

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

NGUYỄN THANH SANG

NGHIÊN CỨU SỰ LÀM VIỆC CỦA CỌC ỚNG THÉP CÓ CÁNH
XOẮN TRONG NỀN CÁT SẠM SAN HỒ

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - NĂM 2024

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

NGUYỄN THANH SANG

NGHIÊN CỨU SỰ LÀM VIỆC CỦA CỌC ỐNG THÉP CÓ CÁNH
XOẮN TRONG NỀN CÁT SẠM SAN HỒ

Chuyên ngành: Kỹ thuật xây dựng công trình giao thông

Mã số : 9 58 02 05

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC: PGS,TS Nguyễn Trương Lai

HÀ NỘI - NĂM 2024

LỜI CAM ĐOAN

Tôi là Nguyễn Thanh Sang, tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào.

Tác giả

Nguyễn Thanh Sang

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên, tác giả xin được bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đối với cán bộ hướng dẫn PGS, TS Nguyễn Trương Lai đã tận tình hướng dẫn và cho nhiều chỉ dẫn khoa học giá trị, sự động viên và chỉ bảo tận tình của Thầy là nguồn động lực to lớn giúp tác giả hoàn thành luận án này.

Tác giả trân trọng cảm ơn Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt, Bộ môn Cầu đường sân bay, Bộ môn Cơ sở kỹ thuật công trình, Phòng Sau đại học, Hệ quản lý học viên sau đại học, Học viện Kỹ thuật quân sự đã tạo điều kiện giúp đỡ em trong thời gian nghiên cứu. Tác giả xin chân thành cảm ơn các giáo sư, phó giáo sư, tiến sĩ, các đồng nghiệp Bộ môn Cầu đường sân bay, Bộ môn Cơ sở kỹ thuật công trình, các nhà khoa học trong và ngoài Học viện đã tạo điều kiện thuận lợi và đóng góp ý kiến quý báu để hoàn thiện luận án.

Cuối cùng, tác giả bày tỏ lòng biết ơn đến gia đình đã luôn động viên, cảm thông và chia sẻ những khó khăn trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Tác giả

Nguyễn Thanh Sang

MỤC LỤC

Trang

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT	i
DANH MỤC CÁC ĐỒ THỊ, HÌNH VẼ	v
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU	x
MỞ ĐẦU	1
1. Đặt vấn đề nghiên cứu.....	1
2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án	2
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của luận án	2
4. Phương pháp nghiên cứu trong luận án	3
5. Nội dung nghiên cứu và cấu trúc của luận án	3
6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án	4
7. Các kết quả nghiên cứu đạt được của luận án.....	4
Chương 1 . TỔNG QUAN VỀ CỌC ỚNG THÉP CÓ CÁNH XOẮN VÀ NỀN CÁT SẠM SẠN HỒ.....	5
1.1. Tổng quan về móng cọc và cọc ống thép có cánh xoắn	5
1.1.1. Cấu tạo và đặc điểm làm việc của móng cọc.....	5
1.1.2. Yêu cầu và phương pháp luận thiết kế cọc đơn.....	6
1.1.3. Tổng quan về cọc ống thép có cánh xoắn.....	8
1.2. Tổng quan về nền san hồ và cát sạn san hồ	12
1.2.1. Đặc điểm về nền san hồ và cát sạn san hồ	12
1.2.2. Nhu cầu sử dụng cọc ống thép trong móng công trình xây dựng trên khu vực nền cát sạn san hồ	16
1.2.3. Đặc điểm tải trọng tác dụng lên cọc của công trình xây dựng trên nền cát sạn san hồ	16
1.3. Tình hình nghiên cứu tương tác cọc đơn và nền trên thế giới	18
1.3.1. Phương pháp nghiên cứu theo mô hình hệ số nền.....	19
1.3.2. Phương pháp phân tích theo mô hình liên tục.....	22
1.3.3. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm theo mô hình vật lý.....	25
1.3.4. Nghiên cứu sự làm việc của cọc đơn có xét đến tính chất ngẫu nhiên của nền và tải trọng.....	26
1.4. Tình hình nghiên cứu cọc đơn trong nền san hồ ở Việt Nam	27
1.5. Những vấn đề rút ra từ nghiên cứu tổng quan	30

1.6. Nhiệm vụ nghiên cứu của luận án.....	31
Chương 2 . NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH CÁC THAM SỐ MÔ HÌNH NỀN CÁT SẠM SAN HỒ.....	32
2.1. Đặt vấn đề nghiên cứu.....	32
2.2. Nghiên cứu thực nghiệm tương tác giữa cát sạm san hồ và tấm thép trong phòng thí nghiệm	33
2.2.1. Cơ sở thí nghiệm.....	33
2.2.2. Mẫu và thiết bị thí nghiệm.....	36
2.2.3. Nội dung và trình tự thí nghiệm.....	40
2.2.4. Kết quả thí nghiệm.....	42
2.3. Nghiên cứu thực nghiệm ma sát giữa cọc ống thép và nền san hồ trên mô hình vật lý.....	49
2.3.1. Mô tả thí nghiệm	49
2.3.2. Kết quả thí nghiệm.....	50
2.4. Nghiên cứu thực nghiệm xác định tham số mô hình cát sạm san hồ trong phòng thí nghiệm	55
2.4.1. Mẫu và thiết bị thí nghiệm.....	55
2.4.2. Tham số thí nghiệm.....	56
2.4.3. Kết quả thí nghiệm.....	56
2.5. Kết luận chương 2	60
Chương 3 . NGHIÊN CỨU SỰ LÀM VIỆC CỦA CỌC ỐNG THÉP CÓ CÁNH XOẮN TRONG NỀN CÁT SẠM SAN HỒ	62
3.1. Mục tiêu nghiên cứu và các giả thiết tính toán	62
3.1.1. Mục tiêu nghiên cứu.....	62
3.1.2. Các giả thiết và giới hạn nghiên cứu	62
3.2. Mô phỏng số tương tác của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạm san hồ	63
3.2.1. Mô hình tương tác tổng quát.....	63
3.2.2. Mô hình cọc ống thép có cánh xoắn	65
3.2.3. Mô hình nền cát sạm san hồ.....	69
3.2.4. Mô hình tương tác cọc ống thép và nền cát sạm san hồ.....	70
3.2.5. Đánh giá độ tin cậy và lựa chọn mô hình số khảo sát	72
3.3. Khảo sát sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn chịu tải trọng tĩnh dọc trục	74

3.3.1. Khảo sát số lượng và khoảng cách cánh xoắn.....	74
3.3.2. Khảo sát độ sâu vị trí cánh xoắn trên thân cọc	81
3.3.3. Khảo sát đường kính và bước cánh xoắn.....	89
3.4. Khảo sát sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn chịu đồng thời tải trọng tĩnh dọc trục và ngang.....	94
3.5. Kết luận chương 3	98
Chương 4 . NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ CỦA CỌC ỐNG THÉP CÓ CÁNH XOẮN XÉT ĐẾN BIẾN ĐỘNG THAM SỐ NỀN CÁT SẠN SAN HỒ	100
4.1. Đặt vấn đề nghiên cứu.....	100
4.2. Xây dựng chương trình tính toán ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô	103
4.2.1. Xây dựng chương trình tính toán.....	103
4.2.2. Kiểm tra độ tin cậy chương trình tính toán	117
4.3. Khảo sát ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô xét đến sự biến động tham số nền	120
4.3.1. Mô hình bài toán khảo sát	120
4.3.2. Kết quả khảo sát	121
4.4. Kết luận chương 4	136
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	138
1. Kết luận	138
2. Kiến nghị.....	139
DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ.....	141
TÀI LIỆU THAM KHẢO	142

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

A_p	Diện tích mũi cọc;
A_c	Diện tích cánh xoắn đã giảm trừ diện tích của cọc;
API	Viện dầu khí Hoa Kỳ;
B	Chiều rộng khối nền cát sạn san hô khảo sát;
COV	Độ nhạy của tham số cát sạn san hô;
C_u	Hệ số không đồng nhất;
C_s	Hệ số đường cong phân phối thành phần hạt;
c	Lực dính đơn vị biểu kiến của cát sạn san hô;
c_p	Lực dính đơn vị biểu kiến của cát sạn san hô ở độ bền cực đại;
c_r	Lực dính đơn vị biểu kiến của cát sạn san hô ở độ bền dư;
D_{50}	Kích thước hạt trung bình của mẫu cát sạn san hô;
D_{max}	Kích thước hạt lớn nhất của mẫu cát sạn san hô;
D_c	Độ chặt tương đối của cát sạn san hô;
D_s	Kích thước cỡ sàng;
D	Đường kính của cánh;
ĐXB	Đảo xa bờ;
d	Đường kính ngoài của cọc;
d_c	Độ lệch chuẩn của biến ngẫu nhiên;
$d_\phi; d_\delta; d_\gamma$	Độ lệch chuẩn của góc ma sát trong; góc ma sát ngoài và trọng lượng thể tích của cát sạn san hô;
EL	Mô hình vật liệu đàn hồi tuyến tính;
E_c	Mô đun đàn hồi của thép cọc;
E	Mô đun biến dạng của cát sạn san hô;
E_{50}	Mô đun biến dạng trung bình của cát sạn san hô;
$E(X), \mu_x$	Giá trị trung bình của biến ngẫu nhiên X;
e_0	Hệ số rỗng tự nhiên của cát sạn san hô;
e_{max}	Hệ số rỗng lớn nhất của cát sạn san hô;
e_{min}	Hệ số rỗng nhỏ nhất của cát sạn san hô;

$F(x)$	Hàm phân phối tích lũy;
f_i	Sức kháng bên đơn vị của cọc;
f_{it}	Sức kháng bên đơn vị đoạn cọc phía trên cánh;
f_{id}	Sức kháng bên đơn vị đoạn cọc phía dưới cánh;
f_{ic}	Sức kháng bên đơn vị của đoạn cọc giữa 02 cánh;
f	Hàm trạng thái giới hạn tính toán sức chịu tải của cọc;
\bar{f}	Giá trị trung bình của hàm trạng thái giới hạn;
H	Bước cánh (chiều cao một vòng cánh);
h	Độ sâu vị trí cánh xoắn trên thân cọc;
H_n	Chiều cao khối nền cát sạn san hô khảo sát;
K_τ	Độ cứng tiếp tuyến của phần tử tiếp xúc;
K_n	Độ cứng pháp tuyến của phần tử tiếp xúc;
L_c	Chiều dài của cọc;
L	Chiều dài của cọc trong nền cát sạn san hô;
MC	Mô hình vật liệu đàn dẻo lý tưởng Mohr - Coulomb;
M	Tổng khối lượng mẫu cát sạn san hô thí nghiệm;
N_q	Hệ số phản lực của cánh khi cọc chịu nén;
N_{mc}	Số phép thử hay số lần mô phỏng Monte-Carlo;
P_s	Xác suất an toàn đảm bảo sức chịu tải của cọc;
P_c	Xác suất sự cố của cọc;
P_0	Áp lực hông buồng mẫu thí nghiệm;
p_{max}	Áp lực nén mẫu lớn nhất;
P	Tải trọng tác dụng lên móng cọc;
P_{gh}	Sức chịu tải giới hạn của cọc;
$[P_c]$	Sức chịu tải cực hạn của cọc;
Q_f	Sức kháng bên của cọc;
Q_{ft}	Sức kháng bên đoạn cọc phía trên cánh;
Q_{fd}	Sức kháng bên đoạn cọc phía dưới cánh;
Q_{fc}	Sức kháng bên của đoạn cọc giữa 02 cánh;

Q_p	Sức kháng mũi của cọc;
Q_c	Sức kháng do phản lực tại cánh dưới khi cọc chịu nén;
Q	Tổng hiệu ứng do tải trọng tác dụng;
q_p	Sức kháng mũi đơn vị của cọc;
$q(z)$	Phản lực ngang của nền lên cọc;
R_{inter}	Hệ số suy giảm cường độ tương tác giữa cọc và nền;
R	Tổng sức kháng của kết cấu cọc;
$R_1; R_2; R_3$	Phản lực giữa cọc và đài cọc;
S	Khoảng cách của các cánh xoắn;
TTGH	Trạng thái giới hạn;
t	Chiều dày đài cọc;
t_{tx}	Chiều dày ảo của phần tử tiếp xúc;
U_{gh}	Chuyển vị giới hạn của cọc;
$[U_c]$	Chuyển vị cực hạn của cọc;
u	Chuyển vị cắt ngang;
u_c	Chuyển vị đầu cọc;
u_1	Chu vi của cọc;
u_2	Chu vi của cánh;
$Var(X)$	Phương sai của biến ngẫu nhiên X;
V_m	Thể tích hộp mẫu thí nghiệm;
β_t	Chỉ số độ tin cậy;
β_T	Chỉ số độ tin cậy mục tiêu;
β	Hệ số áp lực ngang;
γ_c	Trọng lượng riêng của thép cọc;
γ_{unsat}	Trọng lượng thể tích của cát sạn san hô ở trạng thái tự nhiên;
γ_{sat}	Trọng lượng thể tích của cát sạn san hô ở trạng thái bão hòa;
δ	Góc ma sát ngoài giữa cát sạn san hô và bề mặt thép;
δ_1	Chiều dày thành cọc;
δ_2	Chiều dày của cánh;

τ_{\max}	Ứng suất cắt phẳng lớn nhất;
τ	sức kháng ma sát giữa nền san hô và kết cấu cọc;
ε	Biến dạng dọc trục của mẫu cát sạn san hô;
ε_v	Biến dạng thể tích của mẫu cát sạn san hô;
ε_t	Mức độ tin cậy mục tiêu;
$\{\varepsilon\}$	Véc tơ biến dạng;
$\{d\varepsilon\}$	Véc tơ số gia biến dạng;
μ	Kỳ vọng của biến ngẫu nhiên;
ρ_s	Khối lượng riêng của cát sạn san hô;
σ'_v	Ứng suất hữu hiệu của nền bão hoà;
$\Delta\sigma$	Biến thiên của ứng suất hữu hiệu;
σ	Áp lực nén của thí nghiệm cắt phẳng;
$\{\sigma\}$	Véc tơ ứng suất;
$\{d\sigma\}$	Véc tơ số gia ứng suất;
$\sigma(x,y)$	Phản lực nền lên đài cọc;
ν	Hệ số Poisson của cát sạn san hô;
ν_c	Hệ số Poisson của thép cọc;
φ	Góc ma sát trong của cát sạn san hô;
φ_p	Góc ma sát trong của cát sạn san hô ở độ bền cực đại;
φ_r	Góc ma sát trong của cát sạn san hô ở độ bền dư;
Φ	Hàm phân bố xác suất;
ψ	Góc trương nở của cát sạn san hô.

DANH MỤC CÁC ĐỒ THỊ, HÌNH VẼ

Hình 1.1. Sự làm việc của móng cọc khi chịu tải trọng dọc trục.....	5
Hình 1.2. Công nghệ thi công cọc hỗn hợp lõi cứng ống thép có cánh	10
Hình 1.3. Cấu tạo cọc vít có cánh xoắn ở mũi	11
Hình 1.4. Mặt cắt địa chất công trình đại diện tại đảo ST	13
Hình 1.5. Đặc trưng chu kỳ và số chu trình lặp của một số dạng tải trọng lặp điển hình dùng trong thiết kế công trình	18
Hình 1.6. Phương pháp phân tích cọc đơn theo mô hình Winkler	19
Hình 2.1. Tương quan phi tuyến giữa góc ma sát ngoài và góc ma sát trong	34
Hình 2.2. Mô hình thí nghiệm cắt phẳng xác định sức kháng ma sát giữa cát sạn san hô và tấm thép	35
Hình 2.3. Đường cong cấp phối hạt của mẫu cát sạn san hô.....	38
Hình 2.4. Xác định thành phần hạt mẫu thí nghiệm theo cấp phối thiết kế	41
Hình 2.5. Chuẩn bị mẫu cát sạn san hô và tấm thép trong khuôn chứa mẫu	41
Hình 2.6. Tương quan sức kháng ma sát với chuyển vị cắt ngang.....	42
Hình 2.7. Tương quan sức kháng ma sát với chuyển vị cắt ngang.....	43
Hình 2.8. Tương quan sức kháng ma sát và chuyển vị cắt ngang giữa cát sạn san hô với tấm thép các trường hợp áp lực nén khác nhau.....	44
Hình 2.9. Tương quan tỷ số giữa sức kháng ma sát và áp lực nén mẫu.....	46
Hình 2.10. Tương quan sức kháng ma sát với chuyển vị cắt ngang.....	47
Hình 2.11. Tương quan sức kháng ma sát với chuyển vị cắt ngang.....	48
Hình 2.12. Tương quan sức kháng ma sát với chuyển vị cắt ngang.....	48
Hình 2.13. Hạ cọc và thí nghiệm cọc ống thép có gắn thiết bị đo tại hiện trường ghiên cứu ma sát cọc ống thép và nền san hô	49
Hình 2.14. Tương quan biến dạng dọc tại các vị trí đo trên thân cọc.....	50
Hình 2.15. Tương quan giữa sức kháng ma sát với chuyển vị.....	51
Hình 2.16. Mô hình thí nghiệm cọc đơn ống thép trong phòng (ký hiệu A1 đến A7 là vị trí lắp đặt các đầu đo biến dạng).....	52
Hình 2.17. Tương quan giữa sức kháng ma sát với chuyển vị.....	52
Hình 2.18. Biến đổi sức kháng ma sát cọc ống thép - nền san hô của cọc thí nghiệm 127 mm khi gia tải nén lặp $P_{max} = 0,2 T$, tần số 2 Hz	53

Hình 2.19. Biến đổi sức kháng ma sát cọc ống thép - nền san hô của cọc thí nghiệm 127 mm khi gia tải nén lặp $P_{max} = 0,4 T$, tần số 2 Hz	53
Hình 2.20. Kết quả thí nghiệm nén 3 trục mẫu cát sạn san hô	56
Hình 2.21. Vòng tròn Mohr ứng suất từ kết quả thí nghiệm 3 trục	57
Hình 2.22. Đồ thị xác định mô đun biến dạng trung bình E50	58
Hình 2.23. Đồ thị tương quan biến dạng dọc trục và biến dạng thể tích	59
Hình 3.1. Mô hình bài toán khảo sát trường hợp cọc có 2 cánh	64
Hình 3.2. Mô hình các dạng cọc ống thép bài toán nghiên cứu	68
Hình 3.3. Mô hình cọc theo phương pháp sử dụng phần tử vỏ	71
Hình 3.4. Mô hình cọc có cánh xoắn trong nền	72
Hình 3.5. Tương quan giữa tỉ số tải trọng và chuyển vị đầu cọc	73
Hình 3.6. Phạm vi phát triển vùng biến dạng dẻo trong nền của cọc tròn trơn, cọc 1 cánh và 2 cánh xoắn khi chuyển vị đầu cọc là 25,4 mm	75
Hình 3.7. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 18 m chịu nén)	76
Hình 3.8. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 15 m chịu nén)	76
Hình 3.9. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 12 m chịu nén)	77
Hình 3.10. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 9 m chịu nén)	77
Hình 3.11. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 18 m chịu nhỏ)	78
Hình 3.12. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 15 m chịu nhỏ)	78
Hình 3.13. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 12 m chịu nhỏ)	78
Hình 3.14. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 9 m chịu nhỏ)	79
Hình 3.15. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 18 m	80
Hình 3.16. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 15 m	80
Hình 3.17. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 12 m	80
Hình 3.18. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 9 m	81
Hình 3.19. Phạm vi phát triển vùng biến dạng dẻo trong nền của các cọc 2 cánh xoắn dài 18 m khi chuyển vị đỉnh cọc 25,4 mm	82
Hình 3.20. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc 18 m chịu nén)	82
Hình 3.21. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc 15 m chịu nén)	83
Hình 3.22. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc 12 m chịu nén)	83
Hình 3.23. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc 9 m chịu nén)	83

Hình 3.24. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc 18 m chịu nhỏ).....	84
Hình 3.25. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc 15 m chịu nhỏ).....	84
Hình 3.26. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc 12 m chịu nhỏ).....	85
Hình 3.27. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc 9 m chịu nhỏ).....	85
Hình 3.28. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 18 m khi $U_{gh} = 25,4$ mm	86
Hình 3.29. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 18 m khi $[U_c] = 60$ mm	86
Hình 3.30. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 15 m khi $U_{gh} = 25,4$ mm	86
Hình 3.31. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 15 m khi $[U_c] = 60$ mm	87
Hình 3.32. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 12 m khi $U_{gh} = 25,4$ mm	87
Hình 3.33. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 12 m khi $[U_c] = 60$ mm	87
Hình 3.34. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 9 m khi $U_{gh} = 25,4$ mm	88
Hình 3.35. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 9 m khi $[U_c] = 60$ mm.....	88
Hình 3.36. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi $H = 0,3$ m	90
Hình 3.37. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi $H = 0,5$ m	90
Hình 3.38. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi $H = 0,7$ m	90
Hình 3.39. Biến thiên tải trọng đầu cọc theo đường kính cánh.....	91
Hình 3.40. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi $D = 1,5d$	92
Hình 3.41. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi $D = 2,0d$	92
Hình 3.42. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi $D = 2,5d$	93
Hình 3.43. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi $D = 3,0d$	93
Hình 3.44. Biến thiên tải trọng đầu cọc theo bước cánh	93
Hình 3.45. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 18 m khi chịu nén dọc trục và ngang đồng thời	95
Hình 3.46. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 15 m khi chịu nén dọc trục và ngang đồng thời	95
Hình 3.47. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 12 m khi chịu nén dọc trục và ngang đồng thời	95
Hình 3.48. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 9 m khi chịu nén dọc trục và ngang đồng thời	96
Hình 3.49. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 18 m khi chịu nhỏ dọc trục và ngang đồng thời.....	96

Hình 3.50. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 15 m khi chịu nhỏ dọc trục và ngang đồng thời.....	97
Hình 3.51. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 12 m khi chịu nhỏ dọc trục và ngang đồng thời.....	97
Hình 3.52. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 9 m khi chịu nhỏ dọc trục và ngang đồng thời	97
Hình 4.1. Mô hình tính sức chịu tải của cọc theo phương pháp hệ số nền	104
Hình 4.2. Mô hình đường cong t - z và đường cong Q - z	107
Hình 4.3. Mô hình tính toán cọc chịu nén dọc trục.....	107
Hình 4.4. Mô hình tính sức chống cắt của nền xét lực dính đơn vị biểu kiến...	109
Hình 4.5. Đường cong thực nghiệm xác định sức kháng bên đơn vị	110
Hình 4.6. Đồ thị hàm phân phối tích lũy xác định sức chịu tải của cọc	111
Hình 4.7. Quy luật phân phối chuẩn Gauss.....	114
Hình 4.8. Sơ đồ khối chương trình tính toán sức chịu tải của cọc theo phương pháp trạng thái giới hạn	116
Hình 4.9. Sơ đồ khối chương trình tính toán sức chịu tải của cọc khi xét đến sự biến động tham số ngẫu nhiên nền cát sạn san hô	117
Hình 4.10. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc theo các chương trình tính toán (khi không xét lực dính).....	118
Hình 4.11. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc theo các chương trình tính toán (xét lực dính đơn vị biểu kiến $c = 29,83 \text{ kN/m}^2$).....	118
Hình 4.12. Đường cong t-z tại các mặt cắt theo chiều sâu cọc	119
Hình 4.13. Đường cong t-z tại các mặt cắt theo chiều sâu cọc	119
Hình 4.14. Biểu đồ tương quan sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh xoắn khi xét ảnh hưởng của số phép thử Monte-Carlo	123
Hình 4.15. Biểu đồ tương quan sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh xoắn khi xét ảnh hưởng của số phép thử Monte-Carlo	123
Hình 4.16. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh xoắn	123
Hình 4.17. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh xoắn.....	124

Hình 4.18. Tương quan sức chịu tải giới hạn của cọc với số phần tử cọc.....	126
Hình 4.19. Tương quan sức chịu tải cực hạn của cọc theo số phần tử cọc	126
Hình 4.20. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh	126
Hình 4.21. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh.....	127
Hình 4.22. Tương quan sức chịu tải giới hạn của cọc xét biến động góc ma sát trong	129
Hình 4.23. Tương quan sức chịu tải cực hạn của cọc xét biến động góc ma sát trong	129
Hình 4.24. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh	129
Hình 4.25. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh.....	130
Hình 4.26. Tương quan sức chịu tải giới hạn của cọc xét biến động góc ma sát ngoài.....	132
Hình 4.27. Tương quan sức chịu tải cực hạn của cọc xét biến động góc ma sát ngoài.....	132
Hình 4.28. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh	132
Hình 4.29. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh.....	133
Hình 4.30. Tương quan sức chịu tải giới hạn của cọc xét biến động trọng lượng thể tích.....	135
Hình 4.31. Tương quan sức chịu tải cực hạn của cọc xét biến động trọng lượng thể tích.....	135
Hình 4.32. Đồ thị hàm mật độ xác suất và phân phối tích lũy sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh.....	135
Hình 4.33. Đồ thị hàm mật độ xác suất và phân phối tích lũy sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh	136

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 2.1. Đặc trưng cơ lý mẫu cát sạn san hô và cát san hô thí nghiệm	37
Bảng 2.2. Thành phần cấp phối các mẫu cát sạn san hô thí nghiệm	38
Bảng 2.3. Góc ma sát ngoài và hệ số suy giảm cường độ xác định từ thí nghiệm cắt phẳng tĩnh	45
Bảng 2.4. Tổng hợp tham số cơ lý các mẫu cát sạn san hô thí nghiệm.....	56
Bảng 2.5. Tham số chống cắt mẫu cát sạn san hô thí nghiệm	58
Bảng 2.6. Mô đun biến dạng E50, hệ số Poisson và góc trương nở	59
Bảng 2.7. Tổng hợp các tham số mẫu cát sạn san hô thí nghiệm	60
Bảng 3.1. Bảng tham số mô hình cọc ống thép khảo sát.....	67
Bảng 3.2. Tham số mô hình nền cát sạn san hô tính toán	69
Bảng 3.3. Tải trọng tác dụng và nội lực tại đầu cọc nhận được.....	73
Bảng 3.4. Tổng hợp tải trọng đầu cọc ở chuyển vị giới hạn	91
Bảng 3.5. Tổng hợp tải trọng đầu cọc ở chuyển vị cực hạn.....	91
Bảng 4.1. Xác suất an toàn của cọc theo phân cấp mức độ an toàn	112
Bảng 4.2. Độ lệch chuẩn xác định theo mức độ tin cậy mong muốn	113
Bảng 4.3. Hệ số độ nhạy tham số đất nền tham khảo một số tác giả.....	113
Bảng 4.4. Độ lệch và phạm vi biến động của các tham số cát sạn san hô.....	115
Bảng 4.5. Tham số mô hình cọc ống thép có cánh xoắn khảo sát.....	120
Bảng 4.6. Tham số mô hình nền cát sạn san hô khảo sát	121
Bảng 4.7. Sức chịu tải giới hạn của cọc tròn trơn theo số phép thử	122
Bảng 4.8. Sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh xoắn theo số phép thử.....	122
Bảng 4.9. Sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh xoắn theo số phép thử	122
Bảng 4.10. Sức chịu tải giới hạn của cọc tròn trơn theo số phần tử	125
Bảng 4.11. Sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh theo số phần tử.....	125
Bảng 4.12. Sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh theo số phần tử	125
Bảng 4.13. Sức chịu tải giới hạn của cọc tròn trơn xét sự biến động của góc ma sát trong	127
Bảng 4.14. Sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh xét sự biến động của góc ma sát trong	128

Bảng 4.15. Sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh xét sự biến động góc ma sát trong.....	128
Bảng 4.16. Sức chịu tải giới hạn của cọc tròn trơn xét sự biến động của góc ma sát ngoài.....	130
Bảng 4.17. Sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh xét sự biến động của góc ma sát ngoài.....	131
Bảng 4.18. Sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh xét sự biến động của góc ma sát ngoài.....	131
Bảng 4.19. Sức chịu tải giới hạn của cọc tròn trơn xét sự biến động trọng lượng thể tích.....	133
Bảng 4.20. Sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh xét sự biến động trọng lượng thể tích.....	134
Bảng 4.21. Sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh xét sự biến động trọng lượng thể tích.....	134

MỞ ĐẦU

1. Đặt vấn đề nghiên cứu

Móng cọc ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong xây dựng các công trình giao thông, dân dụng, công nghiệp, thủy lợi. Do có nhiều ưu điểm so với các loại móng khác như: khả năng chịu tải lớn, độ ổn định cao, có thể xây dựng trong những điều kiện địa hình và địa chất phức tạp,... Việc phân tích móng cọc nhằm mục đích dự báo sát thực nhất sự làm việc của hệ công trình ở các điều kiện làm việc khác nhau trong suốt quá trình xây dựng và khai thác của công trình. Các nghiên cứu về ứng xử của móng cọc cơ bản đều dựa trên các kết quả nghiên cứu về ứng xử của cọc đơn và xét ảnh hưởng của hiệu ứng nhóm giữa các cọc trong móng [2], [67]. Tiêu chuẩn thiết kế móng cọc ở Việt Nam hiện nay quy về tính toán sức chịu tải của cọc đơn [20].

Nghiên cứu sự làm việc của cọc đơn truyền thống và cọc đơn cải tiến luôn là hướng nghiên cứu thu hút sự tham gia của các nhà khoa học ở Việt Nam cũng như trên thế giới trong những năm qua và sẽ càng được đẩy mạnh hơn trong tương lai [37], [47], [87], [95]. Móng cọc ở Việt Nam cho đến nay chủ yếu sử dụng cọc bê tông cốt thép; cọc ống thép trơn truyền thống được sử dụng ở một số công trình biển như: cụm Dịch vụ kinh tế - Khoa học kỹ thuật, cầu cảng, âu tàu, trụ tiêu báo hiệu hàng hải.... Thực tiễn khai thác cho thấy công trình biển sử dụng móng cọc ống thép xây dựng trên nền san hô tại một số vùng biển đảo của Việt Nam có sự suy giảm sức kháng hoặc sức chịu tải của nền móng nhanh hơn sự suy giảm độ bền của kết cấu dẫn đến giảm tuổi thọ công trình, nhiều công trình đã phải sửa chữa gia cường kết cấu móng.

Nghiên cứu về móng cọc trên nền san hô đã được các nhà khoa học ở Việt Nam nghiên cứu từ cuối những năm 90 đến nay. Những nghiên cứu gần đây trên thế giới và ở Việt Nam về cọc cải tiến đã cho thấy cọc ống thép có cánh xoắn gia cường có thể gia tăng đáng kể sức chịu tải của cọc trong nền [12], [35], [94]. Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu khả thi được áp dụng vào thực tiễn về giải pháp kết cấu cọc ống thép cải tiến có cánh xoắn được xây dựng trong điều kiện địa chất phức tạp là nền cát sạn san hô. Đây là loại nền đặc biệt, phân bố nhiều ở vùng biển đảo xa bờ thuộc tỉnh Khánh Hoà [2], [6], [9].

Quy hoạch phát triển kinh tế biển đảo của Việt Nam đã đặt ra nhu cầu rất lớn về xây dựng công trình hạ tầng trên các vùng biển đảo nói chung và các đảo, bãi ngầm thuộc khu vực đảo xa bờ nói riêng. Do đó, thực tiễn đặt ra cần áp dụng những kiến thức, công nghệ mới trong xây dựng và kỹ thuật nền móng của các công trình được đầu tư xây dựng trên các vùng ven biển và khu vực biển đảo xa bờ nhằm củng cố an ninh quốc phòng kết hợp phát triển kinh tế, đặc biệt là kinh tế biển trên các khu vực thuộc thềm lục địa của Việt Nam.

Hiện nay tại Việt Nam đã công bố và sử dụng tiêu chuẩn liên quan móng cọc: TCVN 10304: 2014 [20]; TCVN 11520: 2016 [23]; TCVN 12111: 2018 [24]; TCVN 11820:2017 [22]; TCVN 108340:2015 [21] và TCVN 11823:2017 [25]. Tuy nhiên, các tiêu chuẩn này chưa đề cập đối tượng thiết kế cọc ống thép làm việc trong trường hợp nền cát sạn san hô, đặc biệt là cọc có nhiều hơn 01 cánh xoắn gia cường trên thân cọc. Đây là cơ sở và là động lực rất lớn để tác giả luận án tập trung nghiên cứu nhằm đề xuất, kiến nghị những luận cứ khoa học và thực tiễn về giải pháp thiết kế các cọc cải tiến có khả năng nâng cao sức chịu tải, áp dụng cho công trình xây dựng trên nền cát sạn san hô nói riêng, và nền san hô nói chung thuộc vùng biển đảo Việt Nam.

2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

Nghiên cứu sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô nhằm cung cấp cơ sở khoa học cho việc tính toán, thiết kế móng cọc xây dựng trên nền san hô. Mục tiêu cụ thể là:

- 1) Làm sáng tỏ cơ chế hình thành và phát triển ma sát của vật liệu cát sạn san hô với bề mặt tấm thép;
- 2) Đánh giá ảnh hưởng các tham số kỹ thuật của cánh xoắn trên thân cọc (số lượng cánh, khoảng cách các cánh, độ sâu vị trí cánh, đường kính cánh và bước cánh) đến sự làm việc của cọc trong nền cát sạn san hô;
- 3) Phân tích ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô khi xét đến sự biến động ngẫu nhiên các chỉ tiêu cơ lý nền cát sạn san hô.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của luận án

Đối tượng nghiên cứu: Cọc đơn dạng cọc ống thép có và không có cánh xoắn của các công trình xây dựng làm việc trong nền cát sạn san hô.

Phạm vi nghiên cứu: Nghiên cứu bài toán cọc đơn ống thép có và không có cánh xoắn làm việc trong nền cát sạn san hô đồng nhất, hạt thô lớn nhất không quá 20 mm và chịu tải trọng tĩnh.

4. Phương pháp nghiên cứu trong luận án

Phương pháp nghiên cứu sử dụng trong luận án là nghiên cứu lý thuyết, mô hình toán kết hợp với thực nghiệm, bao gồm:

- Phương pháp phân tích, tổng hợp và kế thừa: áp dụng để nghiên cứu tổng quan và hệ thống các kết quả đã thực hiện bởi các nghiên cứu đã công bố nhằm phục vụ cho nội dung luận án, đặc biệt là các số liệu đầu vào về mô hình ứng xử của nền cát sạn san hô và cọc ống thép.

- Phương pháp mô hình toán: áp dụng cơ sở lý thuyết toán học và cơ học vật rắn biến dạng, lý thuyết đàn hồi để xây dựng mô hình số 3 chiều theo phương pháp phần tử hữu hạn. Phương pháp tính và thuật giải để xây dựng chương trình tính toán sức chịu tải của cọc ống thép có cánh xoắn xét đến sự biến động ngẫu nhiên một số tham số nền cát sạn san hô.

- Phương pháp thực nghiệm: Thí nghiệm mẫu cát sạn san hô và cát san hô trong phòng thí nghiệm để xác định tham số đặc trưng của mô hình vật liệu. Thí nghiệm trong phòng thí nghiệm kết hợp ngoài hiện trường nhằm làm sáng tỏ ứng xử tương tác của nền cát sạn san hô với cọc ống thép.

5. Nội dung nghiên cứu và cấu trúc của luận án

Để đạt được mục tiêu nghiên cứu đặt ra, tác giả tập trung vào các nội dung nghiên cứu theo cấu trúc của luận án như sau:

Mở đầu;

Chương 1. Tổng quan về cọc ống thép có cánh xoắn và nền cát sạn san hô;

Chương 2. Nghiên cứu thực nghiệm xác định các tham số mô hình nền cát sạn san hô;

Chương 3. Nghiên cứu sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô;

Chương 4. Nghiên cứu ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn xét đến biến động tham số nền cát sạn san hô;

Kết luận và kiến nghị.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

Hướng nghiên cứu của luận án về sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô vừa có ý nghĩa khoa học, vừa có tính cấp thiết về thực tiễn nhằm đánh giá hiệu quả của cọc cải tiến, trong đó:

- Ý nghĩa khoa học của luận án thể hiện qua kết quả nghiên cứu nhằm bổ sung cơ sở dữ liệu khoa học để tính toán sức chịu tải của cọc có các cánh xoắn khác nhau trong nền cát sạn san hô, phục vụ thiết kế móng cọc trong môi trường nền có tính đặc thù khi xây dựng các công trình biển đảo, công trình đặc biệt nhằm đảm bảo an ninh quốc phòng.

- Ý nghĩa thực tiễn của luận án thể hiện ở kết quả nghiên cứu đạt được sẽ góp phần bổ sung những kiến nghị kết cấu cọc ống thép được cải tiến khi bổ sung các cánh xoắn phù hợp thực tiễn, làm tăng sức chịu tải của móng cọc công trình xây dựng trong môi trường nền cát sạn san hô. Áp dụng trực tiếp cho các công trình xây dựng trên vùng biển, đảo của Việt Nam.

7. Các kết quả nghiên cứu đạt được của luận án

- Làm sáng tỏ cơ chế hình thành và phát triển sức kháng ma sát giữa cát sạn san hô với tấm thép; xác định các tham số mô hình của cát sạn san hô làm số liệu đầu vào cho nghiên cứu sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô;

- Đánh giá sự làm việc và đề xuất các tham số cánh xoắn của cọc ống thép có cánh xoắn nhằm nâng cao sức chịu tải, hài hoà tính kinh tế của dạng cọc được cải tiến so với cọc tròn trơn truyền thống;

- Xây dựng chương trình tính toán “PileHLC” để phân tích ứng xử của cọc ống thép có 02 cánh xoắn khi xét đến sự biến động ngẫu nhiên của một số tham số cát sạn san hô.

Chương 1. TỔNG QUAN VỀ CỌC ỚNG THÉP CÓ CÁNH XOẴN VÀ NỀN CÁT SẠM SAN HÔ

Trong chương này, luận án trình bày tổng quan đặc trưng về san hô và nền cát sạm san hô. Phân tích cấu tạo, đặc điểm làm việc, phương pháp luận và các kết quả nghiên cứu về cọc đơn nói chung, cọc ống thép được cải tiến khi gia cường cánh xoắn theo các cấu hình khác nhau đã thực hiện tại Việt Nam và trên thế giới. Phân tích những vấn đề hạn chế còn tồn tại cần được tiếp tục nghiên cứu, trên cơ sở đó xác định nhiệm vụ nghiên cứu của luận án.

1.1. Tổng quan về móng cọc và cọc ống thép có cánh xoắn

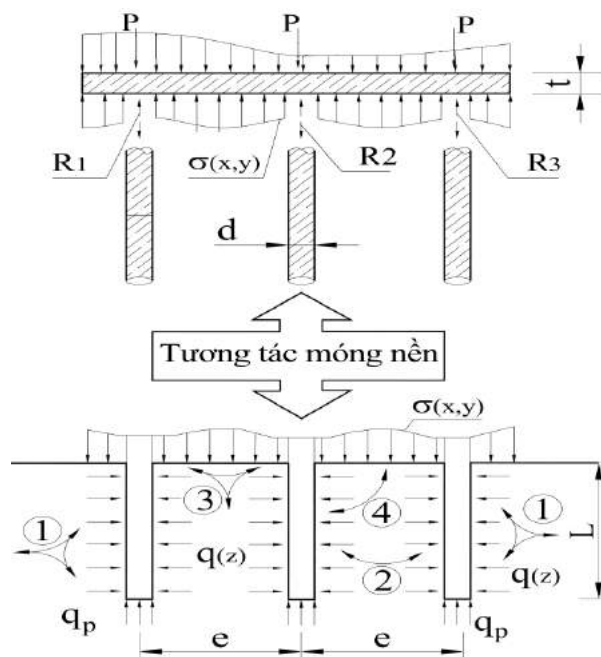
1.1.1. Cấu tạo và đặc điểm làm việc của móng cọc

Móng cọc là một loại móng sâu, thường dùng khi chịu tải trọng lớn và được sử dụng rộng rãi trong xây dựng công trình dân dụng và công nghiệp, hạ tầng, giao thông, thủy lợi, công trình biển. Cấu tạo của móng cọc thường gồm có cọc và đài cọc, trong đó cọc có chức năng tiếp nhận tải trọng của công trình truyền xuống qua đài cọc. Đặc điểm làm việc của móng cọc phụ thuộc vào 3 yếu tố chính là cọc đơn, đài cọc và nền.

Sự làm việc của móng cọc được hình thành trên cơ chế tương tác giữa đài cọc-cọc-đất nền mô tả trên Hình 1.1:

- (1) - Tương tác giữa cọc và nền;
- (2) - Tương tác giữa cọc và cọc;
- (3) - Tương tác giữa đất và đài móng;
- (4) - Tương tác giữa cọc và đài móng.

P - tải trọng dọc trục tác dụng móng cọc; R_1, R_2, R_3 - phản lực của cọc và đài cọc; d - đường kính cọc; t - chiều dày đài cọc; $q(z)$ - phản lực ngang của nền lên cọc; q_p - sức kháng mũi đơn vị của cọc; $\sigma(x,y)$ - phản lực nền lên đài cọc; L - chiều dài của cọc.



Hình 1.1. Sự làm việc của móng cọc khi chịu tải trọng dọc trục [76]

Trong một số trường hợp có thể bỏ qua yếu tố (2) và (3), ví dụ khi khoảng cách các cọc đủ xa để không hình thành hiệu ứng nhóm hoặc khi kích thước đài cọc bé và nền đất yếu nên phản lực của đất ở đáy đài nhỏ, có thể được bỏ qua trong tính toán. Với các công trình giao thông thiết kế móng cọc đài cao và đài mềm thì không có sự tương tác giữa nền và đài móng. Yếu tố (4) được phản ánh qua sự truyền tải từ kết cấu phần trên và đài cọc xuống cọc tại vị trí liên kết. Còn yếu tố (1) phản ánh sự tương tác giữa cọc với nền có ý nghĩa rất quan trọng, ảnh hưởng lớn đến sự làm việc của móng cọc và quyết định sức chịu tải của các cọc trong móng [76].

Dù có cấu tạo khá đa dạng, nhưng móng cọc đều có đặc điểm chung là sức kháng và khả năng chịu tải của móng cọc chủ yếu được phát huy qua cọc trong móng. Đã có nhiều tài liệu, nghiên cứu tập trung vào sự làm việc của cọc và đề xuất các giải pháp nhằm tăng sức kháng của cọc đơn trong móng [2], [5], [6]. Tiêu chuẩn thiết kế móng cọc hiện hành tại Việt Nam “TCVN 10304: 2014: Móng cọc – Yêu cầu thiết kế” cũng quy định và chỉ dẫn các yêu cầu tính toán sức chịu tải của các cọc đơn, sau đó kể thêm các hệ số trong trường hợp phải xét đến hiệu ứng nhóm cọc trong móng [20]. Nhiều tác giả trên thế giới cũng tập trung nghiên cứu bài toán làm việc của cọc đơn trong móng như: Banerjee P.K., Davies T.G. (1978) [40], Barari A., Bagheri E. (2017) [41], Byrne B.W. (2019) [49].

1.1.2. Yêu cầu và phương pháp luận thiết kế cọc đơn

Trong thực tiễn kỹ thuật công trình, việc thiết kế nền móng công trình nói chung và thiết kế cọc đơn nói riêng được quy định bởi các tiêu chuẩn và quy trình thiết kế. Mỗi quốc gia đều ban hành tiêu chuẩn thiết kế riêng với những quy định chi tiết tùy thuộc vào đặc điểm riêng về trình độ công nghệ, đặc điểm kinh tế-kỹ thuật của quốc gia. Tuy nhiên, yêu cầu chung khi thiết kế cọc có thể tóm lược gồm:

(1) Đảm bảo sự bền vững, ổn định của bản thân kết cấu cọc và công trình dưới tác động của các loại tải trọng;

(2) Đảm bảo điều kiện làm việc, khai thác bình thường của công trình trong tuổi thọ thiết kế;

(3) Đảm bảo tính khả thi trong xây dựng;

(4) Có chi phí đầu tư, khai thác hiệu quả;

(5) Đáp ứng yêu cầu phát triển bền vững [5].

Trong các yêu cầu nêu trên, yêu cầu đầu tiên liên quan đến khả năng chịu tải của bản thân kết cấu công trình, móng, nền và thường xác định theo trạng thái giới hạn độ bền. Việc thiết kế nền móng theo trạng thái giới hạn về độ bền thường được đánh giá thông qua sức kháng cực hạn của kết cấu móng và nền rồi tiến hành hiệu chỉnh nhằm đảm bảo mức độ dự trữ cần thiết để khắc phục sự không chính xác trong tính toán, thiết kế do ảnh hưởng sự không chắc chắn khi xác định các tham số đầu vào.

Yêu cầu thứ hai thường được đề cập đến là trạng thái giới hạn sử dụng trong các tiêu chuẩn thiết kế, việc đáp ứng yêu cầu này thường gắn với việc tính toán, dự báo và khống chế mức độ biến dạng, chuyển vị của bản thân móng và công trình nằm trong giới hạn cho phép để không ảnh hưởng đến việc duy trì các tính năng công nghệ khai thác vận hành của công trình.

Để đáp ứng yêu cầu đối với tính toán, người kỹ sư cần phải xem xét đầy đủ các yếu tố tương tác giữa cọc đơn và nền đất. Sự làm việc của cọc trong nền được đánh giá thông qua tương tác của cọc với nền và có thể phân ra hai phần: sự truyền tải dọc theo thân cọc tạo nên sức kháng bên của cọc; sự truyền tải dưới mũi cọc tạo nên sức kháng mũi của cọc. Tuy nhiên, do sự đa dạng của cọc và nền cùng với những khó khăn trong việc xác định tham số của nền đất, nên đến nay việc phân tích, tính toán cọc chủ yếu kết hợp giữa phương pháp lý thuyết và thực nghiệm theo nguyên tắc thử dần [5], [20].

Việc phân tích móng cọc thường bắt đầu bằng việc xem xét cọc đơn trong móng [1], [21]. Do vậy, trong nghiên cứu này, tác giả tập trung nghiên cứu tương tác của cọc đơn ống thép có cánh xoắn với nền cát sạn san hô. Phân tích ứng xử của cọc đơn dưới tác dụng của tải trọng đầu cọc hoặc do chuyển

vị cường bức của cọc là bài toán cơ bản trong phân tích móng cọc và thường được thực hiện đồng thời bằng cả các phương pháp lý thuyết và phương pháp thực nghiệm. Căn cứ trên kết quả dự báo đối với cọc đơn để tiến hành chế tạo và thi công cọc thử rồi tiến hành thí nghiệm trên cọc thử tại hiện trường để kiểm chứng và hiệu chỉnh thiết kế đối với cọc đơn. Đây là quy trình được quy định trong hầu hết các tiêu chuẩn thiết kế móng cọc hiện hành trên thế giới.

Sự phát triển về khoa học công nghệ với việc máy tính có thể phân tích và xử lý được các bài toán có dữ liệu lớn, nên trong nhiều nghiên cứu và điều kiện cho phép, khi tính toán nhiều công trình thường dựa trên các phân tích bằng mô hình số kết hợp thực nghiệm [2], [6].

Do công trình và móng cọc có thể chịu nhiều tải trọng có đặc điểm khác nhau, nhưng khi đánh giá tổng thể ở mức độ gần đúng có thể dựa trên kết quả phân tích tĩnh nhằm xác định sức chịu tải tĩnh cực hạn của cọc, từ đó cho phép đánh giá khả năng ổn định của cọc theo tương quan giữa bộ tham số xác định bằng thực nghiệm về tỉ số giữa biên độ của tải trọng động với sức chịu tải cực hạn tĩnh của cọc [36], [76].

Hiện nay, tiêu chuẩn nhiều nước trên thế giới và ở Việt Nam cũng quy về tải trọng tĩnh hoặc tĩnh tương đương khi quy định và chỉ dẫn thiết kế móng cọc cũng như cọc đơn [20], [22], [31].

1.1.3. Tổng quan về cọc ống thép có cánh xoắn

Hiện nay, các nước trên thế giới cơ bản đã xây dựng hệ thống các tiêu chuẩn phục vụ thiết kế, thi công và kiểm soát chất lượng cọc, thậm chí xây dựng chi tiết đến các loại cọc khác nhau. Việc phân loại cọc trong các tài liệu cũng có nhiều cách khác nhau: Theo công nghệ thi công: cọc chế tạo sẵn và cọc đổ tại chỗ; theo đặc trưng hình thành sức kháng của cọc trong nền: cọc ma sát, cọc chống, cọc kết hợp chống-ma sát; theo vật liệu làm cọc: cọc thép, cọc bê tông, cọc bê tông cốt thép thường, cọc bê tông cốt thép dự ứng lực, cọc ống thép nhồi bê tông; Theo cấu tạo và hình dạng của cọc bao gồm: cọc trơn, cọc vuông, cọc tròn, cọc hình chữ I, chữ H, các cọc vít, cọc có cánh xoắn.

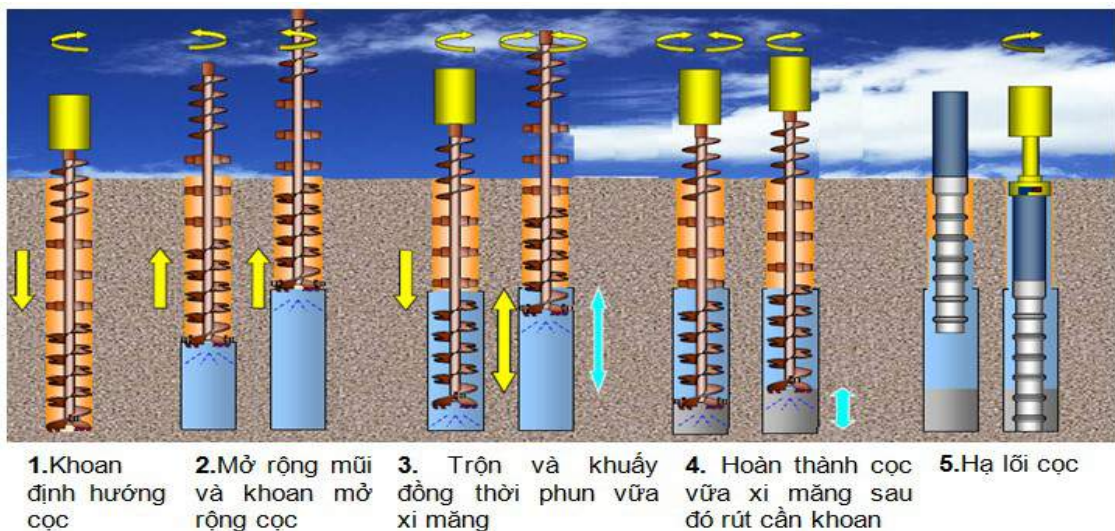
Dù có nhiều loại cọc khác nhau, nhưng đều có đặc điểm là khi chịu tác dụng của tải trọng, thì sức kháng của cọc đơn được huy động thông qua sức kháng mũi và sức kháng bên dọc theo thân cọc; sức kháng mũi bị ảnh hưởng nhiều bởi kích thước (đường kính) mũi cọc; sức kháng bên phụ thuộc nhiều vào ma sát bên của vật liệu cọc với nền. Các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm trên thế giới đã chỉ ra rằng, với các cọc cải tiến có tiết diện cọc thay đổi trên thân cọc (cọc vít, cọc có cánh xoắn, cọc có mở rộng mũi,...) có thể tăng diện tích truyền tải của cọc vào nền và do đó làm tăng sức kháng của cọc [35], [55], [66]. Cọc ống thép có cánh xoắn được chia làm hai loại: (1) Cọc vít có cánh xoắn liên tục (screw pile) - là loại cọc có cánh xoắn liên tục trên thân cọc, thường chỉ sử dụng các cọc có chiều dài không lớn và chủ yếu làm cọc neo hay cọc gia cố chống nhổ cho móng; (2) Cọc vít có cánh xoắn không liên tục (helical pile) - là loại cọc có cánh xoắn độc lập và không liên tục trên thân cọc, các vị trí cánh xoắn có thể thay đổi trên thân cọc nên phù hợp trong các trường hợp cọc ngắn và cọc dài, áp dụng làm cọc chịu lực chính cho móng.

Cọc ống thép có cánh xoắn không liên tục (helical pile) bao gồm một hoặc nhiều tấm hình tròn xoắn theo các bước khác nhau được hàn vào mặt ngoài cọc ống thép tròn trơn ở độ sâu nhất định và có khoảng cách phù hợp để nâng cao sức kháng, đặc biệt là sức kháng nhổ. Cọc được thi công hạ vào nền bằng thiết bị khoan xoay hạ cọc chuyên dùng khi đồng thời tạo lực nén và mô men xoắn để hạ các cọc có kích thước đường kính và chiều sâu khác nhau.

Nghiên cứu sử dụng cọc xoắn hoặc cọc có tăng cường cánh xoắn để thiết kế móng cọc cho các tuabin gió ngoài khơi đã được một số tác giả thực hiện như: Prasad Y., Narasimha R. (1996) [100]; Bienen B. và cộng sự (2012); Ghaly A., Clemence S. (1998) [65]; Costa J.P.S. (2017) [87]. Tuy nhiên, một số yếu tố liên quan đến vị trí của cánh xoắn, ảnh hưởng của độ dày của cánh trên các loại nền khác nhau và vị trí của cánh xoắn liên quan đến đặc trưng của tải trọng, đặc điểm của nền cát sạn san hô,... chưa được làm rõ.

Mittal S. và cộng sự, thực hiện thử nghiệm trên cọc xoắn đã chỉ ra rằng sức chịu tải ngang tăng lên theo số lượng cánh và vị trí của cánh trong cọc [92]. Prasad và Narasimha đã nghiên cứu thử nghiệm trên mô hình cọc có 02 và 04 cánh xoắn cho thấy sức chịu tải bên của cọc có cánh xoắn tăng lên từ 1,2 đến 1,5 lần so với cọc tròn trơn. Narasimha S. và cộng sự (1991, 1993), Abdrabbo F.M. (2016) chỉ ra rằng, tỉ lệ chiều sâu cánh so với chiều sâu của cọc hợp lý từ 1/3 đến 1/2, số lượng cánh hiệu quả là 02 và khoảng cách cánh phù hợp bằng 3 lần đường kính của cọc [93], [94], [95]. Ngoài ra, còn một số nghiên cứu về cọc có cánh như Bienen B. và cộng sự (2012) về cọc đơn có cánh chịu tải trọng lặp trong nền cát [43], Fahmy A. và cộng sự (2017) [53].

Kết quả nghiên cứu đề tài khoa học cấp Bộ Giao thông vận tải năm 2014 của Nguyễn Hữu Đầu cùng cộng sự cho thấy, trong một số trường hợp cọc hỗn hợp lõi cứng ống thép có cánh xoắn là một giải pháp thiết kế và thi công kinh tế, có thể giảm chi phí đến 50% so với giải pháp cọc khoan nhồi [4].

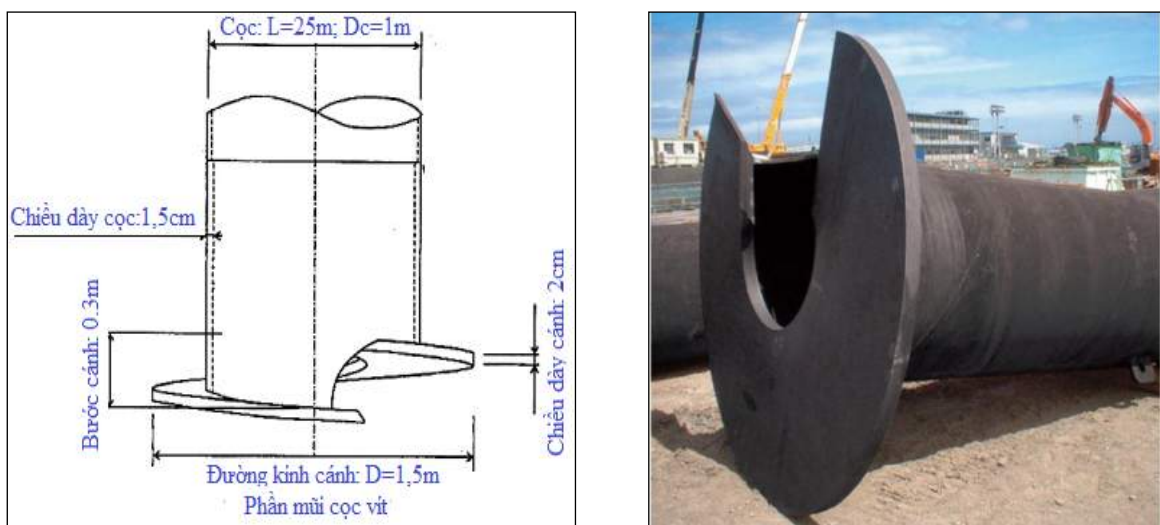


Hình 1.2. Công nghệ thi công cọc hỗn hợp lõi cứng ống thép có cánh [4]

Tại Nhật bản, phương pháp thiết kế và thi công cọc cải tiến dạng ống thép có cánh vít ở mũi (cọc NS ECO-PILE của hãng Nippon Steel) đã được áp dụng cho hơn 10.000 m dài cọc có đường kính từ 600 mm đến 1600 mm tại hơn 240 dự án khác nhau [30].

Tiêu chuẩn về thiết kế và thi công móng cọc vít hiện nay ở nước ta có

“TCVN 11520: 2016: Móng cọc vít có cánh đơn ở mũi - Yêu cầu thiết kế” và tiêu chuẩn “TCVN 12111: 2018: Móng cọc vít có cánh đơn ở mũi - Yêu cầu thi công và nghiệm thu” làm cơ sở pháp lý cho các kỹ sư thiết kế và thi công các giải pháp cấu hình cọc khác nhau áp dụng cho các công trình giao thông và tham khảo cho các loại công trình khác [21], [24]. Trên cơ sở đó, ở Việt Nam cũng đã áp dụng thi công móng trụ cầu của công trình cầu vượt Hoàng Minh Giám tại thủ đô Hà Nội và cầu Rạch Tôm tại TP Hồ Chí Minh. Một dạng cọc có cánh xoắn ở mũi được thể hiện như Hình 1.3:



Hình 1.3. Cấu tạo cọc vít có cánh xoắn ở mũi [21]

Cấu hình cọc cải tiến NS ECO-PILE của hãng Nippon Steel là dạng cọc vít có 01 cánh đơn ở mũi có rất nhiều ưu điểm so với cọc truyền thống như cọc khoan nhồi, cọc đóng vè mặt định tính: Giảm thiểu tiếng ồn và rung động do thi công hạ cọc bằng phương pháp nén và xoay khi sử dụng lực ép và mô men xoắn; cần lực lượng máy móc nhỏ; giảm thiểu phạm vi thi công; không đào đất nên không có đất thải; không tạo ra nước thải; không bị sụp đổ tường lỗ đào; không ảnh hưởng đến nước ngầm; không ô nhiễm xung quanh [30].

Theo dữ liệu của tập đoàn Nippon Steel Việt Nam khi so sánh thời gian thi công của một công trình cầu có 40 trụ có sử dụng 01 ca máy như sau: Trường hợp thi công cọc khoan nhồi, sử dụng cọc đường kính D1000, cọc dài 35 m thì thời gian thi công hoàn thành 160 cọc là 240 ngày. Nhưng khi thi

công theo giải pháp cọc cải tiến dạng NS ECO-PILE sử dụng cọc D800, dài 30 m, tổng có 160 cọc thì thời gian thi công hoàn thành giảm một nửa còn 120 ngày [30]. Đây là ưu điểm có ý nghĩa rất lớn trong thực tiễn triển khai các dự án đầu tư, đặc biệt là các công trình xây dựng trên vùng biển đảo xa bờ của nước ta khi phải thi công trong điều kiện thời tiết, thủy hải văn rất phức tạp nên đòi hỏi phải thi công nhanh, đảm bảo khai thác hiệu quả và bền vững.

1.2. Tổng quan về nền san hô và cát sạn san hô

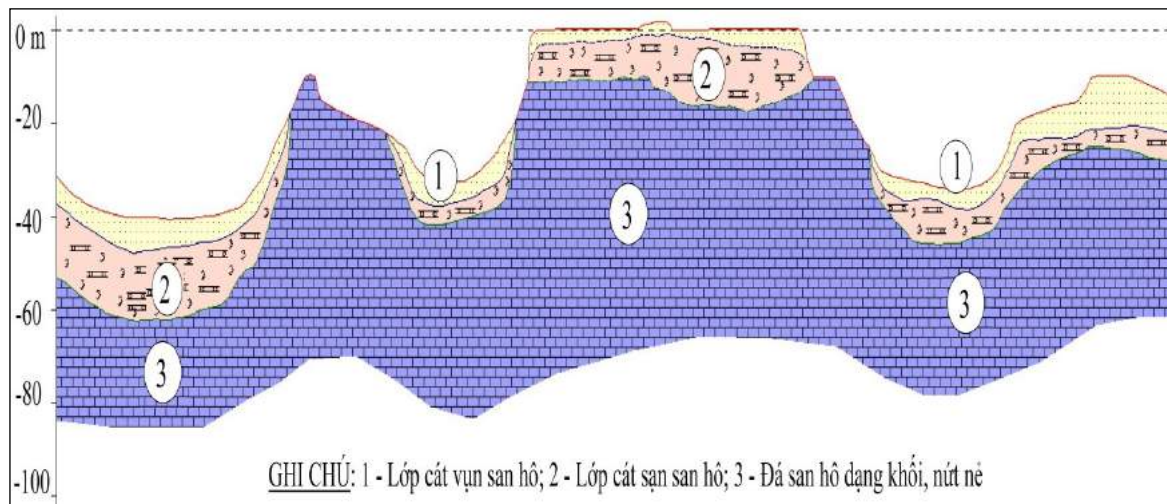
1.2.1. Đặc điểm về nền san hô và cát sạn san hô

Nền san hô phân bố phổ biến ở các đảo, quần đảo và các vùng biển trên thế giới với chiều dày khác nhau. Ở Việt Nam, nền san hô tại khu vực các đảo xa bờ (ĐSB) thuộc tỉnh Khánh Hoà phân bố có chiều dày lớn, các tài liệu khoan khảo sát địa chất đã thực hiện với độ sâu đến 60m vẫn chưa thấy đá gốc [2], [6], [17], [18]. Cấu trúc địa chất tầng nông của các đảo, bãi ngầm san hô thuộc khu vực Biển Đông là nền san hô phân lớp, phân nhíp; thứ tự các lớp và nhíp thay đổi không giống nhau tùy theo khu vực, độ sâu và vị trí hố khoan. Trong phụ lục 1 có trình bày một số trụ địa chất và tổng hợp số liệu nền cát sạn san hô thu thập từ kết quả điều tra cơ bản của nhà nước và một số dự án xây dựng công trình khu vực các ĐXB những năm gần đây.

Theo tổng hợp của tài liệu điều tra cơ bản của nhà nước, cấu trúc địa chất chung của ĐXB được hình thành do các quần thể san hô phát triển và chết đi theo các chu kỳ phát triển của lịch sử Trái Đất trong kỷ Đệ Tứ. Đây là các quần thể san hô Đệ tứ (Q_{IV}) phát triển kế thừa trên những quần thể san hô đá phát triển mạnh mẽ trong giai đoạn Paleogen và Neogen và chịu tác động của các vận động kiến tạo và sự thay đổi mực nước biển qua các thời kỳ khác nhau, làm thay đổi môi trường sống của san hô. Chính vì vậy, đá san hô khu vực ĐXB là một loại đá có nguồn gốc hình thành, kiến trúc, cấu tạo, tính chất cơ lý khác biệt với các loại đá có nguồn gốc khác vẫn được làm nền công trình. Đa số các đảo là đảo tích tụ san hô, có nguồn gốc trầm tích, kết quả của quá trình tích tụ và xói mòn; Vật liệu chủ yếu là những mảnh vụn của khung

cốt san hô và sản phẩm biến đổi của nó – đá vôi san hô kết tinh. Đặc điểm trầm tích tầng nông khu vực các đảo xa bờ tỉnh Khánh Hoà, nói chung có thể được chia làm 3 trường là: đá san hô gắn kết tốt, đá san hô xốp dạng cục tảng lẫn cành nhánh và cát san hô lẫn cành nhánh [17], [18].

Mặt cắt địa chất công trình đại diện (trong đó bao gồm phân bố lớp số 2 là cát sạn san hô) tại đảo ST thuộc vùng biển đảo tỉnh Khánh Hoà được thể hiện trên Hình 1.4 và các điểm đảo khác trình bày trong “Phụ lục 1”.



Hình 1.4. Mặt cắt địa chất công trình đại diện tại đảo ST [18]

Các nghiên cứu về các đặc trưng cơ lý của nền san hô đã được một số nhà nghiên cứu tiến hành như: Airey D. W. và Fahey M. đã nghiên cứu ứng xử lập của cát san hô ở vùng biển phía Tây Bắc của Australia và xác định các tham số của mô hình áp dụng cho cát san hô [39]. Xu B. và Zhuge A. (2016) nghiên cứu các đặc trưng cơ lý của cát san hô [42]. Wang X.Z. và cộng sự (2011, 2016) nghiên cứu đặc tính chống cắt của cát san hô ở vùng biển thuộc quần đảo Hoàng sa [97], [98]. Poulos H.G. (1988) nghiên cứu đặc trưng cơ học của cát san hô ở vùng biển ở Australia [77]. Wang X.Z., Wang X., Jin Z.C., Meng Q.S., Zhu C.Q. (2016) nghiên cứu đặc tính chống cắt của nền san hô [86]. Một số nghiên cứu gần đây của các tác giả như Qi W. và cộng sự (2022) nghiên cứu ứng xử động của cát san hô ở trạng thái bão hoà [68]; Wang J. và cộng sự (2023) nghiên cứu thực nghiệm trong phòng và mô hình số ứng xử của

cát san hô chịu tải trọng [69]; Long H. và cộng sự (2022) nghiên cứu động lực học sục vỡ hạt của cát san hô [70]; Wang W. và cộng sự (2019) nghiên cứu thực nghiệm đặc tính chống cắt của mẫu cát san hô [71]; Wang X. và cộng sự (2018) nghiên cứu ảnh hưởng độ nhám bề mặt cắt cầu đến tương tác giữa cát san hô với tấm thép [99]. Những nghiên cứu trên đã đạt được những kết quả có ý nghĩa. Tuy vậy, các ứng xử cơ học của cát san hô ở khu vực biển đảo xa bờ tỉnh Khánh Hoà thuộc chủ quyền của Việt Nam vẫn còn khá mới đối với các nhà khoa học trong nước cũng như trên thế giới, đòi hỏi cần tiếp tục nghiên cứu.

Hoàng Xuân Lượng (2003-2010) cùng cộng sự đã nghiên cứu chi tiết đặc điểm địa chất công trình của san hô một số vùng trọng điểm và các giải pháp thích ứng cho xây dựng các công trình biển phục vụ phát triển kinh tế và an ninh quốc phòng. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra vật liệu san hô có đặc điểm giòn và có tính từ biến, tác giả khuyến nghị sử dụng mô hình đàn hồi cho nền đá san hô, đối với lớp san hô cành nhánh và cát san hô khuyến nghị sử dụng mô hình Mohr - Coulomb như vật liệu cát rời [7], [8], [9].

Nguyễn Thái Chung (2006) đã nghiên cứu và đánh giá những đặc điểm quan trọng của nền san hô. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, đặc điểm nổi bật của vật liệu san hô là giòn, có tính từ biến, quan hệ ứng suất biến dạng tuyến tính. Nền san hô phân lớp, liên kết giữa nền san hô và công trình có tính một chiều, cường độ ma sát giữa cọc và nền san hô khá nhỏ và có thể suy giảm phụ thuộc thời gian tác dụng và tần số của tải trọng [2].

Vũ Anh Tuấn (2017) cùng cộng sự đã thực hiện nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số ứng xử cơ học của cát san hô. Kết quả cho thấy cát san hô có góc ma sát lớn hơn và giá trị hóa mềm thấp hơn cát rời thông thường [14].

Nguyễn Tương Lai (2019) cùng cộng sự đã nghiên cứu cơ chế ma sát giữa cọc và nền san hô với các tính chất cơ lý khác nhau. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng mặc dù có hệ số rỗng lớn, mô đun biến dạng nhỏ, nhưng sức chống cắt của nền san hô rời khá cao (gồm góc ma sát trong và lực dính đơn vị biểu kiến) tùy thuộc cấp phối hạt, độ chặt, san hô rời có ứng xử không tuyến tính

và quan hệ ứng suất biến dạng của nền san hô có thể được mô phỏng theo mô hình Mohr - Coulomb, Cam-Clay hoặc Hypoplastic, tùy thuộc độ chặt, cấp phối của san hô và đặc trưng của tải trọng tác dụng [6].

Các kết quả nghiên cứu về san hô và nền san hô chỉ ra rằng, nghiên cứu san hô phục vụ xây dựng công trình là một lĩnh vực phức tạp vì đặc thù của san hô có tính phân lớp, sự phân tán cao, phân bố không đồng đều trên một khu vực rộng lớn, tính chất phụ thuộc nhiều vào quá trình hình thành, vị trí địa lý, thậm chí phân tán ngay trong mỗi hố khoan và trên một khu vực [2].

Đặc trưng rất quan trọng và có sự khác biệt rất lớn so với nền đất rời thông thường là sức chống cắt của san hô ngoài góc ma sát trong có giá trị khá cao còn đồng thời bao gồm lực dính đơn vị biểu kiến, đây là lực dính do sự cài móc giữa các thành phần hạt trong hỗn hợp san hô. Điều này làm cho sức chống cắt của san hô khá lớn. Tuy nhiên, do cấu trúc nền san hô có hệ số rỗng cao, bản thân các hạt cát sạn san hô cũng có cấu trúc tinh thể rỗng, giòn và dễ bị ép vỡ nên đặc trưng biến dạng và quan hệ ứng xử cơ học (quan hệ ứng suất và biến dạng khi chịu tải) phức tạp, phụ thuộc nhiều vào cấp phối hạt, trạng thái độ chặt, độ ẩm và lịch sử hình thành dẫn đến việc mô hình hóa ứng xử của nền san hô trong các bài toán cơ học công trình vẫn đang là thách thức lớn đối với các nhà khoa học [6].

Sự khác biệt về đặc trưng cơ lý, tính chất phức tạp của san hô so với nền đất rời thông thường nêu trên và khó khăn trong nghiên cứu, đặc biệt là việc tiếp cận khu vực phân bố san hô trên các đảo nổi, đảo chìm xa bờ thuộc vùng biển của Việt Nam là thực tiễn cấp thiết đặt ra cần tiếp tục nghiên cứu và là cơ sở ý nghĩa khoa học và thực tiễn quan trọng để tác giả nghiên cứu luận án. Do tính chất phức tạp của đối tượng nghiên cứu và điều kiện hạn chế của trang thiết bị thí nghiệm hiện có, nên trong phạm vi của luận án, tác giả chỉ tập trung nghiên cứu đối tượng nền cát sạn san hô với cỡ hạt lớn nhất đến 20 mm.

1.2.2. Nhu cầu sử dụng cọc ống thép trong móng công trình xây dựng trên khu vực nền cát sạn san hô

Từ những năm 90 của thế kỷ XX, Việt Nam đã đầu tư xây dựng các công trình biển đảo tại khu vực đảo xa bờ thuộc tỉnh Khánh Hoà và thêm lục địa phía Nam đáp ứng nhu cầu bảo vệ chủ quyền biển đảo và phát triển kinh tế biển. Kể từ khi Chiến lược biển được thông qua, nhu cầu xây dựng công trình biển đảo đảm bảo quốc phòng, an ninh kết hợp với phát triển kinh tế biển ngày càng được chú trọng đầu tư. Từ năm 2011 đến 2016 Bộ Quốc phòng và nhà nước đã tiến hành xây mới hàng loạt công trình nhà dàn DKI mới trên các bãi cạn san hô ở thêm lục địa phía Nam; giải pháp kết cấu chính vẫn là hệ dàn thép không gian trên nền móng cọc ống thép đóng sâu đến 20 m xuống nền san hô. Tại các đảo xa bờ thuộc tỉnh Khánh Hoà đã và đang xây dựng hệ thống công trình bảo đảm hàng hải (cầu cảng, âu tàu, trụ tiêu báo hiệu hàng hải), hệ thống công trình năng lượng sạch cho các đảo,... đây là những công trình xây dựng ở vùng nước nông, chịu tác động thường xuyên của điều kiện sóng gió bất lợi và giải pháp móng cọc có diện cản sóng nhỏ, độ bền và ổn định cao là một giải pháp hiệu quả so với giải pháp móng trọng lực.

Trong xu thế phát triển xanh, nhiều đảo chìm xa bờ thuộc tỉnh Khánh Hoà có diện tích lòng hồ lớn, độ sâu mức nước nhỏ 4 -15 m là một tiềm năng để xây dựng hệ thống năng lượng sạch, sản xuất nhiên liệu hydro,... Hiện nay trên thế giới và ở Việt Nam, những công trình năng lượng sạch ngoài khơi ở độ sâu < 50 m thì giải pháp móng cọc vẫn đang là giải pháp hiệu quả.

1.2.3. Đặc điểm tải trọng tác dụng lên cọc của công trình xây dựng trên nền cát sạn san hô

Các công trình biển đảo ngoài tải trọng thường xuyên do trọng lượng bản thân kết cấu và tải trọng tạm thời do các hoạt tải khai thác, còn chịu tác động thường xuyên của tải trọng sóng, gió. Theo kết quả tổng quan về thiết kế, xây dựng công trình biển ở khu vực các ĐXB trong những năm qua [6], đặc trưng khí tượng thủy hải văn ở khu vực các ĐXB và vùng DKI (cụm Dịch vụ kinh tế - Khoa học kỹ thuật) là đặc trưng của gió mùa. Trong năm có hai mùa gió

chủ đạo Đông Bắc và Tây Nam, sức gió trung bình cấp 5÷6 tương đương sóng cấp 4÷5, sức gió lớn nhất đến cấp 7÷8 tương đương sóng cấp 5÷6, chu kỳ sóng tương ứng trong khoảng 5÷8 s, nếu tính với sóng bão chu kỳ sóng có thể đến 10 s. Thời gian cơn bão đi qua vị trí công trình ở khu vực các ĐXB thường chỉ kéo dài 2-3 h với sự đổi hướng của gió rất nhanh; thời gian duy trì một đợt gió mùa mạnh thường 3÷5 ngày, sóng gió duy trì ổn định về hướng và cường độ.

Từ các phân tích nêu trên cho thấy, đối với các công trình xây dựng ở khu vực các đảo xa bờ thuộc tỉnh Khánh Hoà và vùng biển DKI, khi xét đến tải trọng cho sóng gió cần xét hai trường hợp:

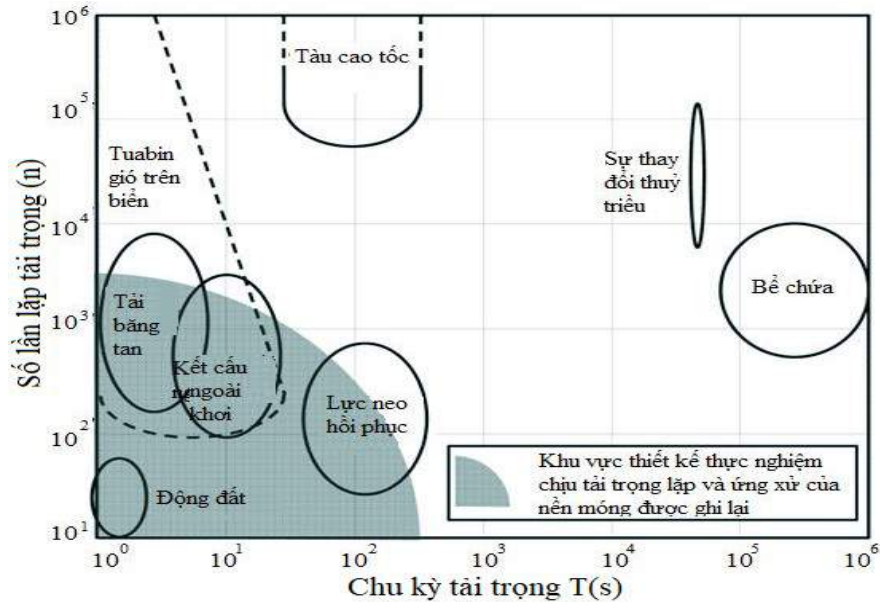
- Trường hợp gió bão (tải trọng thiết kế): sóng tính toán tương ứng với bão cấp 12, độ cao sóng 7÷14 m, chu kỳ sóng khoảng 10÷12 s, số chu trình lặp liên tục theo một hướng trong một cơn bão <100 lần;

- Trường hợp gió mùa (tải trọng khai thác): sóng tính toán tương ứng với gió cấp 6÷8, độ cao sóng 4÷6 m, chu kỳ sóng khoảng 8÷10 s, số chu trình lặp liên tục theo một hướng trong một đợt gió mùa 1000÷3000 lần.

Trong lĩnh vực xây dựng công trình, dạng tải trọng lặp khá phổ biến và đã được các nhà khoa học trên thế giới cũng như trong nước đầu tư nghiên cứu; gần đây nhất, Tiểu ban kỹ thuật TC209 (Technical Committee 209) của Hiệp Hội Cơ học đất và địa kỹ thuật quốc tế (ISSMGE – International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering) họp tại Paris năm 2013 đã tổng hợp nhiều kết quả nghiên cứu mới nhất về thiết kế nền móng công trình chịu tải trọng lặp, đặc trưng của các dạng tải trọng lặp điển hình dùng trong thiết kế nền móng công trình thể hiện trong Hình 1.5 [59].

Theo đồ thị này, đặc trưng chu kỳ của tải trọng lặp khi thiết kế công trình biển trong khoảng 3÷30 s với giá trị trung bình khoảng 10 s, số chu trình lặp cần khảo sát trong khoảng 100÷3000 chu trình tùy theo đặc trưng tần số của tải trọng. Tại Việt Nam, đặc trưng phân bố sóng biển dạng điều hòa trên thềm lục địa phía Nam Biển Đông được dùng trong tính toán, thiết kế các công

trình dầu khí có chu kỳ sóng thay đổi trong khoảng $3,5 \div 12,17$ s, số con sóng theo các hướng từ vài con sóng đến hàng trăm ngàn con sóng và có sự thay đổi theo thời gian trong năm [16].



Hình 1.5. Đặc trưng chu kỳ và số chu trình lặp của một số dạng tải trọng lặp điển hình dùng trong thiết kế công trình [59]

Các công trình biển đảo xây dựng trên nền san hô ở khu vực biển Đông chịu tác dụng của tải trọng sóng gió có biên độ, chu kỳ lặp và hướng tác dụng thay đổi liên tục dẫn đến cọc móng của công trình chịu tác dụng lặp phức tạp của tải trọng từ công trình truyền xuống, bao gồm cả tác dụng kéo nhỏ, nén, uốn, cắt... Tuy nhiên, các tiêu chuẩn thiết kế hiện nay ở Việt Nam đều quy về tải trọng tĩnh hoặc tĩnh tương đương để tính toán.

1.3. Tình hình nghiên cứu tương tác cọc đơn và nền trên thế giới

Bài toán phân tích sự làm việc của cọc đơn trong nền đã được quan tâm nghiên cứu từ rất sớm trên thế giới bằng cả lý thuyết và thực nghiệm. Do sự đa dạng và phân tán của nền đất cũng như sự phức tạp của bài toán, nên đến hiện nay các phương pháp lý thuyết hay bán thực nghiệm vẫn chủ yếu tập trung vào dự báo sức kháng cực hạn của cọc trong nền, chỉ có một số ít kết quả nghiên cứu cho phép dự báo quan hệ tải trọng - chuyển vị của cọc,... mức độ dự báo của các phương pháp vẫn khác biệt nhau đáng kể, nên trong các dự

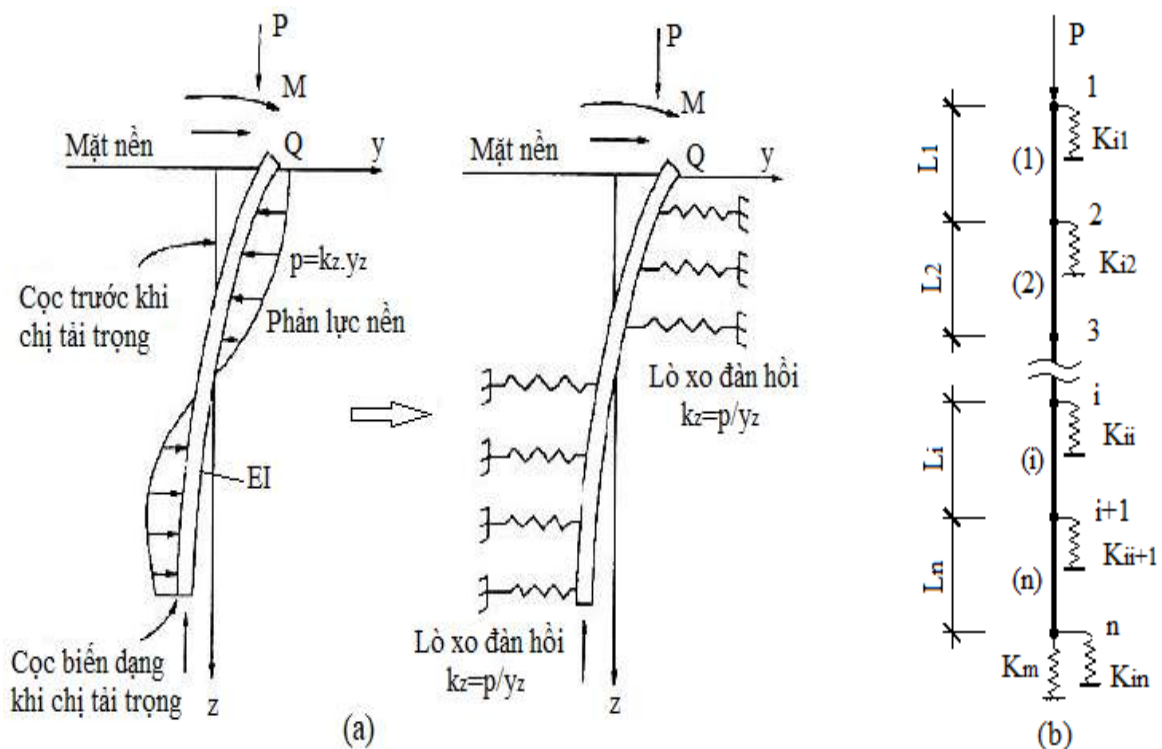
án xây dựng công trình thực tiễn vẫn phải tiếp tục thử nghiệm trên cọc thực để kiểm chứng trước khi thi công cọc đại trà. Dưới đây tác giả tổng hợp một số kết quả, phương pháp nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm đối với bài toán phân tích sự làm việc của cọc đơn trên thế giới trong những năm qua.

1.3.1. Phương pháp nghiên cứu theo mô hình hệ số nền

Đặc điểm chung của các phương pháp sử dụng mô hình hệ số nền áp dụng trong bài toán phân tích tương tác cọc và nền là thay thế môi trường nền bằng liên kết biến dạng đặt trên biên tiếp xúc của cọc với nền. Các liên kết biến dạng này có quan hệ lực với chuyển vị là tuyến tính hoặc phi tuyến và xác định theo các đặc trưng ứng xử cơ học của vật liệu nền [90].

1.3.1.1. Mô hình dầm-cột trên nền Winkler cho phân tích cọc đơn

Theo phương pháp này, cọc chịu tải trọng được xem như kết cấu dầm-cột chịu uốn nằm trên nền đàn hồi, còn đất nền coi như làm việc đàn hồi được thay thế bằng một loạt các lò xo đàn hồi độc lập nhau như trên Hình 1.6.



Hình 1.6. Phương pháp phân tích cọc đơn theo mô hình Winkler [90]

(a – khi cọc chịu tải trọng ngang; b – khi cọc chịu tải trọng dọc trục)

Một số lời giải phân tích cọc chịu uốn theo mô hình dầm-cột trên nền

Winkler hoặc theo lý thuyết hệ số phản lực nền đã được trình bày trong các tài liệu như: Reese L.C. và Matlock H. (1956); Davisson M.T. và Gill H.L. (1963) [51]; Broms B.B. (1964) [46]; Hirai H. (2012); Zhang C. (2016) [101]. Nhiều tác giả xem xét mô đun biến dạng của nền và do đó là hệ số nền thay đổi tuyến tính theo độ sâu trong nền để phát triển các lời giải cho chuyển vị ngang, góc xoay, mô men, lực cắt và phản lực nền. Tiêu chuẩn về thiết kế móng cọc của Việt Nam cũng sử dụng mô hình này.

Zhang C. và cộng sự (2016) cho thấy tính khả thi của việc sử dụng mô đun hệ số nền chủ động khi phân tích hiệu ứng tương tác cọc-đất-cọc trong nhóm cọc. Cả hai cách tiếp cận của Hirai H. (2012), Zhang C. (2016) đều bổ sung tính liên tục cho mô hình Winkler cổ điển thông qua việc sử dụng lời giải của Mindlin [101]. Phạm Tuấn Anh và cộng sự (2016) cũng áp dụng mô hình hệ số nền kết hợp với lời giải của Mindlin để nghiên cứu hiệu ứng nhóm trong móng cọc chịu tải trọng tĩnh để xây dựng mô hình phần tử đặc trưng cho móng cọc đài cứng của kết cấu công trình với nền [1].

Nhược điểm cơ bản của việc sử dụng mô hình nền Winkler là chỉ xét được nền đàn hồi nên chỉ phù hợp cho các bài toán cọc ngắn, chuyển vị bé và nền vẫn làm việc trong giới hạn đàn hồi; điều này hạn chế phạm vi sử dụng của các kết quả nghiên cứu trong các ứng dụng thực tiễn xây dựng công trình. Đối với nền cát sạn san hô có đặc điểm hệ số rỗng lớn, mô đun biến dạng nhỏ, quan hệ tải trọng – độ lún thể hiện tính phi tuyến rõ rệt nên không dùng mô hình nền Winkler cho bài toán phân tích cọc đơn trong nền san hô.

1.3.1.2. Mô hình dầm-cột trên các liên kết phi tuyến p-y, t-z và Q-z

Các phương pháp phân tích ứng xử của móng cọc theo mô hình đường cong p-y và t-z là sự phát triển của phương pháp mô hình hệ số nền ra ngoài giới hạn đàn hồi để kể đến khả năng biến dạng dẻo của nền cho phép cọc có chuyển vị dư trước khi đạt đến trạng thái phá hoại của nền. Theo phương pháp này, phản lực của nền lên cọc được thay bởi các phản lực lò xo có độ cứng phi tuyến. Đường cong p-y đặc trưng cho sự biến dạng của nền (y) dưới tác dụng

của lực ngang từ cọc (p) truyền vào; đường cong t-z đặc trưng chuyển vị trượt (z) giữa cọc với nền do tác dụng của lực ma sát (τ); đường cong Q-z đặc trưng cho chuyển vị theo phương dọc trục tại mũi cọc do biến dạng lún của nền.

Các đường cong p-y được đề xuất khi thực hiện các thử nghiệm trên các cọc đường kính nhỏ hơn 0,64 m có gắn thiết bị đo và hạ trong cả nền đất cát và nền đất sét như: Matlock H. (1970); Reese L.C. và cộng sự (1972, 1974, 1975). Các nghiên cứu tiếp theo của nhiều tác giả đã áp dụng kết quả thí nghiệm ba trục của mẫu nền trong phòng thí nghiệm, hoặc thí nghiệm nén ngang tại hiện trường kết hợp với thí nghiệm cọc thực có bố trí thiết bị đo trên thân cọc để xây dựng các công thức thực nghiệm xác định tham số của đường cong p-y cho đất cát, đất sét ở các trạng thái độ chặt, một số nghiên cứu của: Stevens J.B. và cộng sự (1979), Robertson P.K và cộng sự (1989), Gabr M.A. và cộng sự (1988), Bransby M.F. (1999) [45]; Georgiadis K. (2012) [54]).

Mặc dù có nhiều tác giả đã nghiên cứu xây dựng đường cong t-z theo lý thuyết như Kraft L.M. (1981), Chow Y.K. (1986), McVay M. (1989), và Randolph M.F. (1994) nhưng hiện nay, các tiêu chuẩn thiết kế móng cọc của thế giới và ở Việt Nam vẫn dùng các đường cong quan hệ t-z theo thực nghiệm cho đất rời và đất dính của Vijayvergiya V.N. (1977), API (1993) cho cọc chế tạo sẵn và cọc khoan nhồi. Theo đó, quan hệ giữa ma sát bên với chuyển vị trượt dọc theo thân cọc so với nền là quan hệ đàn dẻo lý tưởng của Vijayvergiya V.N. (1977) hay đàn hồi dẻo lý tưởng của API (1993). Giá trị chuyển vị trượt lớn nhất để huy động được sức kháng ma sát tới hạn thay đổi từ 2,5 mm đến 7,5 mm.

Ưu điểm của mô hình dầm-cột trên các liên kết phi tuyến (p-y, t-z, Q-z) là đơn giản và dễ thực hiện, xét được đặc trưng phi tuyến của nền đến phản lực từ nền lên thân cọc và mũi cọc nhưng nhược điểm lớn nhất là các quan hệ p-y theo phương vuông góc với trục cọc và quan hệ t-z theo phương tiếp tuyến với thân cọc lại độc lập với nhau và chưa phản ánh được tính liên tục của nền. Gần đây, một số dự án nghiên cứu của châu Âu (PISA - Pile Soil Analysis, SOLCYP) đã nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết về tương tác của cọc với nền cát, sét chịu tác dụng

của tải trọng đơn điệu và tải trọng chu trình, từ kết quả thực nghiệm và mô hình toán đã đề xuất đường cong thực nghiệm p-y và t-z cho phân tích cọc trong đất cát, sét xét đến ảnh hưởng các dạng tải trọng. Tuy nhiên, đến nay vẫn chưa có công bố nào về quan hệ đường cong p-y và t-z cho cọc làm việc trong nền san hô.

1.3.2. Phương pháp phân tích theo mô hình liên tục

Khác với các phương pháp tính theo mô hình hệ số nền nêu trên, các phương pháp tính theo mô hình liên tục thường xét kết cấu và nền làm việc đồng thời trong cùng một mô hình tính, theo đó hệ kết cấu cọc và nền là một hệ “liên tục” gồm nhiều thành phần có đặc trưng vật liệu và đặc trưng ứng xử cơ học khác nhau. Việc xét theo mô hình liên tục làm tăng mức độ phức tạp của bài toán phân tích tương tác cọc với nền. Do vậy, có thể khắc phục được nhược điểm của phương pháp phân tích theo mô hình dầm - cột trên các liên kết phi tuyến p-y, t-z, Q-z nêu ở phần trên.

Cùng với sự phát triển của máy tính và các công cụ tính toán mạnh, các phương pháp số đã và đang được nghiên cứu để giải quyết các bài toán phân tích tương tác của kết cấu với nền (SSI) trong hơn nửa thế kỷ qua, bài toán phân tích cọc đơn chỉ là một trường hợp đại diện. Đến nay, các phương pháp số được phát triển và áp dụng rộng rãi trong nghiên cứu mô hình toán của các bài toán SSI có thể kể đến gồm: phương pháp sai phân hữu hạn (FDM), phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), phương pháp phần tử biên (BEM), phương pháp phần tử rời rạc (DEM), phương pháp hạt không lưới (SPH), phương pháp điểm vật liệu (MPM). Trong đó, phương pháp FDM và FEM có lịch sử phát triển và ứng dụng rộng rãi hơn cho các bài toán SSI, các phương pháp còn lại là những phương pháp mới được nghiên cứu ứng dụng cho các bài toán SSI trong khoảng hai thập kỷ gần đây.

1.3.2.1. Phương pháp sai phân hữu hạn

Trong lĩnh vực nghiên cứu địa kỹ thuật nói chung và phân tích SSI nói riêng, hiện nay thường sử dụng phần mềm FLAC do hãng Itasca (Hoa kỳ) phát triển, phần mềm này có cả phiên bản 2D và 3D cho phép giải quyết một

lớp khá rộng các bài toán theo mô hình phẳng và mô hình không gian. FLAC sử dụng công thức của phương pháp sai phân hiện (explicit finite difference formulation) để mô hình hóa các bài toán địa kỹ thuật nhiều giai đoạn, chẳng hạn như đào tuần tự, san lấp và chất tải. Các thuật toán của FLAC có thể mô hình hóa các bài toán với ứng xử chuyển vị lớn và biến dạng lớn, ứng xử phi tuyến vật liệu, thậm chí cả điều kiện phá hoại xảy ra trên một diện tích lớn hoặc sự sụp đổ hoàn toàn xảy ra trên đối tượng khảo sát.

Phương pháp sai phân hữu hạn được sử dụng bởi một số tác giả Reese L.C. (1977); Verruijt A., Kooijman A.P. (1989) [96]; Zhang F. và cộng sự (2000) đã nghiên cứu giải các phương trình vi phân trong nhiều vấn đề liên quan đến các cọc khoan nhồi, cọc ống trong nền đàn hồi dẻo nhiều lớp.

Muthukkumaran K. và Arun K.S. (2015) đã nghiên cứu ảnh hưởng của độ dốc đáy biển đến ứng xử ngang của móng cọc cho công trình biển cố định bằng FLAC 3D (dựa trên FDM). Các tác giả kết luận rằng độ dốc cao hơn 1V: 20H có ảnh hưởng đến ứng xử ngang của móng và độ dốc 1V:5H có thể gây ra sự gia tăng 100% mô men uốn so với trường hợp mặt đất nằm ngang.

Gupta B.K. và Basu D. (2017) đã phát triển một thuật toán phân tích coi đất là môi trường liên tục đàn hồi phân lớp không đồng nhất, trong đó mô đun biến dạng thay đổi theo độ sâu được giả định là tuyến tính hoặc phi tuyến tính trong mỗi lớp. Sử dụng nguyên lý thế năng cực tiểu để xây dựng các phương trình vi phân chuyển vị của cọc và nền rồi tiến hành giải bằng FDM.

Phương pháp FDM được ít tác giả áp dụng để phân tích móng cọc cũng như cọc đơn. Về mặt lý thuyết, FDM đến nay đã phát triển mạnh, có thể giải bài toán với những kết cấu có hình dạng không quá phức tạp.

1.3.2.2. Phương pháp phân tử hữu hạn

Hiện nay có nhiều phần mềm phát triển trên cơ sở lý thuyết FEM đã và đang được ứng dụng phổ biến như: phần mềm PLAXIS (PLAXIS 3D – Hoa Kỳ, ABAQUS (3DS Dassault System, Hoa Kỳ), ANSYS (ANSYS Inc., Hoa Kỳ). Các phần mềm này được phát triển trên cơ sở lý thuyết phương pháp

chuyển vị của FEM, đều có khả năng mô hình hóa ứng xử của nền đất, đá và tương tác của kết cấu với nền trong điều kiện khá đa dạng của thực tiễn kỹ thuật về dạng bài toán, điều kiện chất tải và đặc trưng ứng xử phi tuyến của môi trường vật liệu nền. Các kỹ thuật FEM gần đây đã được nghiên cứu phát triển mạnh hơn, cho phép mô phỏng khá thành công các điều kiện phức tạp trong thực tiễn bao gồm cả các vấn đề liên quan đến sự thay đổi của tải trọng và ảnh hưởng của nó đến ứng xử của hệ cọc-nền. Các tính năng chính của mô hình FEM đã góp phần vào giải quyết thành công các dạng bài toán tương tác cọc-nền bao gồm việc sử dụng các mô hình vật liệu tiên tiến.

Mô hình phân tử hữu hạn hai chiều (Bransby M.F., 1999) và ba chiều như: Najjar Y.M. và cộng sự, 1988; Bransby M.F., 1999; Chae K.S. và cộng sự, 2004 [48]; Karthigeyan S. và cộng sự, 2007; Al-Baghdadi T.A., 2015; Georgiadis K., 2012 [54]; Fahmy A. và cộng sự, 2012; El Naggar M.H. 2017; Murphy G. và cộng sự (2018) đã áp dụng để nghiên cứu tương tác cọc-nền với khả năng xem xét các yếu tố khác nhau như trình tự gia tải, đặc trưng ứng xử của vật liệu nền, kết hợp các loại tải trọng, thay đổi địa hình mặt đất.

Karthigeyan S. và cộng sự (2007) sử dụng mô hình FEM ba chiều đã báo cáo rằng tác động của tải trọng thẳng đứng làm giảm sức kháng bên của cọc trong nền đất sét đồng nhất. Bourgeois E. và cộng sự (2010) đã sử dụng mô hình FEM ba chiều của cọc chịu tải trọng ngang với ứng xử đàn dẻo của nền để hiệu chỉnh các đường cong p-y tĩnh nhằm kết hợp sự suy giảm dần dần độ cứng do tương tác cọc-nền khi chịu tải trong điều kiện chất tải liên tục.

Fahmy A. và El Naggar M.H. (2017) nghiên cứu ứng xử của cọc ống sắt đúc (SCDI) được gia cường với một tấm xoắn trong nền sét thông qua mô hình FEM phi tuyến ba chiều [53]. Sheil B. và McCabe B. (2017) đã nghiên cứu ảnh hưởng của tải đa chiều đến ứng xử của cọc đơn trong nền cát bằng mô hình hypoplastic kết hợp với PLAXIS 3D. Barari và cộng sự (2017) đã sử dụng mô hình FEM ba chiều để phân tích tương tác động lực học phi tuyến dàn khoan biển chịu tác dụng đồng thời của mô men và tải ngang.

Vũ Anh Tuấn và cộng sự (2019) cũng đã sử dụng FEM theo mô hình ba chiều thông qua phần mềm PLAXIS 3D để phân tích hiệu quả sức kháng nhỏ của cọc ống thép có cánh ngang phẳng trong nền cát san hô dựa trên kết quả thí nghiệm ba trục của mẫu cát san hô [35].

Đặc điểm chung của FEM khi mô phỏng bài toán cọc đơn trong nền đều phụ thuộc vào khả năng mô hình hóa hệ kết cấu cọc và nền bằng tập hợp các loại PTHH với các quy luật ứng xử khác nhau của vật liệu cọc, vật liệu nền và điều kiện tiếp xúc giữa cọc với nền. Các quan hệ ứng xử của vật liệu này được xác định từ các thí nghiệm cơ bản như thí nghiệm mẫu vật liệu nền, thí nghiệm ma sát giữa mẫu vật liệu nền với vật liệu cọc, thí nghiệm mô hình cọc trong nền tại hiện trường hoặc trên mô hình vật lý trong phòng thí nghiệm. Trong các tài liệu đã công bố, đa phần các kết quả nghiên cứu đều thực hiện với vật liệu nền là cát, sét hay vật liệu trầm tích mà có rất ít nghiên cứu với cọc trong nền san hô. Các nghiên cứu đã công bố sử dụng phần mềm địa kỹ thuật như PLAXIS có khả năng mô hình hóa ứng xử đa dạng của vật liệu nền nhưng lại hạn chế về khả năng mô hình hóa các loại kết cấu phức tạp. Từ phiên bản mới gần đây của PLAXIS đã được hãng Bentley cải tiến cho phép nâng cao khả năng mô hình hóa các đối tượng kết cấu phức tạp hơn. Do vậy, trong nghiên cứu của mình tác giả sẽ sử dụng phần mềm PLAXIS 3D làm công cụ nghiên cứu về ảnh hưởng của cấu hình cánh xoắn đến sự làm việc và ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn trong môi trường nền cát san hô.

1.3.3. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm theo mô hình vật lý

Nghiên cứu thực nghiệm để giải quyết các bài toán liên quan đến phân tích sự làm việc của cọc đơn và móng cọc trong nền được thực hiện từ rất sớm trên thế giới nhằm xác định các tham số đầu vào của vật liệu nền, vật liệu cọc, tiếp xúc của cọc với nền, ... trong các điều kiện chất tải khác nhau cũng như để hiệu chỉnh và kiểm nghiệm phương pháp lý thuyết. Tuy nhiên, do chi phí thí nghiệm cao và thời gian kéo dài nên kết quả thí nghiệm với cọc thực và cọc đơn ở hiện trường trong các điều kiện địa chất và tải trọng phức tạp chưa được

thực hiện nhiều, chủ yếu có một số dự án nghiên cứu của châu Âu đã nghiên cứu như PISA [49] hay SOLCYP [72]. Các nghiên cứu trên mô hình cọc trong phòng thí nghiệm với một loại nền cụ thể được thực hiện phổ biến hơn do chi phí phù hợp và khả năng kiểm soát được các tham số vật liệu nền và tải trọng theo mục tiêu nghiên cứu (điển hình như Morata G. và cộng sự, 2002 [64]; Kim B.T và cộng sự, 2004; Zhu B. và cộng sự, 2016; Rimoy S., 2013 [88]; Tsuchi C. và cộng sự, 2012 [89]; Zhu B. và cộng sự, 2016 [44], Deendayal R. cùng cộng sự, 2019 [52]; Vu A.T và cộng sự, 2016; Zainuddin A.Z. và cộng sự, 2016; Nguyễn Trương Lai và cộng sự, 2019 [6]).

Nghiên cứu ma sát giữa vật liệu cọc với vật liệu nền cát, sét cũng được thực hiện phổ biến bởi nhiều nhà khoa học trên thế giới; các thí nghiệm được thực hiện trên máy cắt phẳng với các điều kiện chất tải khác nhau như: cắt tĩnh với các mức áp lực pháp tuyến khác nhau nhằm xác định cơ chế hình thành ma sát cũng như cường độ ma sát ứng với mức chuyển vị trượt giới hạn giữa hai loại vật liệu; cắt lặp với áp lực pháp tuyến không đổi hoặc áp lực pháp tuyến thay đổi nhằm xác định quy luật biến đổi ma sát giữa vật liệu cọc với vật liệu nền theo điều kiện thay đổi trạng thái của nền xung quanh cọc khi chịu tải [38], [74], [75], [82].

Các nghiên cứu đã công bố chủ yếu cho cọc làm việc trong nền cát, sét thông thường mà hầu như rất ít công bố cho cọc làm việc trong nền cát sạn san hô. Trong nghiên cứu này, tác giả sẽ tiến hành nghiên cứu thực nghiệm tham số mẫu cát sạn san hô và tham số ma sát của mẫu cát sạn san hô với tấm thép ở chương 2, làm cọc để xác định tham số đầu vào cho nghiên cứu trong chương 3 và chương 4 của luận án.

1.3.4. Nghiên cứu sự làm việc của cọc đơn có xét đến tính chất ngẫu nhiên của nền và tải trọng

Do tính chất đa dạng và phi tuyến của nền đất, dưới tác dụng của tải trọng cũng mang tính ngẫu nhiên cao nên vấn đề nghiên cứu sự làm việc của cọc trong nền có xét đến tính chất ngẫu nhiên của nền đất và của tải trọng đã

được quan tâm nghiên cứu từ lâu bởi các nhà khoa học trên thế giới cũng như ở Việt Nam. Khó khăn lớn nhất khi phân tích cọc trong nền có xét đến đặc trưng ngẫu nhiên của nền và tải trọng là có quá nhiều tham số ảnh hưởng của nền (loại đất, cấp phối hạt, trạng thái độ chặt, các tham số đặc trưng cho tính chất biến dạng và sức kháng, lịch sử chất tải,...) mà bản thân mỗi tương quan của các phân phối ngẫu nhiên giữa các đại lượng này cũng chưa được nghiên cứu đầy đủ. Vì lý do này, những nghiên cứu đã công bố về phân tích ngẫu nhiên phi tuyến của cọc trong nền chủ yếu được thực hiện bằng mô hình đơn giản dạng dầm-cột trên các liên kết biến dạng p - y , t - z , Q - z và số tham số ngẫu nhiên của nền được xét cũng hạn chế [60], [61], [62]. Lý thuyết độ tin cậy kết hợp với phương pháp mô phỏng Monte-Carlo là phương pháp chính được sử dụng trong phân tích tương tác ngẫu nhiên phi tuyến của cọc với nền dựa trên các mô hình tiên định đơn giản.

Những kết quả nghiên cứu được ứng dụng vào thiết kế thực tiễn như trong tiêu chuẩn ASSHTO và tiêu chuẩn EURO code 7 chỉ mới dừng ở mức xác định sức kháng của cọc ở trạng thái giới hạn về độ bền và trạng thái giới hạn về khai thác mà chưa có nghiên cứu về quan hệ tải trọng-chuyển vị của cọc. Gần đây, cùng với sự phát triển của các thuật toán hồi quy đa biến và phân tích dữ liệu lớn (kỹ thuật trí tuệ nhân tạo), một số nhà khoa học đã nghiên cứu phát triển công cụ máy học để dự báo sức chịu tải của cọc trong nền từ cơ sở dữ liệu thực nghiệm về nền đất và các thí nghiệm cọc ở hiện trường và trong phòng thí nghiệm. Dù có một số kết quả ban đầu cho thấy tiềm năng của nhóm phương pháp này nhưng việc có được cơ sở dữ liệu đủ lớn và đa dạng để áp dụng sẽ vẫn là một thách thức lớn trong những năm tới.

1.4. Tình hình nghiên cứu cọc đơn trong nền san hô ở Việt Nam

Đã có một số công trình nghiên cứu trên thế giới về sự làm việc của cọc trong nền san hô, tiêu biểu như: Akili W. (1998) của Saudi Arabia, Peng Y. (2021) của Qatar và đề tài mã số CN110374085B (2021) của Trung Quốc. Tuy nhiên, các nghiên cứu này được thực hiện đối với địa chất san hô ở các

vùng khác nhau, mà chưa có nghiên cứu của các tác giả trên thế giới về tương tác của cọc trong nền san hô ở khu vực các đảo xa bờ thuộc tỉnh Khánh Hoà. Nguyên nhân là do yêu cầu tuyệt đối trong việc không tiếp cận khu vực có ý nghĩa quan trọng thuộc chủ quyền và an ninh quốc phòng của nước ta.

Trong khi đó ở Việt Nam, các công trình nhà giàn DKI (cụm Dịch vụ kinh tế - Khoa học kỹ thuật) xây dựng trên các bãi cạn san hô ở thềm lục địa phía Nam của biển Đông có thể coi là những công trình đầu tiên sử dụng kết cấu cọc ống thép trong nền san hô tại Việt Nam được các nhà khoa học thuộc Bộ tư lệnh Công binh và Liên doanh dầu khí Việt Xô thực hiện từ cuối những năm 80 của thế kỷ XX. Do hiểu biết về nền san hô còn hạn chế nên chúng ta chưa dự báo hết được hết các yếu tố ảnh hưởng đến công trình xây dựng trên nền san hô, hậu quả là đã có công trình bị đổ, nhiều công trình bị rung lắc mạnh trong quá trình khai thác nên phải tiến hành gia cố.

Giai đoạn từ 1990÷2000, những nghiên cứu về móng cọc trong nền san hô đều coi nền san hô là nền đàn hồi, cọc được phân tích theo mô hình dầm-cột trên nền Winkler (Nguyễn Văn Hợi, Nguyễn Hoa Thịnh, đề tài KT-03.13).

Giai đoạn 2000÷2015, các đề tài nghiên cứu thuộc Chương trình KC-09 do Hoàng Xuân Lượng và các cộng sự, dự án ĐTB11 do Nguyễn Văn Hợi và các cộng sự đã nghiên cứu thực nghiệm trên mô hình cọc đơn, mô hình dàn thép không gian trên móng cọc ống thép tại một số đảo xa bờ thuộc tỉnh Khánh Hoà; đồng thời với các thí nghiệm ma sát của mẫu ống thép với mẫu đá san hô trong phòng thí nghiệm để xác định cường độ sức kháng ma sát của nền san hô với một số vật liệu cọc bê tông, thép cũng như sự thay đổi của cường độ sức kháng ma sát cọc-nền san hô dưới tác dụng của tải trọng lặp [2], [7]÷[11], [13], [16]÷[18]. Mặc dù chỉ thí nghiệm với mô hình cọc nhỏ (đường kính cọc D60 mm đến D130 mm) và chiều sâu cọc thí nghiệm nhỏ nhưng đã cung cấp số liệu khoa học bước đầu về sự làm việc của cọc trong nền san hô; các tác giả đã khuyến nghị mô hình phân tích cọc-nền san hô có xét đến hiện tượng tách-trượt của kết cấu cọc với nền. Với nền san hô rời, ảnh hưởng của

cấp phối hạt, trạng thái độ chặt,... đến sự phát triển và biến đổi của sức kháng ma sát giữa cọc với nền chưa được xét đến.

Giai đoạn 2006, Nguyễn Thái Chung đã xây dựng chương trình tính toán theo phương pháp PTHH xét đến tương tác một chiều khi kể đến sự tách, trượt trên bề mặt của kết cấu cọc ống thép với nền san hô, hệ tương tác cọc và nền làm việc trong điều kiện biến dạng phẳng, các mô hình vật liệu giả thiết ứng xử đàn hồi tuyến tính [2].

Giai đoạn 2016÷2020, Nguyễn Tương Lai và các cộng sự tại Học viện KTQS đã nghiên cứu thực nghiệm mô hình cọc tại hiện trường với các cỡ cọc khác nhau (D60 mm dài 2-4 m đến D400 mm dài 21 m) và mô hình cọc trong nền san hô chế tạo trong bờ để nghiên cứu cơ chế hình thành và biến đổi của sức kháng ma sát giữa cọc ống thép với nền san hô rời dạng cành nhánh lẫn cát sạn và cục tảng (nền thực tế) khi chịu tải trọng tĩnh và tải trọng lặp. Nghiên cứu sinh cũng là thành viên chính thực hiện đề tài này (đề tài mã số ĐTDL-CN.17/15) và được sự đồng ý của chủ nhiệm đề tài sẽ sử dụng một số kết quả cho luận án. Kết quả nghiên cứu cho thấy giá trị sức kháng ma sát của cọc ống thép với nền san hô phụ thuộc vào cấp phối hạt, độ chặt, quy luật và lịch sử chất tải; đề tài cũng đề xuất một số giải pháp tăng cường sức kháng cho cọc ống thép hạ trong nền san hô, trong đó có giải pháp sử dụng cọc ống thép có cánh ngang gia cường trên thân cọc nhưng chưa làm rõ ảnh hưởng của cấu hình cánh xoắn đến sự làm việc của cọc [6].

Giai đoạn 2011÷2019, Vũ Anh Tuấn đã nghiên cứu sự làm việc của cọc ống thép tròn trơn trong nền san hô chịu tải trọng tĩnh và tải trọng chu trình theo phương pháp lý thuyết và thực nghiệm khi xét tương tác giữa cọc với nền san hô được thay thế bằng các lò xo biến dạng [13]. Đồng thời tác giả nghiên cứu tương tác cọc ống thép theo mô hình thực nghiệm và lý thuyết (sử dụng cả phương pháp các lò xo biến dạng độc lập và mô hình số 3 chiều liên tục), trong đó đã nghiên cứu cọc có cánh, nhưng mới xét đến các cánh phẳng nằm ngang trong nền cát san hô có kích thước hạt lớn nhất là 4,75 mm, chưa

nghiên cứu đối với cọc có cánh xoắn và chưa làm rõ ảnh hưởng của các tham số cánh xoắn nhằm đảm bảo tính khả thi trong thi công hạ cọc cũng như lựa chọn các tham số cánh xoắn hợp lý để tăng hiệu quả sức kháng của cọc [35].

1.5. Những vấn đề rút ra từ nghiên cứu tổng quan

Từ những kết quả nghiên cứu tổng quan trình bày trong các phần trên, tác giả rút ra các nội dung đã được làm rõ và một số vấn đề còn tồn tại cần tiếp tục nghiên cứu chuyên sâu như sau:

1) Nghiên cứu về cọc đơn là cơ sở khoa học để nghiên cứu về móng cọc. Kết quả nghiên cứu về sức kháng của cọc đơn đã đạt được nhiều thành tựu khác nhau trong nền đất cát, sét, nền đá phong hóa, nhưng những nghiên cứu về cọc trong nền san hô còn rất hạn chế;

2) Các nghiên cứu lý thuyết đã phát triển nhiều loại mô hình cơ học phi tuyến của vật liệu nền nhằm mô phỏng tính đa dạng về ứng xử của vật liệu nền đó. Các nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành trong phòng thí nghiệm hay với cọc thực tại hiện trường nhằm cung cấp số liệu đầu vào cho nghiên cứu lý thuyết và hiệu chỉnh kết quả nghiên cứu phù hợp với thực tiễn;

3) Cọc ống thép có cánh xoắn là một loại cọc cải tiến bằng cách tăng diện tiếp xúc của thân cọc hoặc mũi cọc với nền, qua đó cho phép tăng sức kháng của cọc. Đã có những kết quả nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết về sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền đất cát và đất sét, nhưng chưa có nghiên cứu khả thi về sự làm việc của loại cọc này được áp dụng trong thực tiễn khi xây dựng trên nền cát sạn san hô;

4) Tại Việt Nam nền san hô phân bố trên các đảo, bãi cạn xa bờ ở biển Đông và có tính phân lớp, phân nhịp, thường gồm: đá san hô gắn kết yếu đến gắn kết tốt, cành nhánh san hô lẫn cục tảng và cát sạn, cát sạn san hô lẫn cành nhánh. Việc xây dựng công trình trên nền san hô nói chung, cát sạn san hô nói riêng tại các khu vực này có vai trò quan trọng đối với việc bảo vệ chủ quyền lãnh hải, quốc phòng an ninh và phát triển kinh tế biển đảo của đất nước;

5) Các nghiên cứu đã công bố cho thấy nền san hô có tính phân tán cao,

hệ số rỗng lớn, nhưng sức chống cắt cao so với vật liệu cát sạn thông thường, bao gồm góc ma sát trong và lực dính đơn vị biểu kiến do ảnh hưởng sự cài móc giữa các hạt khi có hình dạng góc cạnh. Vật liệu cát sạn san hô có tính giòn và dễ bị ép vỡ dẫn đến sự thay đổi tính chất cơ lý khi chịu tải. Có thể sử dụng mô hình vật liệu đàn dẻo lý tưởng Mohr-Coulomb để mô phỏng quan hệ ứng suất và biến dạng của nền cát sạn san hô;

6) Để có thể nghiên cứu đầy đủ về giải pháp móng cọc trong nền san hô cần tiếp tục đầu tư của nhà nước và nỗ lực của các nhà khoa học. Trong phạm vi một luận án tiến sĩ, tác giả chọn vấn đề nghiên cứu về sự làm việc trong nền cát sạn san hô của cọc đơn ống thép có cánh xoắn nhằm góp phần bổ sung, hoàn thiện cơ sở khoa học cho việc thiết kế móng cọc công trình trên nền san hô nói chung, cát sạn san hô nói riêng.

1.6. Nhiệm vụ nghiên cứu của luận án

Với những vấn đề được rút ra nêu trên và mục tiêu nghiên cứu đặt ra, luận án xác định các nhiệm vụ chính sau:

1) Nghiên cứu thực nghiệm xác định ứng xử ma sát giữa cọc ống thép với nền cát sạn san hô và các tham số mô hình nền để vận dụng vào tính toán tương tác của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô;

2) Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để nghiên cứu sự làm việc và ứng xử của cọc ống thép được cải tiến bằng các cánh xoắn gia cường trong nền cát sạn san hô khi thay đổi các cấu hình cánh xoắn khác nhau nhằm đánh giá hiệu quả làm việc và sức chịu tải của cọc có cánh xoắn so với cọc tròn trơn, kiến nghị cấu hình cánh xoắn hợp lý trong phạm vi nghiên cứu;

3) Đề xuất mô hình và xây dựng chương trình tính toán sức chịu tải của cọc ống thép có cánh xoắn theo lý thuyết mô phỏng số Monte-Carlo để xét đến sự biến động một số tham số ngẫu nhiên của nền cát sạn san hô.

Chương 2. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH CÁC THAM SỐ MÔ HÌNH NỀN CÁT SẠM SAN HỒ

Trong chương này, luận án trình bày nghiên cứu thực nghiệm xác định sức kháng ma sát giữa cọc ống thép với cát sạm san hồ và các tham số của mô hình nền cát sạm san hồ. Kết quả nhận được từ thực nghiệm là cơ sở luận cứ khoa học của bộ số liệu đầu vào để nghiên cứu sự làm việc và ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạm san hồ trong các chương 3 và chương 4 của luận án.

2.1. Đặt vấn đề nghiên cứu

Trong chương I, tác giả đã tổng quan về san hồ nói chung, cát sạm san hồ nói riêng và những đặc điểm cơ bản, yêu cầu đặt ra cần tiếp tục nghiên cứu đối với cát sạm san hồ. Trong đó, làm rõ tính chất phức tạp của nền san hồ và ý nghĩa thực tiễn, khoa học to lớn của việc nghiên cứu cát sạm san hồ trong xây dựng công trình khu vực biển đảo xa bờ trên các thềm lục địa thuộc chủ quyền của Việt Nam.

Việc nghiên cứu phát triển và hoàn thiện các mô hình vật liệu nền phù hợp với các điều kiện làm việc của công trình cụ thể trong thực tiễn vẫn đang được các nhà khoa học và các cơ sở nghiên cứu quan tâm đầu tư. Các phương pháp và mô hình tính toán bài toán tương tác của cọc đơn với nền đã được tác giả luận án tổng hợp, phân tích ở chương I. Đối với bài toán tương tác của cọc và nền san hồ khi chịu tác dụng của tải trọng tĩnh có thể mô phỏng quan hệ phi tuyến của ứng suất với biến dạng theo mô hình Mohr - Coulomb; mô hình Cam Clay; mô hình tái bền động học Hypoplastic [6], [9].

Trong phạm vi nghiên cứu của luận án, tác giả sử dụng mô hình nền Đàn dẻo lý tưởng Mohr - Coulomb để mô hình hoá vật liệu cát sạm san hồ, vì đây là mô hình cơ bản đã được nhiều tác giả trên thế giới và Việt Nam ứng dụng, đồng thời mô hình này có thể mô phỏng được quan hệ đàn dẻo phi tuyến của nền cát sạm san hồ khi chịu tải trọng tĩnh.

Các tham số cần thiết của nền cát sạm san hồ theo mô hình Mohr-

Coulomb để phục vụ tính toán tương tác của cọc ống thép với nền cát sạn san hô, bao gồm: góc ma sát trong, lực dính đơn vị biểu kiến, mô đun biến dạng, hệ số Poisson, trọng lượng thể tích, hệ số suy giảm cường độ trên bề mặt tương tác của cọc với nền, góc ma sát ngoài của cọc ống thép với cát sạn san hô, sức kháng ma sát và cường độ sức kháng ma sát giữa cọc ống thép với cát sạn san hô. Để xác định ứng xử và giá trị các tham số cơ bản này, tác giả tiến hành thực nghiệm trên thiết bị nén ba trục và cắt phẳng trong phòng thí nghiệm Địa kỹ thuật tại Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, kết hợp thực nghiệm xác định sức kháng ma sát của cọc ống thép với nền san hô tại hiện trường ở 01 đảo nổi xa bờ trên biển đông thuộc tỉnh Khánh Hoà trong phạm vi khu vực chủ quyền của Việt Nam. Đây là vấn đề có ý nghĩa khoa học rất lớn, làm cơ sở để vận dụng nghiên cứu ứng xử của cọc đơn nói chung, cọc ống thép có cánh xoắn nói riêng làm việc trong môi trường nền cát sạn san hô.

Do hạn chế về điều kiện thiết bị thí nghiệm trong phòng, nên những nghiên cứu về tính chất cơ học của san hô hoặc cát sạn san hô thường được thực hiện với kích thước hạt lớn nhất $D_{\max} \leq 2$ mm. Trong nghiên cứu này, các thử nghiệm ba trục và cắt phẳng được thực hiện để xác định đặc tính sức chống cắt của cát sạn san hô và tham số tương tác của cát sạn san hô với cọc ống thép. Căn cứ phương pháp phân loại của đất rời, trong luận án quy ước mẫu hỗn hợp san hô trong nghiên cứu này bao gồm cát, sỏi, cành nhỏ có kích thước hạt thô lớn nhất $D_{\max} \leq 20$ mm là mẫu cát sạn san hô nghiên cứu.

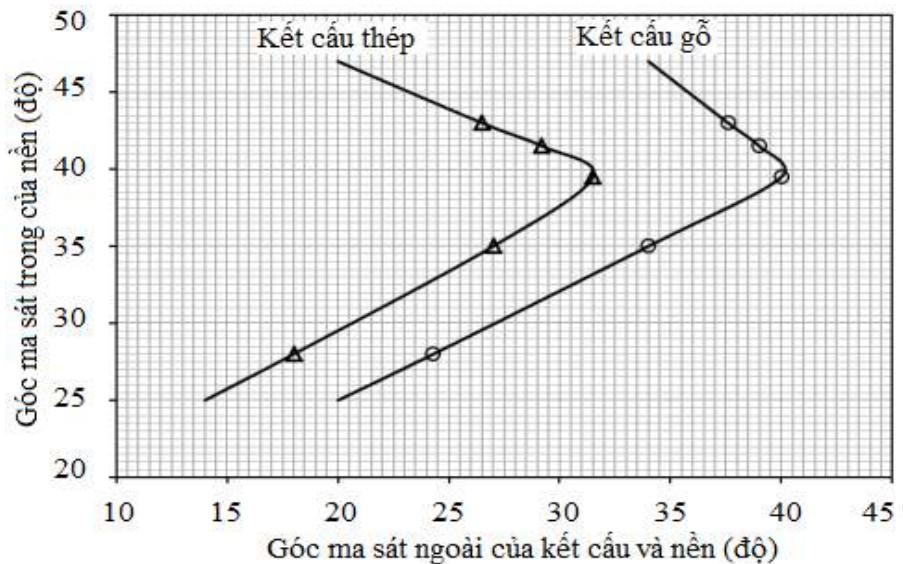
2.2. Nghiên cứu thực nghiệm tương tác giữa cát sạn san hô và tấm thép trong phòng thí nghiệm

2.2.1. Cơ sở thí nghiệm

Vấn đề rất khó khăn trong nghiên cứu tương tác giữa cọc ống thép và cát sạn san hô đó là xác định được chính xác ứng xử ma sát của các lớp cát sạn san hô với kết cấu thép trên bề mặt tiếp xúc giữa 2 vật liệu. Nhiều tác giả đã thực hiện những nghiên cứu về tính chất cơ học của nền trên bề mặt tiếp xúc với các loại vật liệu xây dựng khác nhau [78], [79], [80], [81], [91], [99]. Đôi

với mẫu san hô nói chung, một số tác giả đã tiến hành thí nghiệm ngoài hiện trường nhằm xác định cơ chế ma sát giữa cọc với nền và thí nghiệm xác định ma sát của khối đá san hô nguyên mẫu với tấm thép hoặc kết cấu bê tông xi măng [2], [6]. Tuy nhiên, chưa có công bố kết quả nghiên cứu tương tác của vật liệu tấm thép với mẫu cát sạn san hô rời rạc có kích thước hạt thô lớn nhất đến 20 mm thu thập từ vùng biển đảo xa bờ tỉnh Khánh Hoà.

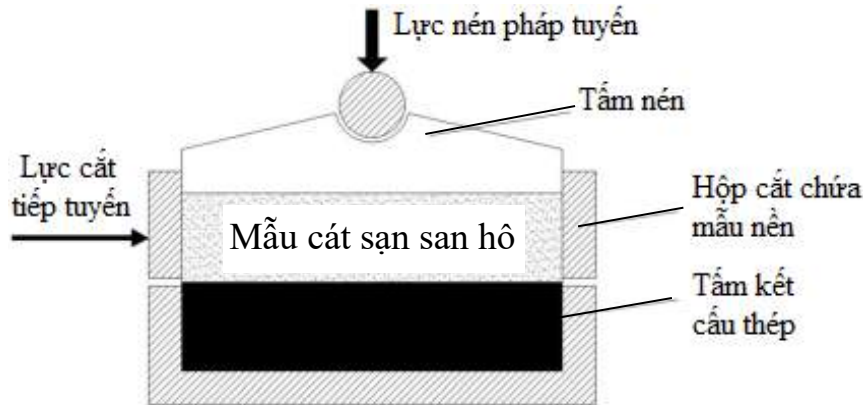
Đã có những nghiên cứu về tương tác giữa cọc và nền nói chung khi sử dụng phân tử tiếp xúc hoặc xét hệ số ma sát giữa cọc và nền. Một số nghiên cứu và tiêu chuẩn thiết kế khuyến nghị tính toán góc ma sát ngoài giữa cọc với nền có mối quan hệ tuyến tính với góc ma sát trong của nền theo biểu thức: $\delta=2*\varphi/3$ [79] hoặc $\delta=\varphi-5$ [31], [33] (trong đó: δ - góc ma sát ngoài giữa cọc và nền, φ - góc ma sát trong của nền nghiên cứu). Tuy nhiên, trong các kết quả thực nghiệm đã nghiên cứu cho thấy góc ma sát ngoài có mối quan hệ phi tuyến với góc ma sát trong như đồ thị Hình 2.1 và không chỉ phụ thuộc góc ma sát trong mà còn ảnh hưởng bởi vị trí xác định góc ma sát giữa cọc với nền, dạng bề mặt của kết cấu và trường hợp tải trọng tác dụng [79].



Hình 2.1. Tương quan phi tuyến giữa góc ma sát ngoài và góc ma sát trong [79]

Do vậy, nghiên cứu xác định sức kháng ma sát theo phương pháp thực nghiệm làm cơ sở tính toán tương tác giữa cọc ống thép với cát sạn san hô có

ý nghĩa rất quan trọng. Để đạt mục tiêu xác định ứng xử tương tác giữa mẫu cát sạn san hô và kết cấu thép, tiến hành thực nghiệm theo mô hình xác định trực tiếp góc ma sát ngoài giữa bề mặt thép với cát sạn san hô thông qua việc xác định sức kháng ma sát theo phương tiếp tuyến và áp lực nén mẫu giữa hai vật liệu theo phương pháp tuyến, sơ đồ nguyên lý thể hiện ở Hình 2.2:



Hình 2.2. Mô hình thí nghiệm cắt phẳng xác định sức kháng ma sát giữa cát sạn san hô và tấm thép [79], [80]

Đây là phương pháp xác định sức kháng ma sát trực tiếp giữa cát sạn san hô với bề mặt tấm thép, phương pháp này đã được một số tài liệu công bố và các tác giả đã thực hiện nghiên cứu trên thế giới đối với các loại nền và kết cấu khác nhau [38], [50], [78], [79], [80], [81], [99].

Theo đó, gọi δ là góc ma sát ngoài giữa bề mặt tấm thép và cát sạn san hô, khi đó δ được xác định theo biểu thức sau [38], [58]:

$$\delta = \arctan(\tau_{\max} / p_{\max}), \quad (2.1)$$

trong đó:

τ_{\max} - ứng suất cắt phẳng lớn nhất trên diện tích bề mặt tấm thép, được xác định thông qua thực nghiệm, kPa;

p_{\max} - Áp lực nén mẫu lớn nhất hay ứng suất pháp lớn nhất tác dụng lên mẫu cát sạn san hô, được xác định từ thực nghiệm, kPa. Tham số này ảnh hưởng đến độ chặt của mẫu cát sạn san hô, nên trong quá trình thí nghiệm khi tăng áp lực nén đến p_{\max} cần giữ ổn định trong một khoảng thời gian để mẫu cố kết trước khi tiến hành thí nghiệm cắt mẫu.

Gọi R_{inter} là hệ số suy giảm cường độ trên bề mặt tiếp xúc giữa kết cấu tấm thép làm cọc ống thép và mẫu cát sạn san hô, khi đó R_{inter} được xác định theo biểu thức sau [73]:

$$R_{inter} = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}, \quad (2.2)$$

trong đó:

δ - góc ma sát ngoài giữa cát sạn san hô với bề mặt thép, được xác định từ thí nghiệm cắt phẳng tĩnh;

φ - góc ma sát trong của cát sạn san hô, xác định qua thí nghiệm thí nghiệm nén 3 trục tĩnh.

Do số lượng mẫu thí nghiệm hạn chế, nên các tham số thực nghiệm này được phân tích, xử lý số liệu theo phương pháp bình phương tối thiểu để nhận được kết quả thực nghiệm trung bình.

2.2.2. Mẫu và thiết bị thí nghiệm

Tham khảo số liệu của đề tài độc lập cấp nhà nước mã số “ĐTĐL-CN.17/15” khi tiến hành khoan khảo sát cấu trúc địa tầng theo chiều sâu tại đảo TSL và đảo ĐTA trên khu vực biển đông thuộc tỉnh Khánh Hoà [6] và kết quả điều tra, khảo sát tại đảo NY [18]; đảo TC [KTS23], thu thập được kết quả về cấu trúc địa chất san hô phân bố ở một số hố khoan theo các lớp sau:

Lớp 1 - Lớp cát sạn san hô màu xám trắng hoặc trắng sữa: có thành phần là hỗn hợp cát sạn lẫn cành nhánh san hô, có chiều dày tại đảo TSL từ 13,0 m đến 14,0 m; tại đảo ĐTA có chiều dày từ 20,5 m đến 21,0 m; tại đảo TC từ 10,0 m đến 16,6 m. Cát sạn hô có thành phần chủ yếu là cát hạt trung mịn, màu xám trắng, bão hoà nước.

Lớp 2 - Lớp đá san hô màu xám trắng, phong hoá vừa - nhẹ: Lớp này phân bố tương đối ổn định, độ sâu gặp ở đảo TSL là 13,0 m đến 25,0 m và ở đảo ĐTA là 21,0 m đến 25,0 m.

Hình trụ hố khoan cột địa tầng lớp địa chất cát sạn san hô tại một số điểm đảo đảo TSL và ĐTA [6], đảo TC [KTS] và đảo TSL [16], [17]. Mặt cắt

địa chất công trình tại một số đảo NY; STT và ST [18]. Trong đó, thể hiện sự phân bố thực tế lớp địa tầng cát sạn san hô trên và xung quanh phạm vi khảo sát được tác giả tổng hợp và trình bày chi tiết trong “Phụ lục 1”.

Theo kết quả phân bố địa chất như trên, trong phạm vi nghiên cứu của luận án, tác giả thu thập hỗn hợp cát sạn san hô thuộc địa tầng lớp 1 tại đảo ĐTA để chế bị mẫu thí nghiệm. Trước khi thí nghiệm, tiến hành phân loại và lựa chọn dạng hỗn hợp cát sạn san hô có thành phần các hạt kích thước lớn nhất là $D_{\max} = 20$ mm đã loại bỏ các tạp chất trước khi sử dụng để tạo mẫu và tiến hành thí nghiệm đối với nền hỗn hợp cát sạn san hô. Đối với hỗn hợp cát sạn san hô thì các hạt có kích thước lớn hơn 5 mm được loại bỏ trước khi chuẩn bị mẫu thí nghiệm cắt phẳng.

Các đặc trưng cơ lý của mẫu thí nghiệm cát sạn san hô và cát san hô được trình bày trên Bảng 2.1.

Bảng 2.1. Đặc trưng cơ lý mẫu cát sạn san hô và cát san hô thí nghiệm

STT	Đặc trưng cơ lý	Mẫu cát sạn san hô	Mẫu cát san hô
1	Khối lượng riêng hạt, ρ_s (T/m^3)	2,61	2,71
2	Hệ số rỗng lớn nhất, e_{\max}	0,76	1,16
3	Hệ số rỗng nhỏ nhất, e_{\min}	0,46	0,58
4	Đường kính hạt trung bình, D_{50} (mm)	0,83	0,36
5	Độ chặt tương đối, D_c (%)	70,0	70,0

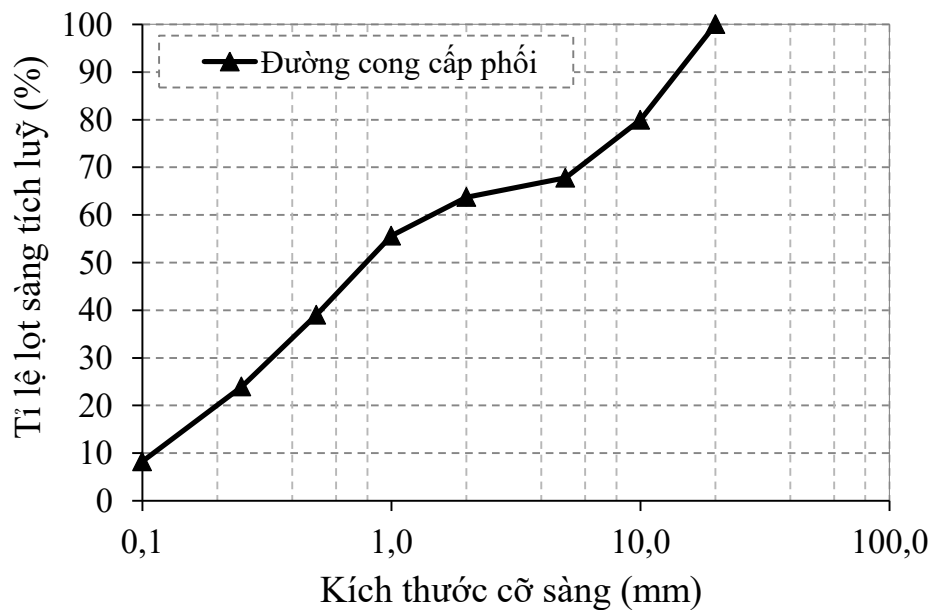
Công tác thí nghiệm xác định thành phần cấp phối của mẫu cát sạn san hô được tiến hành trước thí nghiệm cắt phẳng để lập đường cong thành phần hạt cũng như đánh giá được xu hướng bị vỡ vụn của kết cấu hạt san hô khi chịu tác động tải trọng ngoài. Bộ rây sàng được sử dụng trong nghiên cứu này có kích thước lỗ sàng gồm: < 20 mm; 10 mm; 5,0 mm; 2,0 mm; 1,0 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,1 mm và < 0,1 mm. Các kết quả thí nghiệm rây sàng được thực hiện trước và sau mỗi mẫu thí nghiệm cắt phẳng tĩnh.

Phân tích thành phần hạt của mẫu cát sạn san hô thí nghiệm tuân thủ theo tiêu chuẩn [28]. Kết quả thí nghiệm thành phần cấp phối của mẫu cát sạn san hô ở độ chặt $D = 70\%$ được thể hiện trên Bảng 2.2:

Bảng 2.2. Thành phần cấp phối các mẫu cát sạn san hô thí nghiệm

STT	Khối lượng trên sàng	Cắt phẳng 63,5 mm	Cắt phẳng 100 mm	Nén 3 trục 100 mm
1	Kích thước cỡ sàng < 20 mm	21,68	52,93	492,15
2	Kích thước cỡ sàng 5,0 mm	13,16	32,12	298,65
3	Kích thước cỡ sàng 2,0 mm	4,38	10,69	99,55
4	Kích thước cỡ sàng 1,0 mm	8,77	21,41	199,10
5	Kích thước cỡ sàng 0,5 mm	17,94	43,79	407,14
6	Kích thước cỡ sàng 0,25 mm	16,31	39,81	370,23
7	Kích thước cỡ sàng 0,1 mm	16,95	41,38	384,77
8	Kích thước cỡ sàng < 0,1 mm	8,92	21,77	202,45
Tổng cộng khối lượng mẫu (g)		108,11	263,94	2454,05

Trên cơ sở khối lượng các thành phần mẫu thí nghiệm, theo chỉ tiêu đánh giá thành phần cấp phối ở Bảng 2.2, tác giả xây dựng đường cong cấp phối mẫu cát sạn san hô để thực hiện thí nghiệm cắt phẳng như trên Hình 2.3:

**Hình 2.3. Đường cong cấp phối hạt của mẫu cát sạn san hô**

Trong quá trình thí nghiệm, để đạt được độ chặt 70% theo mục tiêu đặt ra, tiến hành cân khối lượng các thành phần hạt theo Bảng 2.2 căn cứ vào khối lượng thể tích của mẫu cát sạn san hô và thể tích của mỗi hộp mẫu thí nghiệm (tiến hành đầm cát sạn san hô sao cho toàn bộ khối lượng mẫu đã xác định

được đưa vào toàn bộ thể tích hộp mẫu). Mặc dù có lực dính đơn vị biểu kiến do sự gài móc giữa các hạt trong thành phần mẫu thí nghiệm, nhưng cát sạn san hô có thể coi là đất rời, nên khối lượng cát sạn san hô cần thiết trong hộp mẫu thí nghiệm tương ứng độ chặt 70% được xác định theo biểu thức sau:

$$M = \frac{\rho_s}{-(e_{\max} - e_{\min}) \cdot D_c + e_{\max} + 1} \cdot V_m, \quad (2.3)$$

trong đó:

M - tổng khối lượng mẫu cát sạn san hô thí nghiệm, g;

ρ_s - khối lượng đơn vị thể tích, g/cm³;

e_{\max} - hệ số rỗng lớn nhất của mẫu cát sạn san hô ($e_{\max} = \rho_s / \gamma_{\min} - 1$);

e_{\min} - hệ số rỗng nhỏ nhất của mẫu cát sạn san hô ($e_{\min} = \rho_s / \gamma_{\max} - 1$);

D_c - độ chặt tương đối của mẫu cát sạn san hô thí nghiệm, %;

V_m - thể tích hộp mẫu thí nghiệm, cm³.

Thí nghiệm cắt phẳng mẫu cát sạn san hô được tiến hành trên máy cắt phẳng tự động Shearmatic sản xuất năm 2017 của hãng Controls - Italia tại Phòng thí nghiệm Địa kỹ thuật - Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt có thông số kỹ thuật cơ bản của máy cắt phẳng như sau:

- Đáp ứng tiêu chuẩn ASTM D3080 và các tiêu chuẩn liên quan;
- Có khả năng tự động gia tải cho các cấp tải (50 cấp), tự động thực hiện thí nghiệm cắt trực tiếp và thí nghiệm cắt lặp chu trình (tối đa 99 chu kỳ) từ giai đoạn cố kết cho đến khi mẫu bị phá huỷ hoặc với biên độ cắt thiết kế, tốc độ thí nghiệm cắt từ 0,001 đến 4,8 mm.

- Thiết bị được trang bị các đầu đo điện tử: Đầu đo lực chịu được lực kéo và nén ± 5 KN, độ nhạy danh nghĩa 2 mV/V, độ chính xác $\pm 0,003\%$. Đầu đo chuyển vị đứng đo biến dạng nền có hành trình tối đa 10 mm, điện trở danh nghĩa 1 kOhm, độ tuyến tính $\pm 0,25\%$, độ lặp lại 0,002 mm. Đầu đo chuyển vị ngang đo hành trình cắt tối đa 25 mm, điện trở danh nghĩa 1 kOhm, độ tuyến tính $\pm 0,25\%$, độ lặp lại 0,002 mm. Đầu đo áp suất đến 1000 kPa, độ chính xác 0,1 kPa, độ nhạy danh nghĩa 2 mV/V.

2.2.3. Nội dung và trình tự thí nghiệm

Tác giả tiến hành thí nghiệm cắt phẳng từ tháng 6 năm 2021 đến tháng 11 năm 2021 và tháng 01 năm 2023 nhằm xác định mối quan hệ giữa áp lực nén theo phương pháp tuyến và ứng suất cắt theo phương tiếp tuyến trong quá trình chuyển vị cắt ngang của mẫu cát sạn san hô trên bề mặt tấm thép.

Do khối lượng thực hiện lớn, mỗi mẫu thí nghiệm cần thiết hành theo trình tự và yêu cầu kỹ thuật chặt chẽ. Trong phạm vi nghiên cứu của luận án, tác giả tiến hành thí nghiệm số lượng mẫu hữu hạn, sau đó phân tích, xử lý số liệu và tính toán các tham số theo phương pháp trung bình. Số lượng mẫu thực hiện tổng cộng là 44 mẫu nhằm đảm bảo mỗi mẫu cát sạn san hô thực hiện được từ 3 đến 4 lần ở từng cấp áp lực nén mẫu khác nhau.

Căn cứ đặc điểm của thiết bị thí nghiệm cắt phẳng tự động trong phòng để tiến hành các cấp tải thí nghiệm khác nhau, tăng hoặc giảm dần theo bước cấp tải là 50 kPa và 100 kPa. Mỗi cấp tải tương ứng áp lực ngang tại độ sâu của cọc nghiên cứu, trong đó:

- Đối với mẫu cát san hô: Thí nghiệm 16 mẫu ứng với các trường hợp áp lực nén mẫu là: $P_0 = 100 \text{ kPa}$; 200 kPa; 300 kPa; 400 kPa.

- Đối với mẫu cát sạn san hô: Thí nghiệm 16 mẫu trên hộp mẫu có đường kính 63,5 mm với các cấp áp lực nén mẫu là: $P_0 = 50 \text{ kPa}$; 100 kPa; 150 kPa; 200 kPa và 300 kPa. Đồng thời, tiến hành thí nghiệm 12 mẫu trên hộp mẫu đường kính 100 mm ứng với các cấp áp lực nén mẫu là: $P_0 = 100 \text{ kPa}$; 150 kPa; 200 kPa và 300 kPa.

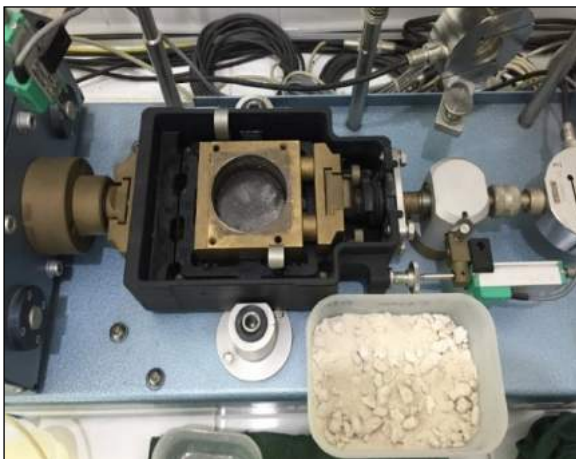
Trình tự tiến hành thí nghiệm cắt phẳng được tác giả căn cứ theo tiêu chuẩn “TCVN 4199-1995: Đất xây dựng - phương pháp xác định sức chống cắt trong phòng thí nghiệm ở máy cắt phẳng” [29], các bước cụ thể được tác giả luận án thực hiện trên mỗi mẫu thí nghiệm như sau:

- Bước 1: Xác định cấp phối mẫu thí nghiệm theo độ chặt tương đối $D=70\%$ xác định, cân khối lượng các thành phần hạt tương ứng đã được tính toán theo Bảng 2.2, thể hiện trên Hình 2.4.



Hình 2.4. Xác định thành phần hạt mẫu thí nghiệm theo cấp phối thiết kế

- Bước 2: Gia công, chế tạo tấm thép có đường kính 63,5 mm, chiều dày bằng chiều dày lòng khuôn mẫu thí nghiệm cắt phẳng và tấm mẫu đường kính 100 mm, lắp đặt tấm thép vào vị trí, Hình 2.5.



Hình 2.5. Chuẩn bị mẫu cát sạn san hô và tấm thép trong khuôn chứa mẫu (hình a - Mẫu đường kính $D=63,5$ mm; hình b - Mẫu đường kính $D=100$ mm)

- Bước 3. Chế tạo mẫu thí nghiệm hỗn hợp cát sạn san hô vào khuôn chứa mẫu của máy cắt phẳng, đầm chặt $D = 70\%$ bằng cách xác định thể tích và khối lượng của mẫu, lắp đá thấm và tấm kê gia tải, tiến hành bơm nước vào khuôn để bão hoà mẫu.

- Bước 4. Lắp đặt các đầu đo chuyển vị, đầu đo lực theo cả phương pháp tuyến và phương ngang của mẫu, sẵn sàng cắt mẫu.

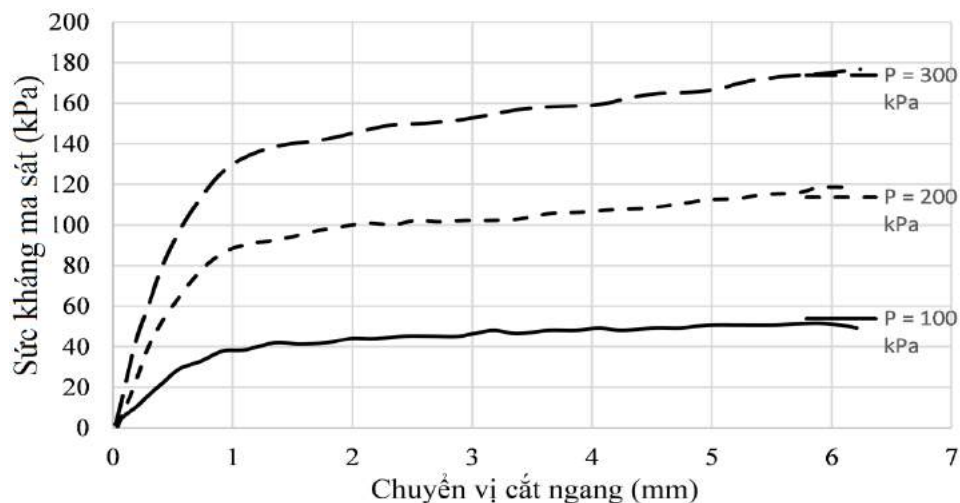
- Bước 5. Cài đặt chương trình cắt mẫu, tiến hành cắt mẫu đến phá hoại, dừng cắt và thu thập, phân tích, xử lý số liệu thực nghiệm nhận được.

2.2.4. Kết quả thí nghiệm

2.2.4.1. Thí nghiệm cắt phẳng tĩnh

Thí nghiệm cắt phẳng tĩnh mẫu cát sạn san hô và cát sạn hô trên bề mặt tấm thép. Căn cứ thiết bị có khả năng cắt phẳng với tốc độ từ: 0,001 đến 4,8 mm/phút, tác giả lựa chọn tốc độ cắt ở mức thấp là 0,8 mm/phút. Các thí nghiệm kết thúc khi chuyển vị ngang tối đa trong hộp cắt đạt giá trị 7 mm đối với mẫu cát sạn hô và 10 mm đối với mẫu cát sạn san hô. Áp lực nén mẫu trong các thử nghiệm thay đổi từ 100 kPa đến 300 kPa. Để có được kết quả trung bình, các thí nghiệm tương tự lặp lại từ 3 đến 4 lần của mỗi mẫu cát sạn san hô. Góc ma sát ngoài và hệ số suy giảm cường độ nhận được từ giá trị trung bình của các thí nghiệm bằng phương pháp bình phương tối thiểu.

Phân tích và xử lý số liệu kết quả thực nghiệm, tác giả nhận được sự phát triển sức kháng ma sát trên bề mặt tương tác của mẫu cát sạn hô với tấm thép cùng với sự gia tăng chuyển vị cắt ngang giữa mẫu cát sạn hô với tấm thép được thể hiện trên Hình 2.6:

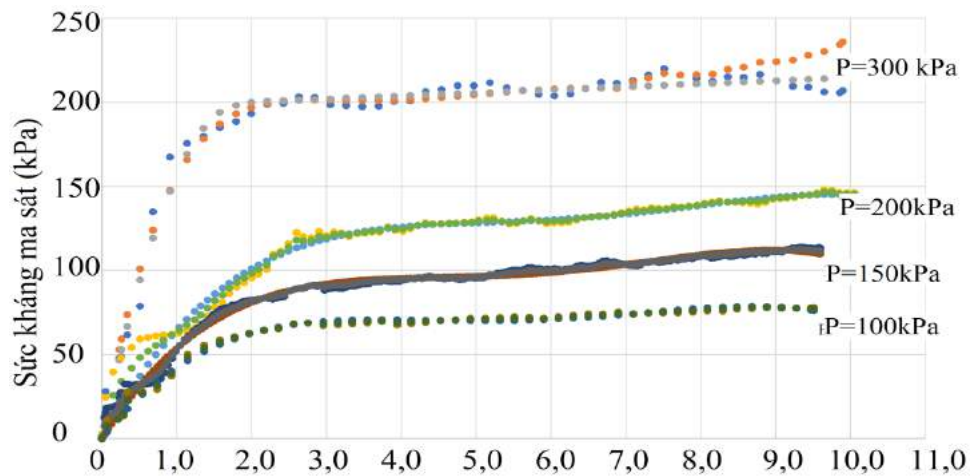


Hình 2.6. Tương quan sức kháng ma sát với chuyển vị cắt ngang giữa cát sạn hô với tấm thép

Nhận định kết quả: từ đồ thị trên Hình 2.6 cho thấy, tương quan giữa sức kháng ma sát với chuyển vị cắt ngang của mẫu cát sạn hô thí nghiệm với tấm thép có dạng đàn dẻo tái bền ở cả ba cấp áp lực pháp tuyến (100 kPa; 200 kPa và 300 kPa) và chuyển vị tới hạn để ma sát đạt đến cường độ lớn nhất ở giai đoạn đàn dẻo là 1,0 mm, nhưng độ cứng kháng trượt khác nhau. Vì đồ thị trên

đoạn chuyển vị cắt ngang từ 0 đến 1 mm có độ dốc tăng theo cấp áp lực pháp tuyến. Sau khi đạt đến chuyển vị cắt ngang tới hạn 1,0 mm thì sức kháng ma sát vẫn tiếp tục tăng lên một mức độ nhất định khi gia tăng chuyển vị cắt ngang. Đồng thời, quy luật tái bền của sức kháng ma sát ở ba cấp áp lực có sự tương đồng nhau, do độ dốc trên ba đồ thị ở giai đoạn này gần như song song với nhau (các đoạn có chuyển vị cắt ngang lớn hơn 1,0 mm).

Kết quả nhận được cũng có quy luật tương đồng đối với thí nghiệm cắt phẳng mẫu cát sạn san hô trên bề mặt tấm thép, nhưng chuyển vị tới hạn của sức kháng ma sát nhận được trung bình là 2,5 mm, thể hiện trên Hình 2.7:



Hình 2.7. Tương quan sức kháng ma sát với chuyển vị cắt ngang giữa cát sạn san hô và tấm thép

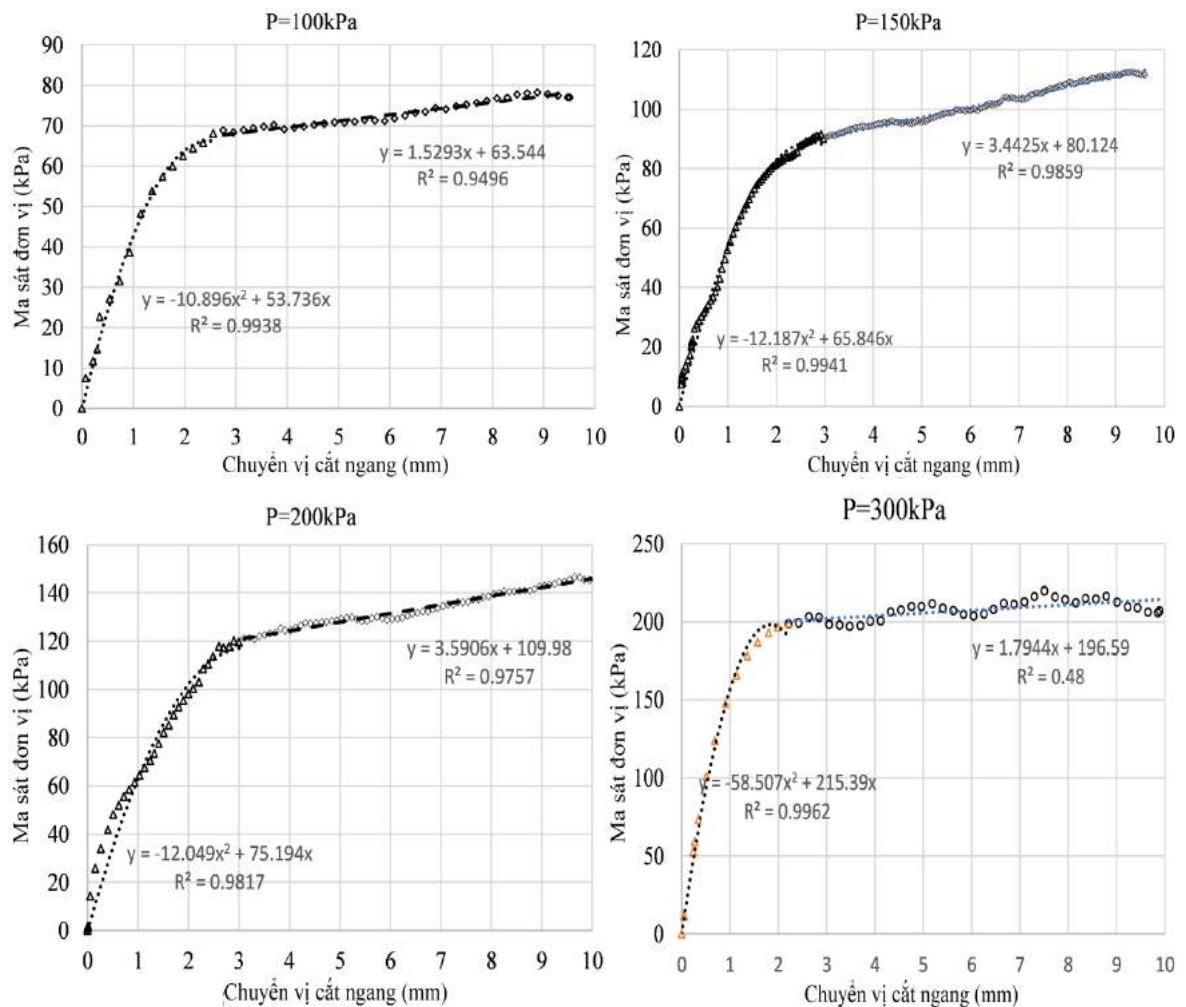
Từ các đồ thị tương quan trên cho thấy trong giai đoạn đàn hồi, ứng suất cắt phẳng tăng tuyến tính với sự gia tăng chuyển vị cắt ngang. Trong giai đoạn đàn hồi - dẻo, ma sát tĩnh chuyển sang ma sát trượt. Trong giai đoạn biến cứng, các hạt nền trên mặt tiếp xúc ở trạng thái ma sát trượt, ứng suất cắt chỉ được gây ra bởi ma sát trượt trên các mặt tiếp xúc, với sự dịch chuyển cắt tăng lên, nhưng ứng suất cắt tăng với tốc độ chậm hơn.

Sức kháng ma sát giữa mẫu cát sạn san hô và tấm thép phụ thuộc vào nhiều yếu tố như áp lực ngang hay áp lực nén mẫu, độ nhám bề mặt kết cấu, thành phần cấp phối và kích thước hạt của mẫu cát sạn san hô thí nghiệm [81], [82], [83], [84]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu thực nghiệm trên, tác giả thực hiện với các mẫu thí nghiệm có cùng cấp phối cát sạn san hô và tấm thép có độ nhám không thay đổi. Nên sức kháng ma sát trong các thí nghiệm này

phụ thuộc chủ yếu vào áp lực nén mẫu, áp lực càng lớn thì sức kháng ma sát càng cao, được thể hiện rõ ràng trên các đồ thị Hình 2.6 và Hình 2.7.

Phân tích hồi quy nhận được tương quan phi tuyến giữa áp lực nén mẫu và ứng suất cắt phẳng. Góc ma sát ngoài trung bình của cát san hô là $27,9^\circ$ với hệ số suy giảm cường độ trung bình là 0,53. Trong khi đó, thí nghiệm đối với bề mặt tiếp xúc giữa mẫu cát sạn san hô với tấm thép trong cùng một phạm vi áp lực nén, góc ma sát ngoài giữa cát sạn san hô với bề mặt tấm thép trung bình là $30,66^\circ$ và hệ số suy giảm cường độ trung bình là 0,56.

Về ảnh hưởng của kích thước hạt được phản ánh từ các kết quả thể hiện trong Hình 2.6 và Hình 2.7: đối với cát san hô có hạt nhỏ hơn, chuyển vị tới hạn của sức kháng ma sát tĩnh là khoảng 1-2 mm, trong khi giá trị này đối với cát sạn san hô lớn hơn, trong phạm vi từ 2-3 mm (trung bình là 2,5 mm).



Hình 2.8. Tương quan sức kháng ma sát và chuyển vị cắt ngang giữa cát sạn san hô với tấm thép các trường hợp áp lực nén khác nhau

Kết quả thí nghiệm cắt phẳng thể hiện mối tương quan giữa sức kháng ma sát của hỗn hợp cát sạn san hô và tấm thép với chuyển vị cắt ngang được thể hiện trên Hình 2.8. Kết quả đã chỉ ra rằng tương quan này có thể được biểu thị bằng hai họ đường cong. Trong đó, đường cong bậc hai ở giai đoạn ban đầu để hạn chế chuyển vị trượt có quan hệ tuyến tính. Quy luật đường cong này rất hữu ích khi tính toán sức kháng bên của cọc trong nền cát sạn san hô. Các đồ thị đường cong quan hệ trên Hình 2.8 cho thấy giới hạn chuyển vị trượt trong khoảng từ 2 mm đến 3 mm (trung bình khoảng 2,5 mm).

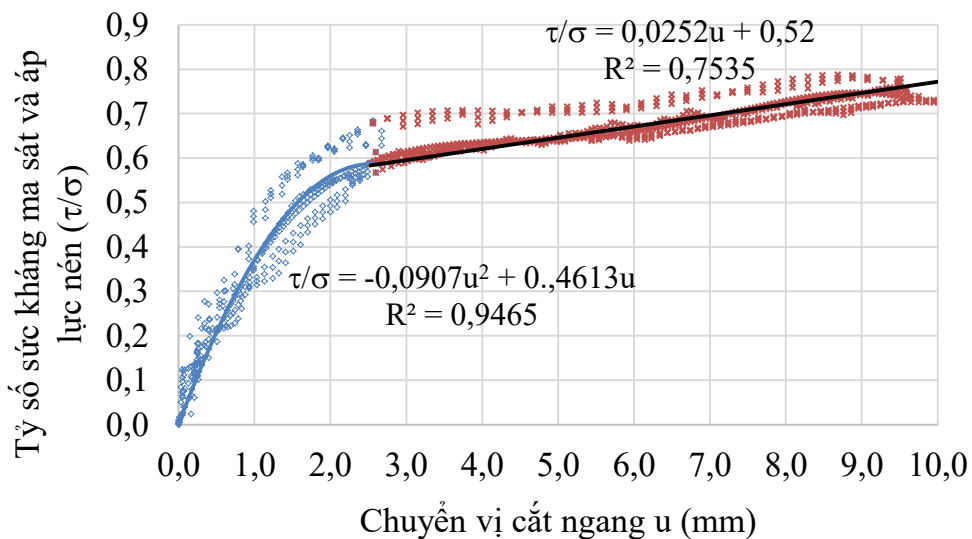
Từ các kết quả nghiên cứu thực nghiệm nhận được, tiến hành phân tích xử lý số liệu để xác định góc ma sát ngoài và hệ số suy giảm cường độ theo phương pháp bình phương tối thiểu. Đây là phương pháp xử lý dữ liệu thống kê đã được chứng minh hiệu quả và được nhiều tác giả sử dụng đối với các bộ số liệu và giảm sự phân tán số liệu từ nhiều thử nghiệm khác nhau. Tổng hợp tham số thí nghiệm góc ma sát ngoài và hệ số suy giảm cường độ ma sát sau khi phân tích, xử lý số liệu cát sạn san hô được thể hiện trên Bảng 2.3:

Bảng 2.3. Góc ma sát ngoài và hệ số suy giảm cường độ xác định từ thí nghiệm cắt phẳng tĩnh

Áp lực nén mẫu (kPa)	Ứng suất cắt lớn nhất (kPa)	Góc ma sát giữa cát sạn san hô và thép (độ)	Hệ số suy giảm cường độ (R_{inter})
<i>a) Trường hợp đường kính mẫu cát sạn san hô 100 mm, cao 20 mm</i>			
100	55,75	29,26	0,53
100	57,04	29,67	0,54
150	84,64	29,52	0,54
200	108,41	28,52	0,52
200	112,98	29,53	0,54
300	160,35	28,13	0,51
<i>b) Trường hợp đường kính mẫu cát sạn san hô 63,5 mm, cao 20 mm</i>			
50	33,02	33,44	0,63
100	68,31	34,34	0,65
150	88,76	30,62	0,56
200	116,07	30,13	0,55
300	203,13	34,10	0,64
Giá trị trung bình		30,66	0,56

Từ kết quả thực nghiệm xác định góc ma sát ngoài giữa mẫu cát sạn san hô và bề mặt tấm thép trên Bảng 2.3, có thể thấy đường kính mẫu có ảnh hưởng nhất định đến kết quả thực nghiệm đối với mẫu cát sạn san hô nghiên cứu. Do đó, tham số góc ma sát ngoài có sự biến động không chỉ loại nền trong thực tế mà còn phụ thuộc vào phương pháp và thiết bị thí nghiệm. Giá trị góc ma sát ngoài trung bình sẽ được tác giả sử dụng để nghiên cứu cơ chế làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn trong chương 3. Trong khi đó, ảnh hưởng của sự biến động tham số góc ma sát ngoài này đến sức chịu tải của cọc được nghiên cứu trong chương 4 của luận án.

Đồ thị tương quan sức kháng ma sát với chuyển vị cắt ngang phụ thuộc vào áp lực nén mẫu, do đó dọc theo chiều sâu cọc có mối tương quan khác nhau, điều này gây khó khăn cho mô hình tính khi xây dựng chương trình tính toán. Do vậy, tác giả xây dựng đồ thị tương quan giữa tỉ số sức kháng ma sát và áp lực nén mẫu với chuyển vị cắt ngang, được thể hiện trên Hình 2.9.



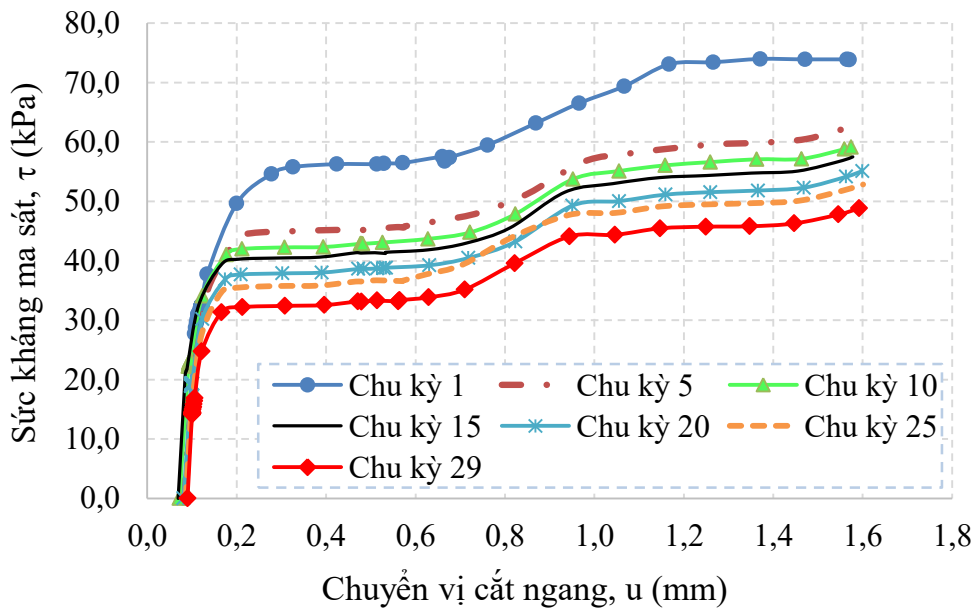
Hình 2.9. Tương quan tỉ số giữa sức kháng ma sát và áp lực nén mẫu với chuyển vị cắt ngang

2.2.4.2. Thí nghiệm cắt phẳng tĩnh lặp

Mặc dù phạm vi nghiên cứu của luận án chỉ xem xét đối với trường hợp tải trọng tĩnh đơn. Tuy nhiên, ngoài thí nghiệm cắt phẳng tĩnh, tác giả đồng thời tiến hành thí nghiệm cắt phẳng tĩnh lặp nhằm đánh giá ứng xử ma sát của

mẫu cát sạn san hô với tám thép sau mỗi lần cắt lặp so với cát tĩnh ban đầu, làm cơ sở luận cứ khoa học để tác giả đánh giá và đặt vấn đề nghiên cứu ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn khi xét đến sự biến động của tham số nền cát sạn san hô trong chương 4 của luận án.

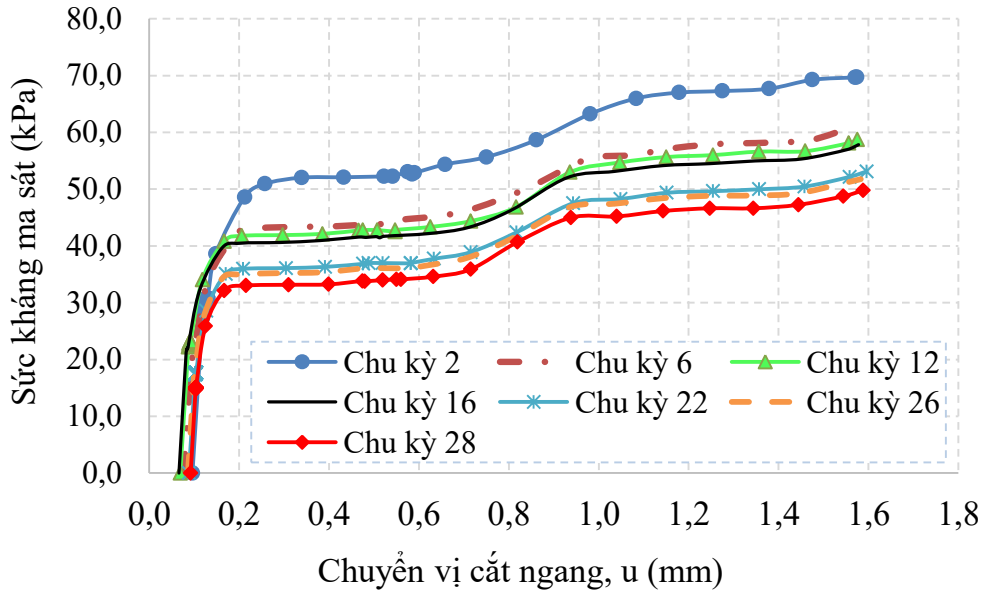
Căn cứ thiết bị thí nghiệm có khả năng cắt phẳng với tốc độ từ: 0,001 đến 4,8 mm/phút, tác giả thí nghiệm 03 mẫu cát lặp trên máy cắt phẳng với tốc độ 0,7 mm/phút. Theo kết quả thí nghiệm cắt tĩnh ở trên, chuyển vị tới hạn của sức kháng ma sát là 2,5 mm. Do đó, biên độ của tải lặp trong thí nghiệm lựa chọn từ 50% đến 80% chuyển vị tới hạn của tải tĩnh, tương ứng chọn là 1,6 mm. Áp lực nén mẫu theo phương pháp tuyển chọn trung bình là $P_0 = 100$ kPa. Mẫu thí nghiệm có cấp phối tương tự trường hợp thí nghiệm cắt tĩnh. Đồ thị tương quan giữa sức kháng ma sát và chuyển vị cắt ngang của mẫu cát sạn san hô trình bày trên Hình 2.10; Hình 2.11 và Hình 2.12:



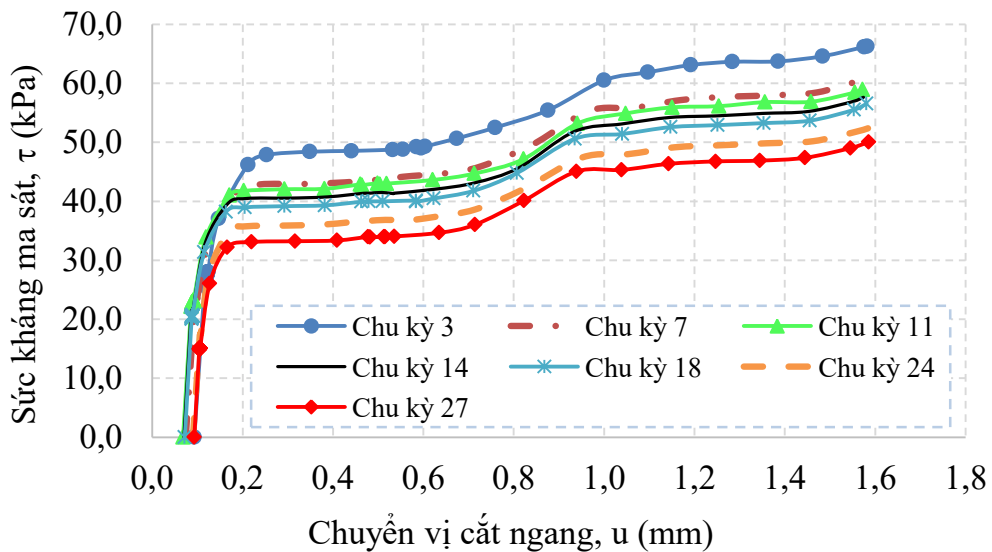
Hình 2.10. Tương quan sức kháng ma sát với chuyển vị cắt ngang ở chu kỳ cắt lặp 1; 5; 10; 15; 20; 25; 29

Từ kết quả nghiên cứu trên các đồ thị Hình 2.10, Hình 2.11, Hình 2.12, sức kháng ma sát có sự suy giảm sau mỗi chu kỳ cắt lặp lại so với chu kỳ trước đó. Đồng thời, sức kháng ma sát ở các chu kỳ gia tải cơ bản có sự gia tăng biến thiên theo chuyển vị cắt ngang, nhưng có các giai đoạn ổn định sức

kháng ma sát khi tăng chuyển vị cắt ngang từ 0,2 mm đến 0,6 mm. Hiện tượng này có thể do sự trượt tương đối giữa mẫu cát sạn san hô với tấm thép.



Hình 2.11. Tương quan sức kháng ma sát với chuyển vị cắt ngang ở chu kỳ cắt lập 2; 6; 12; 16; 22; 26; 28



Hình 2.12. Tương quan sức kháng ma sát với chuyển vị cắt ngang ở chu kỳ cắt lập 3; 7; 11; 14; 18; 24; 27

Với những kết quả thí nghiệm cắt phẳng đã đạt được, tác giả luận án rút ra những nhận xét như sau:

- Góc ma sát ngoài giữa cát sạn san hô với bề mặt tấm thép trong các trường hợp thí nghiệm phụ thuộc vào áp lực nén mẫu tác dụng giữa tấm thép

và cát sạn san hô. Ứng suất cắt giữa tấm thép và cát sạn san hô tỷ lệ thuận với ứng suất pháp tác dụng (trong trường hợp cấp phối thí nghiệm này, hệ số suy giảm cường độ và góc ma sát ngoài thay đổi trong biên độ hẹp và có giá trị trung bình theo Bảng 2.3 là $\delta = 30,66^0$ và $R_{inter} = 0,56$). Đây là căn cứ khoa học để mô hình số tương tác giữa cọc ống thép có cánh xoắn với nền cát sạn san hô trong bài toán nghiên cứu ở chương 3 và chương 4 của luận án;

- Kết quả thực nghiệm nhận được đồ thị tương quan giữa sức kháng ma sát và chuyển vị cắt ngang. Chuyển vị tới hạn của cường độ sức kháng ma sát đạt được ở các trường hợp áp lực nén mẫu khác nhau có giá trị trung bình là 2,5 mm. Đây là cơ sở khoa học để nghiên cứu ứng xử của cọc ống thép có cánh theo phương pháp mô phỏng số Monte-Carlo ở chương 4 của luận án;

- Với độ chặt của cát sạn san hô và tải trọng thí nghiệm cắt tĩnh lặp thực hiện, sức kháng ma sát giảm dần khi tăng số chu kỳ cắt phẳng lặp.

2.3. Nghiên cứu thực nghiệm ma sát giữa cọc ống thép và nền san hô trên mô hình vật lý

2.3.1. Mô tả thí nghiệm

Nghiên cứu thực nghiệm hiện trường ma sát giữa cọc ống thép với nền cát sạn san hô lần cành nhánh được thực hiện theo nhiệm vụ của đề tài cấp quốc gia, mã số ĐTDL-CN.17/15 [6], mà tác giả là một thành viên chính tham gia thí nghiệm, quá trình hạ cọc thể hiện trên Hình 2.13.



Hình 2.13. Hạ cọc và thí nghiệm cọc ống thép có gắn thiết bị đo tại hiện trường nghiên cứu ma sát cọc ống thép và nền san hô [6]

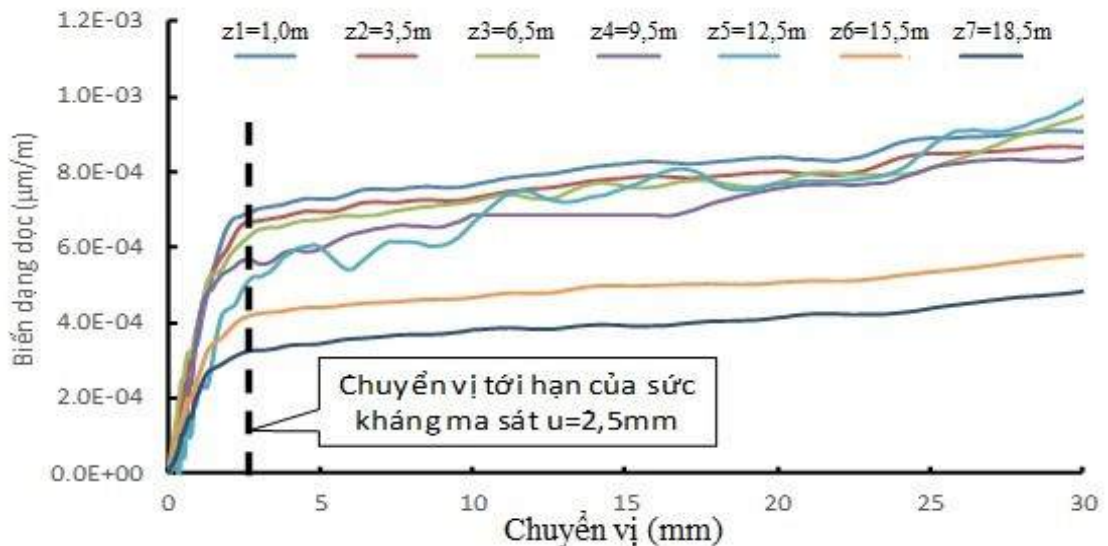
Thời gian thí nghiệm hiện trường từ 5/2016 đến 7/2016 tại 01 đảo nổi xa

bờ trên Biển đông ở tỉnh Khánh Hoà thuộc chủ quyền của Việt Nam. Cọc thí nghiệm là cọc ống thép đường kính 0,2 m; dài 21 m và được hạ vào nền bằng máy khoan hạ cọc do nhóm đề tài thiết kế chế tạo (Hình 2.13).

Mỗi cọc thí nghiệm bố trí thiết bị đo trên thân cọc gồm đầu đo biến dạng dọc trục của cọc, đầu đo áp lực đất và đầu đo áp lực nước lỗ rỗng theo phương ngang tại 07 vị trí có chiều sâu khác nhau dọc thân cọc (ký hiệu từ e_1 đến e_7 tương ứng với độ sâu của cọc trong nền san hô: $z_1 = 1,0$ m; $z_2 = 3,5$ m; $z_3 = 6,5$ m; $z_4 = 9,5$ m; $z_5 = 12,5$ m; $z_6 = 15,5$ m và $z_7 = 18,5$ m).

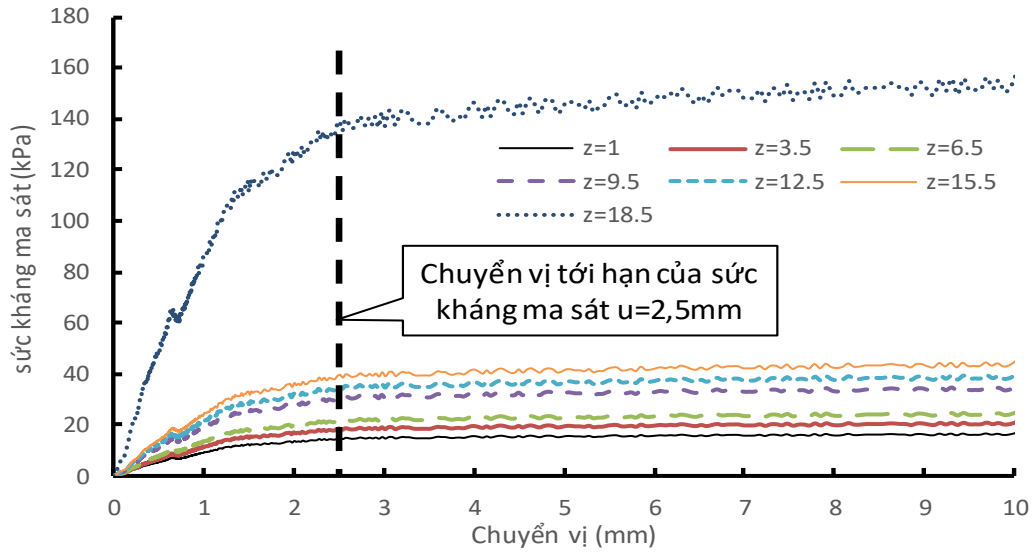
2.3.2. Kết quả thí nghiệm

Kết quả phân tích số liệu đo biến dạng dọc trục theo phương pháp bình phương tối thiểu tại các vị trí dọc thân cọc tương ứng với chuyển vị đầu cọc khi tiến hành thí nghiệm nhỏ tĩnh cọc được thể hiện trên Hình 2.14.



Hình 2.14. Tương quan biến dạng dọc tại các vị trí đo trên thân cọc với chuyển vị khi thí nghiệm nhỏ cọc D200 tại đảo TSL [6]

Biến dạng dọc trục của cọc được xác định từ thực nghiệm thông qua phân tích và xử lý số liệu đo được từ các Tenzomet biến dạng dạng mạch cầu 1/4. Các biến dạng này phụ thuộc vị trí chiều sâu mặt cắt và tương tác của cát sạn san hô với cọc ống thép. Từ biến dạng nhận được tại vị trí mỗi mặt cắt của cọc sẽ tính toán xác định sức kháng ma sát ở các độ sâu của cọc theo phương pháp gián tiếp, xác định được biến thiên sức kháng ma sát dọc thân cọc khi thí nghiệm nhỏ tĩnh cọc, kết quả thể hiện trên Hình 2.15.

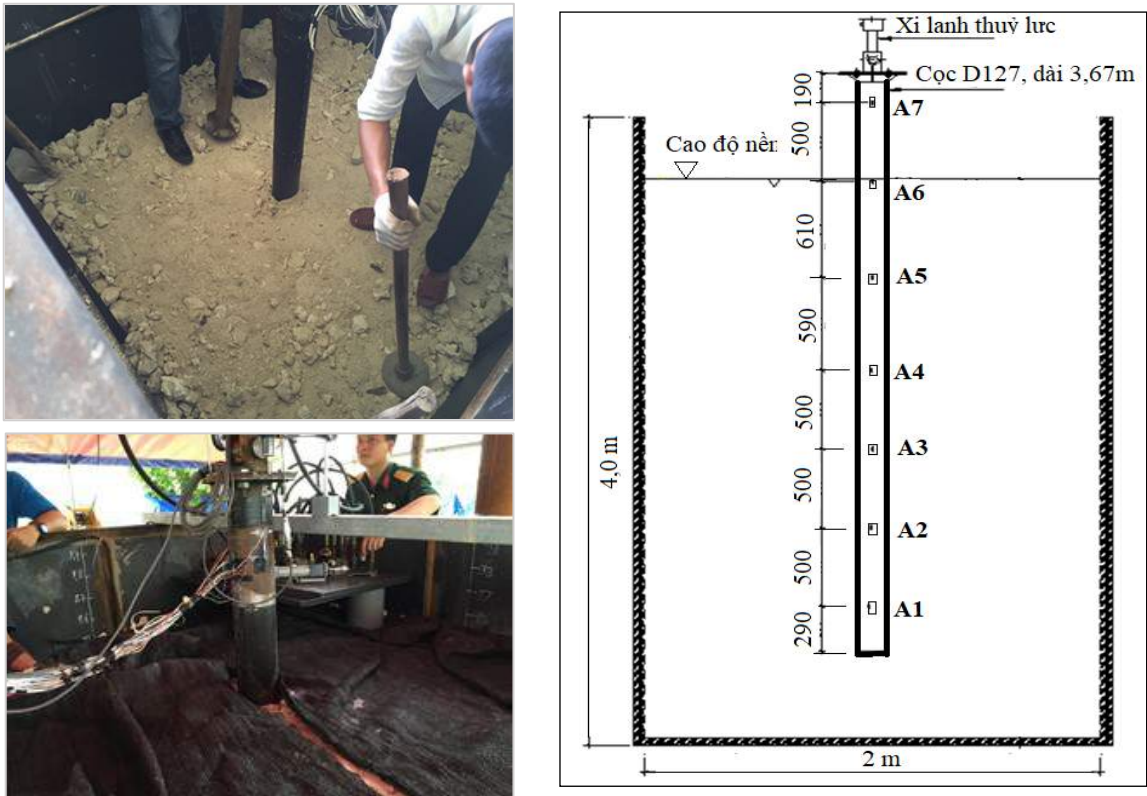


Hình 2.15. Tương quan giữa sức kháng ma sát với chuyển vị khi thí nghiệm cọc D200 tại đảo TSL [6]

Kết quả nghiên cứu trên đồ thị Hình 2.15 cho thấy, chuyển vị tới hạn của sức kháng ma sát trung bình là 2,5 mm, kết quả này khá phù hợp với kết quả nghiên cứu xác định sức kháng ma sát từ thí nghiệm cắt phẳng trong phòng thí nghiệm đã được trình bày trong phần 2.2.

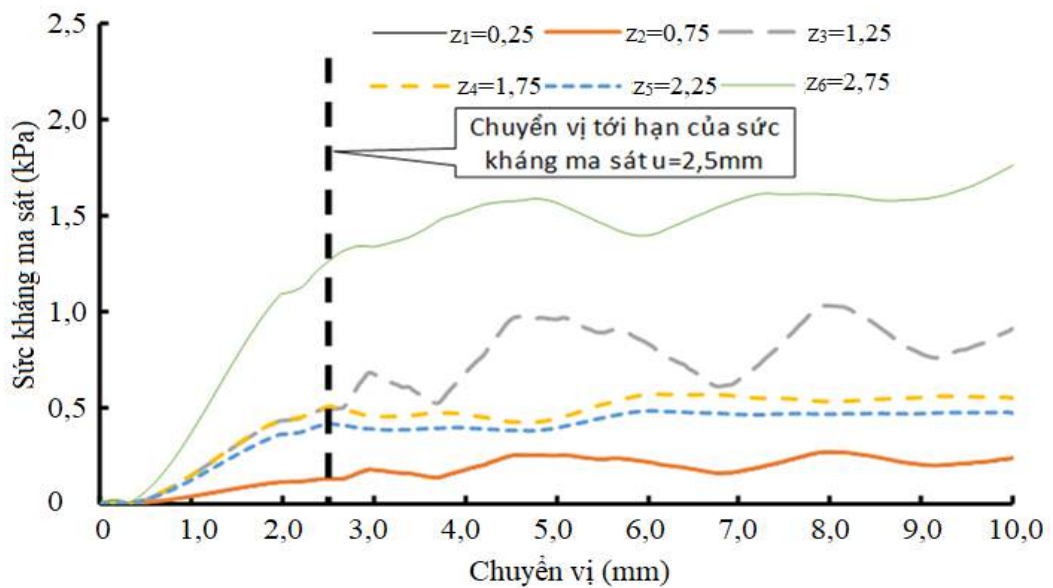
Trong trường hợp thực nghiệm này, sức kháng ma sát xác định theo phương pháp gián tiếp thông qua biến dạng dọc trục của cọc tại 7 vị trí mặt cắt theo chiều sâu của cọc. Trong đó, tại đoạn cọc ở vị trí lắp đặt Tenzomet biến dạng là $z_7 = 18,5$ có sức kháng ma sát lớn hơn các độ sâu khác có thể được giải thích do tại vị trí này có sự tương tác cục bộ của cánh nhánh san hô hiện trường lẫn trong cát sạn san hô với cọc ống thép.

Ngoài thí nghiệm cọc ở hiện trường, công tác thí nghiệm trên mô hình cọc trong nền cát sạn san hô lẫn cánh nhánh chế bị trong phòng thí nghiệm chịu tác dụng nén tĩnh và nén lặp động dọc trục ở đầu cọc cũng được nhóm đề tài thực hiện từ 8/2017 đến 10/2017. Cọc thí nghiệm là ống thép dài 3,67 m, dày 3 mm, đường kính 127 mm được đặt trong bể chứa kích thước 2 x 2 x 4m (Hình 2.16). San hô được đắp trước đến cao độ mũi cọc, sau đó cọc được lắp đặt theo phương thẳng đứng trong bể tại cao độ thiết kế, tiếp tục đổ san hô với cấp phối hạt từ 0,05 mm đến 50 mm để lấp dần từng lớp và đầm chặt.

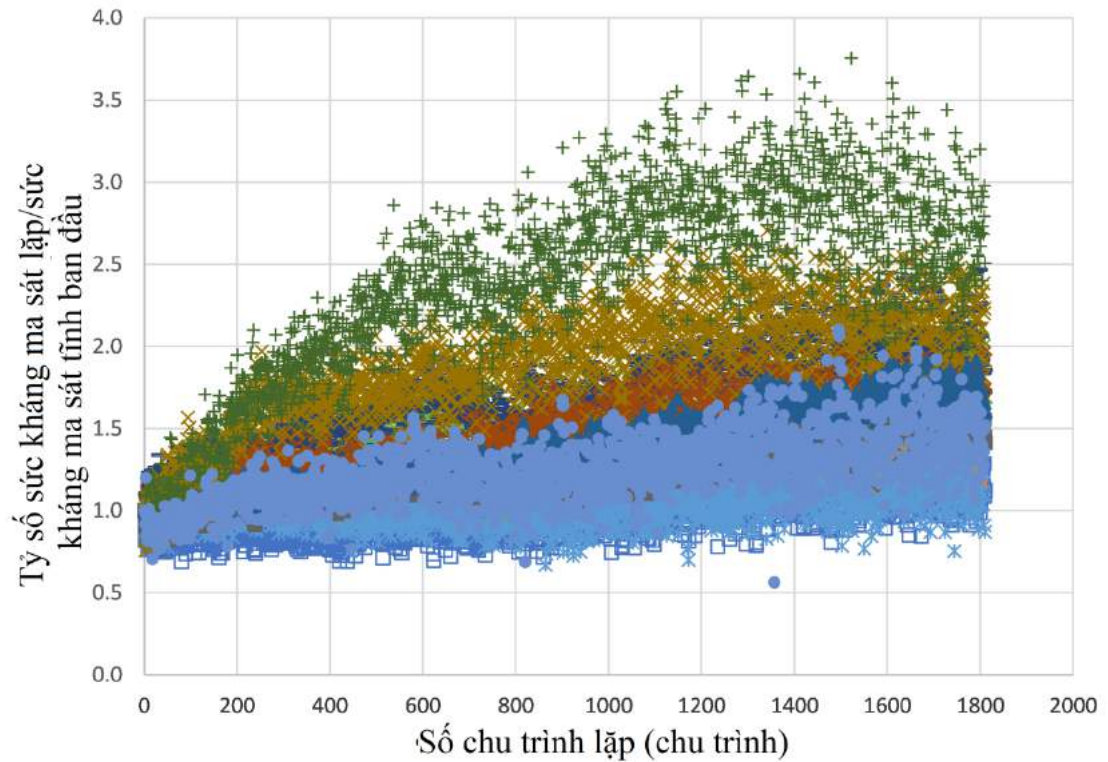


Hình 2.16. Mô hình thí nghiệm cọc đơn ống thép trong phòng
(ký hiệu A1 đến A7 là vị trí lắp đặt các đầu đo biến dạng)

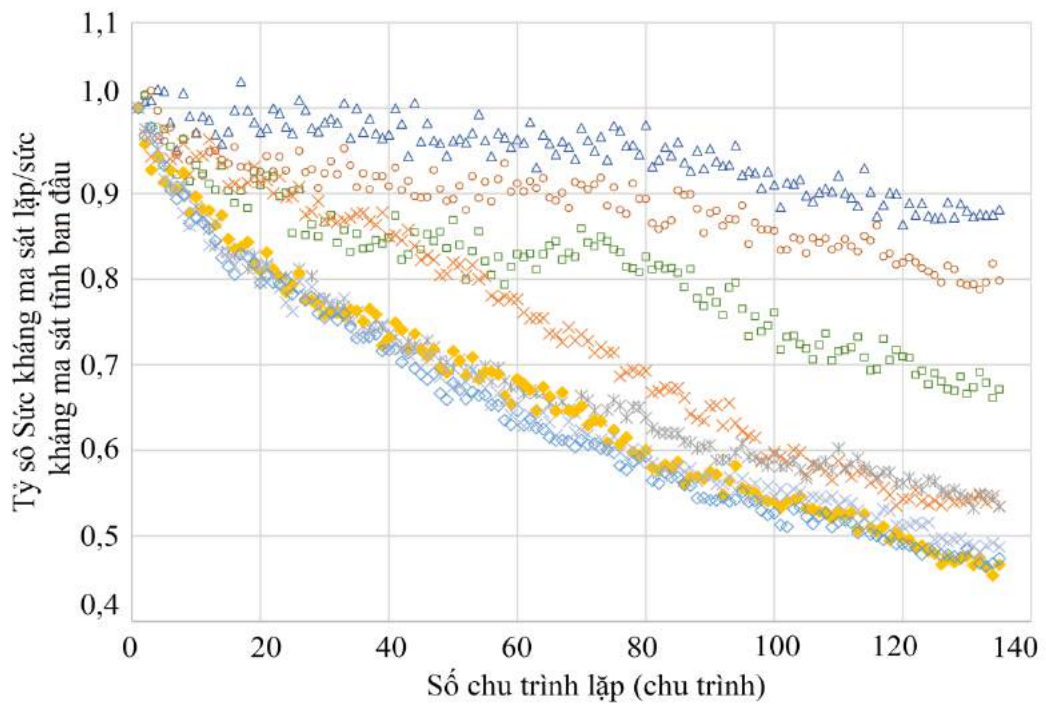
Kết quả thí nghiệm cường độ sức kháng ma sát khi gia tải nén tĩnh, nén lặp động với biên độ tải lặp 30% và 60% của tải nén tĩnh lớn nhất thể hiện trên các Hình 2.17 đến Hình 2.19.



Hình 2.17. Tương quan giữa sức kháng ma sát với chuyển vị khi thí nghiệm nhỏ cọc đường kính 127 mm [6]



Hình 2.18. Biến đổi sức kháng ma sát cọc ống thép - nền san hô của cọc thí nghiệm 127 mm khi gia tải nén lặp $P_{max} = 0,2 T$, tần số 2 Hz [6]



Hình 2.19. Biến đổi sức kháng ma sát cọc ống thép - nền san hô của cọc thí nghiệm 127 mm khi gia tải nén lặp $P_{max} = 0,4 T$, tần số 2 Hz [6]

Từ các kết quả thí nghiệm trên cọc thực tại hiện trường và mô hình cọc trong phòng thí nghiệm tác giả nhận thấy: sức kháng ma sát của cọc với nền san hô tăng khi cọc bắt đầu xuất hiện chuyển vị trượt trong nền và có thể chia làm ba giai đoạn:

+ Giai đoạn 1: khi giá trị chuyển vị $< (1,3 \div 1,5)$ mm thì quan hệ sức kháng ma sát và chuyển vị là tuyến tính;

+ Giai đoạn 2: khi giá trị chuyển vị trong khoảng $(1,5 \div 2,5)$ mm thì tốc độ tăng sức kháng ma sát giảm nhưng trị số sức kháng ma sát vẫn tăng cho đến khi chuyển vị đạt đến giá trị tới hạn của sức kháng ma sát (2,5 mm), tương quan chuyển vị và sức kháng ma sát giai đoạn này là tuyến tính;

+ Giai đoạn 3: sau khi chuyển vị tương đối đạt đến giá trị tới hạn của sức kháng ma sát thì sức kháng ma sát hầu như không tăng mặc dù chuyển vị vẫn tiếp tục tăng (gọi là cường độ sức kháng ma sát).

Các kết quả nhận được từ thực nghiệm, tác giả kiến nghị sức kháng ma sát của cọc ống thép với nền cát sạn san hô ứng với thời điểm chuyển vị trượt của cọc đạt đến 2,5 mm là giá trị cường độ sức kháng ma sát. Cường độ sức kháng ma sát tăng theo độ sâu trong cùng một loại nền cát sạn san hô rời và có liên quan đến độ chặt của nền, quy luật tăng không phải là tuyến tính.

Kết quả thí nghiệm cho thấy cường độ sức kháng ma sát của cọc với nền san hô rời khá phân tán và phụ thuộc nhiều vào cấp phối hạt, độ chặt của nền, khi tỉ lệ hạt to (cành + cục) tăng và độ chặt tăng thì cường độ sức kháng ma sát tăng và kết quả khá ổn định với độ sâu khoảng 1/3 chiều sâu ở mũi cọc. Khi thí nghiệm với tải trọng nén lặp dọc trục của mô hình cọc trong phòng thí nghiệm, nhận thấy nếu biên độ tải $< 30\%$ sức chịu tải cực hạn của cọc (Hình 2.18) thì ma sát giữa cọc với nền san hô có xu hướng giảm ở độ sâu gần bề mặt nhưng tăng với mức tăng không đều theo các độ sâu ở phía dưới, điều này có thể lý giải do tải trọng lặp biên độ nhỏ gây rung động nền quanh cọc và gia tăng độ chặt của nền quanh cọc, trạng thái làm việc của cọc lúc này ở phạm vi gia tăng ổn định. Kết quả ngược lại khi biên độ tải trọng nén lặp dọc

trục lớn hơn, đạt khoảng 60% sức chịu tải cực hạn của cọc thì sức kháng ma sát cọc với nền san hô đều giảm tại tất cả các độ sâu (Hình 2.19).

Mặc dù kết quả thí nghiệm của đề tài ĐTĐL-CN.17/15 thực hiện với loại nền cát sạn san hô lẫn cành nhánh và cực tăng có cấp phối cỡ hạt của nền lớn hơn so với đối tượng nền cát sạn san hô nghiên cứu của luận án, nhưng có thể thấy quy luật hình thành và phát triển sức kháng ma sát giữa vật liệu cọc ống thép với cát sạn san hô theo các cấp áp lực pháp tuyến do tác giả thực hiện là tin cậy và có cơ sở khoa học để áp dụng.

2.4. Nghiên cứu thực nghiệm xác định tham số mô hình cát sạn san hô trong phòng thí nghiệm

2.4.1. Mẫu và thiết bị thí nghiệm

Căn cứ đặc điểm của thiết bị thí nghiệm biên chế tại phòng thí nghiệm, trong phạm vi nghiên cứu của luận án, tác giả tiến hành thực nghiệm nén 3 trục với các mẫu cát sạn san hô có kích thước hạt thô lớn nhất là $D_{\max} = 20$ mm (mẫu thí nghiệm tương ứng với cấp áp lực buồng là $P_0 = 50$ kPa; 100 kPa và 150kPa). Mẫu thí nghiệm được xác định khi sử dụng bộ sàng tiêu chuẩn có các kích thước 20 mm; 10 mm; 5 mm; 2 mm; 1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,1 mm và nhỏ hơn 0,1 mm. Lựa chọn mẫu thí nghiệm có chiều cao bằng 10 lần kích thước hạt lớn nhất và chiều rộng bằng 5 lần kích thước hạt lớn nhất. Do đó, kích thước mẫu thí nghiệm 3 trục có đường kính 100 mm và chiều cao 200 mm, độ chặt nghiên cứu là 70%, tính toán và phân tích khối lượng thành phần tương ứng với mỗi kích thước cỡ sàng đã thể hiện trên Bảng 2.2 ở Phần 2.2. Đồng thời, xây dựng đường cong cấp phối của mẫu thí nghiệm 3 trục tương tự như trường hợp thí nghiệm cắt phẳng và được trình bày trên Hình 2.3.

Các tham số đặc trưng cơ lý của mẫu cát sạn san hô bao gồm: khối lượng riêng (ρ_s) được xác định theo tiêu chuẩn [26]; hệ số rỗng lớn nhất (e_{\max}), hệ số rỗng nhỏ nhất (e_{\min}), đường kính hạt trung bình (D_{50}), hệ số rỗng tự nhiên (e_o), hệ số không đồng nhất (C_u) và hệ số đường cong phân bố thành phần hạt (C_s) xác định theo tiêu chuẩn [28]; trọng lượng thể tích tự nhiên (γ_{unsat}), trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà (γ_{sat}) xác định theo tiêu chuẩn [27]. Kết

quả nghiên cứu được tổng hợp ở trong bảng Bảng 2.4:

Bảng 2.4. Tổng hợp tham số cơ lý các mẫu cát sạn san hô thí nghiệm

Tham số	ρ_s (t/m ³)	e_{\max}	e_{\min}	D_{50} (mm)	C_u	C_s
Giá trị	2,616	0,763	0,469	0,83	13,20	0,68

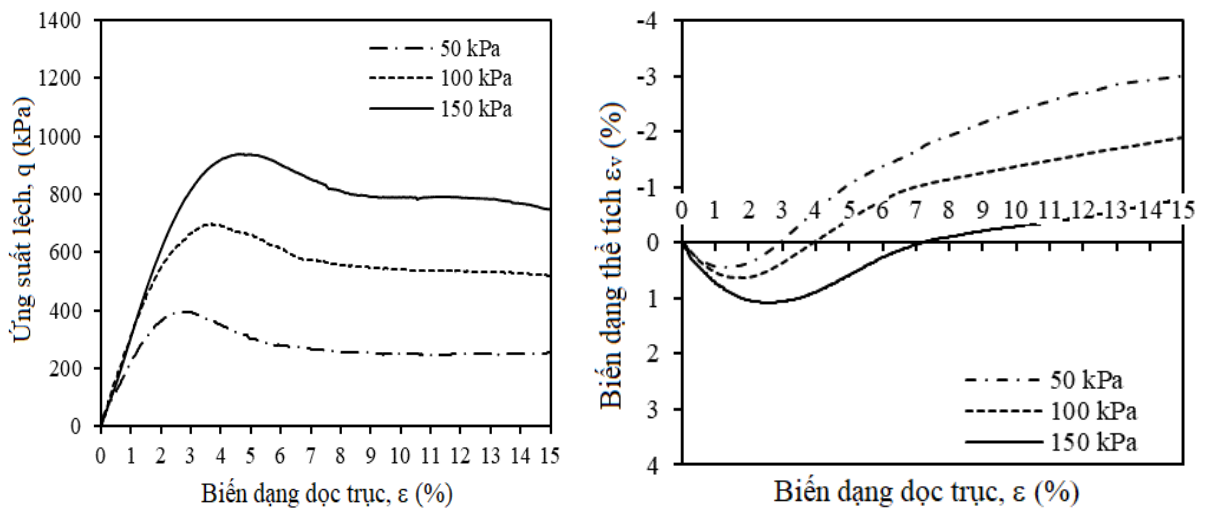
2.4.2. Tham số thí nghiệm

Đặc trưng của mô hình vật liệu cát sạn san hô cần thí nghiệm, bao gồm: các tham số đàn hồi (mô đun biến dạng E, hệ số Poisson ν); các tham số độ bền (góc ma sát trong φ , lực dính đơn vị biểu kiến c); góc trương nở Ψ (độ).

Việc xác định các tham số đặc trưng của vật liệu cát sạn san hô có thể được thực hiện bằng các thí nghiệm trên mẫu vật liệu và xem là đại diện cho khối nền tại hiện trường tương ứng với vị trí lấy mẫu. Thực hiện các thí nghiệm trong điều kiện thoát nước trên thiết bị thí nghiệm nén 3 trục, gia tải tĩnh của mẫu cát sạn san hô có độ chặt tương đối là $D_c = 70\%$ với các trường hợp áp lực hông thay đổi $P_0 = 50$ kPa; 100 kPa và 150 kPa.

2.4.3. Kết quả thí nghiệm

Phân tích số liệu thí nghiệm nhận được, trên Hình 2.20 thể hiện kết quả ứng xử của mẫu thí nghiệm nén 3 trục tĩnh thông qua đường cong mối quan hệ giữa biến dạng dọc trục với ứng suất lệch và biến dạng thể tích.

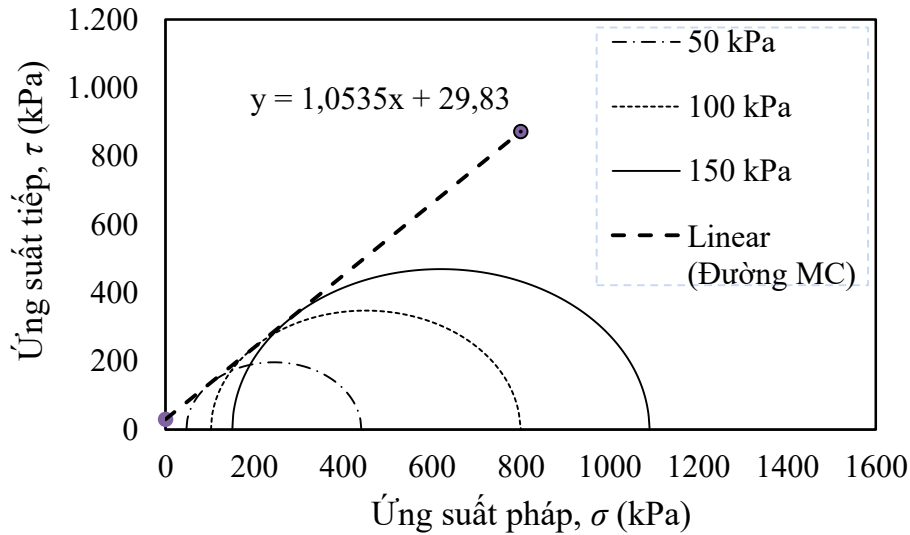


a. Quan hệ biến dạng dọc trục và ứng suất lệch

b. Quan hệ biến dạng dọc trục và biến dạng thể tích

Hình 2.20. Kết quả thí nghiệm nén 3 trục mẫu cát sạn san hô

Từ kết quả nghiên cứu trên Hình 2.20, nhận thấy cát sạn san hô có sự hoá mềm phi tuyến sau cực đỉnh. Vị trí của các đỉnh này thay đổi tùy áp lực buồng mẫu thí nghiệm và biến dạng dọc trục, trong trường hợp mẫu cát sạn san hô nghiên cứu này vào khoảng 3% đến 5%.



Hình 2.21. Vòng tròn Mohr ứng suất từ kết quả thí nghiệm 3 trục

Căn cứ vào đồ thị tương quan giữa độ lệch ứng suất $q=(\sigma'_1-\sigma'_3)$ và biến dạng dọc trục (ϵ) trên Hình 2.20, xác định được độ lệch ứng suất cực đại $(\sigma'_1-\sigma'_3)_{\max}$ (là giá trị lớn nhất trong các giá trị độ lệch ứng suất) và độ lệch ứng suất dư $(\sigma'_1-\sigma'_3)_{res}$ (là giá trị độ lệch ứng suất đạt được không đổi mặc dù biến dạng dọc trục vẫn tăng).

Để xác định các tham số chống cắt của mẫu cát sạn san hô thí nghiệm, tác giả sử dụng phương pháp bình phương tối thiểu. Khi đó, các tham số chống cắt của mẫu cát sạn san hô ở trạng thái độ bền cực đại (góc ma sát trong φ_p và lực dính đơn vị biểu kiến c_p) và ở trạng thái độ bền dư (góc ma sát trong φ_r và lực dính đơn vị biểu kiến c_r) được xác định theo các biểu thức sau:

$$\varphi_{p/r} = \tan\left(\frac{\frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (\sigma'_{1i}) \cdot \sigma'_{3i} - \sum_{i=1}^n (\sigma'_{1i}) \cdot \sum_{i=1}^n \sigma'_{3i}}{n \sum_{i=1}^n (\sigma'_{3i})^2 - (\sum_{i=1}^n \sigma'_{3i})^2} - 1}{2 \sqrt{\frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (\sigma'_{1i}) \cdot \sigma'_{3i} - \sum_{i=1}^n (\sigma'_{1i}) \cdot \sum_{i=1}^n \sigma'_{3i}}{n \sum_{i=1}^n (\sigma'_{3i})^2 - (\sum_{i=1}^n \sigma'_{3i})^2}}}\right); \quad (2.4)$$

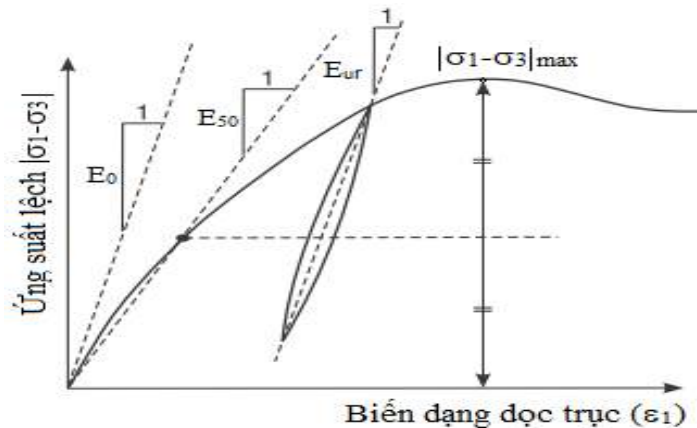
$$c_{p/r} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma'_{1i}) \cdot \sum_{i=1}^n (\sigma'_{3i})^2 - \sum_{i=1}^n \sigma'_{3i} \cdot \sum_{i=1}^n (\sigma'_{1i}) \cdot \sigma'_{3i}}{n \sum_{i=1}^n (\sigma'_{3i})^2 - (\sum_{i=1}^n \sigma'_{3i})^2}}{2 \sqrt{\frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (\sigma'_{1i}) \cdot \sigma'_{3i} - \sum_{i=1}^n (\sigma'_{1i}) \cdot \sum_{i=1}^n \sigma'_{3i}}{n \sum_{i=1}^n (\sigma'_{3i})^2 - (\sum_{i=1}^n \sigma'_{3i})^2}}}} \quad (2.5)$$

Kết quả phân tích số liệu thực nghiệm và tính toán xác định các tham số chống cắt ở trạng thái cực đỉnh và trạng thái dư cũng như góc trương nở của mô hình nền thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 2.5:

Bảng 2.5. Tham số chống cắt mẫu cát sạn san hô thí nghiệm

Tham số chống cắt cực đỉnh		Tham số chống cắt trạng thái dư	
φ_p (°)	c_p (kPa)	φ_r (°)	c_r (kPa)
46,49	29,83	44,96	7,09

Từ đồ thị tương quan giữa biến dạng dọc trục và ứng suất lệch trên Hình 2.20, xác định được mô đun biến dạng trung bình (E_{50}) trường hợp cực đỉnh tương ứng với $P_0 = 50$ kPa; $P_0 = 100$ kPa và $P_0 = 150$ kPa theo Hình 2.22:



Hình 2.22. Đồ thị xác định mô đun biến dạng trung bình E_{50}

Hệ số Poisson (ν) xác định theo biểu thức (2.6) và góc trương nở (ψ) được xác định theo đồ thị tương quan giữa biến dạng dọc trục với biến dạng thể tích ở Hình 2.23:

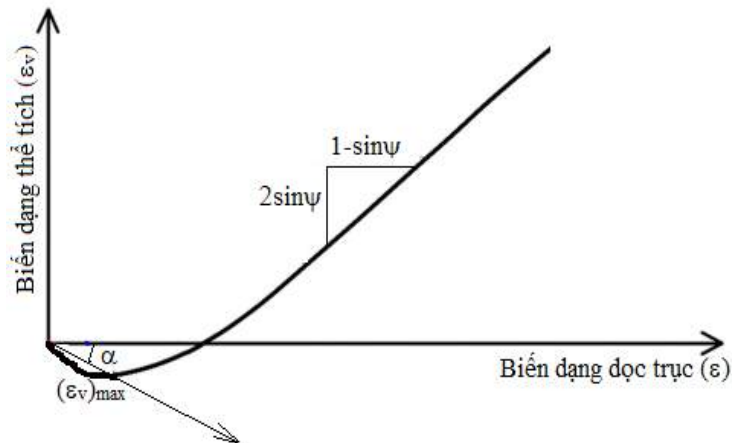
$$\nu = \frac{\varepsilon - \varepsilon_v}{2\varepsilon} = \frac{1 - \varepsilon_v / \varepsilon}{2} = \frac{1 - tg\alpha}{2}, \quad (2.6)$$

trong đó:

ε - biến dạng dọc trục của mẫu cát sạn san hô;

ε_v - biến dạng thể tích của mẫu cát sạn san hô;

α - góc tạo bởi trục biến dạng dọc trục với đường nối giữa điểm gốc và điểm có biến dạng thể tích lớn nhất (biến dạng thể tích lớn nhất này phụ thuộc áp lực buồng P_0 trong các trường hợp thí nghiệm khác nhau).



Hình 2.23. Đồ thị tương quan biến dạng dọc trục và biến dạng thể tích

Kết quả thí nghiệm xác định được mô đun biến dạng trung bình E_{50} và hệ số Poisson của các mẫu tương ứng với các trường hợp áp lực buồng thí nghiệm khác nhau, được thể hiện trên Bảng 2.6:

Bảng 2.6. Mô đun biến dạng E_{50} , hệ số Poisson và góc trương nở

Mô đun biến dạng trung bình E_{50} (MPa)			Hệ số Poisson (ν)	Góc trương nở ψ ($^\circ$)
$P_0= 50$ kPa	$P_0= 100$ kPa	$P_0= 150$ kPa		
22,40	30,86	31,31	0,34	9,52

Từ Bảng 2.6 nhận thấy, mô đun biến dạng tăng khi áp lực buồng mẫu thí nghiệm tăng. Trong khi đó, hệ số Poisson ổn định với giá trị trung bình là 0,34 và góc trương nở trung bình là $9,52^\circ$. Với kết quả thí nghiệm nén 3 trục các mẫu cát sạn san hô đã thực hiện, tác giả rút ra đánh giá như sau:

– Các tham số sức chống cắt của mẫu cát sạn san hô nhận được từ kết quả thí nghiệm ngoài góc ma sát trong như nền đất rời thông thường còn xuất hiện lực dính đơn vị, theo khái niệm một số tác giả đã công bố kết quả nghiên

cứu gọi là lực dính đơn vị biểu kiến, lực dính này được hình thành do sự gài móc của các hạt cát sạn san hô [6], [97], [98]. Trong đó, theo kết quả thí nghiệm thì góc ma sát trong của mẫu cát sạn san hô nghiên cứu là $\varphi = 46,49^\circ$ và lực dính đơn vị biểu kiến có giá trị $c = 29,83 \text{ kN/m}^2$. Các tham số chống cắt này phụ thuộc vào khối lượng riêng khô, cấp phối hạt, hình dạng hạt và độ bão hoà. Kết quả nghiên cứu này phù hợp với kết quả nghiên cứu của tác giả Wang X.Z. đã công bố đối với san hô rời năm 2011 và 2016 với góc ma sát trong từ $23,8^0$ đến $56,0^0$ và lực dính đơn vị biểu kiến từ 24,5 kPa đến 316,2 kPa [97], [98]. Giá trị góc ma sát trong là khá lớn và đặc biệt có lực dính đơn vị biểu kiến của mẫu cát sạn san hô thí nghiệm thể hiện sự khác biệt lớn đối với nền đất rời thông thường.

– Ở độ chặt tương đối là $D_c = 70\%$, mô đun biến dạng trung bình của mẫu cát sạn san hô thí nghiệm là $E_{50} = 30,86 \text{ kN/m}^2$ (tương ứng với cấp áp lực buồng thí nghiệm là $P_0 = 100 \text{ kPa}$), góc trương nở của nền là $\psi = 9,52$ độ và hệ số Poisson là $\nu = 0,34$.

– Trên cơ sở các kết quả thực nghiệm nén tĩnh mẫu cát sạn san hô bằng thiết bị 3 trục, phân tích và tổng hợp số liệu thực nghiệm nhận được giá trị các tham số mẫu cát sạn san hô thể hiện trên Bảng 2.7:

Bảng 2.7. Tổng hợp các tham số mẫu cát sạn san hô thí nghiệm

Mô hình	Ψ	φ	c	γ_{sat}	γ_{unsat}	ν	E
Mohr -	(độ)	(độ)	(kN/m^2)	(kN/m^3)	(kN/m^3)		(kN/m^2)
Coulomb	9,52	46,49	29,83	20,38	16,80	0,34	30,86E+3

– Các tham số này được tác giả ứng dụng vào tính toán ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô ở chương 3 và chương 4.

2.5. Kết luận chương 2

Từ những kết quả nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm theo nội dung đã trình bày ở trên. Tuy khối lượng thí nghiệm chưa lớn, nhưng trong phạm vi nghiên cứu của luận án, tác giả có thể rút ra một số kết luận sau:

1) Sử dụng thiết bị thí nghiệm cắt phẳng tự động trong phòng thí nghiệm

Địa kỹ thuật tại Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt để cải tiến thiết bị bằng cách bổ sung tấm thép vào hộp mẫu của thiết bị thay cho cát sạn san hô nhằm xác định tham số tương tác của mẫu cát sạn san hô trong điều kiện cùng cấp phối có kích thước hạt thô lớn nhất là 20 mm ở độ chặt tương đối 70% với tấm thép;

2) Thí nghiệm trong phòng các mẫu cát sạn san hô có tính chất tương tự trên máy thí nghiệm nén 3 trục trong điều kiện thoát nước với các trường hợp áp lực hông $P_0 = 50 \text{ kPa}$; 100 kPa và 150 kPa ;

3) Xác định được các tham số cát sạn san hô theo mô hình Mohr - Coulomb và làm sáng tỏ sức kháng ma sát khi nghiên cứu tương tác giữa cọc ống thép và nền cát sạn san hô, kết quả nghiên cứu được tác giả tổng hợp trong Bảng 2.3 và Bảng 2.7;

4) Kết quả nhận được từ nghiên cứu thực nghiệm các mẫu cát sạn san hô và thí nghiệm ma sát của cọc ống thép tròn trơn ngoài hiện trường là luận cứ khoa học của bộ số liệu tham số đầu vào để tác giả tính toán, khảo sát nghiên cứu sự làm việc của cọc ống thép có và không có cánh xoắn gia cường trong chương 3. Đồng thời, lập luận sử dụng một số tham số tiền định là giá trị mục tiêu (hay giá trị kỳ vọng) khi xét đến sự biến động ngẫu nhiên một số tham số cát sạn san hô trong nhiệm vụ nghiên cứu ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn ở chương 4 của luận án.

Chương 3. NGHIÊN CỨU SỰ LÀM VIỆC CỦA CỌC ỚNG THÉP CÓ CÁNH XOẮN TRONG NỀN CÁT SẠM SAN HỒ

Ở chương này, luận án sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn là công cụ tính toán nghiên cứu sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn. Tác giả mô phỏng số bài toán tương tác 3 chiều của cọc ống thép có cánh xoắn với nền cát sạn san hồ trên phần mềm PLAXIS 3D - Version 20.1.0.98 nhằm đánh giá ảnh hưởng của tham số cánh xoắn như: số lượng cánh, độ sâu vị trí cánh, khoảng cách cánh, đường kính và bước cánh. Từ đó kết luận và kiến nghị các tham số cánh xoắn hợp lý của giải pháp thiết kế cọc ống thép cải tiến sử dụng ở các công trình xây dựng trên khu vực nền cát sạn san hồ.

3.1. Mục tiêu nghiên cứu và các giả thiết tính toán

3.1.1. Mục tiêu nghiên cứu

Đã có những công trình nghiên cứu phân tích sự làm việc của cọc ống thép trong nền san hồ nói chung, nhưng đều tập trung nghiên cứu dạng cọc tròn trơn truyền thống hoặc có cánh ngang phẳng khó có khả năng thi công trong thực tiễn, mà chưa có kết quả nghiên cứu được công bố và chưa được áp dụng vào trong thực tế đối với giải pháp thiết kế cọc có cánh xoắn gia cường nhằm tăng hiệu quả khai thác móng công trình, đảm bảo khả thi khi thi công hạ cọc trong nền cát sạn san hồ. Trong khi đó, thực tiễn đặt ra đòi hỏi ngày càng cao về giải pháp thiết kế có kết cấu hợp lý nhằm giảm chi phí xây dựng, đẩy nhanh tiến độ thi công, nhưng đảm bảo mục tiêu khai thác đặt ra.

Do vậy, mục tiêu nghiên cứu sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn nhằm đánh giá ứng xử của cọc ống thép đó trong nền cát sạn san hồ khi khảo sát với các cấu hình cánh xoắn khác nhau, làm cơ sở luận cứ khoa học để các kỹ sư thiết kế cân nhắc đề xuất giải pháp kết cấu cọc nói riêng và móng cọc công trình xây dựng nói chung khi được đầu tư nghiên cứu, thiết kế và thi công các công trình này trên khu vực thềm san hồ ở các đảo xa bờ tỉnh Khánh Hoà, thuộc chủ quyền của Việt Nam.

3.1.2. Các giả thiết và giới hạn nghiên cứu

Để phản ánh một cách khách quan và phù hợp với thực tế tương tác của cọc ống thép với nền cát sạn san hồ, thì một vấn đề rất quan trọng là xác định

và tính toán theo mô hình cơ học vật liệu phù hợp. Các mô hình này được hình thành trên cơ sở các nguyên lý cơ học dựa theo kết quả thực nghiệm hoặc trên các nguyên tắc lý thuyết đã được kiểm nghiệm.

Trong quá trình tính toán, ứng xử tương tác của cọc ống thép có cánh xoắn với nền cát sạn san hô tuân theo các giả thiết sau:

+ Cọc không bị phá hoại (đảm bảo điều kiện sức chịu tải của cọc theo vật liệu), vật liệu kết cấu cọc ống thép ứng xử đàn hồi, biến dạng tuyến tính. Cọc liên kết vào nền theo phương thẳng đứng và đã ổn định.

+ Nền cát sạn san hô xung quanh cọc không bị phá hoại (đảm bảo sức chịu tải của cọc theo đất nền), tính chất của lớp vật liệu nền được coi đồng nhất đẳng hướng, đàn dẻo phi tuyến. Trong quá trình làm việc không xem xét thay đổi các tham số nền cát sạn san hô có thể xảy ra do sự lan truyền của sóng chấn động trong nền đó khi hạ cọc ống thép có cánh xoắn [15].

+ Khi chịu tải, điều kiện liên tục về chuyển vị được thỏa mãn trên bề mặt tiếp xúc giữa các lớp nền nhưng trên bề mặt tiếp xúc của kết cấu và nền có thể xảy ra sự trượt và tách tương đối của kết cấu cọc so với nền.

Trong thiết kế, sức chịu tải của cọc được tính toán là giá trị nhỏ nhất giữa sức chịu tải của cọc theo vật liệu và sức chịu tải của cọc theo đất nền [5], [20]. Đối với các cọc thi công theo công nghệ đóng, ép, xoay hạ cọc thì sức chịu tải của cọc theo vật liệu thường lớn hơn nhiều sức chịu tải theo đất nền. Do vậy, Luận án chỉ nghiên cứu sức chịu tải của cọc ống thép theo đất nền để đánh giá sự làm việc và ứng xử của cọc ống thép trong nền cát sạn san hô.

3.2. Mô phỏng số tương tác của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô

3.2.1. Mô hình tương tác tổng quát

3.2.1.1. Cơ sở lý thuyết tính toán

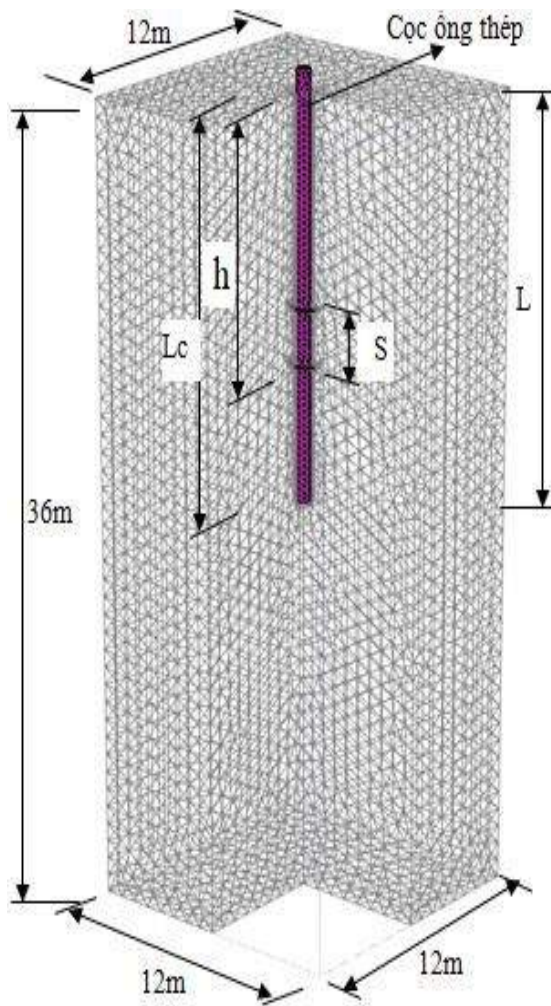
Trong nội dung nghiên cứu chương này, tác giả sử dụng phương pháp PTHH để tính toán và đánh giá ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn. Nội dung cơ sở lý thuyết tính toán được trình bày trong “Phụ lục 4”.

3.2.1.2. Mô tả mô hình tính

Xét bài toán cọc ống thép có cánh xoắn đã hạ ổn định vào nền cát sạn

san hô bằng phương pháp khoan xoay hạ cọc, cọc thẳng đứng trong nền và chịu tác dụng của chuyển vị cưỡng bức dọc trục trong cả 2 trường hợp khi kéo hoặc nén tác dụng tại đầu cọc, lòng cọc rỗng và mũi cọc bịt kín. Khi cọc có cánh xoắn gia cường trên thân cọc thì không thỏa mãn tính đối xứng trục, nên cần thiết phân tích tính toán tương tác bằng mô hình số 3 chiều.

Do vậy, mô hình tương tác tổng quát của bài toán nghiên cứu này được tác giả sử dụng là mô hình số 3 chiều của cọc ống thép có cánh xoắn làm việc đồng thời với nền cát sạn san hô. Tác giả tiến hành phân tích và giải bài toán tương tác theo phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH). Cấu tạo mô hình và một số tham số cơ bản của cọc đơn ống thép có cánh xoắn, nền cát sạn san hô của bài toán khảo sát thể hiện trên Hình 3.1.



Hình 3.1. Mô hình bài toán khảo sát trường hợp cọc có 2 cánh

Tham số cát sạn san hô:

- Loại nền: Hỗn hợp cát sạn san hô có kích thước $D_{\max} \leq 20$ mm;
- Mô hình: Mohr-Coulomb (MC);
- Mô đun biến dạng: E;
- Góc ma sát trong: φ ;
- Lực dính đơn vị biểu kiến: c;
- Hệ số Poisson: ν ;
- Trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà: γ_{sat} .

Tham số cọc ống thép:

- Mô hình: Đàn hồi tuyến tính (EL);
- Mô đun đàn hồi: E_c ;
- Hệ số Poisson: ν_c ;
- Chiều dài cọc: L_c ;
- Chiều dài cọc trong nền: L;
- Đường kính cọc: d;
- Chiều dày thành cọc: δ_1 ;
- Đường kính cánh: D;
- Chiều dày cánh: δ_2 ;
- Độ sâu vị trí cánh trên cọc: h;
- Khoảng cách cánh: S.

Tải trọng: Nén, kéo tại đầu cọc, có xét ảnh hưởng tải trọng theo phương ngang.

Giá trị các tham số bài toán khảo sát như trên sẽ được tác giả trình bày trong phần các mô hình cọc ống thép có cánh xoắn và mô hình nền cát sạn san hô. Cơ chế truyền tải từ cọc ra nền cát sạn san hô gồm lực ma sát giữa thân cọc với nền và áp lực nén của cánh lên nền, áp lực từ mũi cọc xuống nền khi cọc chịu lực nén. Do đặc trưng chống cắt của nền cát sạn san hô gồm có góc ma sát trong và lực dính đơn vị biểu kiến [6], các tham số này khá cao so với nền trầm tích thông thường nên khi một phần nền bị dịch chuyển theo cánh sẽ bị ngăn cản bởi sức kháng ma sát của bản thân vật liệu nền, giá trị này lớn hơn đáng kể so với sức kháng ma sát giữa vật liệu cọc với nền cát sạn san hô.

3.2.1.3. Điều kiện biên của mô hình

Trong nghiên cứu này, để giảm khối lượng, thời gian tính toán và số phần tử mô hình, tác giả tách một phần nền cát sạn san hô khảo sát ra khỏi môi trường bán không gian vô hạn để tính toán. Khi đó, phải đánh giá điều kiện biên của nền cát sạn san hô tiếp giáp giữa phần tách ra và phần nền vô hạn còn lại (tức là điều kiện biên ở trên toàn bộ bề mặt không gian của phần nền cát sạn san hô đưa vào mô hình tính). Biên cố định này được chọn ở phạm vi đủ xa kết cấu cọc sao cho tỷ số giữa ứng suất trên biên khối nền với ứng suất lớn nhất của nền trong vùng khảo sát có giá trị đủ nhỏ chấp nhận để tính toán [2]. Đây là một vấn đề phức tạp cần thực hiện giải lặp nhiều mô hình để lựa chọn, dẫn đến thời gian và công sức rất lớn. Trong phạm vi nghiên cứu luận án tham khảo khuyến cáo lựa chọn kích thước khối nền theo các nghiên cứu đã công bố, phụ thuộc vào chiều dài cọc trong nền cát sạn san hô (L) và đường kính của cọc (d).

Với đặc điểm trên, biên khối nền cát sạn san hô trong bài toán khảo sát, tác giả lựa chọn sao cho: Chiều rộng khối nền $B \geq 20 \cdot d = 12$ m, (trong đó: d là đường kính ngoài của cọc) [57], chọn $B = 12$ m. Chiều cao khối nền $H_n \geq L + 20 \cdot d = 29$ m, (L là chiều dài cọc trong nền) [57], chọn $H_n = 36$ m.

3.2.2. Mô hình cọc ống thép có cánh xoắn

Xét cọc ống thép tròn trơn và cọc được gia cường bằng việc tăng cường 01 đến 02 cánh xoắn đã thi công hoàn thiện vào nền cát sạn san hô bằng phương pháp tạo lực nén kết hợp mô men xoắn. Cọc thẳng đứng trong nền cát

sạn san hô và chịu lực kéo hoặc nén dọc trục kết hợp trường hợp chịu tải trọng ngang tác dụng đồng thời tại đầu cọc, lòng cọc rỗng, mũi cọc và đầu cọc được bịt kín. Do hạn chế về điều kiện thiết bị thí nghiệm các tham số của vật liệu thép theo các mô hình vật liệu phức tạp, nên luận án giả thiết cọc ống thép có ứng xử theo mô hình đàn hồi, phân tích tuyến tính. Đây là mô hình cơ bản được sử dụng phổ biến đối với kết cấu cọc ống thép của móng các loại công trình, các tham số cơ bản của mô hình gồm: Mô đun đàn hồi, hệ số Poisson, trọng lượng riêng (tham khảo Bảng 3.1).

Tham số kết cấu cọc: Khảo sát tham số đặc trưng của cánh xoắn, bao gồm bước cánh (chiều cao 1 vòng cánh xoắn), khoảng cách các cánh, đường kính của cánh, số lượng cánh, độ sâu vị trí của cánh trên thân cọc đến sự làm việc của cọc ống thép trong nền cát sạn san hô, cụ thể như sau:

– Đường kính cọc: Theo tiêu chuẩn TCVN 9245:2012 [19] và TCVN 11520:2016 [23], cọc ống thép dạng vít có cánh ở mũi, đường kính cọc thường từ 600 mm đến 1200 mm. Theo số liệu thu thập của tập đoàn Nippon Steel Việt Nam đã thực hiện cho các công trình thực tế sử dụng đường kính cọc thường được lựa chọn từ 600 mm đến 1600 mm. Trong khi đó, các công trình báo hiệu hàng hải ở khu vực đảo xa bờ tỉnh Khánh Hoà sử dụng móng cọc ống thép đường kính 400 mm dày 16 mm hạ sâu từ 7 m đến 9 m trong nền cát sạn san hô; các công trình DKI sử dụng móng cọc ống thép đường kính 800 ÷ 1200 mm dày 50 mm hạ sâu 14 ÷ 20 m trong nền san hô ngoài hiện trường. Từ đặc điểm và thực tiễn đó, tác giả chọn đường kính ngoài của cọc ống thép trong bài toán khảo sát là: $d = 0,6$ m.

– Chiều dài cọc: Tham khảo hình trụ hố khoan tại đảo TSL, đảo ĐTA và đảo TC khu vực biển đông thuộc vùng biển đảo xa bờ tỉnh Khánh Hoà, chiều dày lớp cát sạn san hô màu xám trắng hoặc trắng sữa (hỗn hợp cát sạn lẫn cành nhánh san hô, cát có thành phần chủ yếu là cát hạt trung - mịn) tại đảo TSL từ 13 m đến 14 m và đảo ĐTA từ 20,5 m đến 21,0 m [6], tại đảo TC từ 10,0 m đến 16,6 m. Do đối tượng nghiên cứu là cát sạn san hô phù hợp với đặc điểm địa chất tại lớp 1 hoặc lớp 2 của các hố khoan trên, nên tác giả lựa chọn khảo sát các cọc ống thép có chiều dài 18 m; 15 m; 12 m; 9 m (tương

ứng với chiều dài cọc trong nền cát sạn san hô là 17 m; 14 m; 11 m và 8 m) hoàn toàn nằm trong chiều sâu của các lỗ khoan. Với chiều dài đã chọn, độ mảnh của cọc từ 1/15 đến 1/50, phù hợp với khả năng thi công thực tế của cọc có cánh xoắn và cọc ống thép tròn trơn trong nền cát sạn san hô nghiên cứu.

– Chiều dày thành cọc: Theo số liệu chiều dày thành cọc tương ứng với đường kính cọc ống thép trong thực tế và bảng C1-TCVN 11520:2016, chiều dày phần mũi cọc có cánh xoắn từ 13 mm đến 18 mm [23]. Kết hợp tham khảo trên thị trường và sản phẩm của các nhà máy sản xuất các ống thép có chiều dày thông dụng tại Việt Nam, tác giả lựa chọn khảo sát trường hợp cọc có chiều dày thành là $\delta_1 = 16$ mm dọc theo toàn bộ chiều dài cọc.

– Tham số cánh xoắn: Theo TCVN 11520:2016, đường kính cánh xoắn thường là: $D = (1,5 \div 3,0)d$ và chiều dày tấm cánh xoắn từ 20 mm đến 45 mm; bước cánh (chiều cao một vòng cánh xoắn) $H = (0,5 \div 1,0)d$ [23]. Trên cơ sở đó, tác giả lựa chọn khảo sát đường kính cánh xoắn là $D = 0,9$ m; 1,2 m; 1,5 m và 1,8 m; bước cánh trong các trường hợp $H = 0,3$ m; 0,5 m và 0,7 m; khoảng cách cánh xoắn khảo sát $S = (2,0 \div 5,0)d$, tương ứng $S = 1,2$ m; 1,8 m; 2,4 m và 3,0 m; chiều dày thép tấm cánh xoắn là $\delta_2 = 28$ mm; số cánh xoắn là 01 và 02 cánh (phạm vi nghiên cứu luận án khảo sát tối đa 2 cánh).

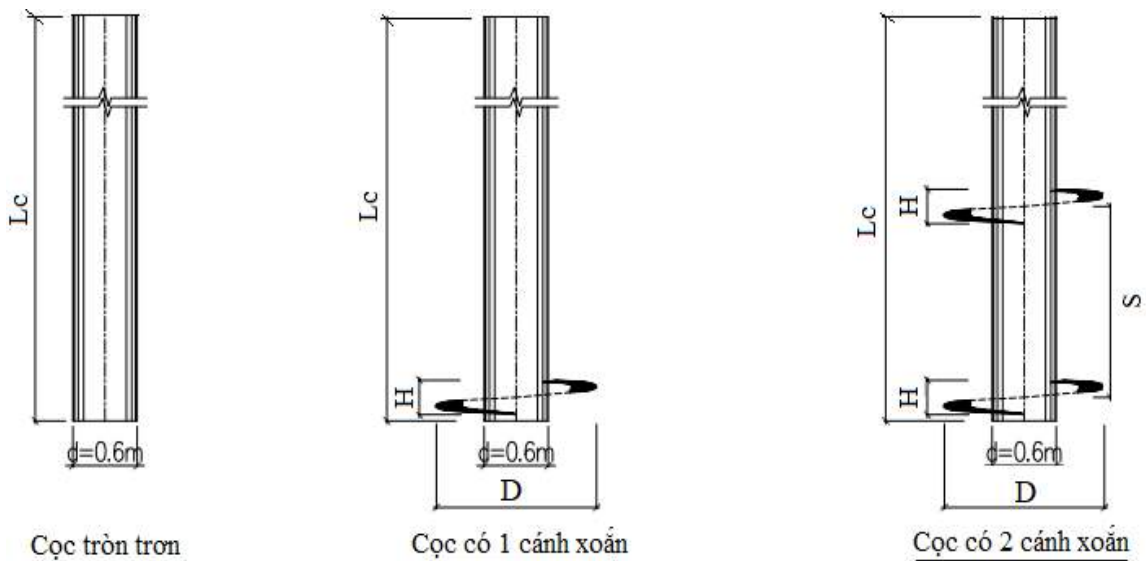
Tham số mô hình và tham số đặc trưng hình học của các cọc khảo sát trong nghiên cứu của luận án này được tổng hợp trên Bảng 3.1:

Bảng 3.1. Bảng tham số mô hình cọc ống thép khảo sát

Tham số của cọc	Loại cọc ống thép trong nghiên cứu		
	Cọc tròn trơn	Cọc có 01 cánh xoắn ở mũi	Cọc có 02 cánh xoắn
- Mô đun đàn hồi vật liệu cọc: E_c (kN/m ²)	2,00x10 ⁸		
- Hệ số Poisson của thép: ν_c	0,30	0,30	0,30
- Khi mô hình theo phần tử vỏ	0,00	0,00	0,00
- Trọng lượng riêng: γ_c (kN/m ³)	78,0	78,0	78,0
- Chiều dài cọc: L_c (m)	18; 15; 12; 9	18; 15; 12; 9	18; 15; 12; 9
- Chiều dài cọc trong nền: L (m)	17; 14; 11; 8	17; 14; 11; 8	17; 14; 11; 8
- Chiều dài cọc ngoài nền: L_t (m)	1,00	1,00	1,00

Tham số của cọc	Loại cọc ống thép trong nghiên cứu		
	Cọc tròn trơn	Cọc có 01 cánh xoắn ở mũi	Cọc có 02 cánh xoắn
- Đường kính ngoài cọc: d (m)	0,60	0,60	0,60
- Chiều dày thép thành cọc: δ_1 (m)	0,016	0,016	0,016
- Số cánh xoắn (n)	-	1	2
- Đường kính cánh xoắn: $D = 1,5d$; $2d$; $2,5d$ và $3d$ (m)	-	0,9; 1,2; 1,5; 1,8	0,9; 1,2; 1,5; 1,8
- Chiều dày thép cánh xoắn: δ_2 (m)	-	0,028	0,028
- Bước cánh xoắn: H (m)	-	0,3; 0,5; 0,7	0,3; 0,5; 0,7
- Độ sâu vị trí cánh trên cọc: h (m)	-	$h/L = 1/1$	$h/L = 1/1 \div 1/5$
- Khoảng cách các cánh: $S = 2,0d$; $3,0d$; $4,0d$ và $5,0d$ (m)	-	-	1,2; 1,8; 2,4 và 3,0

Mô hình cọc trong các trường hợp của bài toán khảo sát như trên được thể hiện trên Hình 3.2.



Hình 3.2. Mô hình các dạng cọc ống thép bài toán nghiên cứu

Trong thực tế làm việc của cọc ống thép ở môi trường nền cát sạn san hô, ngoài chịu tác động trực tiếp của các tải trọng, còn ảnh hưởng bởi sự tác động do sự xâm thực môi trường nước biển. Tuy nhiên, trong phạm vi nghiên cứu, luận án không xem xét, đánh giá tác động và ảnh hưởng của yếu tố này đến sự làm việc của cọc ống thép. Vấn đề thực tiễn đặt ra này sẽ được tác giả kiến nghị tiếp tục mở rộng trong các nghiên cứu tiếp theo.

3.2.3. Mô hình nền cát sạn san hô

a) *Loại nền*: Luận án khảo sát đối với trường hợp nền cát sạn san hô có các tham số mô hình đã được trình bày trong nội dung nghiên cứu thực nghiệm tại chương 2. Đây là loại nền phân bố tập trung ở khu vực điển hình trên các đảo xa bờ thuộc tỉnh Khánh Hoà, nơi có ý nghĩa đặc biệt quan trọng đến an ninh quốc phòng và kinh tế biển của Việt Nam.

b) *Mô hình tính toán*: Như trong chương 1 và chương 2 của luận án, tác giả đã phân tích và trình bày đối với bài toán tương tác của cọc với nền cát sạn san hô khi chịu tải trọng tĩnh có thể mô phỏng quan hệ phi tuyến của ứng suất với biến dạng theo mô hình Mohr - Coulomb; mô hình Cam Clay; mô hình tái bền động học Hypoplastic [5]. Trong phạm vi nghiên cứu của luận án, tác giả sử dụng mô hình đàn dẻo lý tưởng Mohr - Coulomb để mô hình hoá vật liệu nền cát sạn san hô (ứng xử đàn dẻo, phân tích phi tuyến).

c) *Tham số các mô hình nền cát sạn san hô*: Trong nghiên cứu này, sử dụng phần tử tiếp xúc mô phỏng trên phần mềm PLAXIS 3D để mô phỏng tương tác cọc ống thép với nền cát sạn san hô có hệ số suy giảm cường độ (R_{inter}) được xác định là giá trị trung bình từ kết quả thí nghiệm. Bảng tham số của mô hình nền bài toán nghiên cứu đã được tác giả tiến hành thực nghiệm và trình bày chi tiết trong chương 2 của Luận án, thể hiện trên Bảng 3.2.

Bảng 3.2. Tham số mô hình nền cát sạn san hô tính toán

Ψ (độ)	φ (độ)	c (kN/m ²)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	ν	E (kN/m ²)	R_{inter}	e_0
9,52	46,49	29,83	20,38	16,80	0,34	30,86E+3	0,56	0,56

Hỗn hợp cát sạn san hô là nền đất rời, nhưng theo kết quả thực nghiệm ở chương 2, tham số chống cắt của nền ngoài góc ma sát trong còn xuất hiện lực dính do sự cài móc giữa các hạt của nền cát sạn san hô, lực dính này gọi là lực dính đơn vị biểu kiến [6], khái niệm lực dính đơn vị biểu kiến cũng được một số tác giả nghiên cứu trên thế giới sử dụng trong các kết quả đã công bố [86], [97], [98]. Nên mô hình nền cát sạn san hô của bài toán nghiên cứu này theo phương pháp phần tử hữu hạn cần thiết xét tới lực dính đơn vị biểu kiến.

3.2.4. Mô hình tương tác cọc ống thép và nền cát sạn san hô

* Điều kiện tiếp xúc cọc ống thép và nền cát sạn san hô:

Tham số tương tác giữa nền cát sạn san hô với cọc ống thép có cánh xoắn là 2 vật liệu có sự làm việc khác nhau được mô phỏng thông qua phần tử tiếp xúc, đây là phần tử ảo có thể có chiều dày hoặc không có chiều dày. Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phần mềm phân tích địa kỹ thuật PLAXIS 3D để mô hình hoá tương tác của nền cát sạn san hô đồng nhất với cọc ống thép có cánh xoắn, sử dụng phần tử tiếp xúc không chiều dày thông qua hệ số suy giảm cường độ R_{inter} phản ánh sự khác nhau giữa mô hình vật liệu cọc bằng thép và vật liệu cát sạn san hô (bài toán khảo sát giả thiết cọc ống thép đã hạ ổn định trong nền san hô nên không xem xét sự biến động sức kháng ma sát do sự thay đổi độ chặt của cát sạn san hô khi thi công hạ cọc). Hệ số này trên cơ sở phân tích các tham số nhận được từ kết quả thí nghiệm cắt phẳng mẫu vật liệu cát sạn san hô với vật liệu tấm thép trong phòng thí nghiệm. Mọi quan hệ đó được thể hiện qua biểu thức sau [73]:

$$R_{inter} = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}, \quad (3.1)$$

trong đó:

δ - góc ma sát ngoài giữa cát sạn san hô với bề mặt thép cọc;

φ - góc ma sát trong của cát sạn san hô.

Quá trình tổ chức thí nghiệm, phân tích và xử lý số liệu để nhận được kết quả thí nghiệm các tham số cát sạn san hô đã được tác giả trình bày chi tiết trong chương 2 và thể hiện trong Bảng 2.3 và Bảng 3.2. Kết quả trung bình của tham số này áp dụng trong bài toán khảo sát là: $R_{inter} = 0,56$.

Độ cứng tiếp tuyến và độ cứng pháp tuyến của phần tử tiếp xúc thường được xác định thông qua hệ số suy giảm cường độ như sau [73]:

$$K_{\tau} = \frac{G}{t_{ix}} \cdot R_{inter}^2; \quad (3.2)$$

$$K_n = 11 \cdot K_{\tau}, \quad (3.3)$$

trong đó: K_{τ} - độ cứng theo phương tiếp tuyến của phần tử tiếp xúc; K_n - độ cứng theo phương pháp tuyến của phần tử tiếp xúc; G - mô đun trượt của

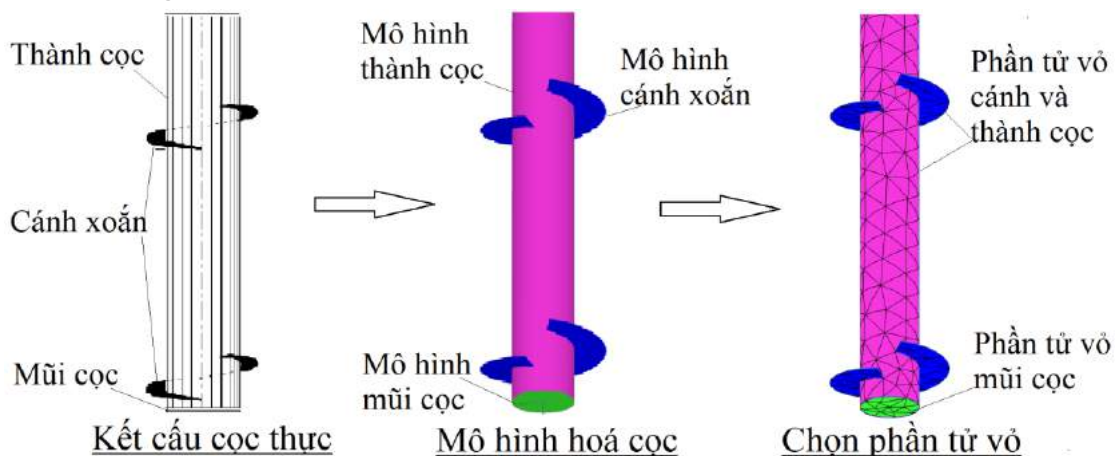
phần tử tiếp xúc; t_{tx} - chiều dày ảo của phần tử tiếp xúc.

Khi cọc chịu tải trọng, trên bề mặt tương tác của cọc ống thép và nền san hô có 2 thành phần độ cứng pháp tuyến và độ cứng tiếp tuyến. Trong trường hợp xảy ra hiện tượng tách giữa kết cấu và nền san hô thì không có sự truyền lực qua lại giữa cọc và nền, khi đó độ cứng pháp tuyến và tiếp tuyến bằng không. Trường hợp có sự trượt giữa kết cấu và nền san hô thì độ cứng pháp tuyến có giá trị xác định, nhưng độ cứng tiếp tuyến giảm dần về độ cứng chống trượt tới hạn xấp xỉ là 0.

*** Lựa chọn dạng phần tử mô hình:**

Mô hình phần tử khối 3 chiều đối với nền cát sạn san hô, phần tử tiếp xúc cọc ống thép và nền cát sạn san hô dạng phần tử ảo không có chiều dày. Có thể mô hình cọc ống thép trong bài toán nghiên cứu có dạng phần tử dầm (Beam) kết hợp phần tử khối (Solid) hoặc lựa chọn dạng phần tử vỏ (Plate) đối với thành cọc và cánh xoắn. Do mô hình tính toán là mô hình liên tục, nên các dạng phần tử khác nhau của mô hình tổng quát được liên kết với nhau bởi các điểm nút, vị trí các nút trong mô hình phụ thuộc kích thước phần tử và dạng phần tử lựa chọn trong tính toán.

Khi mô hình số cọc ống thép theo phương pháp sử dụng phần tử vỏ, toàn bộ thành cọc, nắp cọc, mũi cọc và cánh xoắn đều được chọn dạng phần tử vỏ (Plate) trong PLAXIS 3D - Version 20.1.0.98, sơ đồ mô hình hoá từ kết cấu cọc thực sang mô hình được thể hiện trên Hình 3.3.

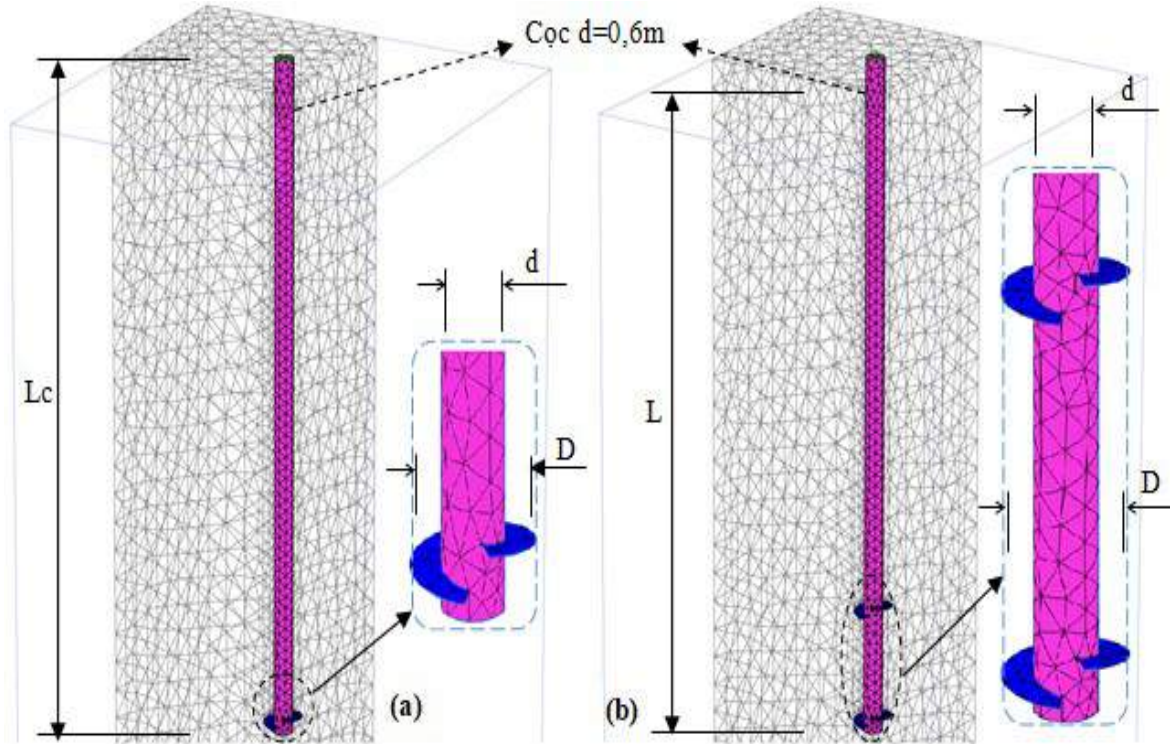


Hình 3.3. Mô hình cọc theo phương pháp sử dụng phần tử vỏ

Do đặc điểm cọc ống thép có chiều dày nhỏ, rỗng ở lòng cọc, mô hình theo phương pháp phần tử dầm gặp khó khăn khi phải giả thiết tỷ lệ đặc trưng

kháng uốn, đặc trưng kháng nén, nên thường có sai số trong tính toán. Trong khảo sát bài toán nghiên cứu của luận án sẽ sử dụng phương pháp phần tử vỏ.

Theo phương pháp mô hình hoá như trên, mô hình cọc và nền được thể hiện như trên Hình 3.4.



Hình 3.4. Mô hình cọc có cánh xoắn trong nền

((a)-cọc có 01 cánh ở mũi; (b)-cọc có 02 cánh khoảng cách S; bước cánh H; d-đường kính cọc; D-đường kính cánh xoắn)

3.2.5. Đánh giá độ tin cậy và lựa chọn mô hình số khảo sát

Kết quả mô phỏng số được đánh giá và kiểm tra độ tin cậy của bài toán đã xây dựng theo nguyên lý cộng tác dụng về nội lực tính toán nhận được tại đầu cọc phải tương ứng với tải trọng tác dụng tại đó.

– Đánh giá sự làm việc của cọc khi sử dụng 02 phương pháp mô hình của cọc ống thép tròn trơn, làm cơ sở lựa chọn mô hình phù hợp, trong đó:

+ Mô hình cọc ống thép rỗng bịt ở đỉnh và mũi cọc, sử dụng dạng phần tử vỏ trên toàn bộ chiều dài cọc.

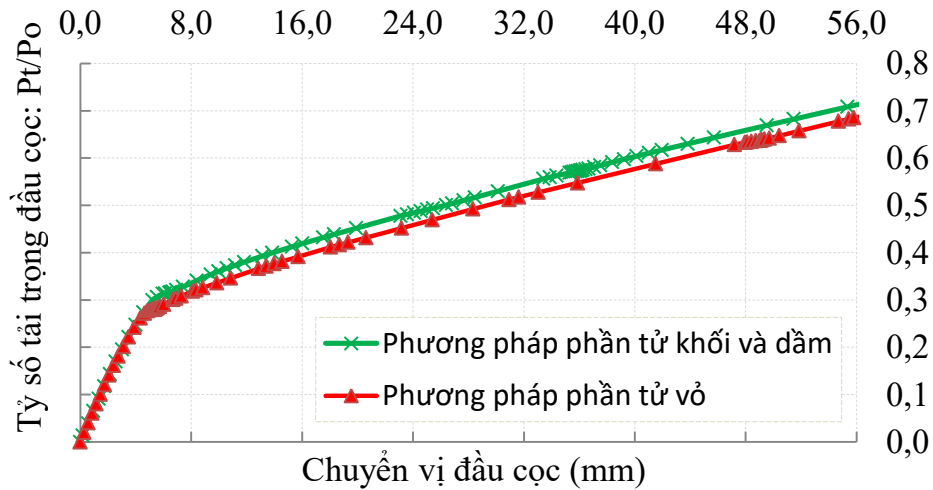
+ Mô hình cọc ống thép rỗng bịt ở đỉnh và mũi cọc, sử dụng phần tử dầm dọc trục tim cọc kết hợp với phần tử khối của cọc đặc, phương pháp này đã được Kimura M. và Zhang F. (2000) [63]; Kusumaningsih D.A. (2016) [57]

nghiên cứu và ứng dụng theo mô hình này.

– Mô hình số bài toán nghiên cứu trong PLAXIS 3D - Version 20.1.0.98 có các tham số cọc ống thép và nền cát sạn san hô đã được trình bày ở trên, chịu tác dụng của tải trọng nén tại đầu cọc. Kết quả khảo sát theo 2 phương pháp mô hình cọc được thể hiện như Bảng 3.3 và Hình 3.5:

Bảng 3.3. Tải trọng tác dụng và nội lực tại đầu cọc nhận được

- Tải trọng nén đầu cọc (P):	-2000,00	kN	Chênh lệch (%)
- Nội lực nhận được tại đầu cọc:			
+ Mô hình số cọc khi sử dụng phần tử dầm kết hợp phần tử khối	-1972,66	kN	-0,011
+ Mô hình cọc theo phần tử vỏ	-2000,22	kN	+1,367



Hình 3.5. Tương quan giữa tỉ số tải trọng và chuyển vị đầu cọc

Từ kết quả trên Hình 3.5, có thể thấy đường cong tương quan giữa chuyển vị đầu cọc với tỉ số của tải trọng tác dụng (P_t) tăng dần trong quá trình gia tải với tải trọng lớn nhất (P_0) của 2 phương pháp mô hình là khá tương đồng. Ngoài ra, từ kết quả tính toán nội lực đầu cọc nhận được trong Bảng 3.3 so sánh với tải trọng tác dụng tại đầu cọc có tăng và giảm do sai số trong tính toán, nhưng rất nhỏ (0,01% và 1,36%), nên kết quả mô hình số theo cả 2 phương pháp là phù hợp và tin cậy.

Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp mô hình số khi quy đổi tương đương mô hình cọc thực theo phần tử dầm kết hợp phần tử khối đó là lựa chọn tỷ lệ giữa mô men kháng uốn, mô men kháng nén của các dạng phần tử

đó phải thực hiện nhiều lần để tìm tỷ lệ phù hợp và có sai số nhật định. Đồng thời, cọc ống thép có chiều dày thành cọc nhỏ, khi bổ sung thêm các cánh xoắn theo phương ngang với tim cọc thì việc xây dựng mô hình số theo phương pháp này khá khó khăn, đặc biệt đối với các cánh xoắn gia cường.

Do vậy, trong nội dung khảo sát các mô hình số ở phần nghiên cứu tiếp theo của Chương 3, tác giả lựa chọn phương pháp mô phỏng số cọc ống thép có cánh xoắn và cọc ống thép tròn trơn sử dụng phần tử vỏ cho cả thành cọc, đỉnh, mũi cọc và các cánh xoắn gia cường. Tổng cộng tác giả xây dựng và tính toán 16 mô hình cọc ống thép tròn trơn; 8 mô hình cọc ống thép có 01 cánh xoắn và 186 mô hình cọc ống thép có 2 cánh xoắn để phân tích, tổng hợp số liệu và khảo sát ảnh hưởng của các tham số cánh xoắn trong các trường hợp khác nhau.

3.3. Khảo sát sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn chịu tải trọng tĩnh dọc trục

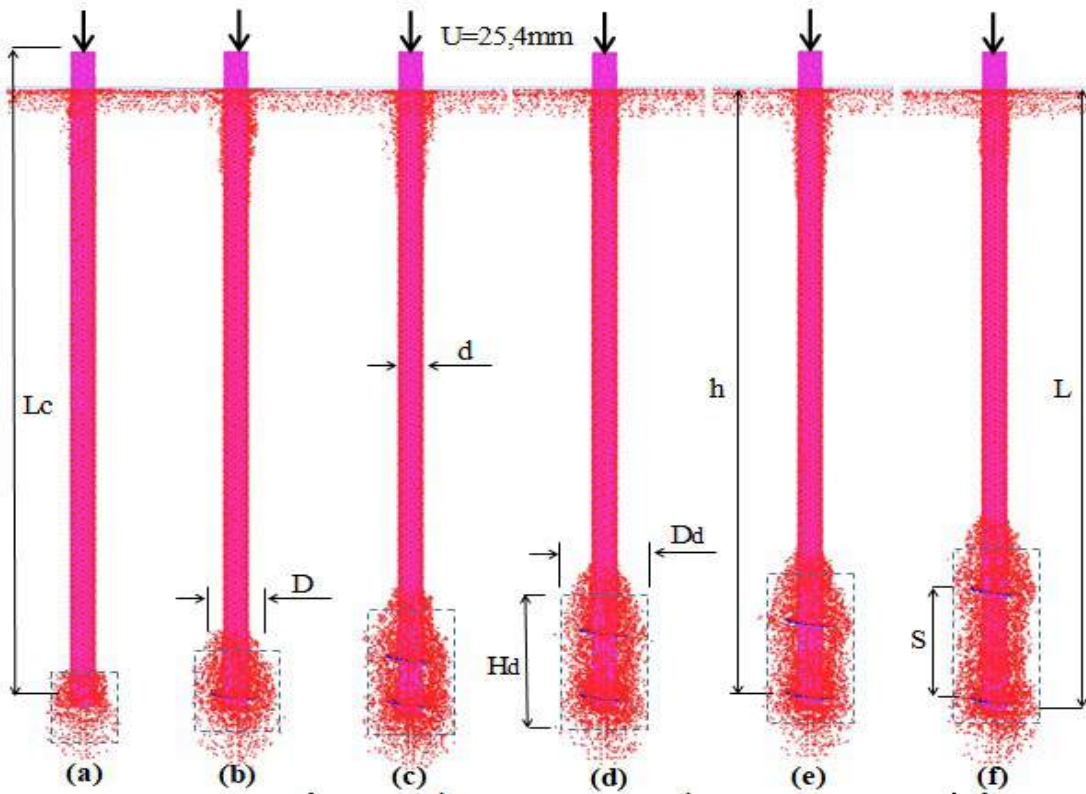
3.3.1. Khảo sát số lượng và khoảng cách cánh xoắn

Để đánh giá sức chịu tải nói riêng và sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn nói chung, tác giả so sánh hiệu quả về sức chịu tải của cọc có 02 cánh xoắn so với trường hợp cọc có 01 cánh xoắn và cọc tròn trơn. Sử dụng các mô hình số đã xây dựng ở trên để tính toán, phân tích kết quả khảo sát ảnh hưởng của số lượng và khoảng cách các cánh của cọc ống thép có cánh xoắn chịu tải trọng dọc trục tại đầu cọc trong các trường hợp sau:

- Trường hợp (a): cọc ống thép tròn trơn, bịt kín đỉnh và mũi cọc;
- Trường hợp (b): cọc tròn như trên được gia cường 01 cánh ở mũi;
- Trường hợp (c): cọc có 02 cánh sao cho khoảng cách của cánh là $S=2d$ (d là đường kính ngoài của cọc) và $h/L = 1/1$ (h là độ sâu vị trí cánh xoắn dưới ở trên thân cọc; L là chiều dài cọc trong nền);
- Trường hợp (d): cọc có 02 cánh sao cho $S=3d$ và $h/L = 1/1$;
- Trường hợp (e): cọc có 02 cánh sao cho $S=4d$ và $h/L = 1/1$;
- Trường hợp (f): cọc có 02 cánh sao cho $S=5d$ và $h/L = 1/1$.

Kết quả tính toán từ mô hình đã chỉ ra rằng, số lượng và khoảng cách

cánh xoắn ảnh hưởng đến sự phát triển vùng biến dạng dẻo trong nền, đồng nghĩa với việc làm thay đổi cơ chế truyền tải của cọc ra nền. Cụ thể với các trường hợp khảo sát thể hiện trên Hình 3.6 khi chuyển vị đầu cọc 25,4 mm.

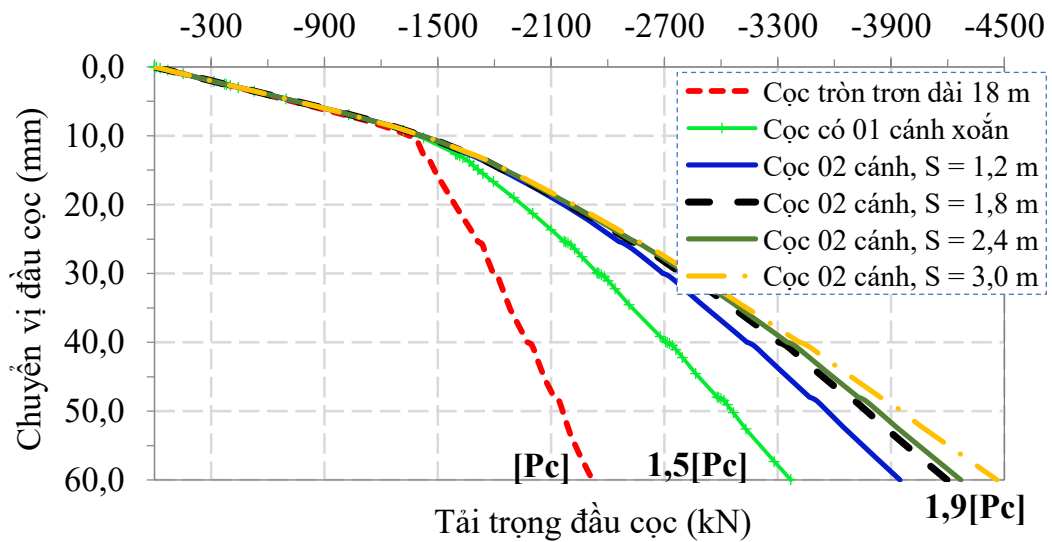


Hình 3.6. Phạm vi phát triển vùng biến dạng dẻo trong nền của cọc tròn trơn, cọc 1 cánh và 2 cánh xoắn khi chuyển vị đầu cọc là 25,4 mm

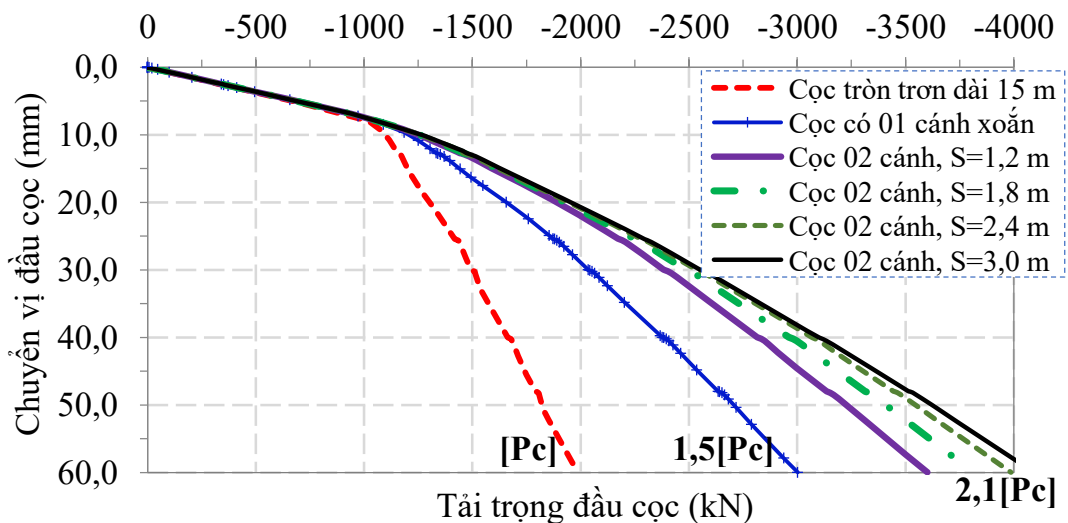
Ở mức chuyển vị nhỏ, các cánh xoắn truyền tải trọng bên ra nền cát sạn san hô như vai trò của các đĩa độc lập. Khi chuyển vị của cọc có cánh xoắn tăng lên (trường hợp $u_c = 25,4$ mm) như ở trên Hình 3.6, thì khối nền trong phạm vi giữa 02 cánh phát triển đến giới hạn dẻo của vật liệu và khối nền này dịch chuyển cùng với cọc và truyền tải trọng ra nền như một đoạn trụ đất. Ảnh hưởng của sự giảm bên ma sát giữa cọc với nền tại phạm vi này bị triệt tiêu, sức kháng bên của đoạn cọc giữa các cánh khôi phục về giá trị sức chống cắt của nền, nên làm tăng đáng kể sức chịu tải bên của cọc. Do vậy, vai trò của các cánh xoắn không chỉ mở rộng cục bộ thân cọc để tăng sức kháng pháp tuyến xuống nền mà còn rất hiệu quả trong việc tăng sức kháng bên của cọc. Điều này rất có ý nghĩa khi thiết kế cọc móng của các công trình có tải trọng

gây ra lực nhô lớn tác dụng lên móng, đặc biệt là đối với nền cát sạn san hô có sức chống cắt rất lớn (góc ma sát trong cao: $\varphi = 46,49^{\circ}$ và có lực dính đơn vị biểu kiến do sự gài móc giữa các hạt so với nền đất rời thông thường).

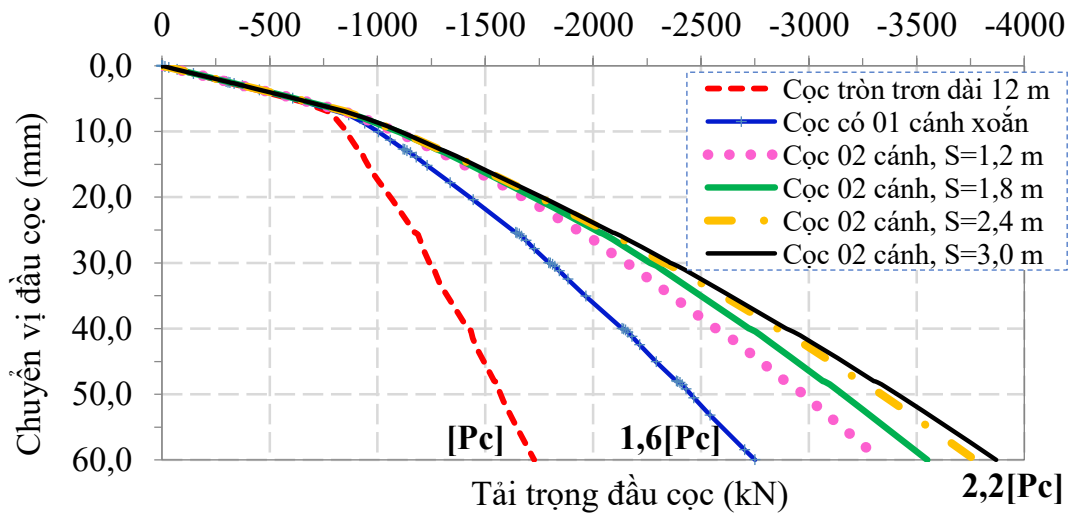
Để đánh giá định lượng ảnh hưởng số lượng và khoảng cách của cánh xoắn đến sự làm việc của cọc ống thép, tác giả tổng hợp kết quả nghiên cứu về sự phát triển tương quan giữa tải trọng với chuyển vị đầu cọc trong các trường hợp mô hình cọc ống thép có 2 cánh xoắn so sánh với cọc có 01 cánh xoắn ở mũi và trường hợp cọc tròn trơn có chiều dài thay đổi tương ứng là 9m; 12 m; 15 m và 18 m. Kết quả thể hiện trên Hình 3.7 đến Hình 3.10:



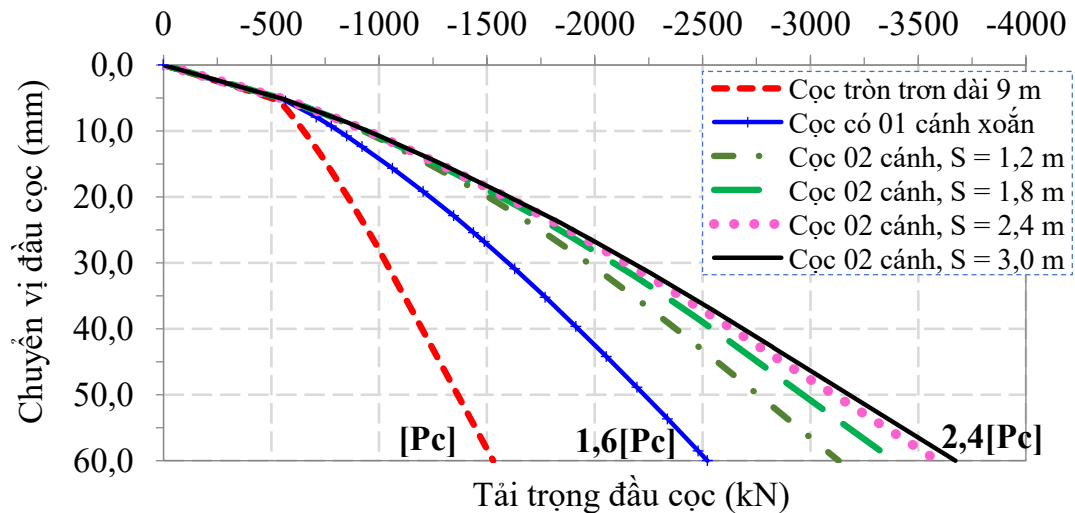
Hình 3.7. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 18 m chịu nén)



Hình 3.8. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 15 m chịu nén)



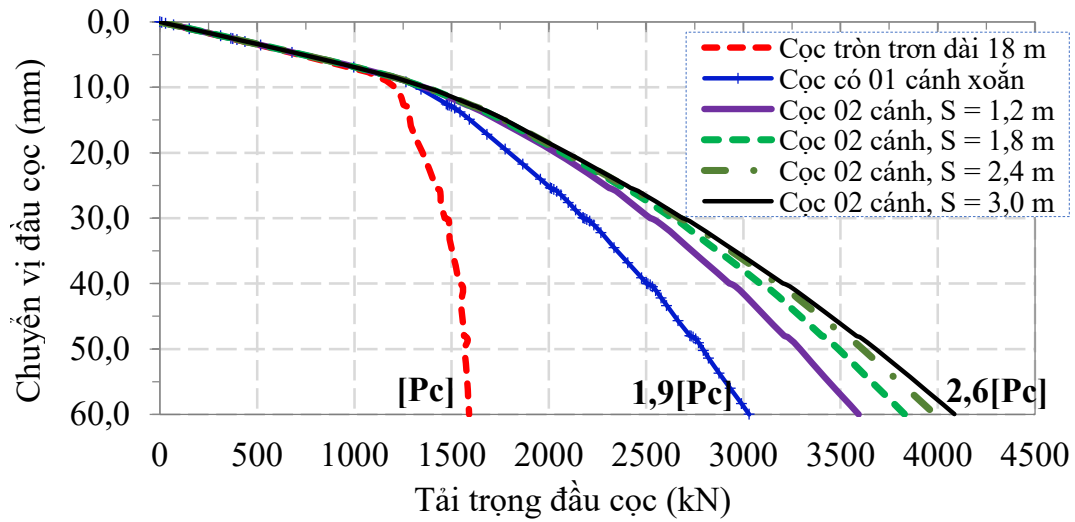
Hình 3.9. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 12 m chịu nén)



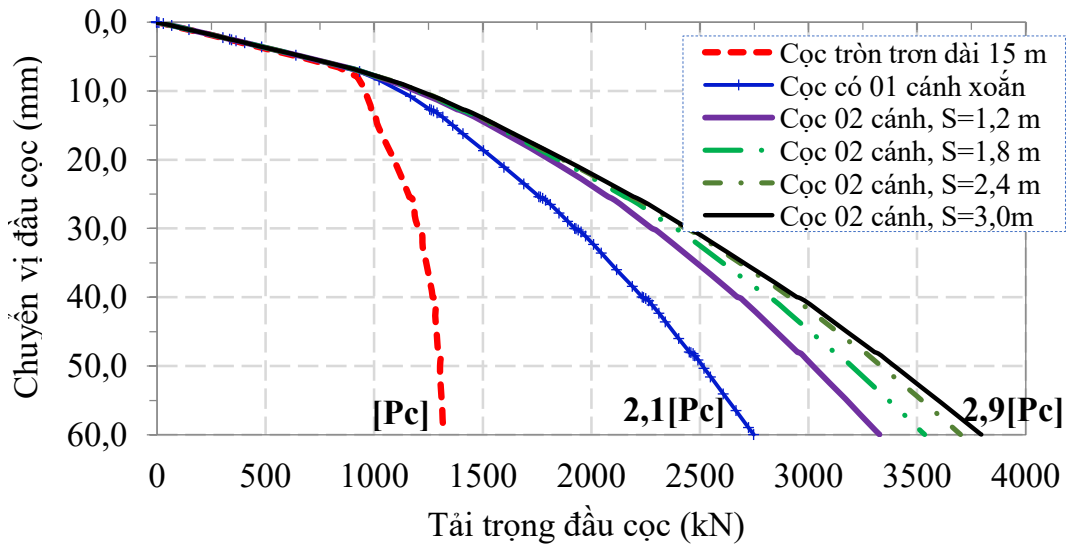
Hình 3.10. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 9 m chịu nén)

Kết quả phân tích đồ thị quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi chịu nén dọc trục trên các Hình 3.7 đến Hình 3.10, có thể nhận thấy ảnh hưởng của cánh xoắn làm thay đổi đáng kể ứng xử của cọc. Trong trường hợp cọc tròn không có cánh, độ cứng chống chuyển vị đầu cọc (tỉ số giữa tải trọng và chuyển vị đầu cọc) bắt đầu suy giảm khi chuyển vị đầu cọc vượt khoảng 2 lần chuyển vị giới hạn của sức kháng ma sát giữa vật liệu cọc và nền cát sạn san hô. Trong khi đó, với cọc có cánh xoắn thì độ cứng chống chuyển vị đầu cọc giảm ít hơn đáng kể, đặc biệt là khi cọc có 02 cánh xoắn.

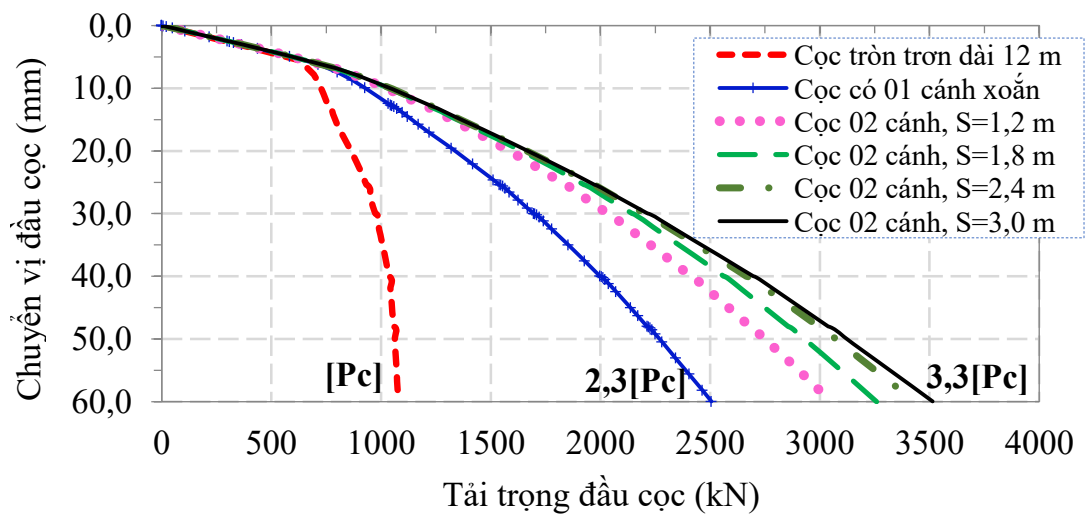
Sức chịu tải nén của cọc có 01 cánh xoắn ở chuyển vị cực hạn ($[U_c] = 60\text{mm}$) tăng từ 1,5 đến 1,6 lần so với cọc tròn, và tăng mạnh đối với trường hợp cọc có 02 cánh xoắn thì sức chịu tải tăng lên từ 1,9 đến 2,4 lần.



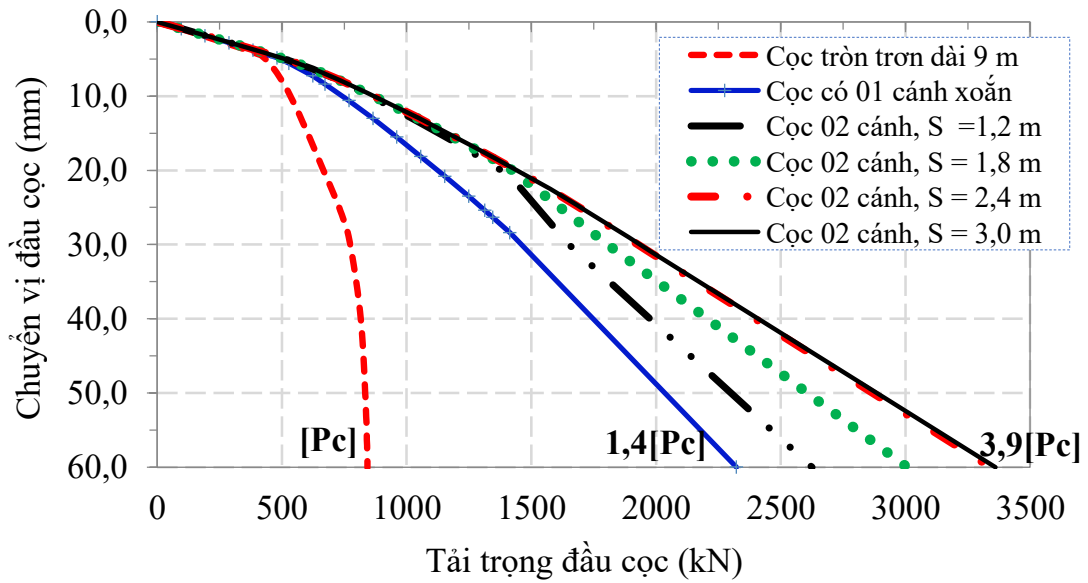
Hình 3.11. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 18 m chịu nhỏ)



Hình 3.12. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 15 m chịu nhỏ)



Hình 3.13. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 12 m chịu nhỏ)



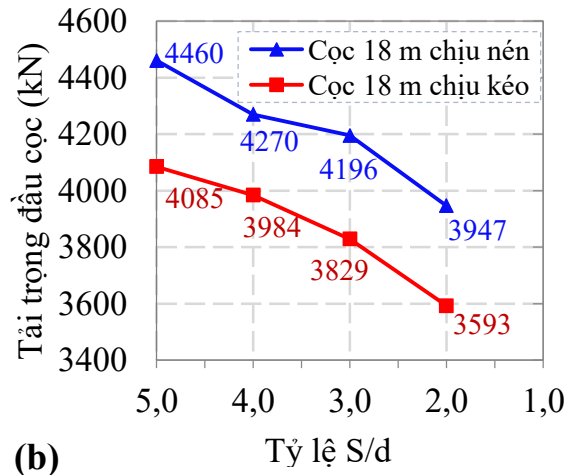
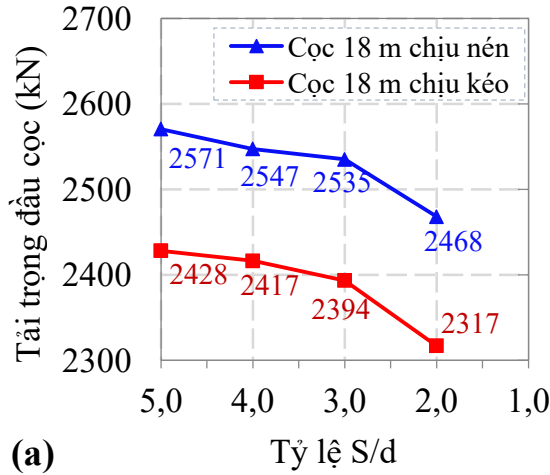
Hình 3.14. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (dài 9 m chịu nhỏ)

Trường hợp cọc chịu nhỏ, sự ảnh hưởng của các cánh xoắn tăng lên khá lớn. Kết quả nghiên cứu thể hiện trên các Hình 3.11 đến Hình 3.14, đối với cọc tròn trơn khi tăng chuyển vị đầu cọc từ 50% chuyển vị cực hạn nhưng tải trọng đầu cọc hầu như không có sự thay đổi đáng kể, chứng tỏ đã vượt quá sức kháng của cọc. Nhưng trường hợp cọc có cánh xoắn (kể cả cọc 01 cánh đơn ở mũi) không xảy ra hiện tượng này.

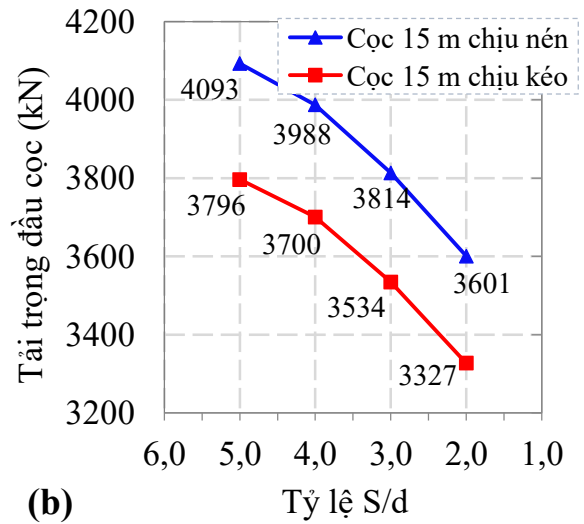
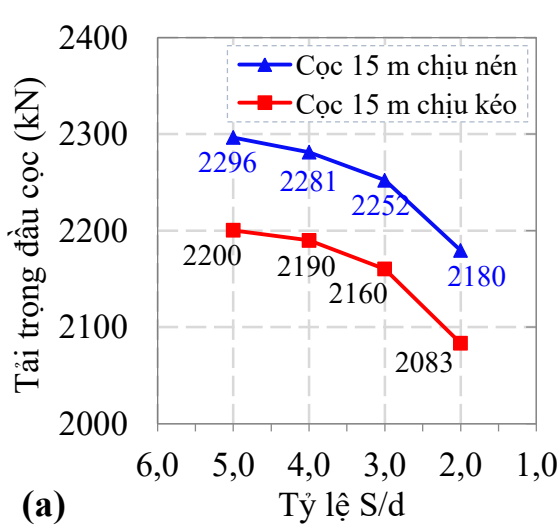
Khi chịu kéo, sức chịu tải của cọc có 2 cánh xoắn ở chuyển vị cực hạn tăng nhanh so với trường hợp cọc có 1 cánh và tăng rất lớn so với cọc tròn trơn (từ 2,6 đến 3,9 lần). Nguyên nhân là do trường hợp cọc có 2 cánh xoắn đã phát huy sức kháng bên tăng và hiệu quả từ sức chống cắt lớn giữa nền với nền cát sạn san hô (góc ma sát trong lớn), trong khi đoạn cọc tròn trơn tương ứng thì sức kháng bên được phát huy từ sức kháng ma sát giữa cọc và nền nhỏ. Sức chịu tải của cọc có cánh xoắn tăng khi tăng chuyển vị đầu cọc đến chuyển vị cực hạn, nhưng trường hợp cọc tròn trơn sức chịu tải của cọc tăng chậm. Do đó, tác giả kiến nghị thiết kế cấu hình cọc ống thép từ 2 cánh xoắn gia cường trở lên nhằm tăng sức kháng đối với các công trình trên khu vực địa chất nền cát sạn san hô hoặc có cấu trúc dạng địa chất tương tự nền san hô.

Để đánh giá ảnh hưởng của khoảng cách cánh đến sức chịu tải của cọc, tác giả tổng hợp số liệu khảo sát và xây dựng các đồ thị tương quan giữa tải trọng đầu cọc với tỷ lệ khoảng cách cánh và đường kính cọc (S/d) ở chuyển vị giới hạn ($U_{gh} = 25,4$ mm - hình a) và chuyển vị cực hạn ($[U_c] = 60$ mm - hình

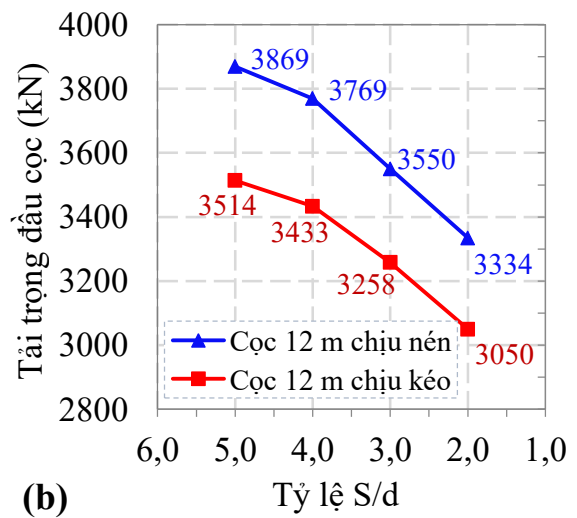
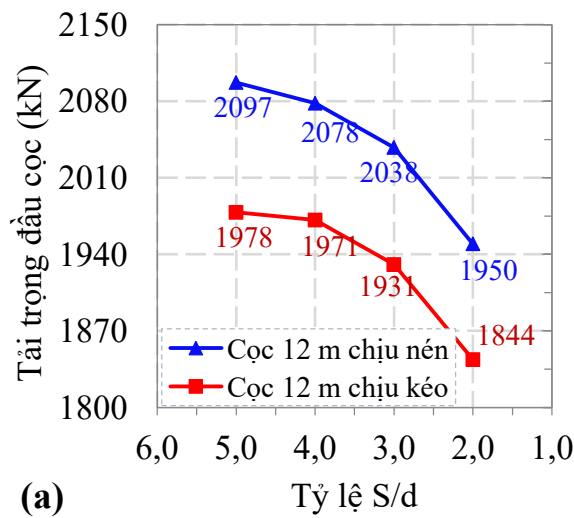
b), kết quả khảo sát thể hiện trên các Hình 3.15 đến Hình 3.18.



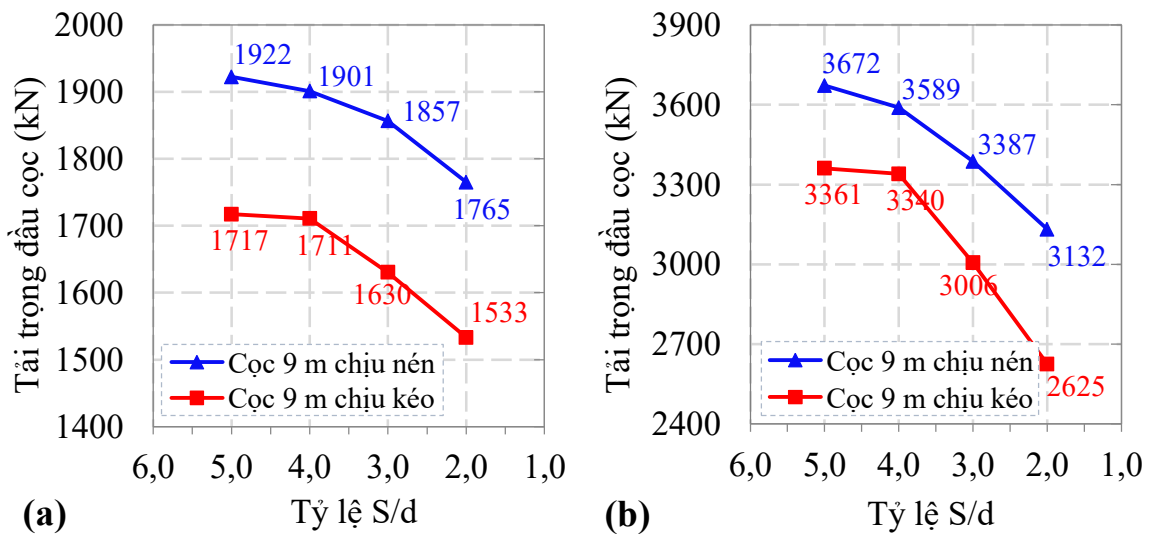
Hình 3.15. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 18 m



Hình 3.16. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 15 m



Hình 3.17. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 12 m



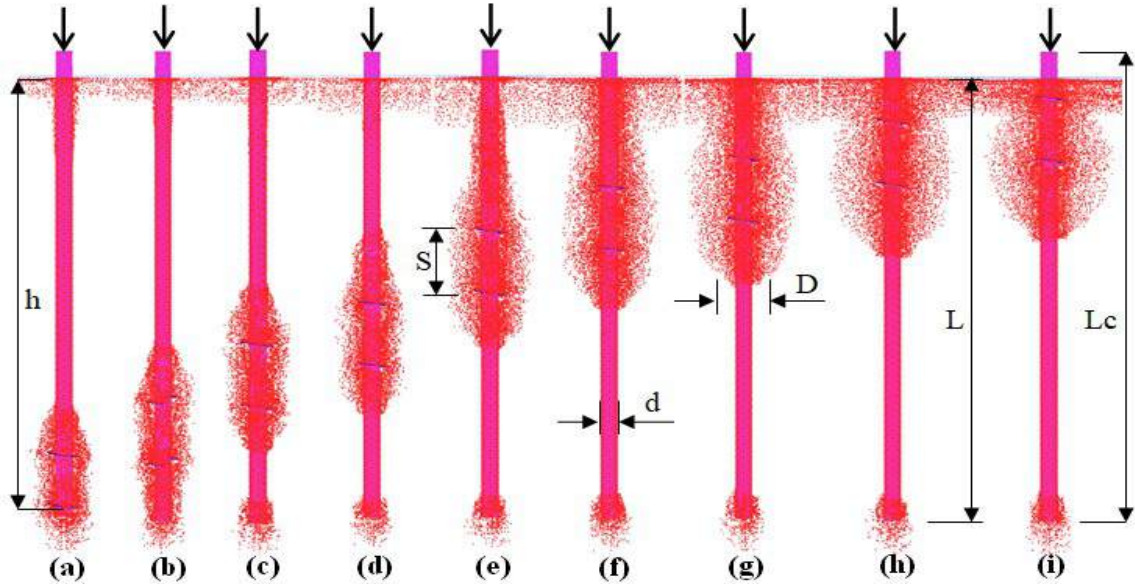
Hình 3.18. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 9 m

Từ kết quả trình bày trên các Hình 3.15 đến Hình 3.18 cho thấy, sự thay đổi tải trọng đầu cọc của các cọc có chiều dài khác nhau ở cả trường hợp chuyển vị giới hạn U_{gh} và chuyển vị cực hạn $[U_c]$ tăng không đáng kể khi tỷ lệ giữa khoảng cách cánh xoắn và đường kính cọc $S/d > 4,0$, nhưng tải trọng đầu cọc giảm nhanh khi $S/d < 3,0$. Do vậy, tác giả kiến nghị khoảng cách hiệu quả giữa các cánh xoắn lực chọn trong khoảng từ 3 đến 4 lần đường kính ngoài của cọc (tương ứng tỷ lệ $S/d = 3,0$ đến $4,0$).

3.3.2. Khảo sát độ sâu vị trí cánh xoắn trên thân cọc

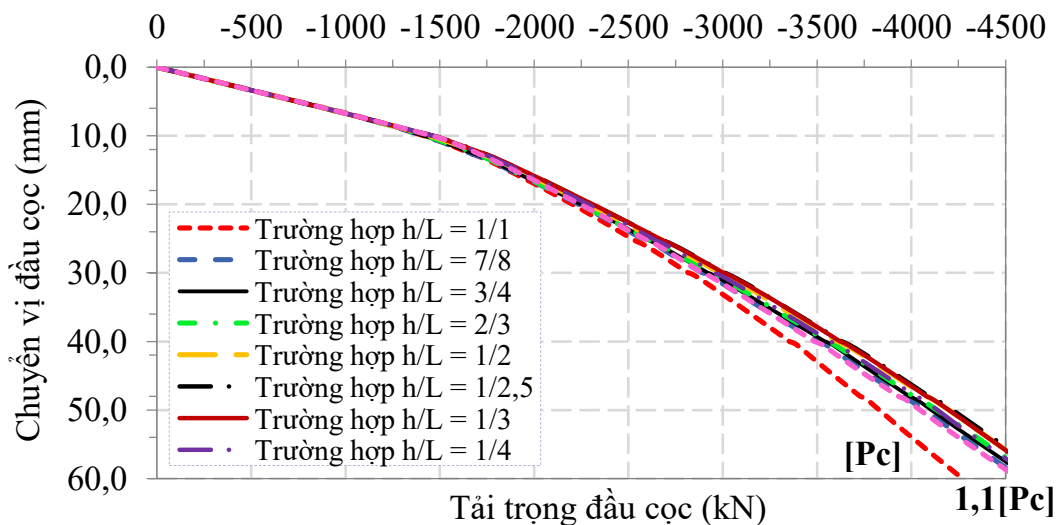
Để đánh giá ảnh hưởng độ sâu vị trí cánh xoắn trên thân cọc (luận án viết gọn lại là: chiều sâu cánh xoắn) đến sức chịu tải của cọc, trên cơ sở đó kiến nghị lựa chọn vị trí cánh xoắn hợp lý, tác giả tiến hành mô hình số các bài toán khảo sát cọc ống thép có 02 cánh xoắn đường kính $D = 2d = 1,2$ m và khoảng cách của cánh là S sao cho $S/d = 4$ như đã kiến nghị ở phần 3.3.1. Nhưng vị trí của 02 cánh thay đổi dọc theo chiều sâu cọc trong các trường hợp sau: Trường hợp (a): tỷ số $h/L = 1/1$ (trong đó: h là độ sâu vị trí cánh trên thân cọc, $h = 16,8$ m; L chiều dài của cọc trong nền cát sạn san hô); trường hợp (b): tỷ số $h/L = 7/8$ ($h = 14,875$ m); trường hợp (c): tỷ số $h/L = 3/4$ ($h = 12,750$ m); trường hợp (d): tỷ số $h/L = 2/3$ ($h = 11,333$ m); trường hợp (e): tỷ số $h/L = 1/2$ ($h = 8,50$ m); trường hợp (f): tỷ số $h/L = 1/2,5$ ($h = 6,80$ m); trường hợp (g): tỷ số $h/L = 1/3$ ($h = 5,667$ m); trường hợp (z): tỷ số $h/L = 1/4$ ($h = 4,25$ m); trường hợp (i): tỷ số $h/L = 1/5$ ($h = 3,40$ m).

Tổng hợp kết quả phát triển vùng biến dạng dẻo trong các trường hợp khảo sát được trình bày trên Hình 3.19.

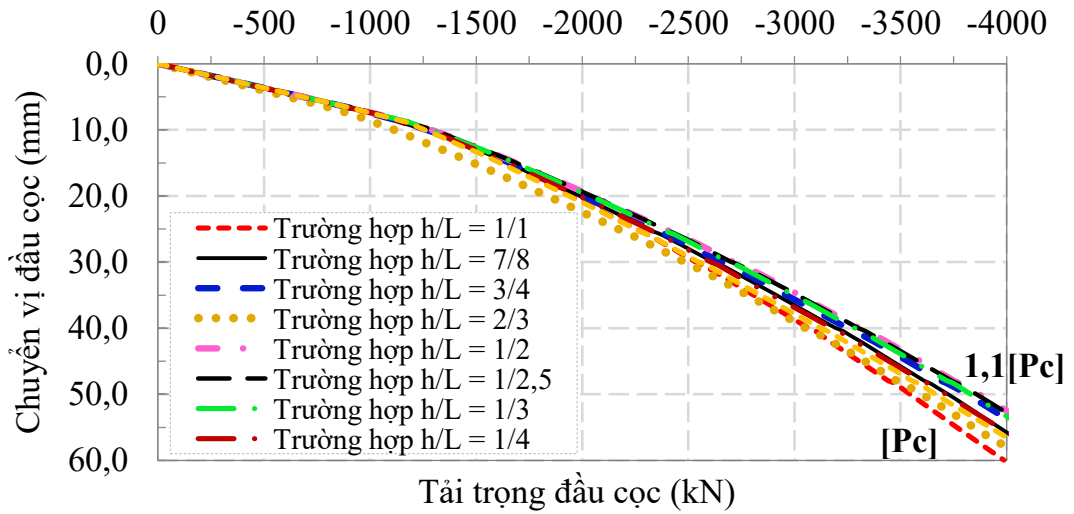


Hình 3.19. Phạm vi phát triển vùng biến dạng dẻo trong nền của các cọc 2 cánh xoắn dài 18 m khi chuyển vị đỉnh cọc 25,4 mm

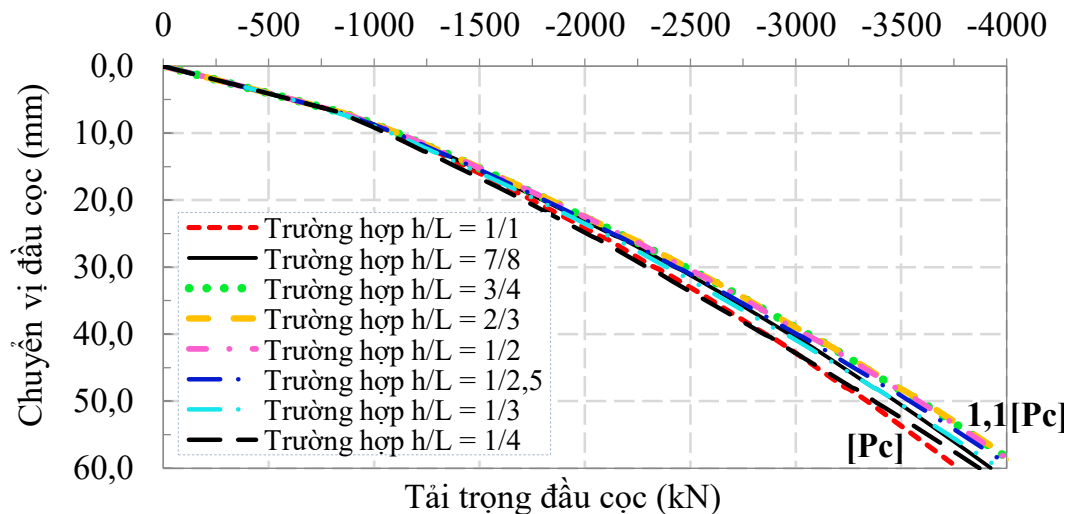
Kết quả cho thấy, tại các vị trí của cánh xoắn dọc theo chiều sâu cọc, vùng biến dạng dẻo phát triển ở mặt bên cọc, mũi cọc và xung quanh phạm vi khối nền giữa 2 cánh xoắn. Tuy nhiên, phạm vi ảnh hưởng ra xung quanh có sự khác nhau nên cần xem xét lựa chọn khoảng cách của các cọc ống thép có cánh xoắn trong móng cọc hợp lý và xét tới ảnh hưởng của hiệu ứng nhóm cọc trong các hướng nghiên cứu tiếp theo.



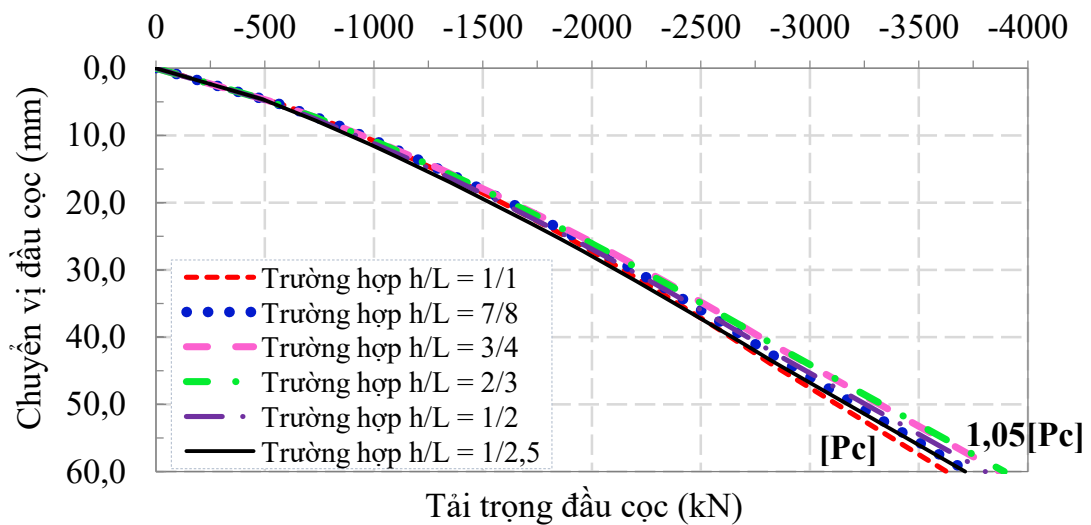
Hình 3.20. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc dài 18 m chịu nén)



Hình 3.21. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc dài 15 m chịu nén)



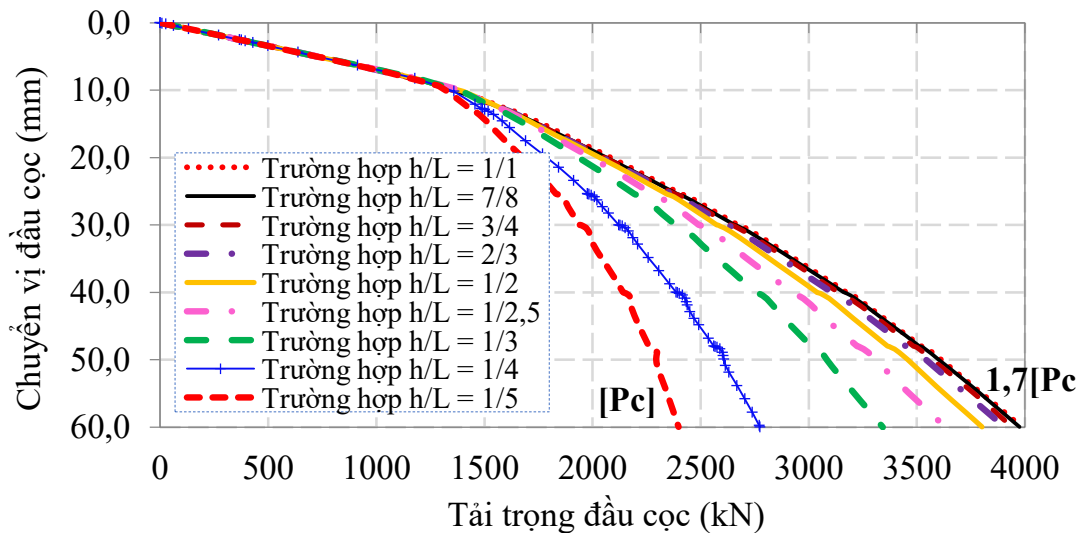
Hình 3.22. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc dài 12 m chịu nén)



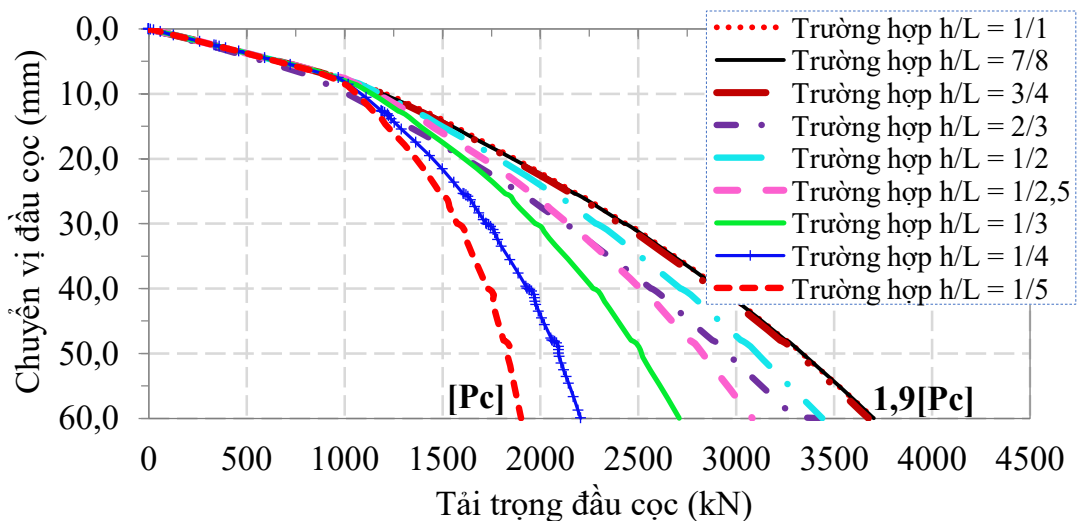
Hình 3.23. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc dài 9 m chịu nén)

Kết quả trên đồ thị hình Hình 3.20 đến Hình 3.23 tác giả nhận thấy, khi cọc chịu nén dọc trục, vị trí của cánh xoắn trong phạm vi khảo sát ảnh hưởng không đáng kể đến độ cứng chống chuyển vị đầu cọc và sức chịu tải hoặc sức kháng của cọc, sự khác biệt chỉ khoảng 5% đến 10% khi cọc đạt đến chuyển vị cực hạn tại đầu cọc.

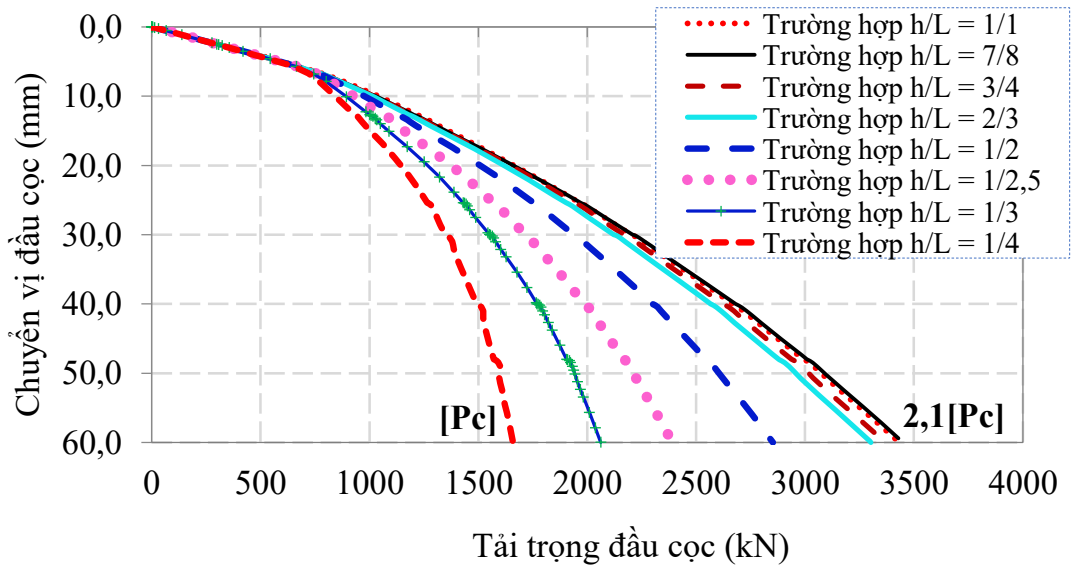
Khi chịu nhỏ, sự khác biệt này phản ánh rõ ràng và khá lớn, thể hiện trên các đồ thị từ Hình 3.24 đến Hình 3.27. Do đặc trưng chống cắt của nền san hô gồm có góc ma sát trong và lực dính đơn vị biểu kiến [5], các tham số này khá cao so với nền cát thông thường nên khi một phần nền bị dịch chuyển theo cánh sẽ bị ngăn cản bởi sức kháng ma sát của bản thân vật liệu cát sạn san hô, giá trị này lớn hơn so với sức kháng ma sát giữa vật liệu cọc với nền.



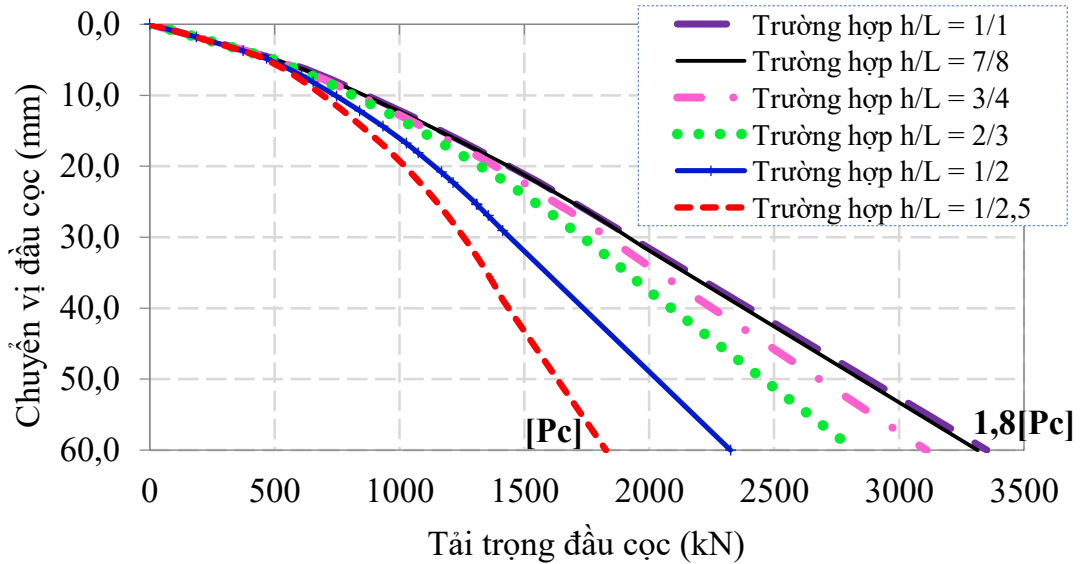
Hình 3.24. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc dài 18 m chịu nhỏ)



Hình 3.25. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc dài 15 m chịu nhỏ)



Hình 3.26. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc dài 12 m chịu nhỏ)

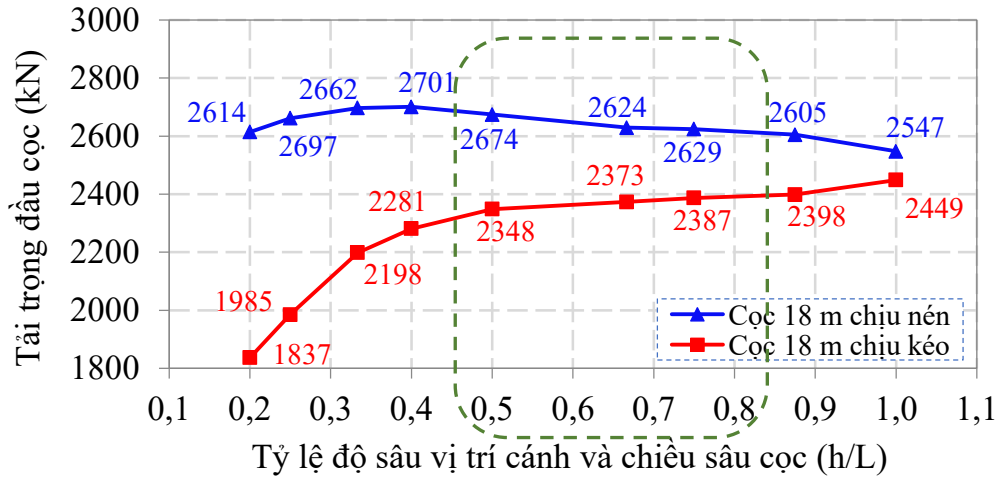


Hình 3.27. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc (cọc dài 9 m chịu nhỏ)

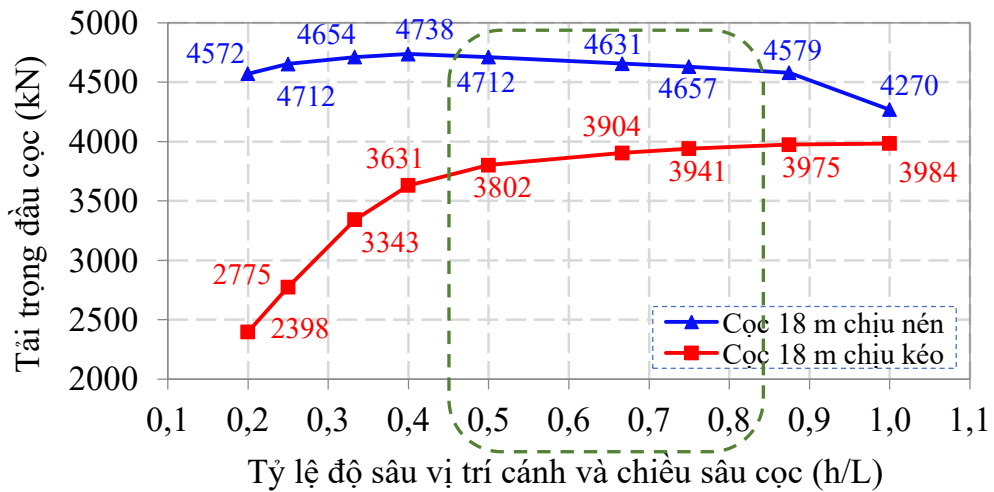
Các đồ thị tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi cọc chịu kéo từ Hình 3.24 đến Hình 3.27 cho thấy, vị trí cánh xoắn ảnh hưởng đáng kể đến độ cứng chống chuyển vị đầu cọc và sức chịu tải của cọc. Vị trí cánh xoắn càng sâu thì sức kháng nhỏ của cọc càng lớn với sự khác biệt có thể từ 1,7 đến 2,1 lần tại chuyển vị cực hạn đầu cọc, sự gia tăng hiệu quả không đều. Khi độ sâu cánh xoắn trên thân cọc lớn hơn 1/2 chiều sâu hạ cọc trong nền thì hiệu quả gia tăng sức kháng nhỏ bắt đầu tăng ít dần.

Phân tích ảnh hưởng độ sâu vị trí cánh xoắn đến sức chịu tải của cọc, tác giả tổng hợp số liệu khảo sát và xây dựng các đồ thị tương quan giữa tải trọng đầu cọc với tỷ lệ độ sâu vị trí cánh và chiều sâu cọc (h/L) ở chuyển vị giới hạn

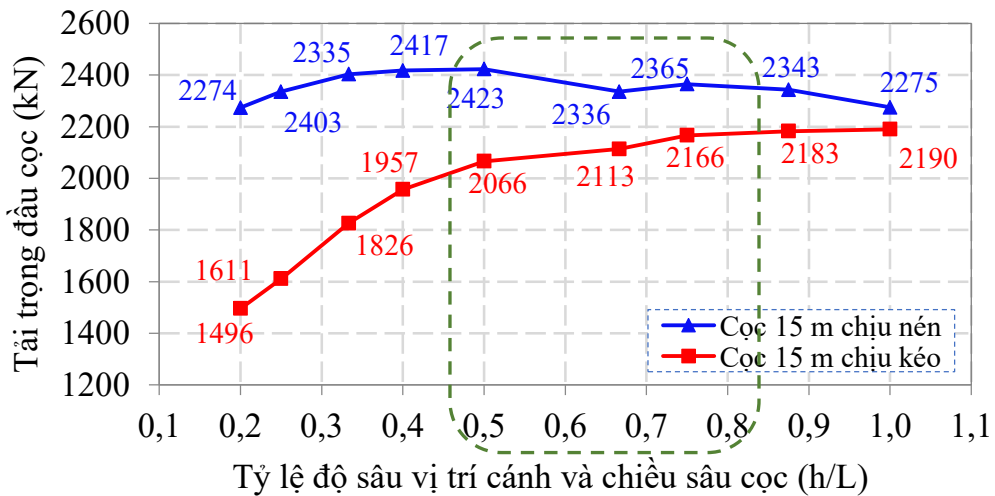
($U_{gh} = 25,4$ mm) và chuyển vị cực hạn ($[U_c] = 60,0$ mm), kết quả khảo sát thể hiện trên đồ thị Hình 3.28 đến Hình 3.35:



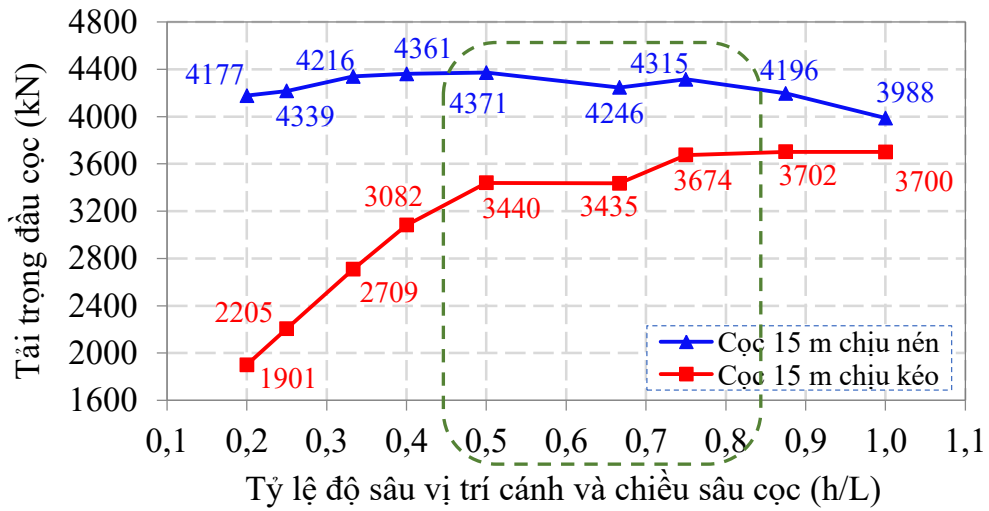
Hình 3.28. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 18 m khi $U_{gh} = 25,4$ mm



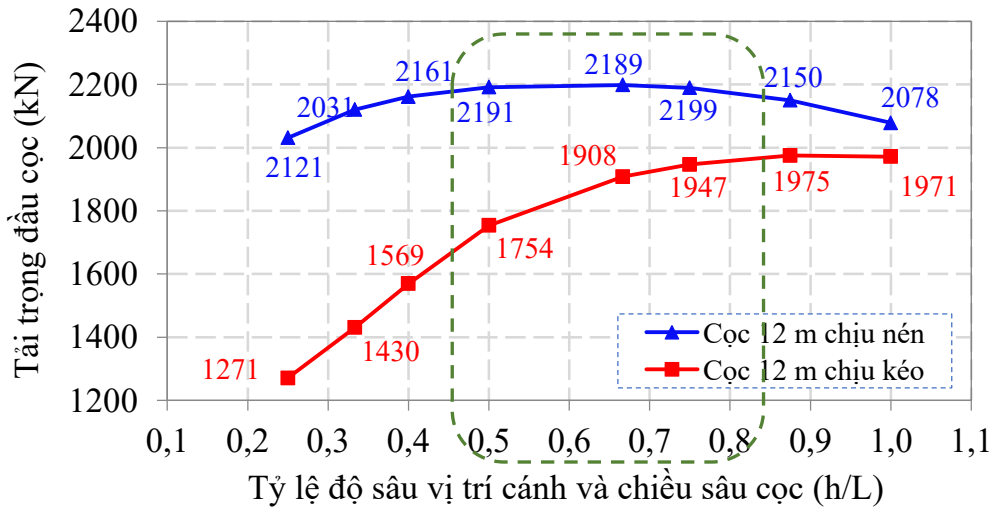
Hình 3.29. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 18 m khi $[U_c] = 60$ mm



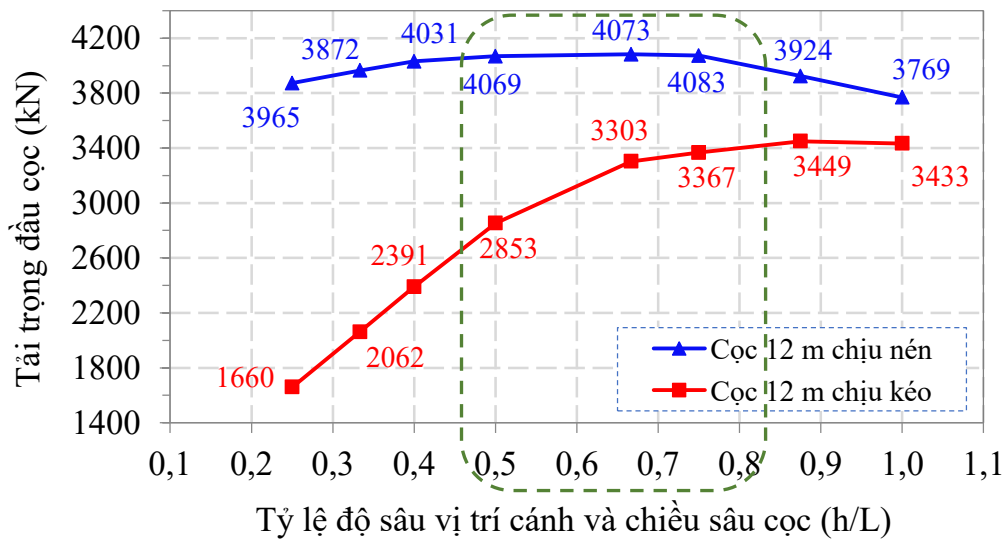
Hình 3.30. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 15 m khi $U_{gh} = 25,4$ mm



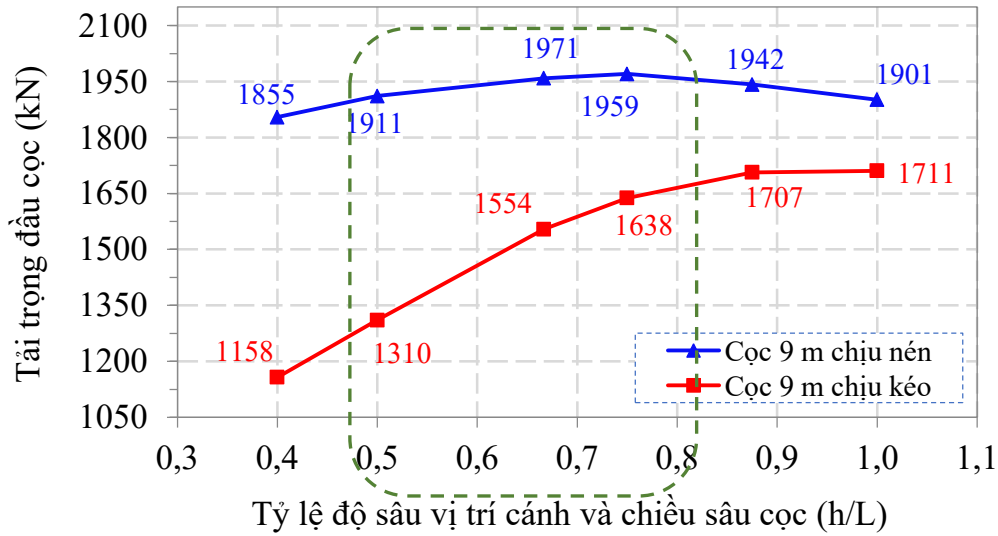
Hình 3.31. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 15 m khi $[U_c] = 60$ mm



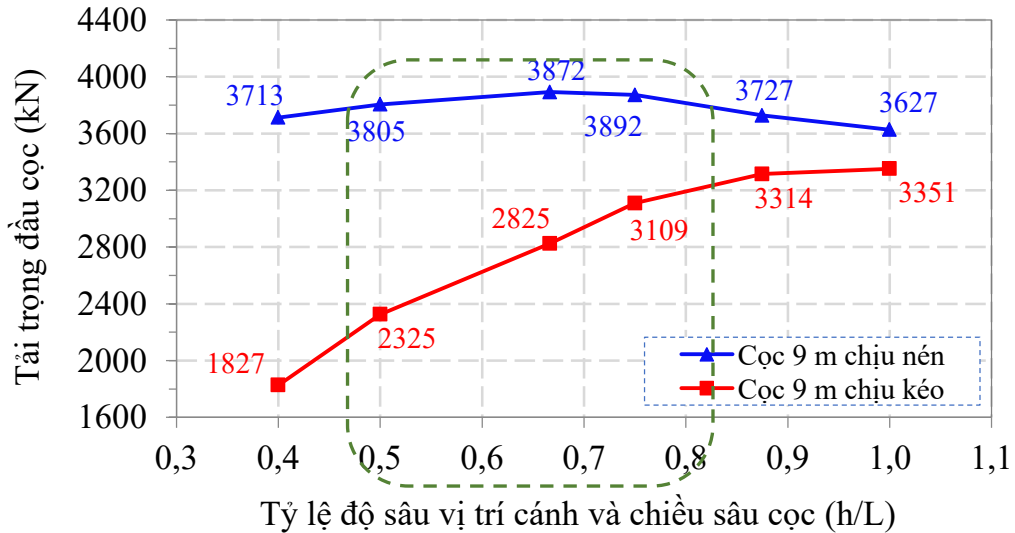
Hình 3.32. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 12 m khi $U_{gh} = 25,4$ mm



Hình 3.33. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 12 m khi $[U_c] = 60$ mm



Hình 3.34. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 9 m khi $U_{gh} = 25,4$ mm



Hình 3.35. Biến thiên tải trọng đầu cọc của cọc dài 9 m khi $[U_c] = 60$ mm

Kết quả thể hiện trên đồ thị các Hình 3.28 đến Hình 3.35 có thể thấy, khi cọc chịu tải trọng nén, vị trí cánh xoắn ảnh hưởng không nhiều đến chuyển vị đầu cọc và sức chịu tải của cọc, sự khác biệt chỉ khoảng từ 1,05 đến 1,1 lần khi cọc đạt đến chuyển vị giới hạn đầu cọc.

Sự khác biệt thể hiện rõ rệt khi cọc chịu tải trọng kéo, vị trí cánh xoắn càng sâu thì sức kháng nhổ của cọc càng lớn với sự khác biệt có thể đến từ 1,7 đến 2,1 lần, nguyên nhân là do có sự khác biệt về sức kháng nhổ của cọc có cánh xoắn khi chịu nén và chịu nhổ. Khi chịu nén thì sức kháng mũi phụ thuộc không đáng kể vào vị trí cánh xoắn, mà phụ thuộc phần lớn vào cường

độ của nền cát sạn san hô. Tuy nhiên, khi chịu nhỏ thì độ lớn sức kháng mũi phụ thuộc vào độ sâu vị trí cánh xoắn, càng gần bề mặt nền thì sức kháng cánh xoắn sẽ giảm do áp lực nền cát sạn san hô giảm dần. Đồng thời, lực ma sát thành bên cũng giảm do áp lực nén của nền giảm. Do vậy, sức chịu tải của cọc có cánh xoắn khi chịu nhỏ khác nhau lớn khi độ sâu vị trí cánh xoắn thay đổi. Sự gia tăng hiệu quả không đều, khi độ sâu cánh xoắn trên thân cọc lớn hơn $1/2$ chiều sâu hạ cọc trong nền thì hiệu quả gia tăng sức kháng nhỏ bắt đầu tăng ít. Tuy nhiên cũng cần lưu ý về mặt thi công hạ cọc có cánh xoắn trong nền hỗn hợp như nền trầm tích cát sạn san hô thì độ sâu cánh càng lớn thì càng khó khăn trong quá trình thi công. Do đó, khuyến nghị chỉ nên bố trí độ sâu cánh trong khoảng $1/2 \div 4/5$ chiều sâu hạ cọc trong nền cát sạn san hô hoặc các dạng nền có cấu trúc địa chất tương tự.

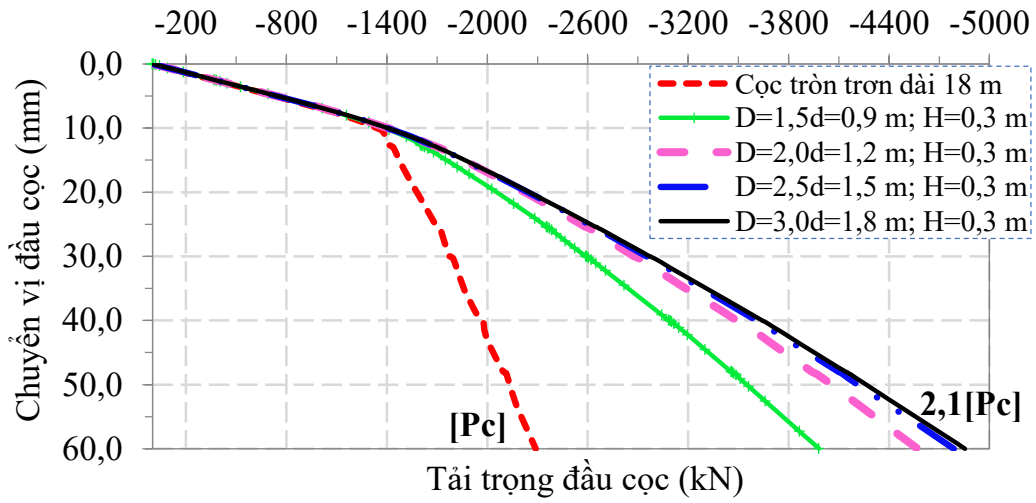
Ngoài ra, từ đồ thị phát triển phạm vi vùng biến dạng dẻo xung quanh cọc, đặc biệt là sự mở rộng vùng biến dạng dẻo ở đoạn cọc có cánh xoắn cần được quan tâm khi bố trí các cọc đơn trong móng cọc và xét tới hiệu ứng nhóm trong trong các hướng nghiên cứu tiếp theo.

3.3.3. Khảo sát đường kính và bước cánh xoắn

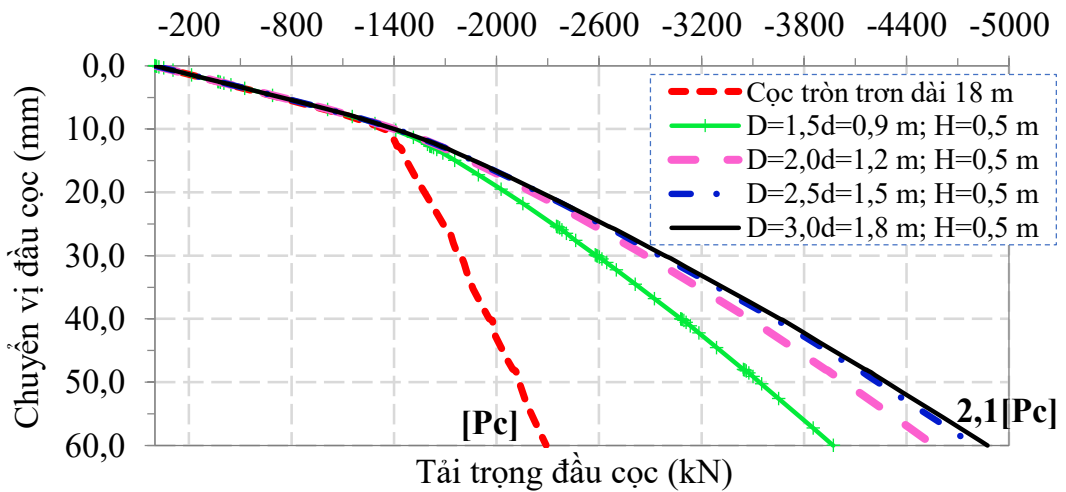
Trên cơ sở tham số mô hình cọc và nền theo bảng Bảng 3.1 đến Bảng 3.2, xây dựng các mô hình số và tính toán của cọc có 02 cánh xoắn gia cường sao cho khoảng cách của cánh là $S = 4 \cdot d = 2,4$ m; chiều sâu cánh dưới trong nền là z sao cho: $z/L = 3/4$. Nhưng có đường kính cánh và bước cánh thay đổi sao cho tỷ lệ giữa đường kính cánh (D) và đường kính của cọc (d) là $D/d = 1,5; 2,0; 2,5$ và $3,0$ (tương ứng đường kính cánh $D = 0,9$ m; $1,2$ m; $1,5$ m; và $1,8$ m). Mỗi trường hợp đường kính cánh trên xét tương ứng sự thay đổi bước cánh sao cho tỷ số giữa bước cánh (H) và đường kính cọc là $H/d = 0,5; 0,833$ và $1,167$ (tương ứng bước cánh là $H = 0,3$ m; $0,5$ m; và $0,7$ m).

Để đánh giá ảnh hưởng của đường kính cánh và bước cánh, tác giả so sánh sức chịu tải của cọc có 2 cánh xoắn trong các trường hợp khảo sát trên với trường hợp cọc tròn trơn có chiều dài là: $L_c = 18$ m. Kết quả mô hình số

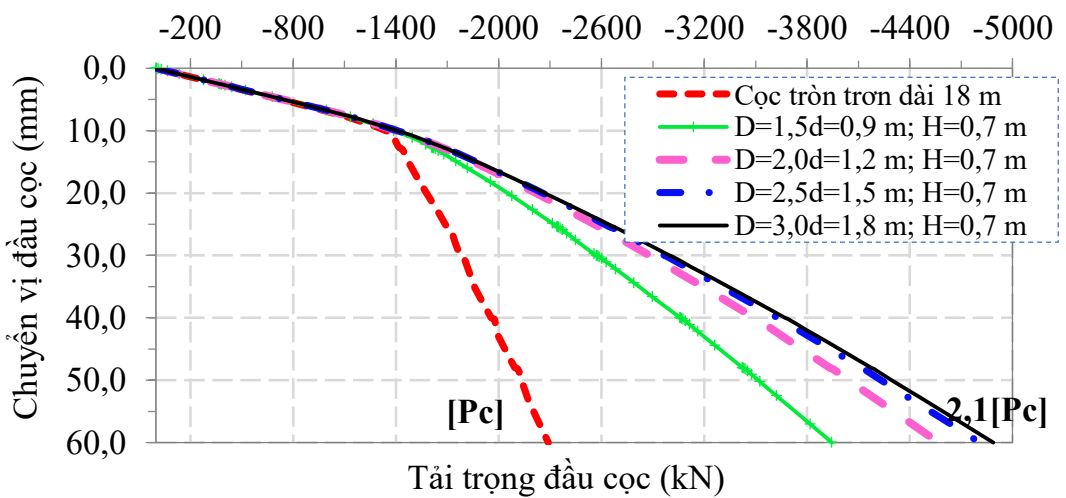
bài toán khảo sát được tổng hợp và thể hiện trên Hình 3.36 đến Hình 3.38:



Hình 3.36. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi H = 0,3 m



Hình 3.37. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi H = 0,5 m



Hình 3.38. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi H = 0,7 m

Tổng hợp tải trọng đầu cọc khi xét ảnh hưởng của đường kính cánh trong các trường hợp bước cánh $H = 0,3 \text{ m}$; $0,5 \text{ m}$ và $0,7 \text{ m}$ được trình bày trên Bảng 3.4 và Bảng 3.5.

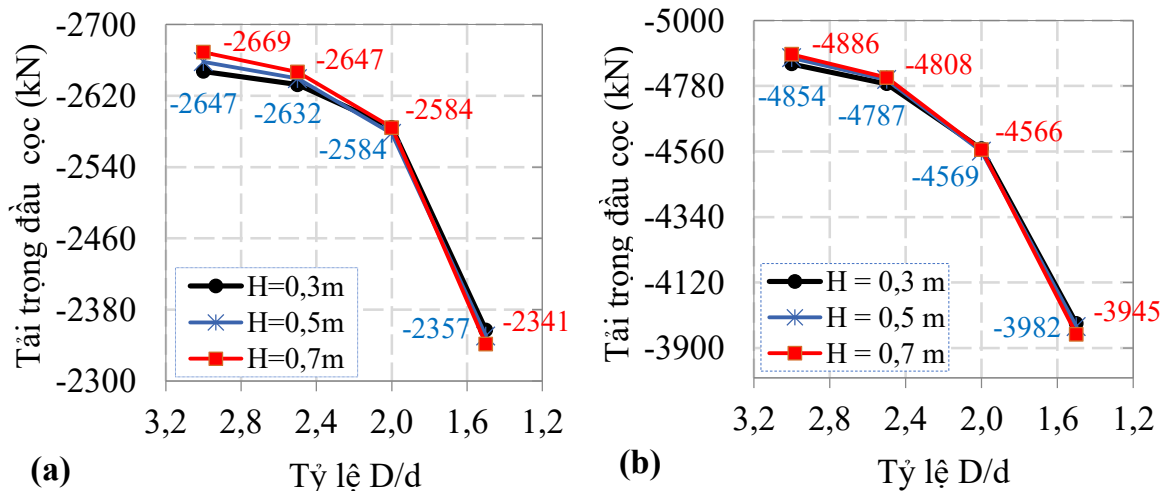
Bảng 3.4. Tổng hợp tải trọng đầu cọc ở chuyển vị giới hạn

Bước cánh H/d (m)	Đường kính cánh D/d (m)			
	1,500	2,000	2,500	3,000
0,500	-2.357,18	-2.584,41	-2.632,38	-2.647,24
0,833	-2.350,42	-2.577,62	-2.639,21	-2.657,98
1,167	-2.341,36	-2.584,27	-2.646,56	-2.668,78

Bảng 3.5. Tổng hợp tải trọng đầu cọc ở chuyển vị cực hạn

Bước cánh H/d (m)	Đường kính cánh D/d (m)			
	1,500	2,000	2,500	3,000
0,500	-3.981,54	-4.569,02	-4.787,46	-4.853,72
0,833	-3.971,49	-4.560,45	-4.801,06	-4.874,58
1,167	-3.944,84	-4.566,44	-4.808,24	-4.886,35

Đồ thị tương quan giữa tỷ lệ đường kính cánh và đường kính cọc với tải trọng đỉnh cọc trình bày trên Hình 3.39.



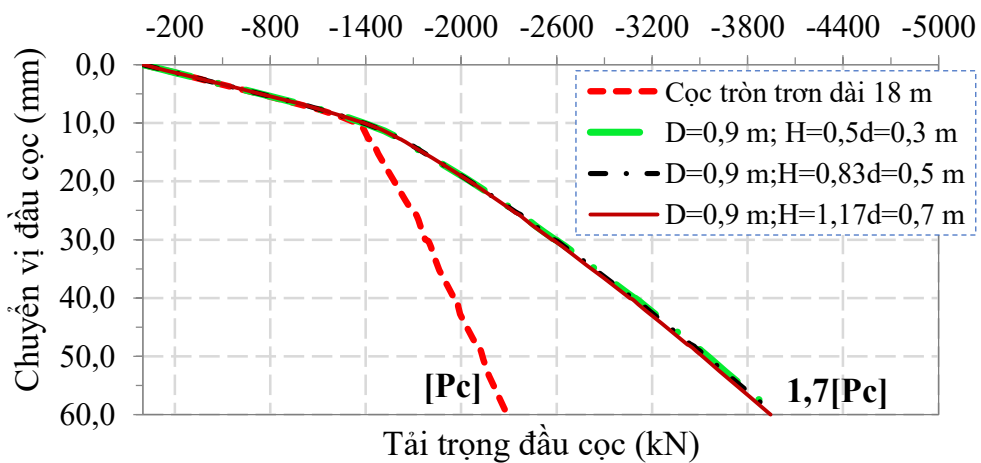
Hình 3.39. Biến thiên tải trọng đầu cọc theo đường kính cánh

(Hình a - trường hợp chuyển vị giới hạn 25,4 mm; Hình b - trường hợp chuyển vị cực hạn 60,0 mm)

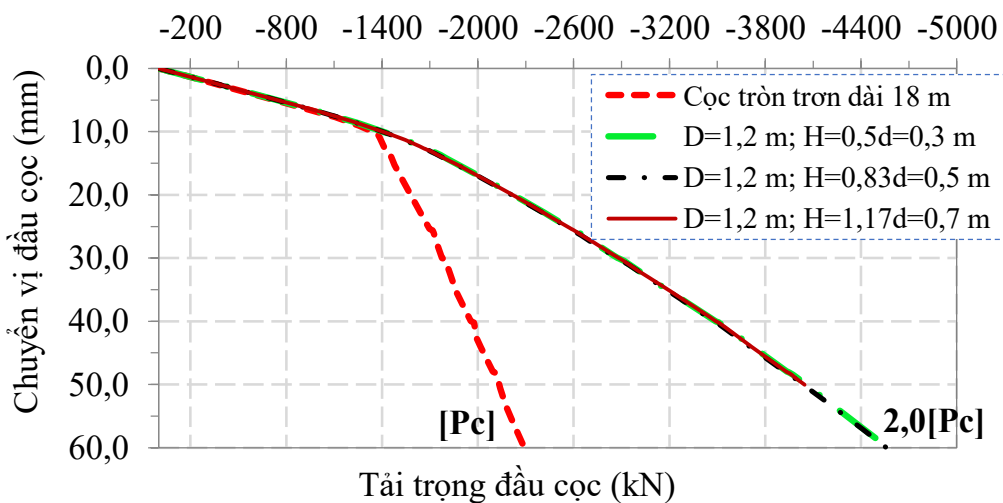
Các kết quả thể hiện trên đồ thị từ Hình 3.36 đến Hình 3.39 cho thấy, ở mỗi trường hợp bước cánh khác nhau thì sức chịu tải của cọc tăng tỉ lệ thuận

với sự tăng đường kính của cánh xoắn. Đặc điểm ảnh hưởng này thể hiện rõ nét khi đường kính cánh xoắn lớn hơn 2 lần đường kính của cọc so với trường hợp đường kính của cánh bằng 1,5 lần đường kính của cọc. Nhưng khi tỷ lệ này lớn hơn 2,5 lần thì sức chịu tải của cọc tăng lên nhỏ. Do vậy, tác giả kiến nghị đường kính của cánh có thể lựa chọn từ 2 đến 3 lần đường kính của cọc.

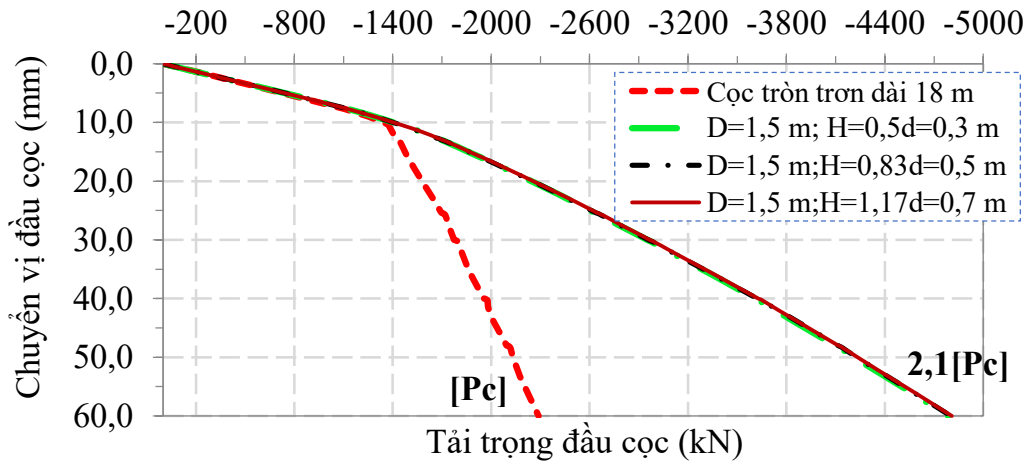
Để đánh giá ảnh hưởng của bước cánh (H) hay chiều cao một vòng cánh xoắn, tác giả tiến hành khảo sát các trường hợp bước cánh sau: H = 0,3 m; 0,5m và 0,7 m. Mỗi trường hợp bước cánh cần lập mô hình số với đường kính của cánh thay đổi khác nhau: D = 0,9 m; 1,2 m; 1,5 m và 1,8 m (tổng cộng 12 mô hình số). Sau đó so sánh với trường hợp cọc tròn trơn dài 18 m để nhận xét và đánh giá. Kết quả được thể hiện trên các Hình 3.40 đến Hình 3.43.



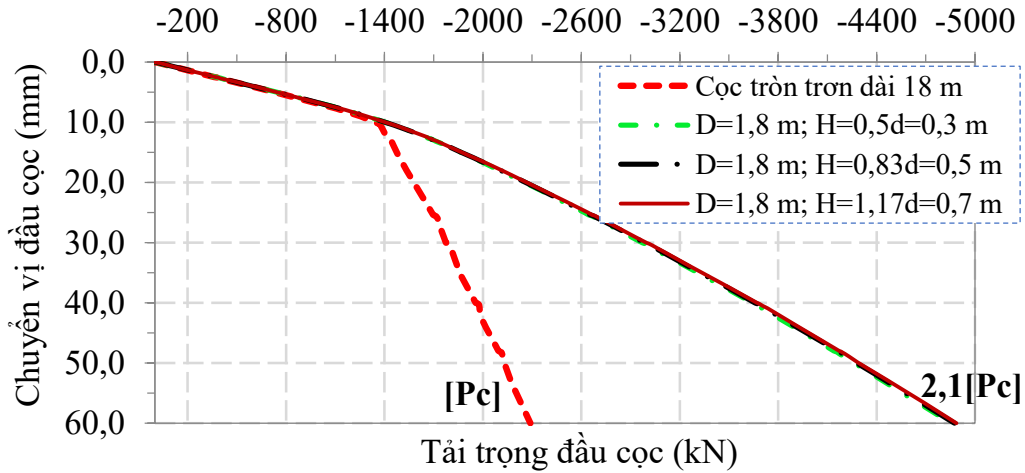
Hình 3.40. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi D = 1,5d



Hình 3.41. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi D = 2,0d

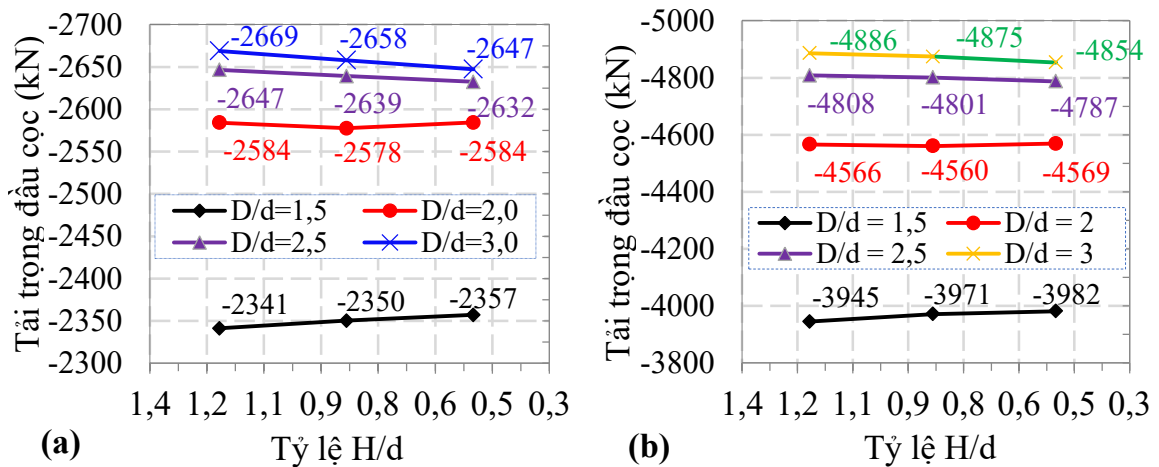


Hình 3.42. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi $D = 2,5d$



Hình 3.43. Tương quan tải trọng và chuyển vị đầu cọc khi $D = 3,0d$

Tổng hợp ảnh hưởng của bước cánh đến sự làm việc của cọc cải tiến trong các trường hợp đường kính cánh thay đổi theo tỷ lệ $D/d=1,5; 2,0; 2,5$ và $3,0$ được thể hiện trên Bảng 3.4, Bảng 3.5, Hình 3.44:



Hình 3.44. Biến thiên tải trọng đầu cọc theo bước cánh

Kết quả khảo sát nhận được trên các đồ thị từ Hình 3.40 đến Hình 3.44 cho thấy, đường cong tương quan giữa tỷ lệ bước cánh và đường kính cọc với tải trọng tại đầu cọc có độ dốc khá nhỏ (gần như nằm ngang), chứng tỏ sức chịu tải của cọc với các bước cánh khác nhau có sự thay đổi nhỏ. Do đó, bước cách trong bài toán khảo sát ảnh hưởng không đáng kể đến sức chịu tải của cọc ống thép có 02 cánh xoắn trong nền cát sạn san hô.

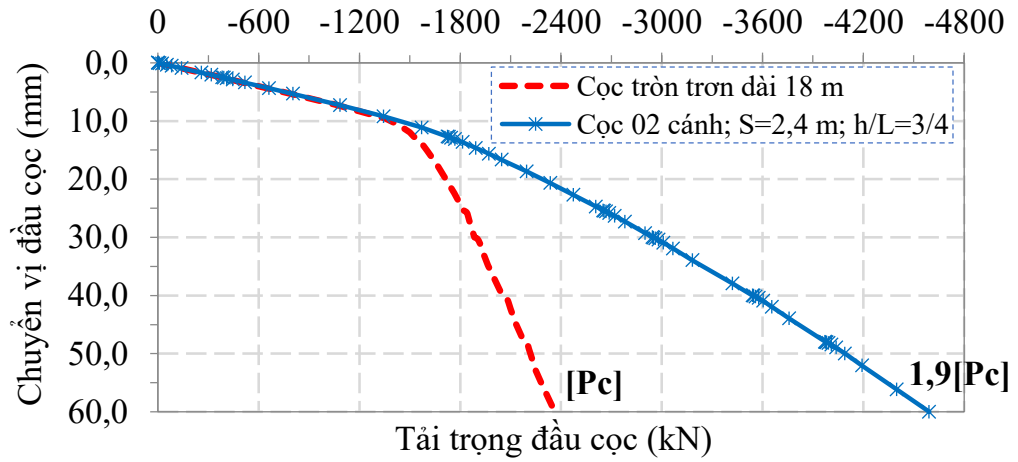
3.4. Khảo sát sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn chịu đồng thời tải trọng tĩnh dọc trục và ngang

Trong phần 3.3, tác giả đã khảo sát và kiến nghị cấu hình hợp lý của cọc ống thép khi được gia cường các cánh xoắn. Tuy nhiên, các trường hợp khảo sát này mới xét trường hợp cọc ống thép chịu tải trọng tĩnh dọc trục mà chưa đánh giá ảnh hưởng của tải trọng ngang. Trong khi đó các công trình xây dựng trên các khu vực nền cát sạn san hô, ngoài các yếu tố tác động chủ yếu làm cọc chịu tải trọng dọc trục thường xuyên, còn có thể xảy ra trường hợp tải trọng tức thời theo phương ngang do sóng, gió, dòng chảy, làm cho cọc ống thép khi sử dụng trong các công trình này có thể chịu đồng thời của tải trọng dọc trục và tải trọng ngang.

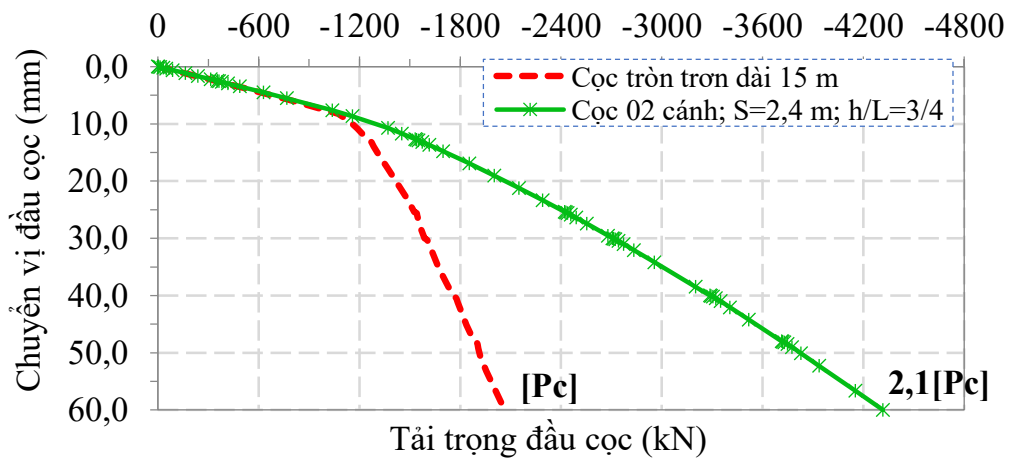
Để khảo sát sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn khi chịu tải trọng theo phương ngang đồng thời với dọc trục, tác giả xét cọc chịu chuyển vị cưỡng bức dọc trục tại đầu cọc như phân trên và chịu chuyển vị cưỡng bức giới hạn theo phương ngang của cọc theo kiến nghị của Vũ Công Ngữ tương ứng là 10 mm [5]. Với chuyển vị ngang giới hạn này, tác giả xác định được từ kết quả phân tích mô hình số tải trọng giới hạn theo phương ngang (P_{ghn}) tương ứng các trường hợp cọc ống thép có các chiều dài khác nhau (trường hợp cọc dài 18 m: $P_{ghn} = 140$ kN khi chịu kéo và -152,1 kN khi chịu nén; cọc chiều dài 15 m: $P_{ghn} = 139$ kN khi chịu kéo và -152,2 kN khi chịu nén; cọc có chiều dài 12 m: $P_{ghn} = 138$ kN khi chịu kéo và -152,5 kN khi chịu nén).

Về mô hình nền cát sạn san hô tương tự như phần 3.3 trên, đối với cọc ống thép chỉ khảo sát trường hợp cọc đường kính 0,6 m có 2 cánh xoắn với độ sâu vị trí cánh xoắn theo phạm vi kiến nghị ở trên từ 1/2 đến 4/5, nên trong trường hợp này tác giả chọn bằng 3/4 lần chiều dài của cọc trong nền, chiều dài cọc thay đổi theo các độ mảnh khác nhau ($L_c = 18$ m; 15 m; 12 m và 9 m).

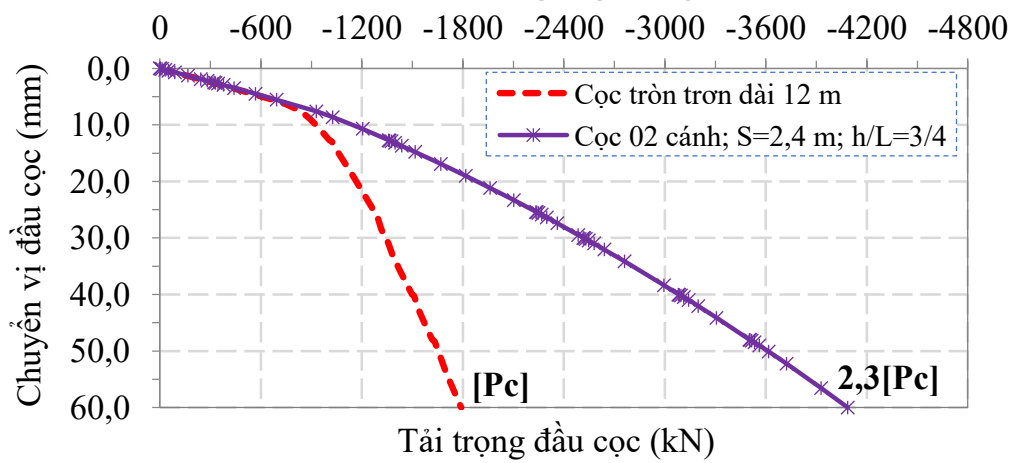
Kết quả khảo sát tổng hợp trên đồ thị các Hình 3.45 đến Hình 3.52:



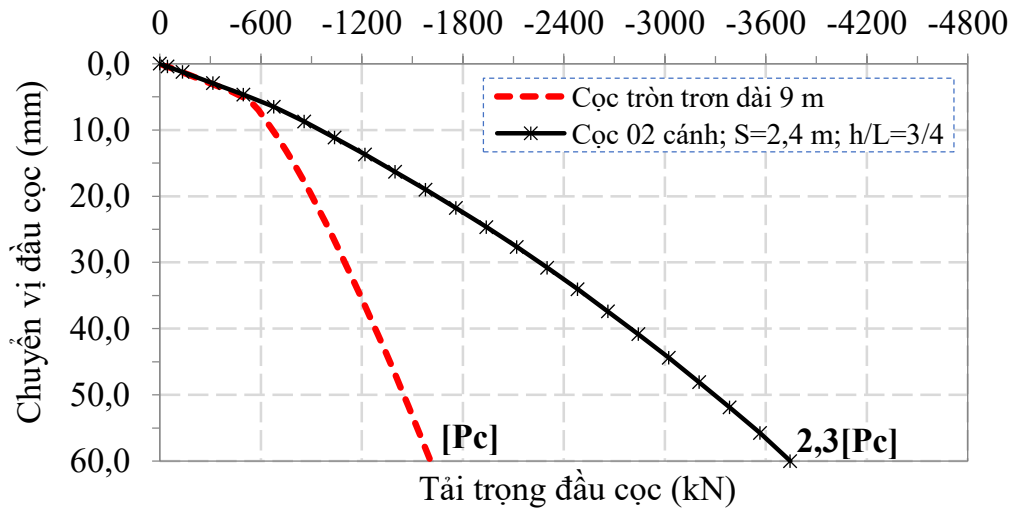
Hình 3.45. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 18 m khi chịu nén dọc trục và ngang đồng thời



Hình 3.46. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 15 m khi chịu nén dọc trục và ngang đồng thời



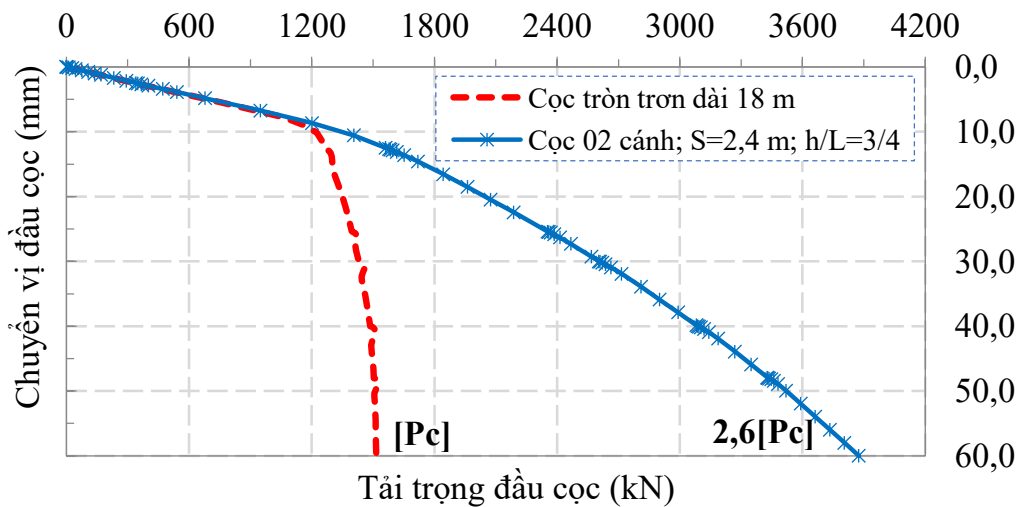
Hình 3.47. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 12 m khi chịu nén dọc trục và ngang đồng thời



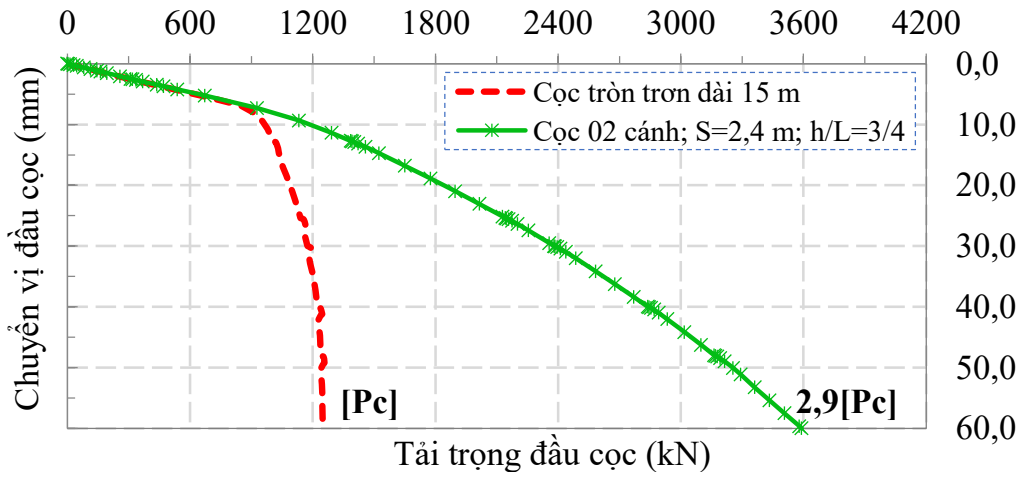
Hình 3.48. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 9 m khi chịu nén dọc trục và ngang đồng thời

Kết quả trên đồ thị các Hình 3.45 đến Hình 3.48 cho thấy, khi chịu đồng thời nén dọc trục và theo phương ngang thì sức chịu tải ứng với chuyển vị cực hạn ($[U_c] = 60,0 \text{ mm}$) của cọc ống thép có 02 cánh xoắn tăng từ 1,9 đến 2,3 lần so với cọc tròn trơn có cùng mô hình tính toán. Chứng tỏ hiệu quả rất lớn từ việc phát huy sức kháng ma sát bên và mũi của đoạn cọc có 2 cánh xoắn so với đoạn cọc tròn trơn truyền thống.

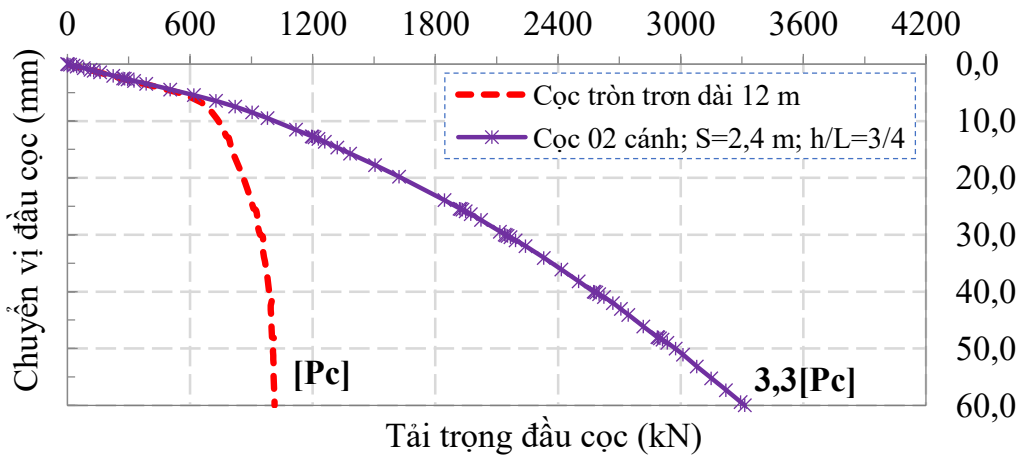
Đối với trường hợp cọc chịu nhỏ và tải ngang đồng thời, đồ thị tương quan tải trọng và chuyển vị đỉnh cọc của cọc có 2 cánh xoắn so với cọc tròn được thể hiện từ Hình 3.49 đến Hình 3.52.



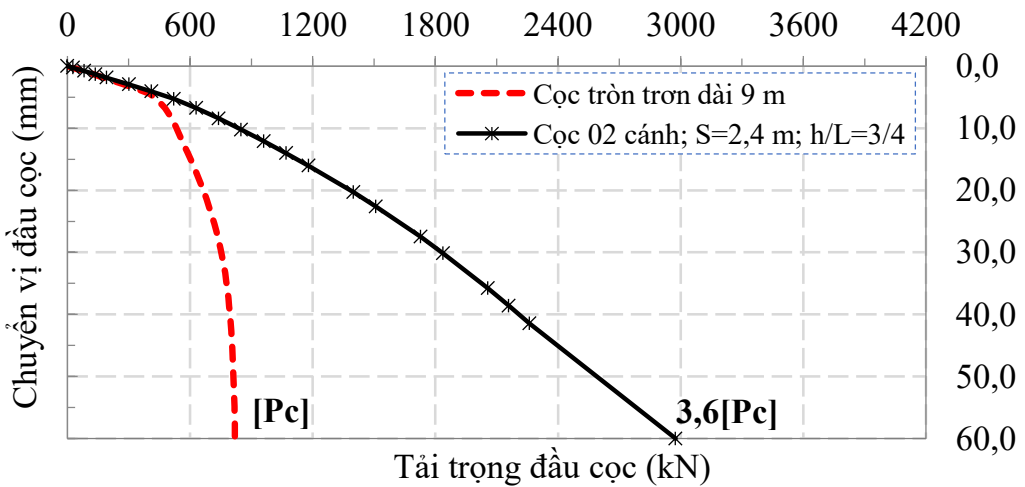
Hình 3.49. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 18 m khi chịu nhỏ dọc trục và ngang đồng thời



Hình 3.50. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 15 m khi chịu nhỏ dọc trục và ngang đồng thời



Hình 3.51. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 12 m khi chịu nhỏ dọc trục và ngang đồng thời



Hình 3.52. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc dài 9 m khi chịu nhỏ dọc trục và ngang đồng thời

Kết quả nhận được trên đồ thị tương quan giữa tải trọng và chuyển vị đầu cọc từ Hình 3.49 đến Hình 3.52 trong trường hợp cọc chịu nhỏ và tải trọng phương ngang đồng thời cho thấy hiệu quả về sức chịu tải cực hạn của cọc ống thép tăng lên rất lớn từ 2,6 đến 3,6 lần so với cọc tròn trơn có chiều dài, đường kính tương ứng. Kết quả nghiên cứu cũng phản ánh được hiệu quả về sức chịu tải của cọc trong trường hợp chịu nhỏ dọc trục và tải ngang đồng thời lớn hơn trường hợp cọc chịu nén và tải ngang đồng thời.

3.5. Kết luận chương 3

Mặc dù luận án chưa thể nghiên cứu thực nghiệm cọc ống thép có cánh xoắn làm việc trong nền san hô trên mô hình vật lý. Nhưng với nội dung đã thực hiện trên mô hình số và các kết quả nghiên cứu đã đạt được, tác giả luận án rút ra kết luận chính của chương 3 như sau:

1) Làm sáng tỏ sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn khi xét ảnh hưởng số lượng và khoảng cách cánh xoắn đến sức chịu tải giới hạn và cực hạn của cọc có từ 01 đến 02 cánh xoắn so với cọc tròn trơn truyền thống. Từ sự thay đổi sức chịu tải của các cọc khi chịu nhỏ và nén khác nhau, tác giả kiến nghị có thể tham khảo thiết kế từ 2 cánh xoắn trở lên và khoảng cách của cánh xoắn hiệu quả, hợp lý từ 3 đến 4 lần đường kính của cọc khi cọc ống thép có cánh xoắn xây dựng trong nền cát sạn san hô có cấp phối và độ chặt trong giới hạn nghiên cứu;

2) Đánh giá ảnh hưởng của độ sâu vị trí cánh xoắn trên thân cọc tương ứng tỷ lệ giữa độ sâu cánh dưới và chiều sâu cọc trong nền là 1/1; 7/8; 3/4; 2/3; 1/2; 1/2,5; 1/3; 1/4 và 1/5 đến sự làm việc của cọc ống thép có 2 cánh xoắn. Kiến nghị vị trí cánh trên thân cọc hiệu quả cả về khía cạnh làm việc của cọc cũng như yếu tố thuận lợi khi thi công hạ cọc có thể tham khảo trong khoảng 1/2÷4/5 chiều sâu cọc trong nền cát sạn san hô nghiên cứu;

3) Làm rõ sự làm việc của cọc ống thép có 2 cánh xoắn khi thay đổi đường kính cánh xoắn trong các trường hợp tỷ lệ giữa đường kính cánh xoắn với đường kính ngoài của cọc là: 1,5; 2,0; 2,5; 3,0. Kiến nghị để hài hoà sức

chịu tải và khả năng hạ cọc trong nền cát sạn san hô, có thể tham khảo lựa chọn đường kính cánh xoắn khoảng từ 2-3 lần đường kính của cọc;

4) Bước cánh ảnh hưởng không đáng kể đến sức chịu tải của cọc ống thép có 02 cánh xoắn nói riêng, sự làm việc của cọc nói chung. Kiến nghị, tùy điều kiện phân bố địa chất nền cát sạn san hô cụ thể và tham khảo kết quả nghiên cứu sự làm việc của cọc để lựa chọn bước cánh phù hợp thực tiễn;

5) Sức chịu tải cực hạn của cọc ống thép có 2 cánh xoắn tăng từ 1,9 đến 3,9 lần khi cọc chỉ chịu tải dọc trục; tăng từ 1,9 đến 2,3 lần khi cọc chịu nén dọc trục và ngang đồng thời; trong khi đó khi chịu nhỏ dọc trục và đẩy ngang đồng thời thì sức chịu tải tăng từ 2,6 đến 3,6 lần. Ngược lại, cọc ống thép có 2 cánh xoắn có thể giảm chuyển vị cực hạn đầu cọc từ 2,8 đến 6,3 lần so với cọc tròn trơn khi xét cùng giá trị tải trọng. Do đó, cọc ống thép có 2 cánh xoắn làm việc rất hiệu quả trong nền cát sạn san hô, khu vực mà cọc ống thép không chỉ chịu tải trọng thường xuyên theo phương dọc trục mà còn có thể chịu tải trọng tức thời theo phương ngang;

6) Cần tiếp tục định hướng nghiên cứu tiếp theo bằng phương pháp thực nghiệm cọc ống thép có cánh xoắn trên mô hình vật lý thu nhỏ trong phòng thí nghiệm, hoặc thực nghiệm trực tiếp cọc thực ở hiện trường nền cát sạn san hô trên các đảo xa bờ. Làm cơ sở khoa học kiểm chứng và rút ra những đánh giá, kết luận, kiến nghị khách quan, phù hợp thực tiễn.

Chương 4. NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ CỦA CỌC ỚNG THÉP CÓ CÁNH XOẮN XÉT ĐẾN BIẾN ĐỘNG THAM SỐ NỀN CÁT SẠN SAN HỒ

Trong chương này, tác giả sử dụng ngôn ngữ lập trình phần mềm MATLAB Version 7.6.0.324 để xây dựng chương trình tính toán sức chịu tải của cọc nhằm đánh giá ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn xét đến sự biến động các tham số ngẫu nhiên nền cát sạn san hô đã được xác định giá trị trung bình bằng phương pháp thực nghiệm ở chương 2. Kết quả nghiên cứu của chương 4 là xác định được các hàm hồi quy bậc 4 đánh giá ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô qua sức chịu tải cho phép và sức chịu tải cực hạn của cọc. Trong đó, góc ma sát trong, góc ma sát ngoài và trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà biến động một khoảng hữu hạn.

4.1. Đặt vấn đề nghiên cứu

Các kết quả nghiên cứu đạt được ở Chương 3 đã làm sáng tỏ hiệu quả rất lớn về sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn gia cường so với cọc ống thép tròn trơn truyền thống. Kiến nghị được các tham số cánh xoắn hợp lý như: số lượng, khoảng cách, độ sâu, đường kính và bước cánh xoắn trong điều kiện, phạm vi nghiên cứu là cọc ống thép trên nền cát sạn san hô. Tuy nhiên, hạn chế của bài toán nghiên cứu theo phương pháp PTHH ở chương 3 là chưa phản ánh được sự làm việc của cọc khi xét đến sự biến động các tham số ngẫu nhiên của nền cát sạn san hô trong quá trình khai thác công trình.

Trong khi đó, kết quả nghiên cứu về nền san hô của các nhà khoa học đã công bố cho thấy sự phân tán của tham số nền [2], [6], [9], đặc biệt là góc ma sát trong, trọng lượng thể tích, ma sát giữa cát sạn san hô với bề mặt thép làm cọc. Ngoài ra, trong quá trình khai thác công trình chịu tác dụng của tải trọng theo thời gian và có thể có tính lặp, làm cho sức kháng ma sát của nền cát sạn san hô suy giảm như kết quả nghiên cứu thực nghiệm ở chương 2. Đồng thời, thành phần hạt của hỗn hợp vật liệu cát sạn san hô còn có thể bị vỡ sau quá trình chịu tải, làm cho cấp phối và đặc trưng tham số của nền cát sạn san hô trước và sau mỗi giai đoạn chịu tải có sự biến động. Do đó, tham số nền san hô nói chung, nền cát sạn san hô nói riêng có thể thay đổi ngẫu nhiên theo thời gian khai thác công trình do tác động của nhiều yếu tố.

Từ phân tích trên, tác giả nhận thấy sự biến động ngẫu nhiên của các tham số cát sạn san hô có thể do một số nguyên nhân cơ bản như sau:

- Tính phân tán ngẫu nhiên của vật liệu san hô, sự phân bố không đồng đều về địa chất tại mỗi hố khoan và ở các vị trí hố khoan khác nhau trên phạm vi rất lớn thuộc vùng biển đảo xa bờ tỉnh Khánh Hoà [2], [6];

- Tác động của yếu tố chủ quan trong quá trình thí nghiệm các tham số vật liệu cát sạn san hô nhận được kết quả có đặc điểm phân tán như đã trình bày trong chương 2. Ngoài ra sự thay đổi đặc trưng cơ lý của nền cát sạn san hô do sự biến động của cấu trúc địa chất sau khi hạ cọc ống thép ổn định trong nền cát sạn san hô so với trước khi thi công hạ cọc;

- Dưới tác động của các yếu tố khác nhau trong quá trình làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn, đặc biệt là chịu tải trọng có tính lặp và sự thay đổi ngẫu nhiên của tải trọng so với tải trọng tiêu chuẩn thiết kế, làm cho sức kháng ma sát của nền cát sạn san hô như kết quả thí nghiệm cắt lặp trong chương 2 hoặc sức chịu tải của cọc cũng có sự thay đổi theo thời gian khai thác và tuổi thọ thiết kế công trình [6].

Do các tham số nhận được từ kết quả thí nghiệm lớn, nên tác giả giới hạn phạm vi nghiên cứu sự biến động của 3 tham biến ngẫu nhiên quan trọng có ảnh hưởng lớn đến kết quả tính toán ứng xử và sức kháng của cọc ống thép, bao gồm: Góc ma sát trong và trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà của cát sạn san hô, góc ma sát ngoài của cát sạn san hô với bề mặt thép làm cọc ống thép, trong đó:

- Góc ma sát trong của cát sạn san hô: là tham số ảnh hưởng đến sức kháng bên của đoạn cọc ống thép có cánh xoắn.

- Góc ma sát ngoài giữa cát sạn san hô với bề mặt thép: liên quan đến sức kháng bên của đoạn cọc tròn trơn trong cọc ống thép có cánh xoắn.

- Trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà: không chỉ ảnh hưởng đến áp lực ngang khi tính sức kháng bên, còn thay đổi sức kháng mũi của cọc.

Sự ảnh hưởng của các tham số trên trong tính toán sức kháng của cọc ống thép có cánh xoắn được tác giả thể hiện trong các biểu thức (4.1), (4.9), (4.10), (4.11) và (4.12) khi xây dựng chương trình tính toán ứng xử của cọc

ống thép có cánh xoắn trong phần 4.2 tiếp theo của chương 4.

Các tiêu chuẩn tính toán thiết kế móng cọc, đặc biệt là móng cọc của dạng công trình giao thông khi tính toán thiết kế thường xét các yếu tố ảnh hưởng của độ tin cậy số liệu tính toán bằng cách kể thêm hệ số độ tin cậy [20]. Tuy nhiên, trong thực tế mỗi trường hợp có điều kiện khác nhau sẽ ảnh hưởng đến độ tin cậy của số liệu. Do các yếu tố chủ quan và khách quan mà số liệu tham số nền khảo sát như góc ma sát trong, trong lượng thể tích, góc ma sát ngoài trong tính toán có biên độ thay đổi đáng kể, đặc biệt đối với dạng nền phức tạp như cát sạn san hô. Khi đó, việc tính toán sức kháng công trình xét đến hệ số độ tin cậy chung cho mọi điều kiện là chưa hợp lý.

Ngoài ra, việc định chuẩn các hệ số an toàn khi tính toán theo phương pháp ứng suất cho phép và phương pháp trạng thái giới hạn gặp nhiều khó khăn, phức tạp và tùy thuộc mức độ an toàn mục tiêu. Để khắc phục những hạn chế trên, một phương pháp tính toán thiết kế đang được quan tâm nghiên cứu và ứng dụng vào thực tiễn là phương pháp tính toán, thiết kế theo lý thuyết độ tin cậy, nhằm trực tiếp dự báo mức độ tin cậy hay xác suất sự cố đối với kết cấu cọc và việc lựa chọn tính toán, thiết kế trở nên linh hoạt. Khái niệm độ tin cậy sức chịu tải của cọc trong luận án là xác suất mà cọc đó đảm bảo an toàn sử dụng theo mục tiêu thiết kế trong suốt thời gian khai thác theo tuổi thọ tính toán yêu cầu của công trình.

Để giải quyết vấn đề đặt ra, việc sử dụng phương pháp tính toán phần tử hữu hạn như trong chương 3 khi xét với một ngưỡng biên độ biến động của các tham số nền cát sạn san hô đó cần phải mô phỏng số rất nhiều bài toán nghiên cứu. Khi đó dẫn đến việc mô hình hoá và phân tích số liệu nhận được từ mô hình đó đòi hỏi khối lượng và công sức rất lớn hoặc khó khả thi do phải thực hiện số lượng lớn mô hình và tính toán, phân tích số liệu tương tác.

Do đó, tác giả sử dụng phần mềm có mã nguồn mở để vận dụng ưu thế của lý thuyết mô phỏng số Monte-Carlo tính toán sức chịu tải của cọc theo lý thuyết độ tin cậy có xét đến sự biến động của các tham số ngẫu nhiên của nền cát sạn san hô, phương pháp này thích hợp khi bài toán có các biến ngẫu nhiên độc lập với nhau [3]. Đây là vấn đề mới và có giá trị khoa học, thực tiễn

lớn vì chưa có nghiên cứu được công bố theo phương pháp này về cọc ống thép có cánh xoắn xây dựng trong điều kiện nền địa chất là cát sạn san hô.

4.2. Xây dựng chương trình tính toán ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô

4.2.1. Xây dựng chương trình tính toán

4.2.1.1. Mô hình tính toán

Trong phần này tác giả xây dựng chương trình tính toán độc lập theo phương pháp độ tin cậy khi ứng dụng lý thuyết mô phỏng số Monte-Carlo để xét đến sự biến động một số tham số ngẫu nhiên của cát sạn san hô vào việc phân tích và đánh giá ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô chịu tải trọng nén dọc trục tại đầu cọc (cơ sở tính toán theo lý thuyết sức chịu tải của cọc theo độ tin cậy và khái quát lý thuyết Monte-Carlo được tác giả trình bày trong phụ lục 6 kèm theo nội dung luận án).

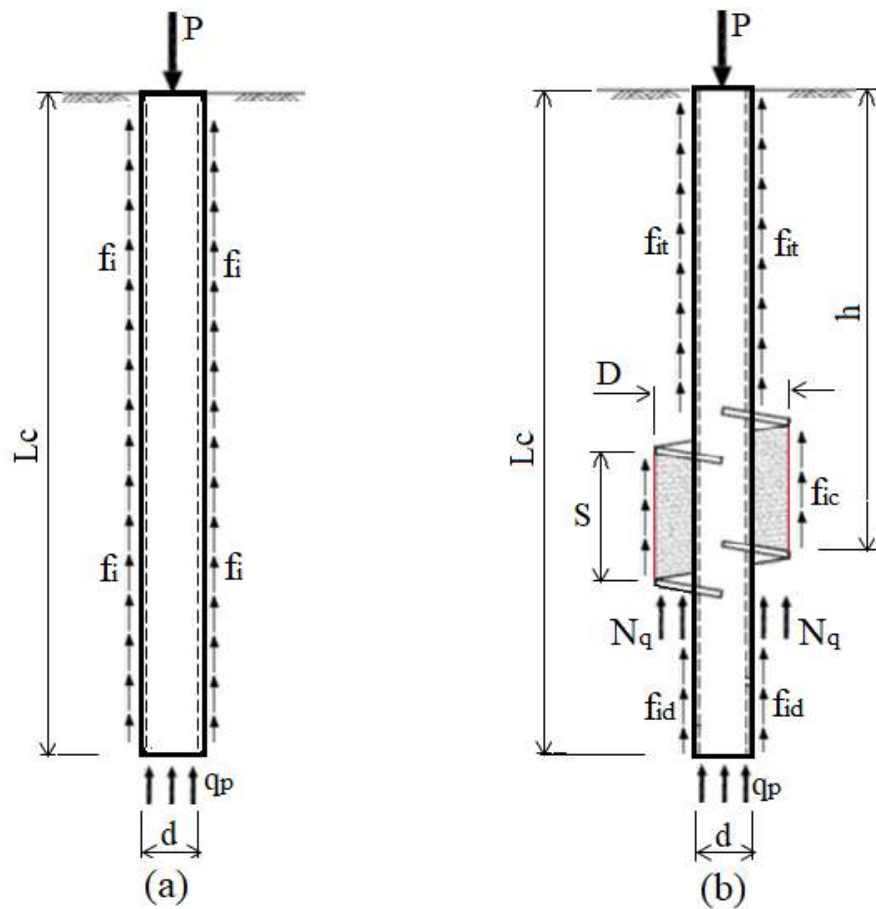
Để kiểm chứng kết quả tính toán theo lý thuyết độ tin cậy, tác giả so sánh với kết quả tính toán tiên định theo phương pháp trạng thái giới hạn. Do đó, chương trình tính toán đồng thời bao gồm 02 module sức chịu tải của cọc theo phương pháp trạng thái giới hạn và phương pháp độ tin cậy như sau:

- Theo phương pháp trạng thái giới hạn (tiên định): Ứng dụng lý thuyết tính toán sức chịu tải dọc trục của Viện dầu khí Hoa Kỳ (API) [32], [33], [34]. Do bài toán nghiên cứu có ứng xử phi tuyến, nên cần sử dụng phương pháp lặp Newton - Raphson dựa trên lời giải của phương trình tuyến tính để giải bài toán phi tuyến [2]. Sức chịu tải của cọc từ chương trình xây dựng theo phương pháp này được kiểm chứng với kết quả tính toán của bài toán tương tự khi sử dụng phần mềm thương mại PileAXL 2.2 (Piles under Axial Loading) được phát triển bởi công ty Innovative Geotechnics Pty Ltd, Hoa Kỳ để khẳng định độ tin cậy và phù hợp của chương trình đã xây dựng. Đây là phần mềm được xây dựng, phân tích, tính toán và đánh giá sức chịu tải của cọc theo trạng thái giới hạn của API [85].

- Phương pháp lý thuyết độ tin cậy: Ứng dụng lý thuyết mô phỏng số Monte-Carlo để xét sự thay đổi ngẫu nhiên các tham số cát sạn san hô, với mỗi bộ tham số nền phân bố theo quy luật nhất định sẽ tính toán được tiên

định sức chịu tải của cọc, nên với số phép thử ngẫu nhiên thu được tập hợp số liệu tương ứng về sức chịu tải của cọc, tập hợp này phân bố theo quy luật nhất định, xử lý số liệu thống kê để tính toán được sức chịu tải kỳ vọng của cọc. Do hiện nay ở Việt Nam chưa xây dựng và ban hành tiêu chuẩn để tính toán sức chịu tải của cọc theo lý thuyết độ tin cậy, nên tác giả vận dụng tiêu chuẩn quốc gia của Trung Quốc “*National Standard of the PRC, GB 50153-2008 Unified standard for reliability design of engineering structures. Beijing: China Architecture & Building Press*” để tính toán [56].

Trong bài toán khảo sát, nghiên cứu ứng xử của cọc ống thép dài 8 m, đường kính ngoài $d = 0,6$ m, xét đối với cọc tròn trơn và cọc có 02 cánh xoắn đường kính 1,2 m (2 lần đường kính của cọc), khoảng cách cánh là 1,8 m (3 lần đường kính của cọc), chiều sâu cánh là 6 m ($3/4$ chiều dài của cọc trong nền) theo các kiến nghị từ kết quả đã nghiên cứu ở chương 3 (Hình 4.1)



Hình 4.1. Mô hình tính sức chịu tải của cọc theo phương pháp hệ số nền
(a - Cọc tròn trơn; b - cọc có 2 cánh xoắn ước tính theo khối nền)

Tác giả đánh giá ứng xử của cọc thông qua mối tương quan giữa sức chịu tải của cọc với chuyển vị cho phép tại đầu cọc trong 2 trường hợp sau:

- Trường hợp 1: Xét theo điều kiện khai thác công trình, sức chịu tải giới hạn của cọc được tính toán qua tương quan với chuyển vị giới hạn cho phép tại đầu cọc. Chuyển vị cho phép phụ thuộc vào loại công trình và tiêu chuẩn áp dụng, trong bài toán khảo sát này tác giả vận dụng yêu cầu về độ lún cho phép của công trình giao thông là $U_{gh} = 25,4 \text{ mm}$ [5] để khảo sát với chuyển vị cho phép tại đầu cọc là: 25,4 mm.

- Trường hợp 2: Theo điều kiện sức chịu tải cực hạn của cọc đơn, tương ứng với chuyển vị cực hạn tại đầu cọc là $[U_c] = 0,1d = 60 \text{ mm}$ [5], [33].

Theo mô hình trên Hình 4.1, Sức chịu tải của cọc ống thép tròn trơn khi chịu tác dụng của tải trọng nén dọc trục được xác định theo biểu thức sau [5]:

$$[P_c] = Q_f + Q_p, \quad (4.1)$$

trong đó:

$$Q_f = u_c \cdot \sum f_i \cdot \Delta z_i \text{ - sức kháng bên của cọc;} \quad (4.2)$$

$$Q_p = q_p A_p \text{ - sức kháng mũi của cọc;} \quad (4.3)$$

q_p - sức kháng mũi đơn vị của cọc; A_p - tiết diện ngang của mũi cọc; u_c - chu vi thân cọc; f_i - sức kháng bên đơn vị của cọc; Δz_i - chiều dài mỗi đoạn cọc tính toán sức kháng bên đơn vị f_i .

Đối với cọc có 02 cánh xoắn, theo kết quả phân tích sự phát triển vùng biến dạng dẻo trong nền ở khu vực xung quanh cọc và mũi cọc thể hiện trên Hình 3.6 và Hình 3.19. Trong trường hợp khoảng cách giữa 2 cánh bằng 3 lần đường kính của cọc và chiều sâu của cánh bằng 3/4 chiều dài của cọc trong nền thì phần đất giữa 2 cánh là một khối và làm việc như một cọc trụ đất. Do đó, trong bài toán nghiên cứu này tác giả thực hiện quy đổi đoạn cọc trong phạm vi 02 cánh này làm việc như đoạn cọc có đường kính bằng đường kính của cánh, phương pháp này đã được các tác giả như: Byrne B.W., Houlsby G.T. (2015) [47]; Perko H.A. (2009) [55]; Nowkandeh M.J., Choobbasti A.J. (2021) [66]; Ali M. (2020) [67] nghiên cứu và đề xuất. Khi đó, sức chịu tải cọc căn cứ theo mô hình trên Hình 4.1 được xác định theo biểu thức sau:

$$[P_c] = (Q_{ft} + Q_{fc} + Q_{fd}) + (Q_p + Q_c), \quad (4.4)$$

trong đó:

Q_{ft} - sức kháng bên của đoạn cọc phía trên của cánh (đoạn trên);

$$Q_{ft} = u_1 \cdot \sum f_{it} \cdot \Delta z_{it}; \quad (4.5)$$

Q_{fd} - sức kháng bên của đoạn cọc phía dưới của cánh (đoạn dưới);

$$Q_{fd} = u_1 \cdot \sum f_{id} \cdot \Delta z_{id}; \quad (4.6)$$

Q_{fc} - sức kháng bên của đoạn cọc giữa 02 cánh (đoạn cánh);

$$Q_{fc} = u_2 \cdot \sum f_{ic} \cdot \Delta z_{ic}; \quad (4.7)$$

f_{it} ; f_{id} ; f_{ic} - lần lượt sức kháng bên đơn vị của đoạn cọc trên cánh, đoạn cọc dưới của cánh và đoạn cọc giới hạn giữa 2 cánh;

Δz_{it} ; Δz_{id} ; Δz_{ic} - lần lượt là chiều dài tương ứng của mỗi đoạn cọc trên cánh, đoạn cọc dưới của cánh và đoạn cọc giới hạn giữa 2 cánh;

u_1 và u_2 - lần lượt là chu vi thân cọc tương ứng với đường kính của cọc và chu vi của đoạn có 02 cánh tương ứng với đường kính của cánh.

Q_p , Q_c - lần lượt là sức kháng của mũi cọc và sức kháng do phản lực của cánh dưới khi cọc chịu nén. Q_p được xác định theo biểu thức (4.8) [5], [33], và Q_c được xác định theo biểu thức (4.9) [66]:

$$Q_p = q_p \cdot A_p; \quad (4.8)$$

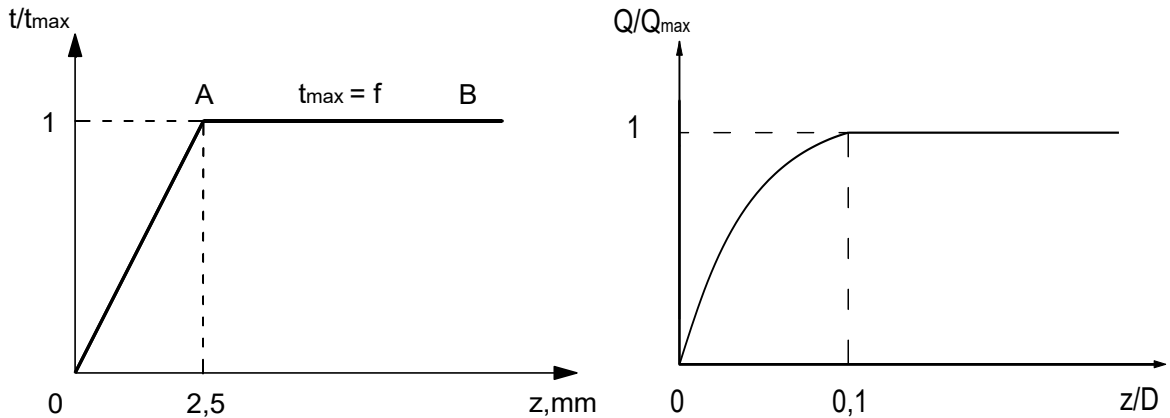
$$Q_c = 2 \cdot D \cdot \gamma \cdot (N_q - 1) \cdot A_c; \quad (4.9)$$

D - đường kính cánh; N_q - hệ số phản lực của cánh khi cọc chịu nén;

A_c - diện tích của cánh xoắn đã giảm trừ đi phần diện tích mặt cắt ngang của thân cọc; A_p - diện tích mũi cọc.

Từ biểu thức (4.1) và (4.4) để xác định sức kháng bên và sức kháng mũi cần xác định sức kháng bên đơn vị và sức kháng mũi đơn vị theo các phương pháp, trong đó phương pháp “đường cong $t - z$ ” và “đường cong $Q - z$ ” được vận dụng khá phổ biến. Đường cong này biểu thị quan hệ giữa phản lực và chuyển vị của các gối đàn hồi đứng phù hợp với vị trí theo chiều sâu và đặc

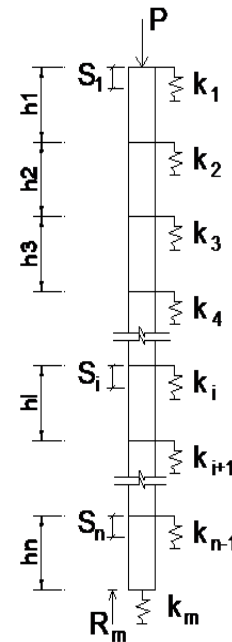
điểm địa chất của nền cát sạn san hô, được thể hiện như Hình 4.2 [33].



Hình 4.2. Mô hình đường cong t - z và đường cong Q - z [33]

Theo phương pháp đường cong t - z, cọc được mô hình hoá thành tập hợp các phần tử độc lập liên kết với nhau bằng các gối đàn hồi phi tuyến thể hiện sức kháng ma sát bên giữa cọc và đất (gối t - z), một gối đàn hồi phi tuyến được đặt ở mũi cọc thể hiện sức kháng mũi (gối Q - z).

Sơ đồ mô hình hoá sự làm việc của cọc và nền đất theo đường cong t - z thể hiện trên Hình 4.3, độ cứng các gối đàn hồi này biểu diễn mối quan hệ giữa phản lực (f_i/f_p) và chuyển vị của mỗi lò xo tương ứng (u_i/u_p).



Hình 4.3. Mô hình tính toán cọc chịu nén dọc trục

Từ biểu thức (4.2); (4.5); (4.6) và (4.7), sức kháng bên của cọc phụ thuộc vào sức kháng bên đơn vị. Trong đó, có thể xác định sức kháng bên đơn vị theo phương pháp sau:

- **Phương pháp tính sức kháng bên đơn vị theo hệ số áp lực ngang:**

Sức kháng bên đơn vị của đoạn cọc thứ i được xác định theo biểu thức (4.10) sau [5]:

$$f_i = k \cdot \text{tg}(\delta) \cdot \sigma'_v = \beta \cdot \sigma'_v = \beta \cdot \sum \gamma_i h_i, \quad (4.10)$$

trong đó:

$$\sigma'_v = \sum \gamma_i h_i - \text{ứng suất hữu hiệu của nền theo phương đứng tại độ sâu}$$

đoạn cọc thứ i tính toán;

δ - góc ma sát ngoài giữa cát sạn san hô với bề mặt thép làm cọc;

h_i - chiều dài đoạn cọc thứ i tại chiều sâu tính toán;

γ_i - trọng lượng thể tích của cát sạn san hô ở trạng thái bão hoà tại chiều sâu đoạn cọc tính toán thứ i (đã xét giảm trừ γ_n của nước do ảnh hưởng của lực đẩy nổi);

β - hệ số áp lực ngang biểu thị ứng suất hữu hiệu của nền tác dụng lên cọc theo phương ngang, xác định theo kết quả thực nghiệm và tính toán theo biểu thức (4.11) và (4.12):

+ Trường hợp cọc tròn tron, hệ số áp lực ngang xác định như sau [85]:

$$\beta = k.tg(\delta). \quad (4.11)$$

+ Trường hợp cọc có cánh, hệ số β phụ thuộc vào vị trí tính toán sức kháng ma sát dọc theo chiều sâu cọc. Đối với các đoạn cọc phía trên hoặc dưới đoạn có cánh thì β phụ thuộc góc ma sát ngoài giữa cát sạn san hô với bề mặt thép làm cọc và được xác định theo (4.11). Ở các đoạn cọc có cánh thì hệ số β phụ thuộc góc ma sát giữa nền với nền hay gọi là góc ma sát trong của nền nghiên cứu, nên hệ số áp lực ngang được xác định theo biểu thức (4.12):

$$\beta = k.tg(\varphi), \quad (4.12)$$

φ - góc ma sát trong của nền cát sạn san hô.

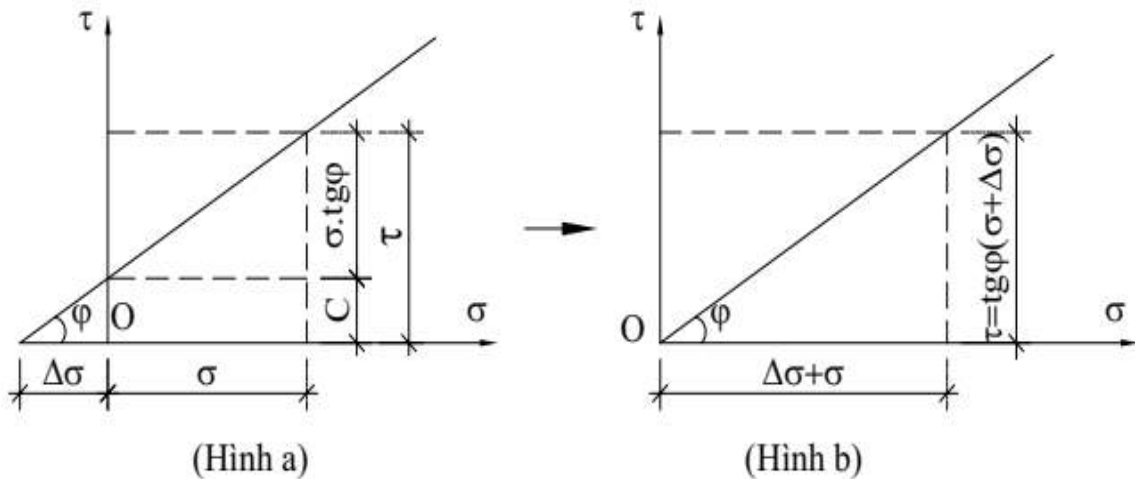
Sức kháng bên đơn vị của cọc theo biểu thức (4.10) được xây dựng tính toán cho nền cát rời (xét lực dính đơn vị $c = 0$). Tuy nhiên, theo kết quả thực nghiệm được trình bày trong chương 2, đối với nền cát sạn san hô thì ngoài góc ma sát trong còn có lực dính, được gọi là lực dính đơn vị biểu kiến do sự cài móc giữa các thành phần hạt của hỗn hợp nền cát sạn san hô [6], [35]. Do vậy, để xét ảnh hưởng của lực dính đơn vị biểu kiến đến sức chống cắt của nền và sức chịu tải của cọc cần bổ sung giá trị phản ánh sự tăng ứng suất hữu hiệu tại mỗi vị trí đoạn cọc đang xét. Khi đó, sức kháng bên đơn vị phát triển từ biểu thức (4.10) được xác định theo biểu thức (4.13):

$$f_i = \beta(\sum \gamma_i h_i + \Delta\sigma) = \beta(\sum \gamma_i h_i + \frac{c}{\text{tg}\varphi}), \quad (4.13)$$

trong đó:

$\Delta\sigma = c / \text{tg}\varphi$ - ứng suất hữu hiệu tăng lên được quy đổi từ lực dính đơn vị biểu kiến, xác định theo phương pháp như trên Hình 4.4 (hình a tính toán sức chống cắt theo góc ma sát trong và lực dính đơn vị biểu kiến, $\tau = \sigma'_v \cdot \text{tg}\varphi + c$. Hình b được xây dựng khi chuyển trục về góc toạ độ “O” và tính toán sức chống cắt theo góc ma sát trong nhưng ứng suất hữu hiệu của nền kể thêm ảnh hưởng của lực dính đơn vị biểu kiến, $\tau = (\sigma'_v + \Delta\sigma) \cdot \text{tg}\varphi$);

c - lực dính đơn vị biểu kiến của cát sạn san hô.

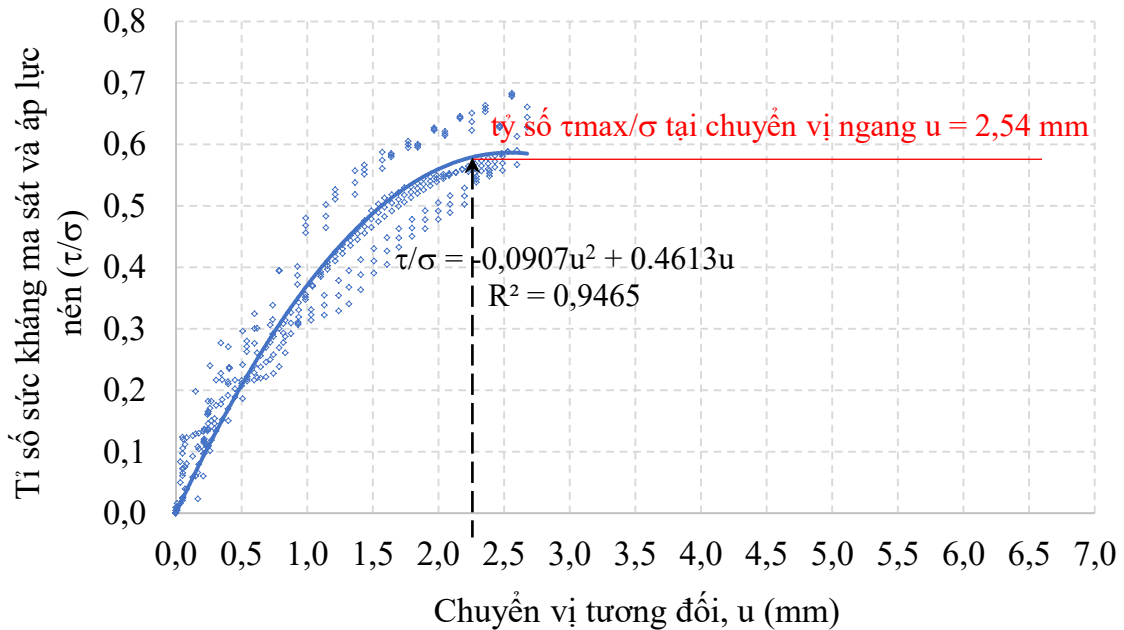


Hình 4.4. Mô hình tính sức chống cắt của nền xét lực dính đơn vị biểu kiến
 - Phương pháp tính toán sức kháng bên đơn vị theo đường cong thực nghiệm

Kết quả thí nghiệm cắt phẳng tĩnh đơn xác định đường cong tương quan tỷ số giữa sức kháng ma sát và áp lực nén mẫu với chuyển vị cắt ngang được thể hiện trong Hình 2.9. Từ đường cong này, xác định sức kháng bên đơn vị của cọc theo chuyển vị ngang tương đối mà không phụ thuộc áp lực nén ngang hay không phụ thuộc chiều sâu đoạn cọc đang xét, do đã xét tỷ số giữa sức kháng ma sát và áp lực nén mẫu khi cắt phẳng. Hàm toán xác định sức kháng ma sát và đồ thị đường cong thực nghiệm hiệu chỉnh áp dụng để xây dựng chương trình tính toán như biểu thức (4.14) có bình phương hệ số tương quan $R^2 = 0,9465$, và Hình 4.5 sau:

$$f = \frac{\tau}{\sigma} = -0,0907 \cdot u^2 + 0,4614 \cdot u, \quad (4.14)$$

trong đó: τ - sức kháng ma sát giữa nền cát sạn san hô và kết cấu cọc, (kPa); σ - áp lực nén của thí nghiệm cắt phẳng trực tiếp, (kPa); u - chuyển vị tương đối giữa nền cát sạn san hô với kết cấu thép cọc, (mm).



Hình 4.5. Đường cong thực nghiệm xác định sức kháng bên đơn vị

Sức kháng mũi đơn vị của cọc được xác định theo biểu thức (4.15) sau [31], [33], :

$$q_p = N_q \sigma'_v = [e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)] [\gamma \cdot h], \quad (4.15)$$

trong đó: N_q - hệ số sức chịu tải mũi cọc, phụ thuộc vào góc ma sát trong φ (trường hợp khi $\varphi > 40^\circ$ thì $N_q = 50$);

σ'_v - ứng suất hữu hiệu theo phương đứng tại mũi cọc.

Với mỗi giá trị tham số nền cụ thể, tác giả tính toán được sức chịu tải tiền định theo các công thức và lý thuyết ở trên, trong luận án gọi là sức chịu tải của cọc theo trạng thái giới hạn (TTGH). Khi các tham số nền này biến động trong một phạm vi hữu hạn thì sức chịu tải của cọc cũng thay đổi. Do đó, để đánh giá được sức chịu tải của cọc có xét đến sự biến động này, tác giả

vận dụng lý thuyết độ tin cậy để tính toán. Trong luận án, đánh giá sức chịu tải của cọc theo lý thuyết độ tin cậy thông qua chuyển vị đầu cọc giới hạn ở trạng thái cho phép của công trình (chuyển vị đầu cọc là 25,4 mm) [5] và chuyển vị cực hạn (chuyển vị đầu cọc bằng 10% đường kính cọc, tương ứng là 60 mm) [5], [20], [35], [57].

Các tham số ngẫu nhiên của nền cát sạn san hô khảo sát: Góc ma sát trong, góc ma sát ngoài và trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà.

Tiêu chuẩn khảo sát: “*National Standard of the PRC, GB 50153-2008 Unified standard for reliability design of engineering structures*” của Trung Quốc [56]. Sức chịu tải của cọc được xác định sau:

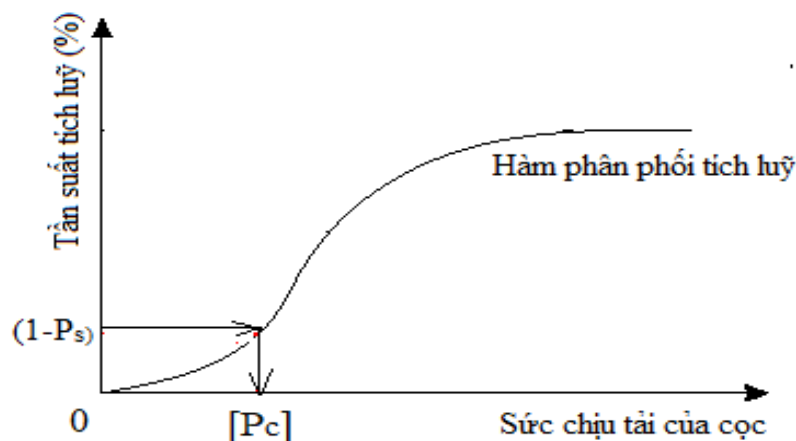
$$[P_c] = F^{-1}(1 - P_s), \quad (4.16)$$

trong đó:

$[P_c]$ - sức chịu tải cần xác định của cọc theo lý thuyết độ tin cậy;

P_s - xác suất an toàn của cọc (phụ thuộc đặc điểm phá hoại kết cấu cọc cấp an toàn của công trình);

$F(x)$ - hàm phân phối tích lũy của sức chịu tải khi tính toán theo lý thuyết Monte-Carlo, đồ thị hàm phân phối tích lũy có dạng trên Hình 4.6:



Hình 4.6. Đồ thị hàm phân phối tích lũy xác định sức chịu tải của cọc

Hàm phân phối tích lũy $F(x)$ mô tả đầy đủ phân phối xác suất của một biến ngẫu nhiên có giá trị X với một số thực x được xác định theo xác suất mà biến ngẫu nhiên X lấy giá trị nhỏ hơn hay bằng x như sau:

$$F(x) = P(X \leq x), \quad (4.17)$$

X - biến ngẫu nhiên nghiên cứu trong bài toán sức chịu tải cọc;

P_s - xác suất an toàn, phụ thuộc vào cấp an toàn và đặc điểm phá hoại của kết cấu cọc, xác định theo bảng tổng hợp sau:

Bảng 4.1. Xác suất an toàn của cọc theo phân cấp mức độ an toàn [56]

Đặc điểm phá hoại của kết cấu cọc	Xác suất an toàn, P_s		
	Cấp an toàn I (Rất nghiêm trọng)	Cấp an toàn II (Nghiêm trọng)	Cấp an toàn III (Không nghiêm trọng)
Phá hoại biến hình từ từ	0,99989000	0,99931890	0,99605330
Phá hoại đột ngột	0,99998665	0,99989000	0,99931890

Đối tượng nghiên cứu là cọc đơn ống thép của công trình xây dựng trên nền cát sạn san hô, nên lựa chọn trường hợp tính toán với đặc điểm phá hoại của cọc biến hình từ từ, cấp an toàn của công trình nghiêm trọng (tương ứng cấp II). Khi đó, theo Bảng 4.1 thì $P_s = 0,9993189$. Từ giá trị P_s , căn cứ theo đồ thị hàm phân phối tích lũy sức chịu tải của cọc trên Hình 4.6, tính toán sức chịu tải giới hạn P_{gh} và sức chịu tải ở trạng thái cực hạn của cọc [P_c].

Kết quả tính toán theo lý thuyết độ tin cậy không chỉ phụ thuộc phương pháp tính, khả năng xây dựng của chương trình tính, mà còn phụ thuộc lớn vào mức độ tin cậy mục tiêu, độ lệch chuẩn theo mức độ tin cậy, số tham biến ngẫu nhiên xét trong bài toán và số phép thử ngẫu nhiên. Các tham biến này có mối tương quan theo biểu thức (4.18):

Xác định số phép thử ngẫu nhiên trong tính toán:

$$N_{mc} = \left[\frac{d^2}{4(1-\varepsilon)^2} \right]^m = \left[\frac{1,645^2}{4(1-0,9)^2} \right]^3, \quad (4.18)$$

trong đó:

N_{mc} - số phép thử hay số lần mô phỏng Monte-Carlo;

ε_t - mức độ tin cậy mục tiêu (từ 0 đến 100%);

d_c - độ lệch chuẩn theo mức độ tin cậy mục tiêu, xác định ở Bảng 4.2;

m - số tham biến ngẫu nhiên trong bài toán (3 tham số góc ma sát

trong, góc ma sát ngoài và trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà).

Bảng 4.2. Độ lệch chuẩn xác định theo mức độ tin cậy mong muốn

STT	Mức độ tin cậy mục tiêu ε_t (%)	Độ lệch chuẩn d_c	Số phép thử ngẫu nhiên Monte-Carlo (N_{mc})
1	80	1,282	1.083
2	90	1,645	309.610
3	95	1,960	56.693.912
4	99	2,576	4.565.571.811.400

Do khối lượng khảo sát lớn, thời gian nghiên cứu có hạn, nên trong luận án, tác giả khảo sát đối với trường hợp mức độ tin cậy mong muốn là 90%. Khi đó độ lệch chuẩn tương ứng là 1,645 thì số phép thử Monte-Carlo trong mỗi chương trình tính toán đã xây dựng là: $N_{mc} = 309610$ phép thử.

Về độ nhạy của các tham số khảo sát, tác giả Baecher G.B. và Christian J.T đánh giá sự phân bố xác suất của một số chỉ tiêu cơ lý của nền đất cơ bản có quy luật phân bố chuẩn. Độ biến động các chỉ tiêu này được đánh giá thông qua hệ số biến thiên hay độ nhạy (COV). Do khối lượng thí nghiệm cần thiết để xác định độ nhạy của góc ma sát trong, góc ma sát ngoài, trọng lượng thể tích bão hoà của cát sạn san hô đòi hỏi rất lớn. Do đó, trong phạm vi nghiên cứu, tác giả tham khảo giá trị độ nhạy của một số tác giả đã nghiên cứu theo Bảng 4.3 để tính toán (COV = 0,05).

Bảng 4.3. Hệ số độ nhạy tham số đất nền tham khảo một số tác giả

Tác giả	Dung trọng	Góc ma sát trong	Lực dính đơn vị
Orr T.L.L, Breyse D. (2008)	0,01 :- 0,1	0,05 :- 0,15	0,2 :- 0,4
Schweckendiek T. (2007)	0,05	-	0,2
Bakker K.J (2004)	-	-	0,275
Baecher G.B., Khristian J.T. (2003)	-	0,05 :- 0,15 (cát)	0,2 :- 0,5
Phoon K.K., Kulhawy F.H. (1999)	0,02 :- 0,13	-	-
Phoon K.K. (1995)	-	0,05 :- 0,11 (cát)	-

Từ giá trị trung bình (hay giá trị kì vọng) của góc ma sát trong, góc ma sát ngoài, trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà đã được xác định thông

qua thực nghiệm trong chương 2, kết hợp với độ nhạy tham khảo ở Bảng 4.3, tác giả xác định được độ lệch chuẩn của tham số đó theo các biểu thức sau:

$$d_{\varphi} = COV \cdot \varphi; \quad (4.19)$$

$$d_{\delta} = COV \cdot \delta; \quad (4.20)$$

$$d_{\gamma} = COV \cdot \gamma_{sat}; \quad (4.21)$$

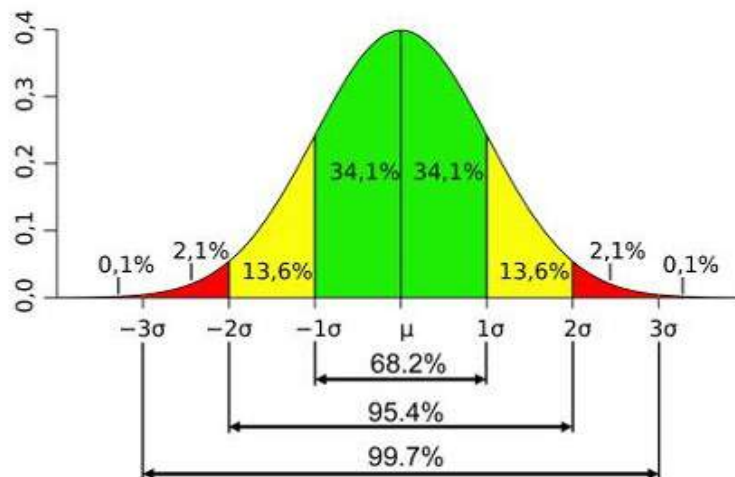
trong đó:

φ , δ , γ_{sat} - lần lượt là góc ma sát trong, góc ma sát ngoài và trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà của cát sạn san hô (xác định theo kết quả thực nghiệm ở trong chương 2);

d_{φ} , d_{δ} , d_{γ} - lần lượt là độ lệch của góc ma sát trong, góc ma sát ngoài và trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà của cát sạn san hô;

COV - độ nhạy của các tham số, tham khảo Bảng 4.3, chọn là 0,05.

Để đánh giá được quy luật phân bố các tham số mô hình nền cát sạn san hô nghiên cứu, cần thí nghiệm số lượng mẫu trong phạm vi bài toán nghiên cứu lớn, nên đòi hỏi thời gian và công sức rất lớn. Do vậy, trong phạm vi nghiên cứu, tác giả lựa chọn sự biến động của các tham số nền cát sạn san hô phân bố theo quy luật phân phối chuẩn Gauss trên cơ sở tham khảo số liệu thu thập được của các nghiên cứu về nền san hô ở Việt Nam. Dạng đồ thị theo quy luật phân phối này được thể hiện trên Hình 4.7:



Hình 4.7. Quy luật phân phối chuẩn Gauss

Khi đó, phạm vi biến động của các tham số cát sạn san hô được xác định theo các biểu thức sau:

$$\varphi - 3d_{\varphi} \leq \varphi_{bd} \leq \varphi + 3d_{\varphi}; \quad (4.22)$$

$$\delta - 3d_{\delta} \leq \delta_{bd} \leq \delta + 3d_{\delta}; \quad (4.23)$$

$$\gamma_{sat} - 3d_{\gamma} \leq \gamma_{bd} \leq \gamma_{sat} + 3d_{\gamma}; \quad (4.24)$$

trong đó: φ_{bd} , δ_{bd} , γ_{bd} - lần lượt là phạm vi biến động của góc ma sát trong, góc ma sát ngoài và trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà của cát sạn san hô.

Từ đó, tác giả tính toán được giá trị độ lệch và phạm vi biến động của các tham số ma sát trong, góc ma sát ngoài và trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà của cát sạn san hô theo Bảng 4.4:

Bảng 4.4. Độ lệch và phạm vi biến động của các tham số cát sạn san hô

Tham số khảo sát	Kỳ vọng	Độ lệch	Phạm vi biến động
Góc ma sát trong, φ (độ)	46,49	2,32	39,52 :- 53,46
Góc ma sát ngoài, δ (độ)	30,66	1,53	26,06 :- 35,26
Trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà, γ_{sat} (T/m ³)	20,40	1,02	17,34 :- 23,46

Với những phân tích trên, tác giả luận án xây dựng chương trình đánh giá ứng xử và tính toán sức chịu tải của cọc ống thép dài 8,0 m, đường kính cọc là 0,6m đã hạ ổn định trong nền cát sạn san hô. Bao gồm cọc tròn trơn và cọc có 2 cánh xoắn; khoảng cách các cánh là 1,8 m; đường kính cánh xoắn là 1,2 m; độ sâu vị trí cánh xoắn trên thân cọc là 6,0 m. Thuật toán, sơ đồ khối và bảng tham số mô hình như sau:

4.2.1.2. Thuật toán của chương trình

a) Đối với module xác định sức chịu tải của cọc theo trạng thái giới hạn

Trên cơ sở đường cong t-z cho sức kháng bên và đường cong Q-z cho sức kháng mũi của cọc, xác định được quan hệ phản lực và chuyển vị của các lò xo tại các vị trí phân chia phần tử cọc. Chuyển vị tới hạn của các lò xo khi xét đường cong t-z theo kết quả thí nghiệm ở chương 2 là 2,5 mm; chuyển vị tới hạn của đường cong Q-z là 60 mm (10% đường kính của cọc ống thép).

Trên cơ sở thuật toán lặp Newton - Raphson khi xét tính phi tuyến của tương tác, xác định sức chịu tải của cọc là tải trọng lớn nhất mà ứng với giá trị đó thì chuyển vị đầu cọc đạt giới hạn U_{gh} hoặc cực hạn $[U_c]$.

b) Đối với module xác định sức chịu tải của cọc theo độ tin cậy

Thuật toán chương trình được thực hiện theo các giai đoạn như sau:

- Giai đoạn 1: Mô hình hóa các biến ngẫu nhiên đầu vào từ các hàm phân phối xác suất cho trước (sử dụng thuật toán hàm ngược).

- Giai đoạn 2: Tính toán tiền định theo các thể hiện đầu vào $X = (\gamma_1, \varphi_1, \delta_1, \dots, \gamma_n, \varphi_n, \delta_n)$ để nhận các thể hiện đầu ra sức chịu tải của cọc là: $[P_c] = f(\gamma_1, \varphi_1, \delta_1, \dots, \gamma_n, \varphi_n, \delta_n)$.

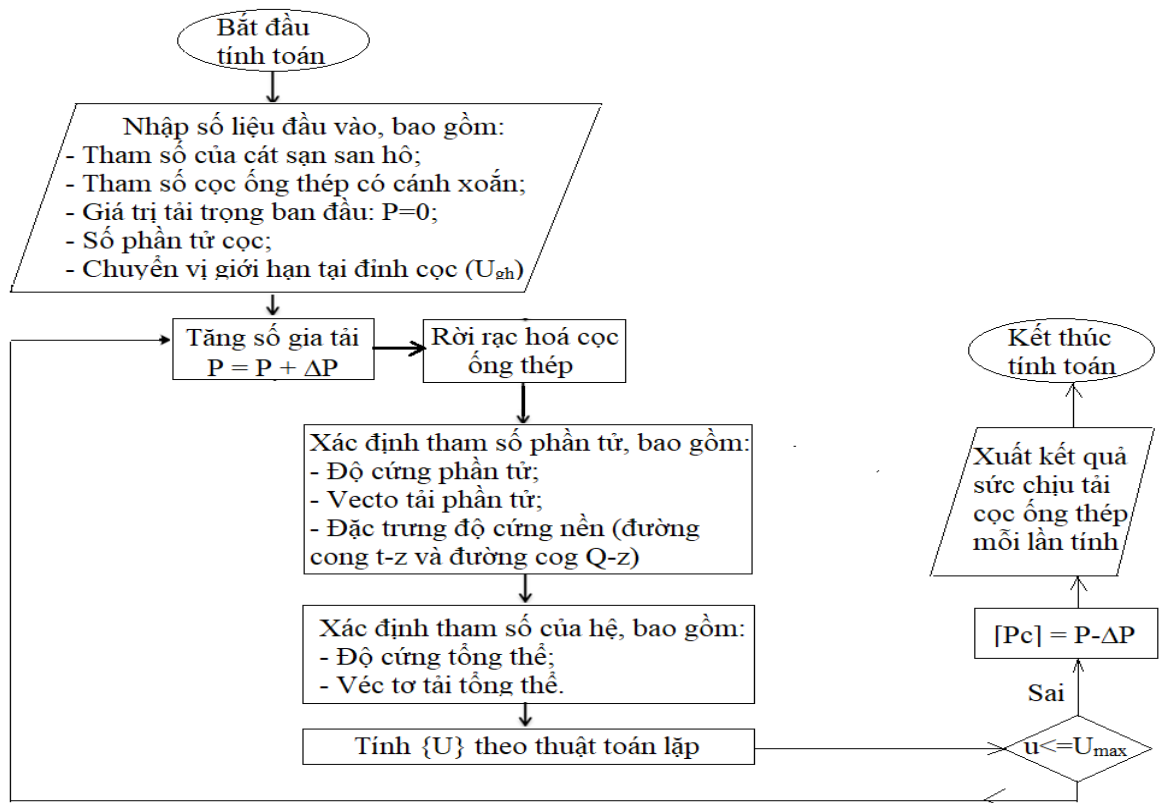
- Giai đoạn 3: Xử lý thống kê các thể hiện đầu ra để tìm các đặc trưng xác suất của nó và kiểm tra các giả thiết thống kê.

4.2.1.3. Sơ đồ khối của chương trình tính

Chương trình “PileHLC” tác giả xây dựng gồm module tính toán sức chịu tải của cọc theo phương pháp trạng thái giới hạn và module tính toán theo lý thuyết độ tin cậy. Sơ đồ khối của mỗi mô đun tính toán như sau:

a) Sơ đồ khối của phần tính toán sức chịu tải theo trạng thái giới hạn

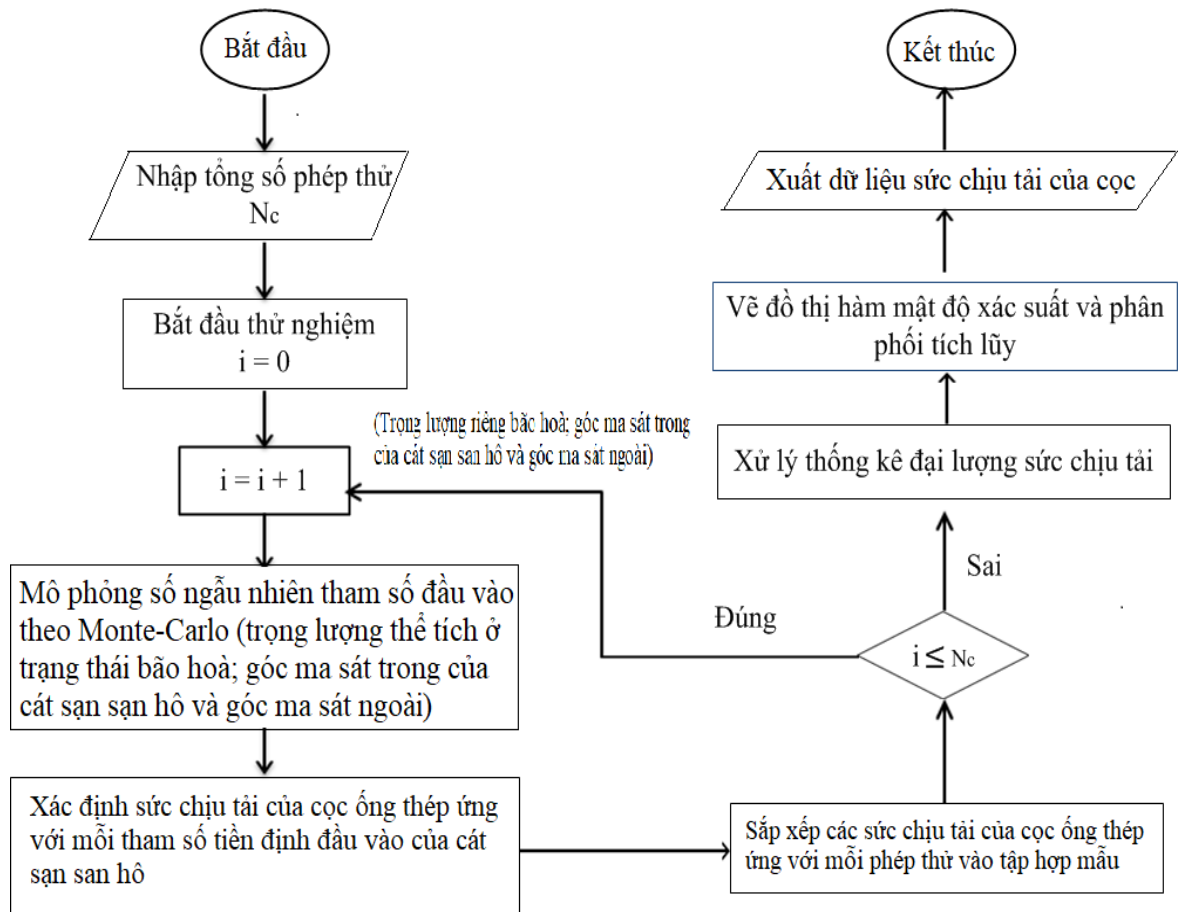
Trong module tính toán sức chịu tải của cọc theo phương pháp trạng thái giới hạn khi xét các tham số mô hình là các giá trị tiền định, thì với mỗi trường hợp tham số cọc ống thép và nền cát sạn san hô xác định, sẽ tính được sức chịu tải của cọc tương ứng theo sơ đồ khối như trên Hình 4.8.



Hình 4.8. Sơ đồ khối chương trình tính toán sức chịu tải của cọc theo phương pháp trạng thái giới hạn

b) Sơ đồ khối của phần tính toán sức chịu tải theo độ tin cậy

Với cơ sở lý thuyết và thuật toán đã trình bày, chương trình tính toán ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn theo phương pháp độ tin cậy khi ứng dụng lý thuyết mô phỏng số Monte-Carlo được tác giả xây dựng theo sơ đồ khối như trên Hình 4.9:



Hình 4.9. Sơ đồ khối chương trình tính toán sức chịu tải của cọc khi xét đến sự biến động tham số ngẫu nhiên nền cát sạn san hô

Với sơ đồ khối như trên, tác giả xây dựng chương trình tính toán sức chịu tải của cọc ống thép có 2 cánh xoắn theo mã nguồn mở trong phụ lục 7.

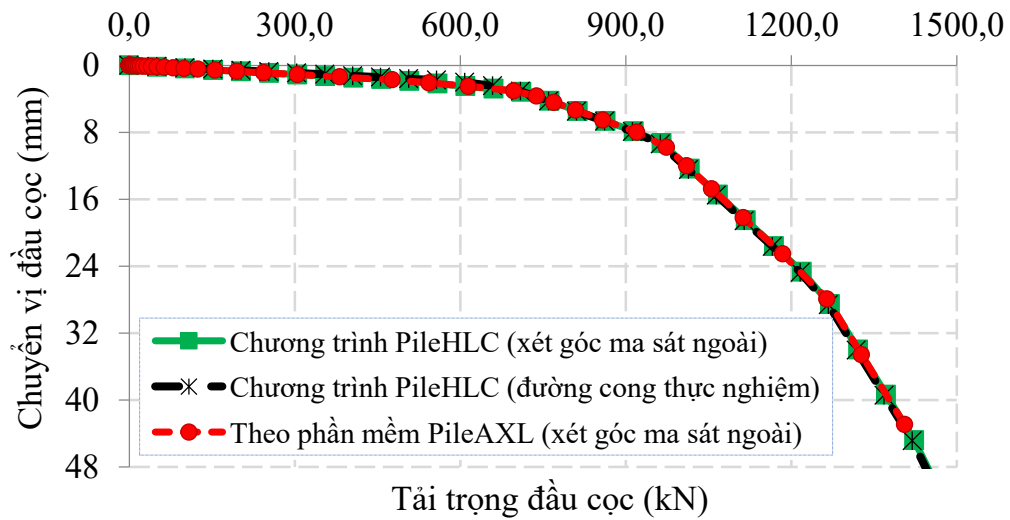
4.2.2. Kiểm tra độ tin cậy chương trình tính toán

4.2.2.1. Tương quan giữa chuyển vị và tải trọng đầu cọc

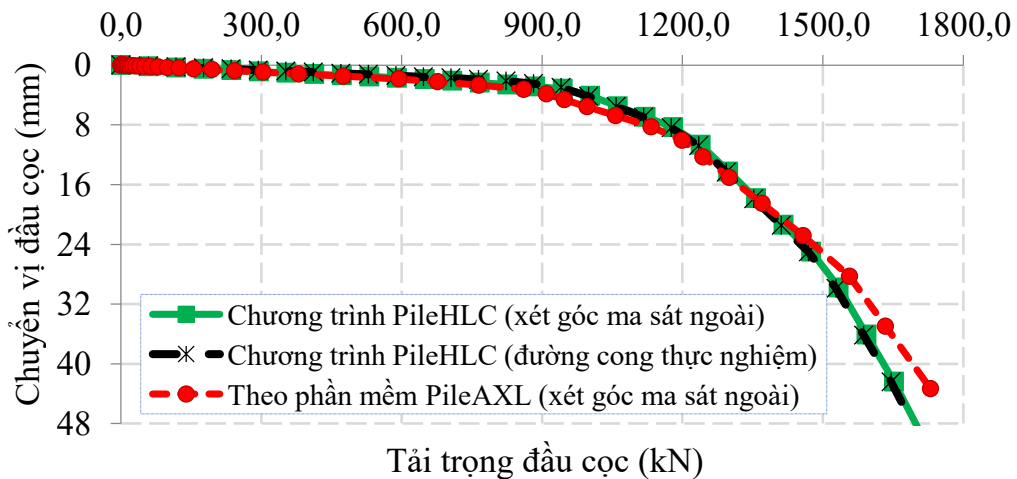
Kết quả tính toán từ chương trình tác giả xây dựng được so sánh với kết quả của bài toán tương tự khi sử dụng phần mềm thương mại “PileAXL” để kiểm tra độ tin cậy của chương trình tính đã lập.

Phương pháp và nội dung tính toán của chương trình tác giả lập

“PileHLC” và phần mềm “PileAXL” tương tự nhau, chỉ khác là chương trình “PileHLC” tính toán được sức chịu tải của cọc theo lý thuyết độ tin cậy để đánh giá ảnh hưởng của biến động các tham số nền cát sạn san hô, nhưng chương trình “PileAXL” không phản ánh được yếu tố này. Kết quả so sánh thể hiện như đồ thị Hình 4.10 và Hình 4.11.



Hình 4.10. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc theo các chương trình tính toán (khi không xét lực dính)



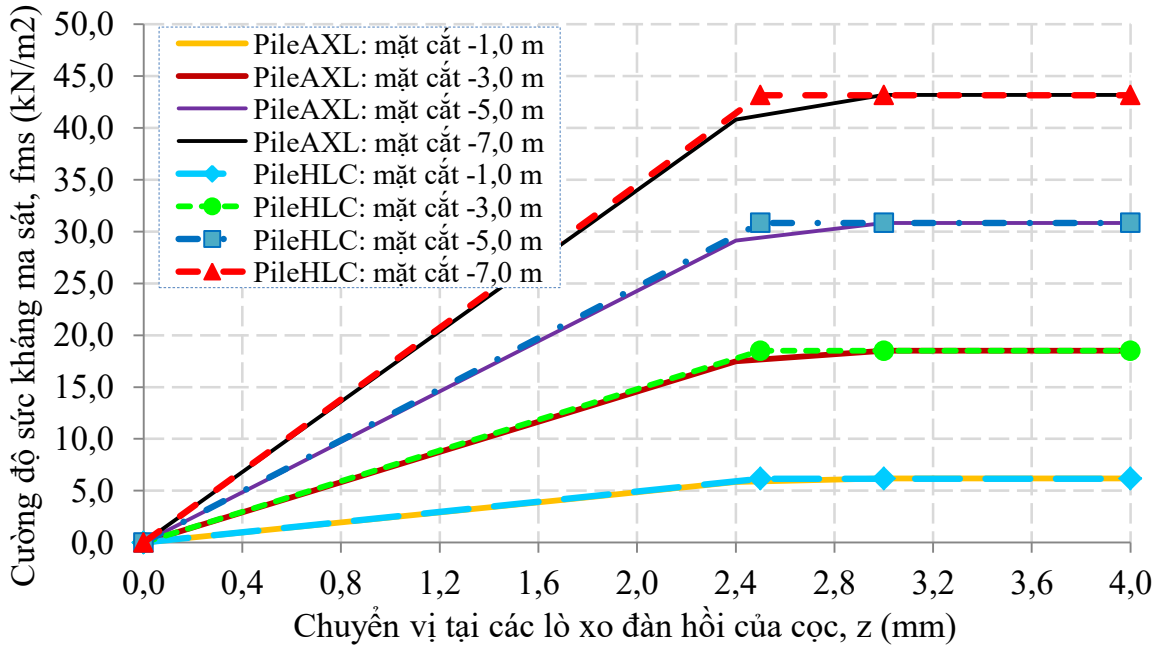
Hình 4.11. Tương quan chuyển vị với tải trọng đầu cọc theo các chương trình tính toán (xét lực dính đơn vị biểu kiến $c = 29,83 \text{ kN/m}^2$)

Từ đồ thị Hình 4.10 và Hình 4.11 nhận thấy, quy luật tương quan giữa tải trọng và chuyển vị đầu cọc theo chương trình tính toán đã xây dựng “PileHLC” phù hợp với quy luật xác định theo phần mềm “PileAXL”. Giá trị tải trọng khi chuyển vị tại đầu cọc đạt $U_{gh} = 25,4 \text{ mm}$ theo phần mềm thương mại “PileAXL” là $P_1 = 1227,56 \text{ kN}$ và chương trình tác giả xây dựng

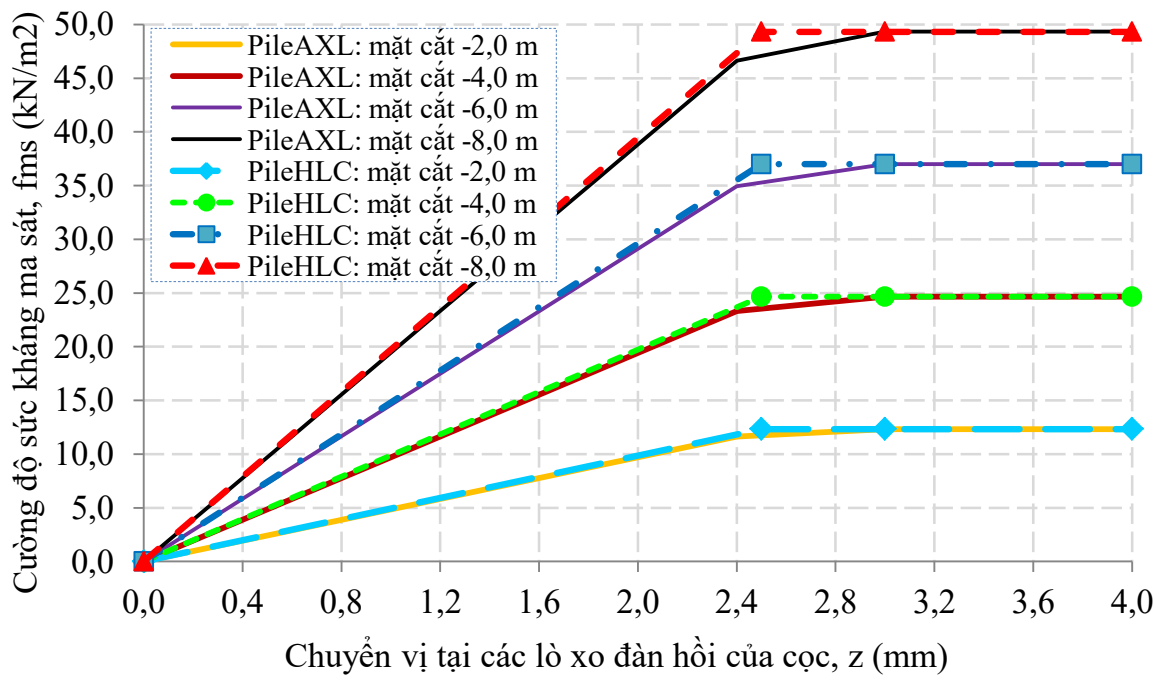
“PileHLC” là $P_2 = 1229,48 \text{ kN}$ (chênh lệch kết quả 1,6% là chấp nhận được).

4.2.2.2. Kiểm tra quy luật sức kháng ma sát bên của cọc

Từ kết quả tính toán mô hình trong chương trình tính đã lập “PileHLC”, so sánh với kết quả nhận được của phần mềm “PileAXL”, tác giả xây dựng đường cong t-z tại các mặt cắt dọc chiều sâu cọc là: -1,0 m đến -8,0 m để so sánh, kết quả thể hiện trên đồ thị Hình 4.12 và Hình 4.13.



Hình 4.12. Đường cong t-z tại các mặt cắt theo chiều sâu cọc



Hình 4.13. Đường cong t-z tại các mặt cắt theo chiều sâu cọc

Từ các kết quả trên đồ thị hình Hình 4.10 đến Hình 4.13, có thể thấy đồ thị tương quan giữa tải trọng đầu cọc với chuyển vị đỉnh cọc và các đường cong t-z tại các độ sâu khác nhau của cọc ống thép tính toán theo chương trình xây dựng “PileHLC” và phần mềm thương mại “PileAXL” phù hợp về quy luật và tương đồng nhau, chênh lệch tải trọng đầu cọc khi chuyển vị đỉnh cọc 25,4 mm là 1,6%. Do vậy, chương trình tác giả xây dựng “PileHLC” để làm cơ sở tính toán sức chịu tải của cọc theo phương pháp độ tin cậy là có độ chính xác và tin cậy cao, làm cơ sở để khảo sát đối với bài toán cọc cải tiến có cánh xoắn thông qua việc tính toán sức chịu tải của cọc có xét yếu tố ngẫu nhiên tham số cát sạn san hô (góc ma sát trong; góc ma sát ngoài giữa cát sạn san hô và bề mặt thép làm cọc; trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà). Nội dung này được tác giả khảo sát ở phần 4.3.

4.3. Khảo sát ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô xét đến sự biến động tham số nền

4.3.1. Mô hình bài toán khảo sát

Tác giả sử dụng chương trình tính đã lập và kiểm tra độ tin cậy trong phần 4.2 để khảo sát ứng xử của cọc ống thép có 02 cánh xoắn đã được hạ ổn định trong nền cát sạn san hô chịu tác dụng của tải trọng nén tại đầu cọc, khi xét đến sự biến động của góc ma sát trong của cát sạn san hô, trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà của cát sạn san hô, góc ma sát ngoài của cát sạn san hô với bề mặt thép làm cọc. Để đánh giá hiệu quả của cọc có cánh xoắn, tác giả khảo sát đồng thời cả cọc tròn trơn truyền thống tương ứng. Các tham số chi tiết về cọc khảo sát được trình bày trên Bảng 4.5.

Bảng 4.5. Tham số mô hình cọc ống thép có cánh xoắn khảo sát

Tham số của kết cấu cọc	Trường hợp cọc khảo sát	
	Cọc tròn	Cọc có 02 cánh
- Mô đun đàn hồi của vật liệu: E_c (kN/m ²)	2,00x10 ⁸	
- Trọng lượng riêng: γ_c (kN/m ³)	78,0	78,0
- Chiều dài cọc: L_c (m)	8,00	8,00
- Đường kính ngoài cọc: d (m)	0,60	0,60

- Chiều dày thép thành cọc: δ_1 (m)	0,016	0,016
- Số cánh (n)	0	2
- Chiều sâu cánh tính từ mặt nền đến tim cánh dưới: h, sao cho $h/L = 3/4$ (m)	-	6,0
- Khoảng cách cánh: $S = 3d$ (m)	-	1,8
- Đường kính cánh: $D = 2d$ (m)	-	1,2

Ảnh hưởng của các tham số cát sạn san hô đến sức kháng của cọc hoặc sức chịu tải của cọc được tác giả trình bày ở các biểu thức tính toán từ (4.1) đến (4.12) trong phần 4.2. Do đó, để khảo sát ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn khi xét đến sự biến động của các tham số ngẫu nhiên, tác giả sử dụng các tham số tiền định của mô hình nền cát sạn san hô đã được xác định từ nghiên cứu thực nghiệm ở chương 2 và được tổng hợp trong Bảng 4.6.

Bảng 4.6. Tham số mô hình nền cát sạn san hô khảo sát

Đặc trưng độ tin cậy	Góc ma sát trong φ (độ)	Góc ma sát ngoài δ (độ)	Lực dính đơn vị biểu kiến c (kN/m ²)	Trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà γ_{sat} (kN/m ³)	Mô đun biến dạng E (kN/m ²)
Kỳ vọng	46,49	30,66	29,83	20,40	30,86E+3
Độ nhạy	0,05	0,05	-	0,05	-
Độ lệch	2,32	1,53	-	1,02	-

4.3.2. Kết quả khảo sát

4.3.2.1. Ảnh hưởng của số phép thử Monte-Carlo

Tác giả khảo sát sức chịu tải của cọc trong các trường hợp số phép thử Monte-Carlo khác nhau từ 100 đến 309610. Tham số mô hình trong chương trình tính toán “PileHLC” căn cứ theo Bảng 4.5 và Bảng 4.6, trong trường hợp khảo sát này tác giả tính toán như sau: Xác suất an toàn: $P_s = 0,99931890$ (điều kiện phá hoại từ từ, cấp độ an toàn kết cấu cọc là cấp độ II - nghiêm trọng); Mức độ tin cậy mục tiêu: $\varepsilon_t = 90\%$.

Kết quả tính toán sức chịu tải được tổng hợp trong Bảng 4.7 đối với cọc tròn trơn và Bảng 4.8 trường hợp cọc có 02 cánh như sau:

Bảng 4.7. Sức chịu tải giới hạn của cọc tròn trơn theo số phép thử

Số phép thử Monte-Carlo (lần)	Sức chịu tải giới hạn của cọc P_{gh}		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
100	1057,14	1114,11	5,39
1.000	1057,14	1081,50	2,30
3.000	1057,14	1088,02	2,92
10.000	1057,14	1083,78	2,52
100.000	1057,14	1082,88	2,43
309.610	1057,14	1082,57	2,41

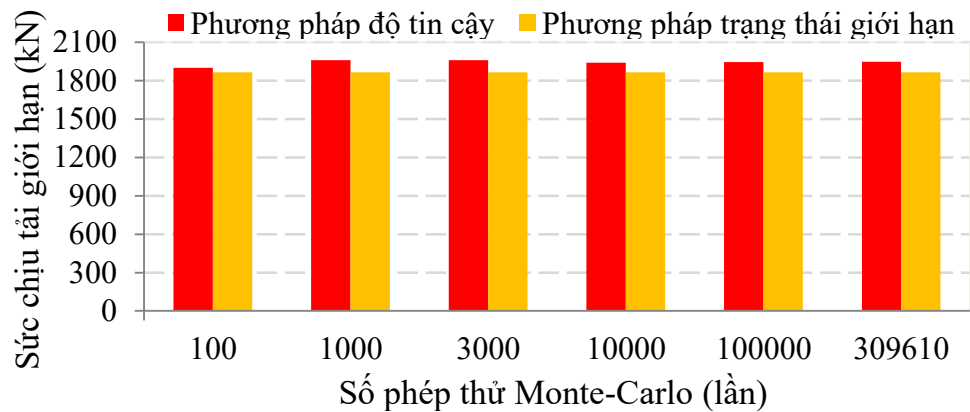
Bảng 4.8. Sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh xoắn theo số phép thử

Số phép thử Monte-Carlo (lần)	Sức chịu tải cho phép của cọc P_{gh}		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
100	1864,29	1900,46	1,94
1.000	1864,29	1959,27	5,09
3.000	1864,29	1959,50	5,11
10.000	1864,29	1940,07	4,06
100.000	1864,29	1944,59	4,31
309.610	1864,29	1945,95	4,38

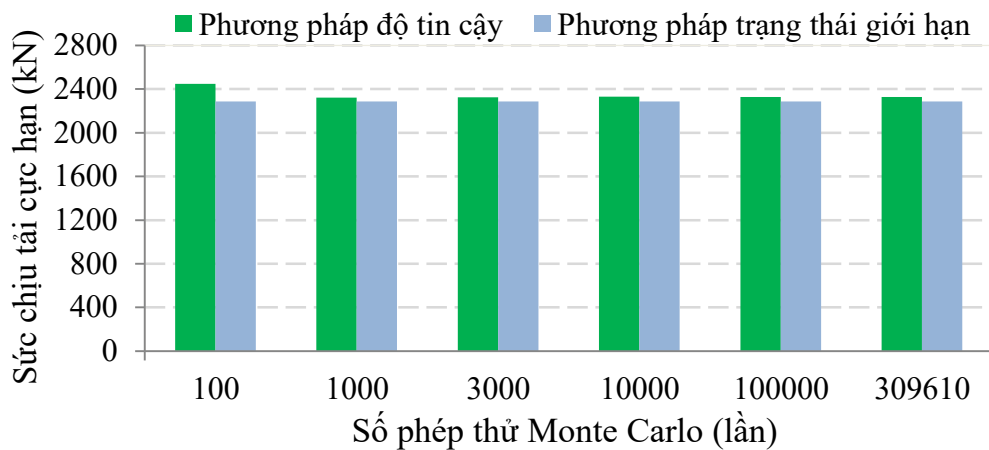
Bảng 4.9. Sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh xoắn theo số phép thử

Số phép thử Monte-Carlo (lần)	Sức chịu tải cực hạn của cọc $[P_c]$		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
100	2285,71	2449,23	7,15
1.000	2285,71	2322,04	1,59
3.000	2285,71	2325,69	1,75
10.000	2285,71	2329,58	1,92
100.000	2285,71	2329,00	1,89
309.610	2285,71	2329,13	1,90

Biểu đồ thể hiện tương quan giữa sức chịu tải giới hạn và cực hạn của cọc ứng với số phép thử Monte-Carlo theo phương pháp độ tin cậy so với trường hợp khi tính theo phương pháp trạng thái giới hạn thể hiện như sau:

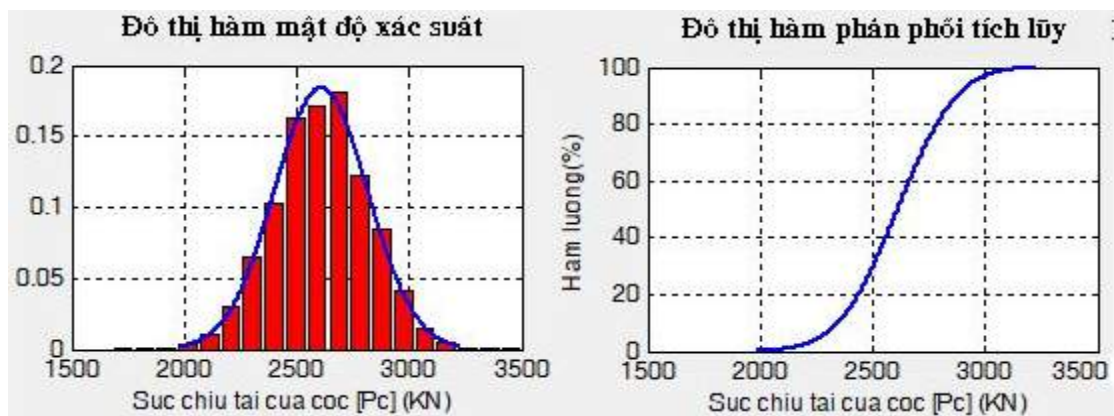


Hình 4.14. Biểu đồ tương quan sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh xoắn khi xét ảnh hưởng của số phép thử Monte-Carlo

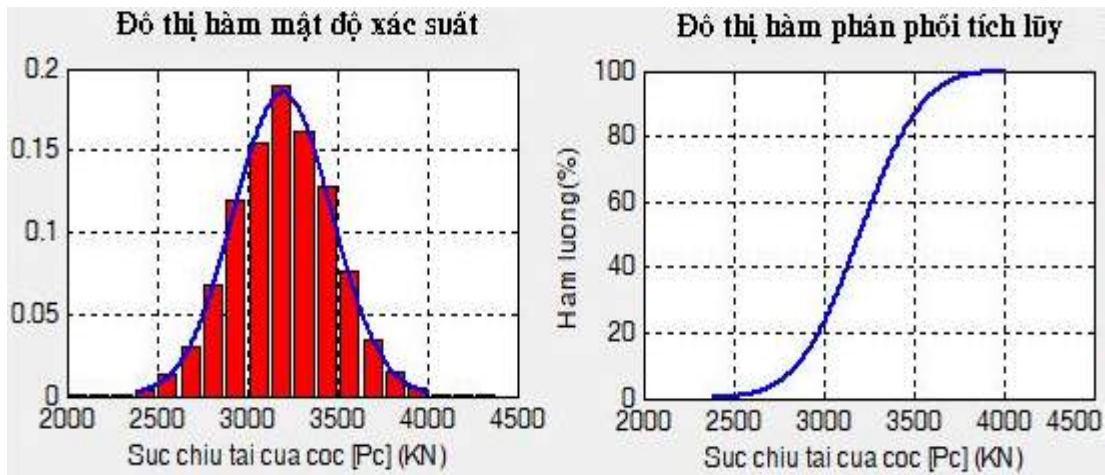


Hình 4.15. Biểu đồ tương quan sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh xoắn khi xét ảnh hưởng của số phép thử Monte-Carlo

Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy trong các trường hợp tính toán thể hiện trong các Hình 4.16 và Hình 4.17.



Hình 4.16. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh xoắn



Hình 4.17. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh xoắn

Sử dụng phương pháp Monte-Carlo để tính toán sức chịu tải của cọc ống thép tròn trơn và cọc có 2 cánh xoắn theo phương pháp độ tin cậy ở điều kiện giới hạn và trạng thái cực hạn của cọc đều có giá trị lớn hơn so với phương pháp trạng thái giới hạn. Điều đó thể hiện khi tính toán sức chịu tải của cọc theo phương pháp trạng thái giới hạn thiên về an toàn hơn.

Số phép thử Monte-Carlo ảnh hưởng đến sức chịu tải và ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn, phụ thuộc vào số tham số ngẫu nhiên và mức độ tin cậy mục tiêu. Trong bài toán khảo sát, tác giả tính toán với 3 tham số ngẫu nhiên, độ tin cậy mục tiêu là 90%, nên lựa chọn số phép thử Monte-Carlo hay số lần tính toán lặp là 309.310 lần.

4.3.2.2. Đánh giá ảnh hưởng của số phần tử kết cấu cọc

Để đánh giá độ tin cậy và tính chính xác của mô hình và phương pháp tính, tiến hành khảo sát sức chịu tải của cọc dài 8 m trong các trường hợp thay đổi số phần tử cọc (số đoạn cọc) là 8; 16; 20; 32 và 40 phần tử.

Tham số mô hình trong chương trình tính toán “PileHLC” căn cứ theo Bảng 4.5 và Bảng 4.6,. Trong trường hợp khảo sát này xét với xác suất an toàn là: $P_s = 0,99931890$; mức độ tin cậy mục tiêu: $\varepsilon_t = 90\%$.

Kết quả tính toán sức chịu tải được tổng hợp trong Bảng 4.10 đối với cọc tròn trơn và Bảng 4.11; Bảng 4.12 trường hợp cọc có 02 cánh xoắn.

Bảng 4.10. Sức chịu tải giới hạn của cọc tròn trơn theo số phần tử

Số phần tử cọc mô hình (phần tử)	Sức chịu tải giới hạn của cọc P_{gh}		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
8	1057,14	1084,86	2,62
16	1057,14	1083,24	2,47
20	1057,14	1086,68	2,79
32	1057,14	1080,84	2,24
40	1057,14	1085,82	2,71

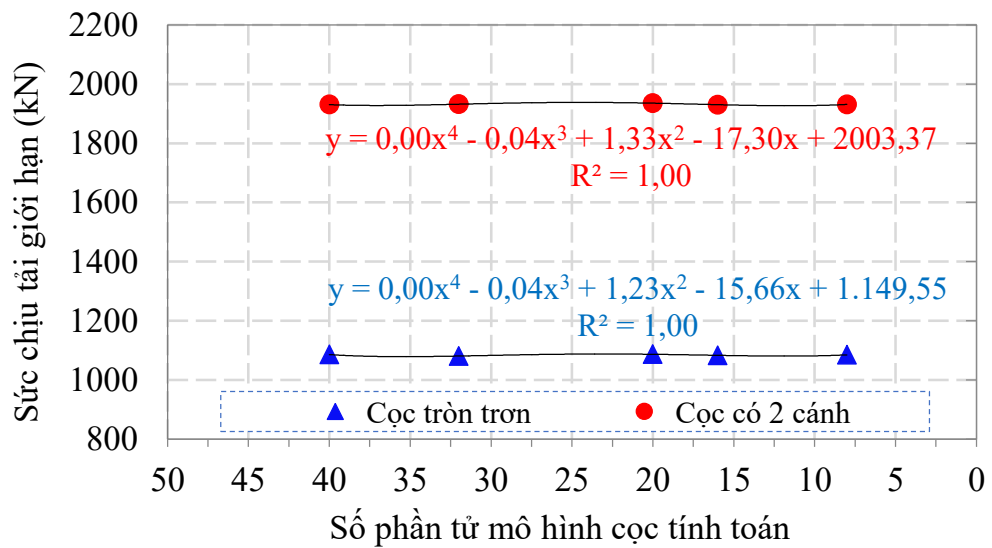
Bảng 4.11. Sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh theo số phần tử

Số phần tử cọc mô hình (phần tử)	Sức chịu tải giới hạn của cọc P_{gh}		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
8	1864,29	1931,41	3,60
16	1864,29	1930,50	3,55
20	1864,29	1935,57	3,82
32	1864,29	1932,07	3,64
40	1864,29	1930,61	3,56

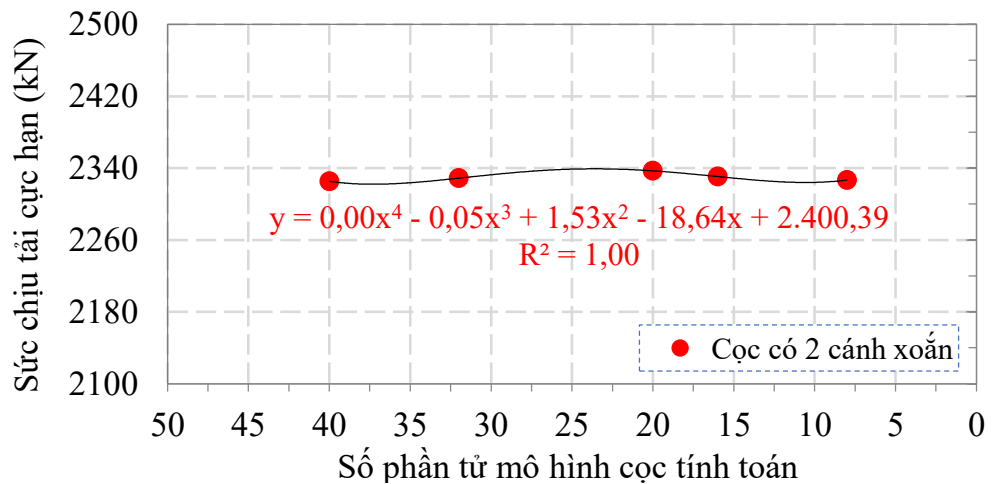
Bảng 4.12. Sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh theo số phần tử

Số phần tử cọc mô hình (phần tử)	Sức chịu tải cực hạn của cọc $[P_c]$		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
8	2285,71	2326,71	1,79
16	2285,71	2330,62	1,96
20	2285,71	2336,94	2,24
32	2285,71	2328,77	1,88
40	2285,71	2325,32	1,73

Biểu đồ thể hiện tương quan giữa sức chịu tải giới hạn và cực hạn của cọc ứng với số phần tử kết cấu cọc theo phương pháp độ tin cậy được thể hiện như trên Hình 4.18 và Hình 4.19.

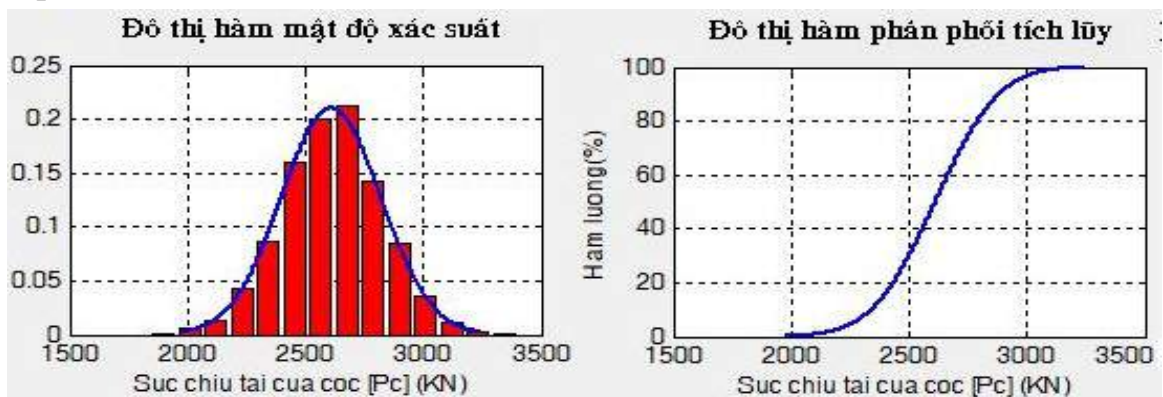


Hình 4.18. Tương quan sức chịu tải giới hạn của cọc với số phần tử cọc

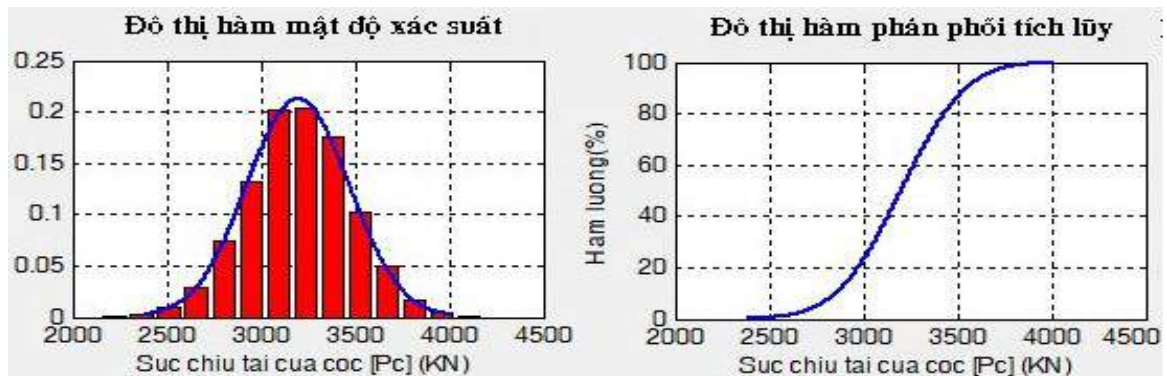


Hình 4.19. Tương quan sức chịu tải cực hạn của cọc theo số phần tử cọc

Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy trong các trường hợp tính toán thể hiện trên Hình 4.20 và Hình 4.21.



Hình 4.20. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh



Hình 4.21. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh

Mặc dù số phần tử của cọc trong tính toán càng nhiều (kích thước mỗi đoạn cọc tính toán càng nhỏ) thì kết quả sức chịu tải của cọc càng chính xác. Tuy nhiên, kết quả nhận được cho thấy chênh lệch sức chịu tải của cọc theo phương pháp độ tin cậy chênh lệch không đáng kể so với phương pháp trạng thái giới hạn. Do đó, trong bài toán khảo sát biến động của tham số nền tiếp theo, tác giả lựa chọn số phần tử cọc trung bình là 20 phần tử.

4.3.2.3. Ứng xử của cọc ống thép có 2 cánh xoắn xét biến động của góc ma sát trong

Để đánh giá ảnh hưởng biến động tham số ngẫu nhiên góc ma sát trong, tiến hành khảo sát sức chịu tải của cọc trong các trường hợp độ lệch của góc ma sát trong khác nhau là: $1,63^0$; $1,86^0$; $2,09^0$; $2,32^0$; $2,65^0$; $2,79^0$ và $3,02^0$. Tham số mô hình chương trình tính toán “PileHLC” căn cứ theo Bảng 4.5 và Bảng 4.6. Số phép thử Monte-Carlo là: 309.610 lần; xác suất an toàn: $P_s = 0,99931890$; mức độ tin cậy mục tiêu: $\varepsilon_t = 90\%$.

Kết quả tính toán sức chịu tải được tổng hợp trong Bảng 4.13 đối với cọc tròn trơn và Bảng 4.14; Bảng 4.15 trường hợp cọc có cánh.

Bảng 4.13. Sức chịu tải giới hạn của cọc tròn trơn xét sự biến động của góc ma sát trong

Độ lệch của góc ma sát trong (độ)	Sức chịu tải giới hạn của cọc tròn trơn P_{gh}		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
1,63	1057,14	1085,38	2,67
1,86	1057,14	1087,55	2,88

2,09	1057,14	1080,37	2,20
2,32	1057,14	1083,76	2,52
2,56	1057,14	1084,08	2,55
2.79	1057,14	1084,45	2,58
3,02	1057,14	1076,66	1,85

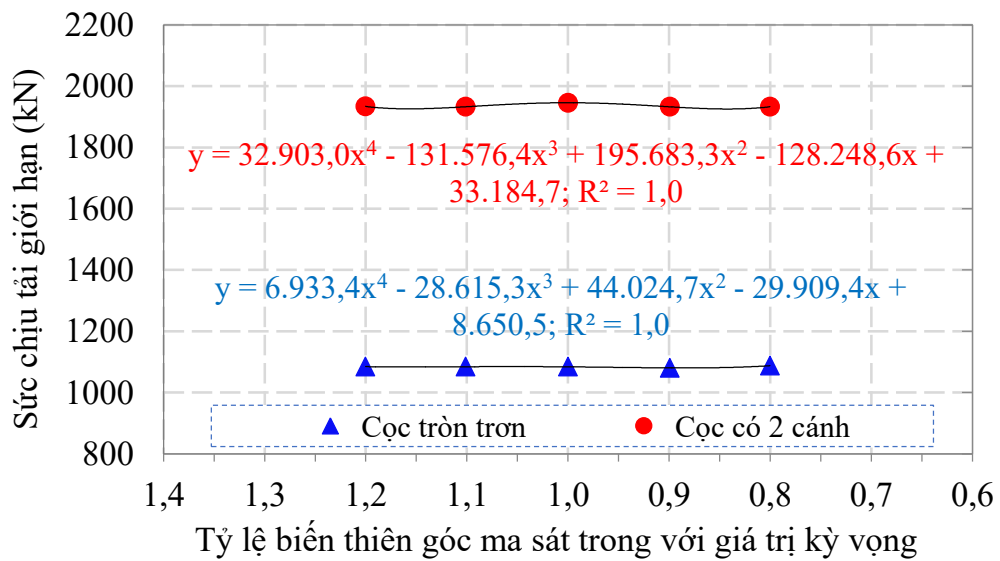
Bảng 4.14. Sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh xét sự biến động của góc ma sát trong

Độ lệch của góc ma sát trong (độ)	Sức chịu tải giới hạn của cọc P_{gh}		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
1,63	1864,29	1931,33	3,60
1,86	1864,29	1932,98	3,68
2,09	1864,29	1932,68	3,67
2,32	1864,29	1945,95	4,38
2,56	1864,29	1932,82	3,68
2.79	1864,29	1934,02	3,74
3,02	1864,29	1929,27	3,49

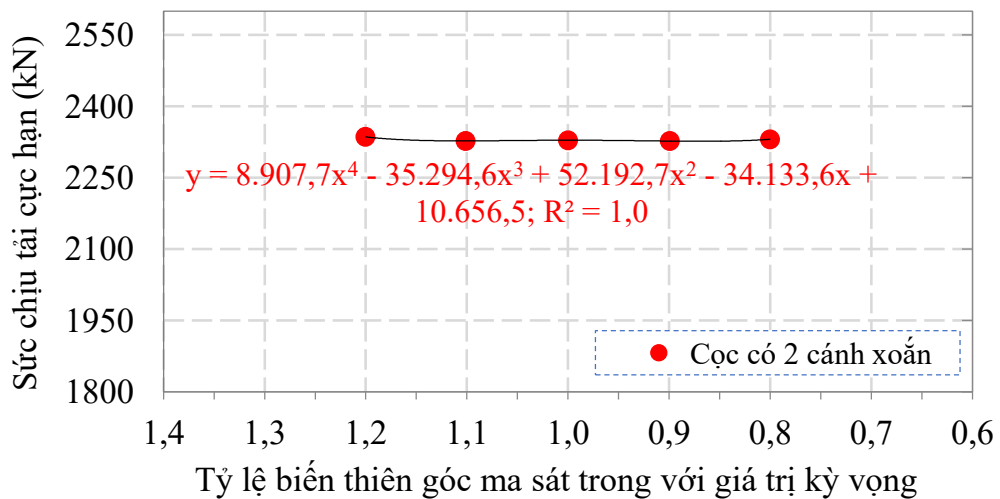
Bảng 4.15. Sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh xét sự biến động góc ma sát trong

Độ lệch của góc ma sát trong (độ)	Sức chịu tải cực hạn của cọc $[P_c]$		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
1,63	2285,71	2329,59	1,92
1,86	2285,71	2330,71	1,97
2,09	2285,71	2326,94	1,80
2,32	2285,71	2328,74	1,88
2,56	2285,71	2327,40	1,82
2.79	2285,71	2335,72	2,19
3,02	2285,71	2319,12	1,46

Đồ thị tương quan giữa sức chịu tải của cọc giới hạn và cực hạn ứng với tỷ lệ biến thiên góc ma sát trong và giá trị kỳ vọng ($46,49^0$) theo phương pháp độ tin cậy được thể hiện như trên Hình 4.22 và Hình 4.23.

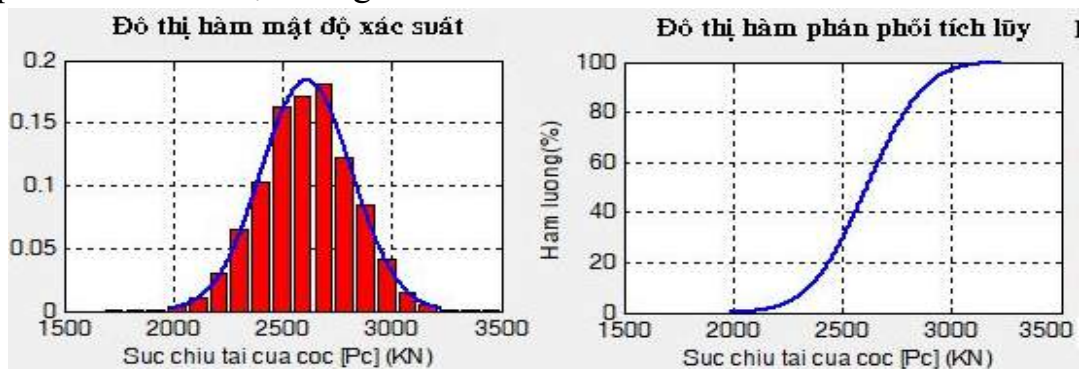


Hình 4.22. Tương quan sức chịu tải giới hạn của cọc xét biến động góc ma sát trong

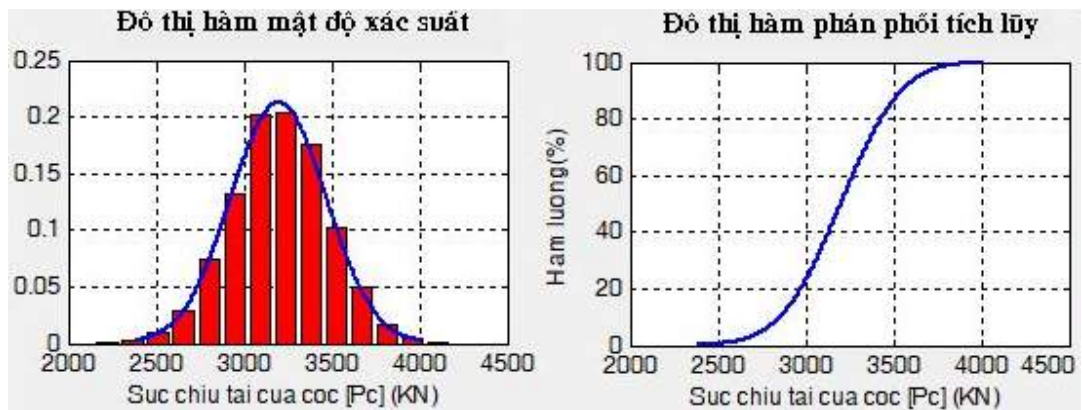


Hình 4.23. Tương quan sức chịu tải cực hạn của cọc xét biến động góc ma sát trong

Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy trong các trường hợp tính toán thể hiện trong Hình 4.24 và Hình 4.25.



Hình 4.24. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh



Hình 4.25. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh

Kết quả tính toán đã xây dựng được các hàm tính toán sức chịu tải của cọc ống thép có 2 cánh xoắn khi xét đến sự biến động hữu hạn tham số ngẫu nhiên góc ma sát trong của nền cát sạn san hô từ $39,52^{\circ}$ đến $53,46^{\circ}$.

4.3.2.4. Ứng xử của cọc ống thép có 2 cánh xoắn xét biến động của góc ma sát ngoài

Đánh giá ảnh hưởng sự biến động tham số ngẫu nhiên là góc ma sát ngoài, tác giả khảo sát sức chịu tải của cọc trong các trường hợp độ lệch của góc ma sát ngoài như sau: $1,07^{\circ}$; $1,23^{\circ}$; $1,38^{\circ}$; $1,53^{\circ}$; $1,69^{\circ}$; $1,84^{\circ}$ và $1,99^{\circ}$.

Tham số mô hình trong chương trình tính toán “PileHLC” căn cứ theo Bảng 4.5 và Bảng 4.6. Số phép thử Monte-Carlo là: 309.610 lần; xác suất an toàn: $P_s = 0,99931890$; mức độ tin cậy mục tiêu: $\varepsilon_t = 90\%$.

Kết quả tính toán sức chịu tải được tổng hợp trong Bảng 4.16; Bảng 4.17 và Bảng 4.18.

Bảng 4.16. Sức chịu tải giới hạn của cọc tròn tròn xét sự biến động của góc ma sát ngoài

Độ lệch của góc ma sát ngoài (độ)	Sức chịu tải cho phép của cọc P_{gh}		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
1,07	1057,14	1084,79	2,62
1,23	1057,14	1081,32	2,29
1,38	1057,14	1080,00	2,16

1,53	1057,14	1082,57	2,41
1,69	1057,14	1072,27	1,43
1,84	1057,14	1067,24	0,96
1,99	1057,14	1064,12	0,66

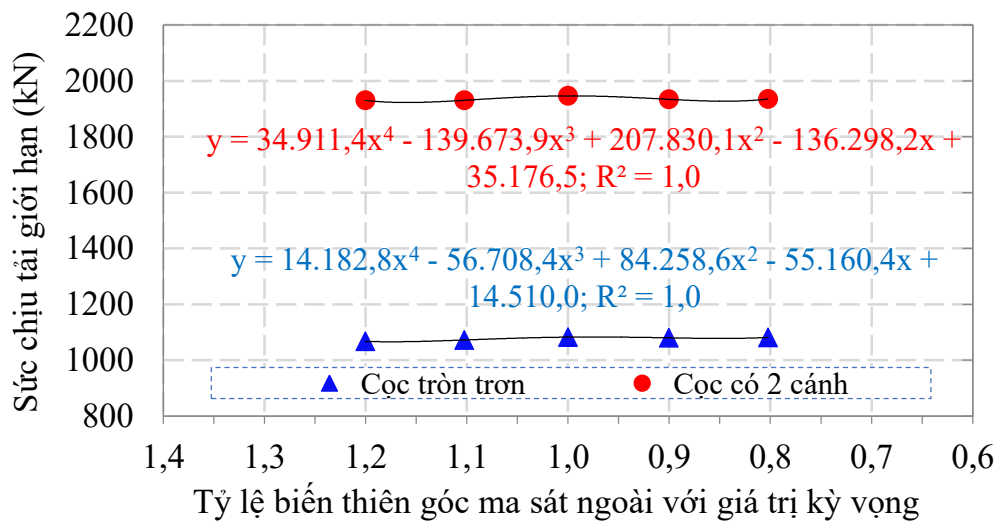
Bảng 4.17. Sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh xét sự biến động của góc ma sát ngoài

Độ lệch của góc ma sát ngoài (độ)	Sức chịu tải cho phép của cọc P_{gh}		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
1,07	1864,29	1934,99	3,79
1,23	1864,29	1934,91	3,79
1,38	1864,29	1933,68	3,72
1,53	1864,29	1945,95	4,38
1,69	1864,29	1930,25	3,54
1,84	1864,29	1929,96	3,52
1,99	1864,29	1928,19	3,43

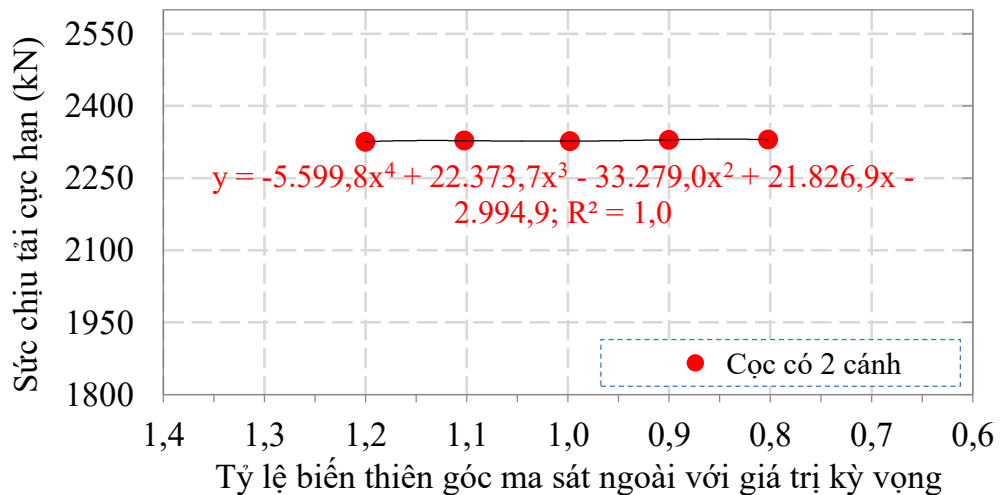
Bảng 4.18. Sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh xét sự biến động của góc ma sát ngoài

Độ lệch của góc ma sát ngoài (độ)	Sức chịu tải cực hạn của cọc $[P_c]$		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
1,07	2285,71	2332,69	2,06
1,23	2285,71	2329,86	1,93
1,38	2285,71	2329,70	1,92
1,53	2285,71	2326,91	1,80
1,69	2285,71	2327,86	1,84
1,84	2285,71	2325,60	1,75
1,99	2285,71	2334,38	2,13

Biểu đồ thể hiện tương quan giữa sức chịu tải của cọc cho phép và cực hạn ứng với độ biến thiên góc ma sát ngoài và giá trị kỳ vọng ($30,66^0$) theo phương pháp độ tin cậy được trình bày trên Hình 4.26 và Hình 4.27.

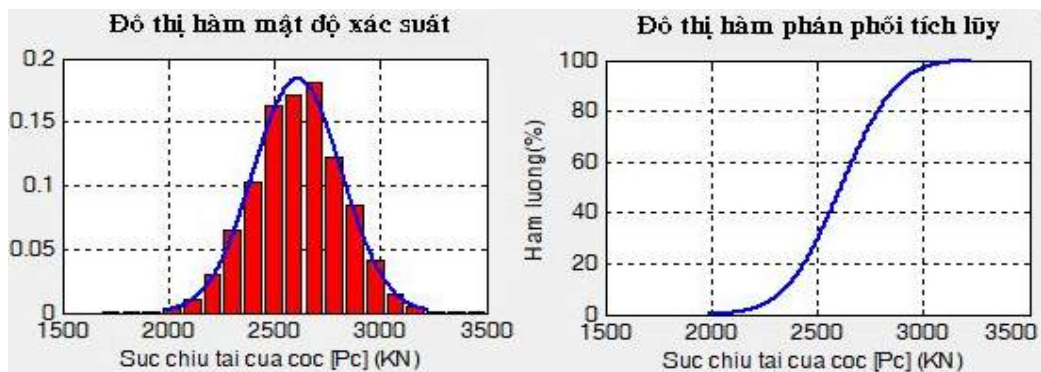


Hình 4.26. Tương quan sức chịu tải giới hạn của cọc xét biến động góc ma sát ngoài

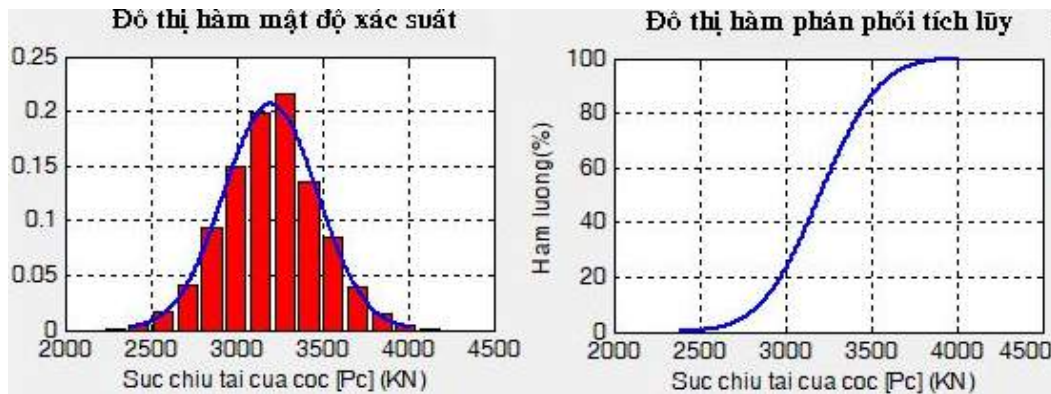


Hình 4.27. Tương quan sức chịu tải cực hạn của cọc xét biến động góc ma sát ngoài

Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy trong các trường hợp tính toán thể hiện trên Hình 4.28 và Hình 4.29.



Hình 4.28. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh



Hình 4.29. Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh

Kết quả tính toán đã xây dựng các hàm tính toán sức chịu tải của cọc ống thép 2 cánh xoắn khi xét đến sự biến động hữu hạn tham số ngẫu nhiên góc ma sát ngoài của cát sạn san hô với bề mặt thép làm cọc từ $26,06^{\circ}$ đến $35,26^{\circ}$.

4.3.2.5. Ứng xử của cọc ống thép có 2 cánh xoắn xét biến động của trọng lượng thể tích

Khảo sát sức chịu tải của cọc trong các trường hợp độ lệch của trọng lượng thể tích cát sạn san hô ở trạng thái bão hoà gồm: $0,82 \text{ kN/m}^3$; $0,92 \text{ kN/m}^3$; $1,02 \text{ kN/m}^3$; $1,12 \text{ kN/m}^3$ và $1,22 \text{ kN/m}^3$. Tham số mô hình trong chương trình tính toán "PileHLC" căn cứ theo Bảng 4.5 và Bảng 4.6. Xác suất an toàn: $P_s = 0,99931890$; mức độ tin cậy mục tiêu: $\varepsilon_t = 90\%$.

Kết quả tính toán sức chịu tải của cọc xét biến động trọng lượng thể tích theo các độ lệch khác nhau tổng hợp trên Bảng 4.19; Bảng 4.20 và Bảng 4.21.

Bảng 4.19. Sức chịu tải giới hạn của cọc tròn trơn xét sự biến động trọng lượng thể tích

Độ lệch trọng lượng thể tích (kN/m^3)	Sức chịu tải cho phép của cọc P_{gh}		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
0,82	1057,14	1144,53	8,27
0,92	1057,14	1110,15	5,01
1,02	1057,14	1075,82	1,77
1,12	1057,14	1040,24	-1,60
1,22	1057,14	1005,48	-4,89

Bảng 4.20. Sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh xét sự biến động trọng lượng thể tích

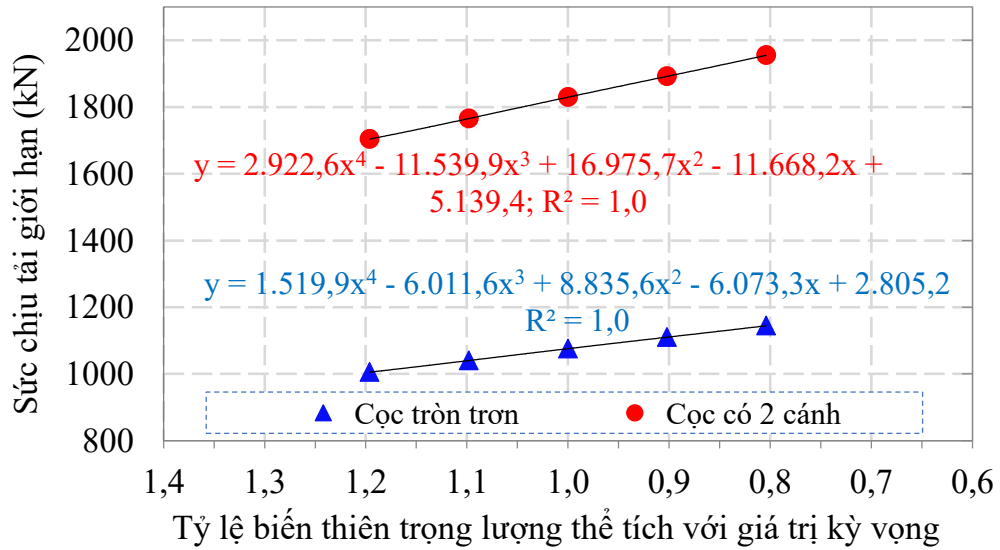
Độ lệch trọng lượng thể tích (kN/m ³)	Sức chịu tải cho phép của cọc P _{gh}		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
0,82	1771,43	1955,26	10,38
0,92	1771,43	1891,97	6,80
1,02	1771,43	1829,52	3,28
1,12	1771,43	1765,52	-0,33
1,22	1771,43	1704,06	-3,80

Bảng 4.21. Sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh xét sự biến động trọng lượng thể tích

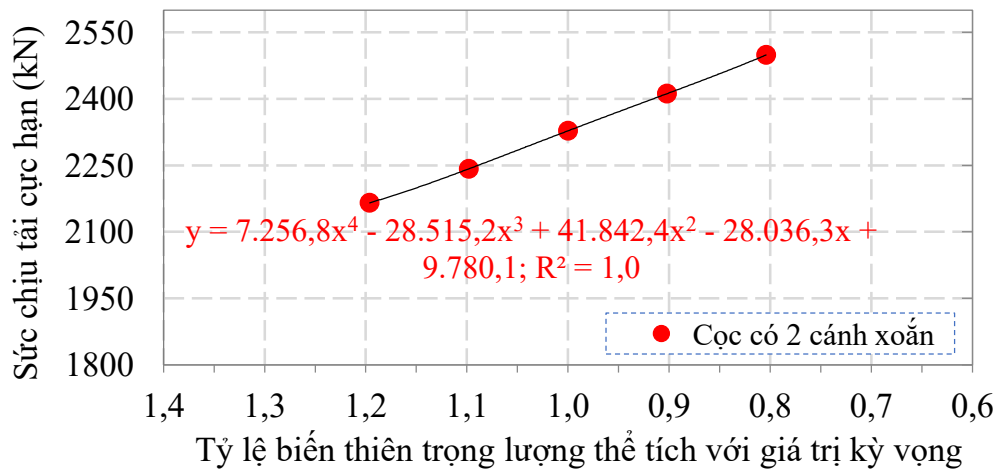
Độ lệch trọng lượng thể tích (kN/m ³)	Sức chịu tải cực hạn của cọc [P _c]		
	Phương pháp trạng thái giới hạn (kN)	Phương pháp độ tin cậy (kN)	Chênh lệch (%)
0,82	2285,71	2499,02	9,33
0,92	2285,71	2411,74	5,51
1,02	2285,71	2327,83	1,84
1,12	2285,71	2242,14	-1,91
1,22	2285,71	2165,61	-5,25

Kết quả tính toán sức chịu tải của cọc theo phương pháp độ tin cậy so với phương pháp trạng thái giới hạn cho thấy, độ lệch của trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử của cọc. Khi độ lệch là 1,12 và 1,22 thì sức chịu tải của cọc theo phương pháp độ tin cậy nhỏ hơn phương pháp trạng thái giới hạn, nhưng khi độ lệch là 0,82 và 0,92 thì chênh lệch giữa 2 phương pháp tính toán tăng lên nhanh từ 5,01% đến 10,38%. Do vậy, kiến nghị tính toán với độ lệch trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà hợp lý theo trung bình là 1,02.

Đồ thị tương quan giữa sức chịu tải giới hạn và cực hạn của cọc ứng với độ biến thiên trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà và giá trị kỳ vọng (20,4 kN/m³) được trình bày ở trên Hình 4.30 và Hình 4.31.

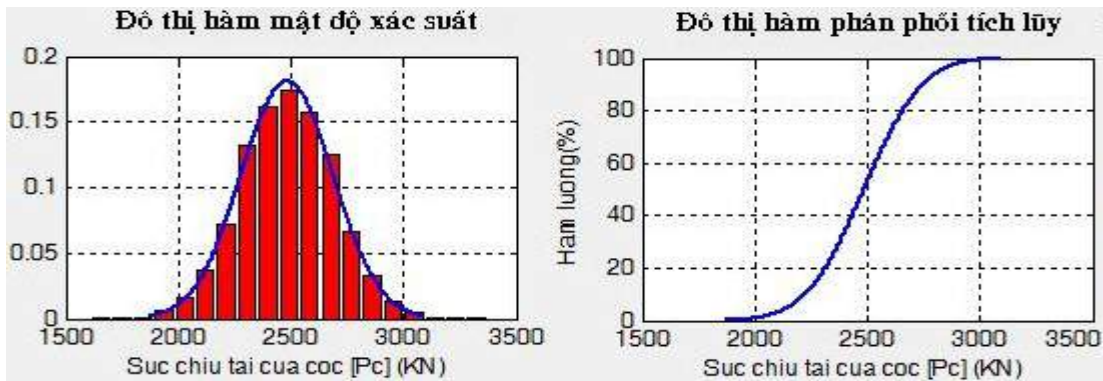


Hình 4.30. Tương quan sức chịu tải giới hạn của cọc xét biến động trọng lượng thể tích

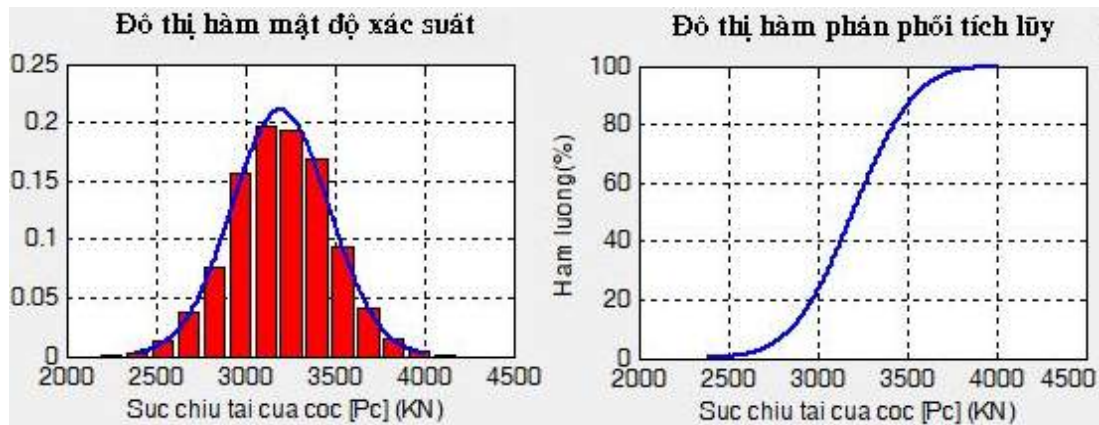


Hình 4.31. Tương quan sức chịu tải cực hạn của cọc xét biến động trọng lượng thể tích

Đồ thị hàm mật độ xác suất và hàm phân phối tích lũy trường hợp độ lệch trọng lượng thể tích là $1,02 \text{ kN/m}^3$ thể hiện trên Hình 4.32 và Hình 4.33.



Hình 4.32. Đồ thị hàm mật độ xác suất và phân phối tích lũy sức chịu tải giới hạn của cọc có 02 cánh



Hình 4.33. Đồ thị hàm mật độ xác suất và phân phối tích lũy sức chịu tải cực hạn của cọc có 02 cánh

Kết quả tính toán đã xây dựng được các hàm hồi quy tính toán sức chịu tải của cọc ống thép có 2 cánh xoắn khi xét đến sự biến động hữu hạn tham số ngẫu nhiên trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà của nền cát sạn san hô từ $17,34 \text{ kN/m}^3$ đến $23,46 \text{ kN/m}^3$.

4.4. Kết luận chương 4

Kết quả nghiên cứu đạt được trong chương 4 của luận án bao gồm các nội dung chính như sau:

- Xây dựng chương trình “PileHLC” nghiên cứu ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô vùng biển đảo xa bờ thuộc tỉnh Khánh Hoà. Trong đó, sử dụng lý thuyết tính toán theo trạng thái giới hạn kết hợp phương pháp mô phỏng số Monte-Carlo để giải lập các bài toán tiền định khi xét đến biến động ngẫu nhiên của tham số nền cát sạn san hô. Chương trình tính toán được lập trong môi trường phần mềm MATLAB Version 7.6.0.324 (R2008a) của hãng Mathworks - Hoa Kỳ theo ngôn ngữ Fortran;

- Rút ra ảnh hưởng của số phép thử Monte-Carlo đến kết quả tính toán cũng như khối lượng phải thực hiện, kết quả nhận được sức chịu tải cho phép và cực hạn của cọc theo phương pháp độ tin cậy chênh lệch so với theo phương pháp trạng thái giới hạn từ 1,59% đến 7,15%;

- Đánh giá ảnh hưởng của số phần tử mô hình cọc khi mô phỏng số Monte-Carlo, kết quả tính toán giữa phương pháp độ tin cậy và phương pháp trạng thái giới hạn chênh lệch từ 1,73% đến 3,82%. Xác định hàm tương quan

bậc 4 tính sức chịu tải của cọc tròn trơn và cọc cánh theo số phân tử cọc;

– Xây dựng hàm tương quan bậc 4 để đánh giá sự làm việc của cọc ống thép tròn trơn và cọc có 02 cánh xoắn khi xét đến sự biến động của tham số ngẫu nhiên góc ma sát trong của nền từ $39,52^0$ đến $53,46^0$ (giá trị kỳ vọng là $46,49^0$), chênh lệch tính toán so với phương pháp TTGH từ 1,46% đến 4,38%;

– Làm sáng tỏ ứng xử của cọc ống thép tròn trơn và cọc có 02 cánh xoắn khi xét sự biến động của tham số ngẫu nhiên góc ma sát ngoài giữa cát sạn san hô với bề mặt thép làm cọc từ $26,06^0$ đến $35,26^0$ (giá trị kỳ vọng là $30,66^0$) qua việc xây dựng hàm tương quan bậc 4, chênh lệch so với phương pháp TTGH từ 0,66% đến 4,38%;

– Xác định được hàm tương quan đánh giá ứng xử của cọc ống thép tròn trơn và cọc có 02 cánh xoắn khi xét tham số ngẫu nhiên trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà của nền cát sạn san hô thay đổi từ 17,34 đến 23,46 kN/m³ (giá trị kỳ vọng là 20,4 kN/m³), chênh lệch so với phương pháp TTGH từ 0,33% đến 10,38%.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Từ các kết quả nghiên cứu, tác giả luận án rút ra những kết luận, đánh giá vấn đề mới, phân tích nội dung đã đạt được. Đồng thời, làm rõ một số hạn chế và kiến nghị các nghiên cứu tiếp của luận án theo như sau:

1. Kết luận

a) Kết quả đạt được trong nội dung nghiên cứu của luận án

1) Làm sáng tỏ sức kháng ma sát giữa bề mặt tấm thép với mẫu cát sạn san hô bằng thí nghiệm cắt phẳng cải tiến kỹ thuật trong phòng thí nghiệm kết hợp thí nghiệm quy luật ma sát ngoài hiện trường. Xác định các tham số mô hình cát sạn san hô ở độ chặt tương đối là 70% và có kích thước hạt thô lớn nhất là 20 mm thu thập được từ vùng biển đảo xa bờ tỉnh Khánh Hoà.

2) Xác định sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô theo phương pháp PTHH. Đồng thời, đánh giá ảnh hưởng các tham số cánh xoắn của cọc khi được gia cường trên cọc, bao gồm: số lượng cánh xoắn; khoảng cách cánh xoắn; độ sâu vị trí cánh xoắn trên thân cọc; đường kính và bước cánh xoắn. Trên cơ sở kết quả nhận được, phân tích và kiến nghị có thể tham khảo các tham số cánh xoắn nhằm nâng cao sức chịu tải theo điều kiện khai thác, hài hoà tính kinh tế của cọc cải tiến so với cọc tròn trơn truyền thống khi sử dụng trong móng cọc công trình trong nền cát sạn san hô.

3) Ứng dụng lý thuyết mô phỏng số Monte-Carlo xây dựng chương trình “PileHLC” để lập các hàm tương quan đánh giá ứng xử của cọc ống thép trong nền cát sạn san hô khi xét đến sự biến động trong một biên độ hữu hạn của tham số ngẫu nhiên nền là góc ma sát trong và trọng lượng thể tích, tham số ngẫu nhiên của tương tác giữa cọc với nền là góc ma sát ngoài.

b) Những điểm mới của luận án mà tác giả đã thực hiện

Căn cứ vào thực tiễn nghiên cứu trong nước và quốc tế, tác giả nhận thấy một số điểm mới trong các kết quả nghiên cứu đạt được của luận án như sau:

1) Tiến hành các thí nghiệm trong phòng và hiện trường nhằm làm sáng tỏ cơ chế hình thành và phát triển sức kháng ma sát giữa bề mặt tấm thép với

cát sạn san hô. Các kết quả cho thấy, góc ma sát ngoài giữa cát sạn san hô và bề mặt tấm thép làm cọc trung bình là $30,66^0$, chuyển vị tới hạn của sức kháng ma sát đạt được trung bình là 2,5 mm.

2) Nghiên cứu ảnh hưởng các thông số của cọc ống thép có cánh xoắn (số lượng cánh, độ sâu vị trí cánh trên thân cọc, khoảng cách cánh, bước cánh và đường kính cánh) và ảnh hưởng sự biến động của các tham số nền cát sạn san hô (góc ma sát trong, góc ma sát ngoài, trọng lượng thể tích ở trạng thái bão hoà) đến sự làm việc của cọc và chuyển vị đầu cọc ống thép. Kết quả nghiên cứu cho thấy sức chịu tải cực hạn của cọc ống thép có 2 cánh xoắn tăng từ 1,9 đến 3,9 lần khi cọc chỉ chịu tải dọc trục; tăng từ 1,9 đến 2,3 lần khi cọc chịu nén dọc trục và ngang đồng thời. Trong khi đó, khi chịu nhỏ dọc trục và đẩy ngang đồng thời thì sức chịu tải tăng từ 2,6 đến 3,6 lần. Ngược lại, cọc ống thép có 2 cánh xoắn có thể giảm chuyển vị cực hạn đầu cọc từ 2,8 đến 6,3 lần so với cọc tròn trơn khi xét cùng giá trị tải trọng.

3) Ứng dụng lý thuyết mô phỏng số Monte - Carlo xây dựng thuật toán, chương trình được gọi là “PileHLC” để tính toán sức chịu tải của cọc ống thép tròn trơn và cọc ống thép có 02 cánh xoắn trong nền cát sạn san hô, khi xét tính ngẫu nhiên tham số góc ma sát trong, trọng lượng thể tích của nền cát sạn san hô và góc ma sát ngoài giữa cọc ống thép với nền cát sạn san hô.

2. Kiến nghị

a) Các hạn chế của kết quả nghiên cứu và các vấn đề lưu ý

1) *Đối với kết cấu cọc:* Mới tập trung nghiên cứu ứng xử về sức chịu tải của cọc đơn ống thép có tối đa 2 cánh xoắn độc lập, chưa đánh giá với các cọc ống thép có nhiều cánh xoắn và hoặc dạng cọc vít có tính liên tục. Chưa đề cập nghiên cứu đến ảnh hưởng của hiệu ứng nhóm đối với cọc cánh xoắn.

2) *Đặc điểm môi trường nền:* Tác giả mới nghiên cứu nền cát sạn san hô ở độ chặt tương đối 70% có kích thước hạt thô lớn nhất là 20 mm. Chưa làm rõ đối với các trường hợp nền san hô khác có kích thước hạt lớn hơn và sử dụng các mô hình nền nâng cao phù hợp từng trường hợp bài toán tương tác cụ thể trong thực tiễn. Đồng thời, luận án chưa thực hiện được nhiều khối lượng thực nghiệm để kiểm định quy luật phân bố của các tham số nền cát sạn

san hô khi khảo sát sự biến động ngẫu nhiên ở trong chương 4.

3) *Tính chất tải trọng tác dụng*: Luận án đề cập đến tải trọng tĩnh tác dụng tại đầu cọc theo phương dọc trục, phương ngang. Chưa đề cập nghiên cứu đến tải trọng lặp tĩnh, lặp động và tải trọng tác dụng đa phương.

4) *Sử dụng phương pháp tính toán*: Kết quả nghiên cứu đánh giá ứng xử của cọc ống thép có cánh xoắn và kiến nghị tham khảo cấu hình cánh xoắn theo mô hình số lý thuyết, mà chưa tiến hành nghiên cứu thực nghiệm tương tác của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô trên mô hình vật lý thu nhỏ hoặc thực nghiệm trực tiếp tại hiện trường. Ngoài ra, trong mô hình số mới xét các tham số tiền định của mô hình nền đàn dẻo lý tưởng để tính toán, mà chưa kể đến sự biến động của các tham số này trong và sau khi hạ.

b) Kiến nghị hướng nghiên cứu tiếp theo

1) Cần tiếp tục nghiên cứu thực nghiệm xác định các tham số mô hình nền đầy đủ để vận dụng vào bài toán cọc ống thép có các cánh xoắn khi xét tới tải trọng động có tính lặp theo thực tế khai thác công trình. Đồng thời, tiến hành thêm nhiều thực nghiệm với các cấp phối khác nhau để kiểm định quy luật phân bố của các tham số nền cát sạn san hô nghiên cứu.

2) Tiếp tục nghiên cứu sự làm việc của cọc ống thép cải tiến bằng các cánh xoắn trong các điều kiện nền san hô khác nhau chịu tác dụng các trường hợp tải trọng phức tạp để tối ưu hóa các tham số của cánh xoắn.

3) Nghiên cứu thực nghiệm cọc ống thép có các cánh xoắn khác nhau theo phương pháp mô hình vật lý trong phòng thí nghiệm với tỷ lệ nhất định hoặc thí nghiệm hiện trường trên các cọc phù hợp thiết kế và thực tiễn thi công nhằm kiểm chứng kết quả nghiên cứu theo thực nghiệm. Đồng thời đánh giá sự biến động của tham số nền cát sạn san hô sau khi hạ cọc ổn định vào trong nền.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

- [1] Phạm Đức Phong, Nguyễn Hải Hưng, Nguyễn Thanh Sang (2017), *Phân tích tương tác của móng – cọc – nền theo mô hình Gibson tổng quát*, Tạp chí xây dựng Việt Nam, số tháng 7 năm 2017, ISSN 0866-0762.
- [2] Nguyễn Thanh Sang, Trần Nam Hưng, Nguyễn Trường Toán (2018), *Nghiên cứu tương tác cọc đơn và nền chịu tác dụng của tải trọng lặp dọc trục*, Tạp chí Cầu đường Việt Nam số 7 năm 2018, ISSN 1859-459X.
- [3] Nguyễn Thanh Sang, Nguyễn Tương Lai, Cao Văn Hòa, Mai Đăng Nhân (2019), *Nghiên cứu thực nghiệm tương tác giữa cọc đơn và nền san hô chịu tác dụng của tải trọng lặp*, Tạp chí Khoa học và kỹ thuật số 204 tháng 12 năm 2019, ISSN 1859-0209.
- [4] Cao Van Hoa, Vu Anh Tuan, Nguyen Thanh Sang, Nguyen Tuong Lai, Pham Duc Tiep (2020), *Effect of Grain Size on Shear Strength of Coral Gravel Sand*, *Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainability in Civil Engineering*, ICSCCE 2020, 26–27, Hanoi, Vietnam, Lecture Notes in Civil Engineering (scopus), ISSN 2366-2557.
- [5] Nguyễn Thanh Sang, Nguyễn Tương Lai, Trần Nam Hưng, Nguyễn Quốc Văn, *Nghiên cứu ứng xử của cọc đơn trong nền bão hòa nước chịu tác dụng của tải trọng lặp dọc trục theo phương pháp phần tử hữu hạn*, Tạp chí Người xây dựng số 3&4 năm 2021, ISSN 0866-8531.
- [6] Nguyễn Tương Lai, Nguyễn Thanh Sang, Phạm Đức Tiệp, Hoàng Quốc Long (2022), *Ảnh hưởng các tham số cánh xoắn đến sự làm việc của cọc ống thép có cánh xoắn trong nền san hô chịu tải trọng dọc trục*, Tạp chí Giao thông vận tải, số tháng 11 năm 2022, ISSN 2354-0818.
- [7] Nguyễn Thanh Sang, Nguyễn Tương Lai, Hoàng Quốc Long, Phạm Đức Tiệp (2023), *Nghiên cứu ứng xử của cọc ống thép chịu tải dọc trục sử dụng các mô hình nền khác nhau*, Tạp chí Giao thông vận tải, số tháng 01 năm 2023, ISSN 2354-0818.
- [8] Nguyen Thanh Sang, Nguyen Tuong Lai, Pham Duc Tiep (2023), *Experimental study of interface shear characteristics between calcareous soil and steel, application to estimate axial bearing capacity of steel pile*, Tạp chí Khoa học công nghệ xây dựng - Viện Khoa học công nghệ xây dựng, số 01 năm 2023, ISSN 1859-1566.
- [9] Nguyễn Thanh Sang (2023), *Nghiên cứu đề xuất các tham số cánh xoắn của cọc vít làm việc trong nền san hô bằng phương pháp phần tử hữu hạn*, Báo cáo tại Hội nghị khoa học các nhà nghiên cứu trẻ tại Học viện Kỹ thuật quân sự tháng 3 năm 2023.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

- [1] Phạm Tuấn Anh, Nguyễn Tương Lai, Trịnh Việt Cường (2016), “*Nghiên cứu hiệu ứng nhóm của móng cọc chịu tải trọng thẳng đứng có xét đến sự làm việc phi tuyến của đất nền*”, *Tạp chí Xây dựng*, số 10, Hà Nội.
- [2] Nguyễn Thái Chung (2006), *Nền san hô và sự làm việc của cọc trong nền san hô*, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội.
- [3] Bùi Đức Năng (2010), *Tính xác suất không hỏng của kết cấu hệ thanh có kể đến các yếu tố ngẫu nhiên về vật liệu, hình học của kết cấu và tải trọng*, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội.
- [4] Nguyễn Hữu Đầu (2014), Báo cáo tổng hợp đề tài KHCN cấp Bộ Giao thông Vận tải “*Nghiên cứu công nghệ cọc hỗn hợp sử dụng trong gia cố và xây dựng công trình trên nền đất yếu*”, mã số 144009, Hà Nội.
- [5] Vũ Công Ngữ, Nguyễn Thái (2014), *Móng cọc phân tích và thiết kế*, NXB Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội.
- [6] Nguyễn Tương Lai (2019), Báo cáo tổng hợp đề tài KHCN độc lập cấp quốc gia “*Nghiên cứu ma sát giữa móng cọc với nền san hô và dự báo sự ổn định của công trình dưới tác động của sóng biển*”, mã số ĐTĐL-CN.17/15, Hà Nội.
- [7] Hoàng Xuân Lượng, Nguyễn Tương Lai, Đặng Văn Mán (2003), *Nghiên cứu thực nghiệm kết cấu dàn thép không gian trên hệ móng cọc thép trong nền san hô*, Tuyển tập báo cáo Hội thảo khoa học Công trình và địa chất biển, Đà Lạt.
- [8] Hoàng Xuân Lượng, Đặng Văn Mán, Nguyễn Tương Lai (2003), *Nghiên cứu thực nghiệm xác định hệ số ma sát giữa các vật liệu khác nhau với san hô và lực ma sát giữa cọc đơn và nền san hô tại hiện trường*, Tuyển tập báo cáo Hội thảo khoa học Công trình và địa chất biển, Đà Lạt.
- [9] Hoàng Xuân Lượng và các cộng sự (2004), *Nghiên cứu đặc điểm địa chất công trình của nền san hô ở một số vùng trọng điểm và các giải pháp thích hợp cho xây dựng các công trình biển phục vụ phát triển kinh tế và quốc phòng*, Báo cáo khoa học đề tài cấp nhà nước KC.09.08, Hà Nội.
- [10] Hoàng Xuân Lượng, Phạm Tiến Đạt, Đặng Văn Mán, Nguyễn Thái Chung (2008), *Sự giảm ma sát bên giữa cọc và nền san hô – nguyên nhân hư*

- hồng công trình móng cọc trong nền san hô*, Tuyển tập Hội nghị khoa học toàn quốc lần thứ ba về sự cố và hư hỏng công trình xây dựng, Hà Nội.
- [11] Hoàng Xuân Lượng và cộng sự (2010), *Nghiên cứu các chỉ tiêu kỹ thuật của nền san hô và tương tác giữa kết cấu công trình và nền san hô*, Báo cáo khoa học đề tài cấp Nhà nước KC.09.07/06-10.
- [12] Nguyễn Thị Tuyết Trinh, Đào Duy Lâm, Nguyễn Thành Trung (2016), *Thiết kế và ví dụ tính toán theo tiêu chuẩn TCVN 11520: 2016: Móng cọc vít có cánh đơn ở mũi – Yêu cầu thiết kế*, NXB Xây dựng, Hà Nội.
- [13] Vũ Anh Tuấn (2011), *Nghiên cứu sự làm việc của cọc ống thép trong nền san hô chịu tải trọng chu trình*, Luận văn thạc sĩ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội.
- [14] Vũ Anh Tuấn (2017), *Nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số ứng xử cơ học của cát san hô ở Trường Sa*, Tạp chí Xây dựng - Số 7/2017, Hà Nội.
- [15] Đặng Huy Tú (2003), *Nghiên cứu sự lan truyền của sóng chấn động trong môi trường đất khi hạ cọc*, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội.
- [16] Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, 2012. *Báo cáo khoa học tổng hợp dự án nhánh ĐTB11.3 “Điều tra, khảo sát và đánh giá trạng thái kỹ thuật của các công trình Quốc phòng dưới tác động của môi trường biển đảo và ảnh hưởng của công trình xây dựng đối với môi trường sinh thái đảo”* thuộc Dự án “Điều tra cơ bản, nghiên cứu xây dựng cơ sở quan trắc và công nghệ xử lý các yếu tố tự nhiên tác động lên công trình ở các vùng biển phục vụ các nhiệm vụ kinh tế kỹ thuật và tăng cường Quốc phòng an ninh trên biển và thềm lục địa Việt Nam” (ĐTB 11).
- [17] Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, 2012. *Báo cáo khoa học chuyên đề dự án nhánh ĐTB11.3 “Kết quả phân tích xử lý các tài liệu thu thập về tính chất cơ lý san hô và môi trường nước vùng QĐTS và DK1 (QUYỀN III.1)”* thuộc Dự án “Điều tra cơ bản, nghiên cứu xây dựng cơ sở quan trắc và công nghệ xử lý các yếu tố tự nhiên tác động lên công trình ở các vùng biển phục vụ các nhiệm vụ kinh tế kỹ thuật và tăng cường Quốc phòng an ninh trên biển và thềm lục địa Việt Nam” (Ký hiệu ĐTB 11).
- [18] Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt, 2012. *Báo cáo khoa học chuyên đề dự án nhánh ĐTB11.3 “Điều tra khảo sát về địa chất công trình và các tính*

chất cơ lý san hô trong vùng QĐTS (QUYÊN III.2)” thuộc Dự án “Điều tra cơ bản, nghiên cứu xây dựng cơ sở quan trắc và công nghệ xử lý các yếu tố tự nhiên tác động lên công trình ở các vùng biển phục vụ các nhiệm vụ kinh tế kỹ thuật và tăng cường Quốc phòng an ninh trên biển và thềm lục địa Việt Nam” (Ký hiệu ĐTB 11).

- [19] Bộ Khoa học và công nghệ (2012), *Tiêu chuẩn cọc ống thép: TCVN 9245: 2012*, Hà Nội.
- [20] Bộ Khoa học và công nghệ (2014), *Tiêu chuẩn TCVN 10304:2014: Móng cọc - Tiêu chuẩn thiết kế*, Hà Nội.
- [21] Bộ Khoa học và công nghệ (2015), *Tiêu chuẩn TCVN 108340:2015 - Móng cọc ống thép dạng cọc đơn dùng cho công trình cầu - Yêu cầu thiết kế*, Hà Nội.
- [22] Bộ Khoa học và công nghệ (2017), *Tiêu chuẩn TCVN 11820: 2017: Công trình Cảng biển – Yêu cầu thiết kế*, Hà Nội.
- [23] Bộ Khoa học và công nghệ (2016), *Tiêu chuẩn TCVN 11520: 2016: Móng cọc vít có cánh đơn ở mũi – Yêu cầu thiết kế*, Hà Nội.
- [24] Bộ Khoa học và công nghệ (2018), *TCVN 12111: 2018: Móng cọc vít có cánh đơn ở mũi – Yêu cầu thi công và nghiệm thu*, Hà Nội.
- [25] Bộ Khoa học và công nghệ (2017), *TCVN 11823: 2017: Thiết kế cầu đường bộ*, Hà Nội.
- [26] Bộ Khoa học và công nghệ (2012), *TCVN 4195:2012 đất xây dựng - phương pháp xác định - khối lượng riêng trong phòng thí nghiệm*, Hà Nội.
- [27] Bộ Khoa học và công nghệ (2012), *TCVN 8721: 2012 đất xây dựng công trình thủy lợi - phương pháp xác định khối lượng thể tích khô lớn nhất và nhỏ nhất của đất rời trong phòng thí nghiệm*, Hà Nội.
- [28] Bộ Khoa học và công nghệ (2014), *TCVN 4198:2014 Đất xây dựng – phương pháp phân tích thành phần hạt trong phòng thí nghiệm*, Hà Nội.
- [29] Bộ Khoa học và công nghệ (1995), *TCVN 4199-1995: Đất xây dựng - phương pháp xác định sức chống cắt trong phòng thí nghiệm ở máy cắt phẳng*, Hà Nội.
- [30] Công ty TNHH Ống thép hàn xoắn Nippon Steel Việt Nam, <https://www.nipponsteel.com/vn/news>, Bà Rịa - Vũng Tàu.

Tiếng Anh

- [31] Mohajerani A., Bosnjak D., Bromwich D. (2016), *Analysis and design*

- methods of screw piles: A review*, Soils and Foundations: The Japanese Geotechnical Society.
- [32] API RP2GEO API Recommended Practice (2011), *Geotechnical and Foundation Design Considerations*, First Edition.
- [33] American Petroleum Institute (2002), *API Recommended Practice 2A-WSD - Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design*.
- [34] American Petroleum Institute (API-RP-2A) (2000), *Recommended practices for planning, designing and constructing fixed offshore platforms*, American Petroleum Institute, Washington.
- [35] Vu A.T., Matsumoto T. (2019), *Numerical Analysis on Behaviours of Winged Monopile Subjected to Cyclic Loading in a Calcareous Ground*, Lecture Notes in Civil Engineering , vol 18. Springer, Singapore.
- [36] Puech A. (2013), *Design for cyclic loading: Piles and other foundations*, Proceedings of TC 209 Workshop, 18th ICSMGE, Paris.
- [37] Abdrabbo F.M., El Wakil A.Z. (2016), *Laterally loaded helical piles in sand*, Alexandria Engineering Journal - Alexandria University.
- [38] ASTM D5321 / D5321M-14 (2014), *ASTM International, Standard test method for determining the shear strength of soil-geosynthetic and geosynthetic-geosynthetic interfaces by direct shear*, West Conshohocken, PA.
- [39] Airey D. W., Fahey M. (1991), *Cyclic response of calcareous soil from the North-West Shelf of Australia*, Geotechnique 41, No. 1, 101-121.
- [40] Banerjee P.K., Davies T.G. (1978), *The behaviour of axially and laterally loaded single piles embedded in nonhomogeneous soils*, Geotechnique 28(3):309–326.
- [41] Barari A., Bagheri M., Rouainia M., Ibsen L.B. (2017), *Deformation mechanisms for offshore monopile foundations accounting for cyclic mobility effects*, Soil Dyn Earthq Eng 97:439–453.
- [42] Xu B., Zhuge A. (2016), *Review of Research on Physical Properties of Coral Sands*, Proceedings of International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2016), Atlantis Press.
- [43] Bienen B., Duřhrkop J., Grabe J., Randolph M.F., White D.J. (2012), *Response of piles with wings to monotonic and cyclic lateral loading in*

- sand*, J Geotech Geoenviron Eng 138(3):364–375.
- [44] Zhu B., Li T., Xiong G., Liu J.C. (2016), *Centrifuge model tests on laterally loaded piles in sand*, Int J Phys Modell Geotech 16:160–172.
- [45] Bransby M.F. (1999), *Selection of p–y curves for the design of single laterally loaded piles*, Int J Numer Methods Geomech 23(15):1909–1926.
- [46] Broms B.B. (1964), *Lateral resistance of piles in cohesive soils*. J Soil Mech Found Div 90:27–63.
- [47] Byrne B.W., Houlsby G.T. (2015), *Helical piles: an innovative foundation design option for offshore wind turbines*, the Royal Society.
- [48] Chae K.S., Ugai K., Wakai A. (2004), *Lateral resistance of short single piles and pile groups located near slopes*, Int J Geomech 4(2):93–103.
- [49] Byrne B.W., Burd H.J., Gavin K.G., Houlsby G.T., Jardine R.J. (2019), *PISA: Recent developments in offshore wind turbine monopile design*. In M. F. Randolph, D. H. Doan, A. M. Tang, M. Bui, & V. N. Dinh (Eds.), Proceedings of the 1st Vietnam Symposium on Advances in Offshore Engineering : Energy and Geotechnics (Vol. 18, pp. 350-355).
- [50] Burlon S., Mroueh H., Cao J.P. (2014), *Skipped cycles method for studying cyclic loading and soil-structure interface*, Computers and Geotechnics, vol. 61, pp. 209–220.
- [51] Davisson M.T., Gill H.L. (1963), *Laterally loaded piles in a layered soil system*, J Soil Mech Found Div 89:63–94.
- [52] Deendayal R., Muthukkumaran K., Thallak S.G. (2019), *Experimental investigation on behavior of a laterally loaded single pile located on sloping ground*, Int J Geomech 19(5):04019021.
- [53] Fahmy A., El Naggar M.H. (2017), *Axial and lateral performance of spun-cast ductile iron helical tapered piles in clay*, Proc Inst Civil Eng Geotech Eng 170(6):503–516.
- [54] Georgiadis K. (2012), *Development of p–y curves for undrained response of piles near slopes*, Comput Geotech 40:53–61.
- [55] Perko H.A. (2009), *Helical Piles: A Practical Guide to Design and Installation*, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey Published simultaneously in Canada.
- [56] National Standard of the PRC, *GB 50153-2008 Unified standard for reliability design of engineering structures*. Beijing: China Architecture

& Building Press, 2009.

- [57] Kusumaningsih D.A., Vu A.T., Matsumoto M. (2016), *Numerical study on behaviour of single piles in a coral sand*, Proc. Soft Soils 2016 Conf., Bandung, pp.D1-1 to D1-6.
- [58] Gavin K.G., O’Kelly B.C. (2007), *Effect of Friction Fatigue on Pile Capacity in Dense Sand*, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering.
- [59] Andersen K.H., Puech A.A., Jardine R.J. (2013) *Cyclic resistant geotechnical design and parameter selection for offshore engineering and other applications*. Proceedings of TC 209 Workshop – 18 ICSMGE Design for cyclic loading: Piles and other foundations, Paris 4 Sep.
- [60] Low B.K, Teh C.I (1999), *Probabilistic analysis of pile deflection under lateral loads*, International Conference on Application of Statistics and Probability (ICASP8), Sydney, Australia.
- [61] Low B.K., Phoon K.K. (2002), *Practical first-order reliability computations using spreadsheet*, Proceedings, Probabilistics In Geotechnics: Technical And Economic Risk Estimation, Graz, Austria.
- [62] Low B.K., Phoon K.K. (2015), *Geotechnical Reliability-based Designs and Links with LRFD*, 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP12, Vancouver, Canada, July 12-15, 2015.
- [63] Kimura M., Zhang F. (2000), *seismic evaluations of pile foundations with three different methods based on three-dimensional elasto-plastic finite element*, soils and foundations Vol. 40, No. 5, 113-132, Oct. 2000, Japanese Geotechnical Society.
- [64] Morata G., Boulon M., Ghionna V.N. (2002), *A 2D constitutive model for cyclic interface behavior*, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 26, no. 11, pp. 1 071–1 096.
- [65] Ghaly A., Clemence S. (1998), *Pullout performance of inclined helical screw anchors in sand*, J. Geotech. Geoenviron. Eng.
- [66] Nowkandeh M.J, Choobbasti A.J. (2021), *Numerical study of single helical piles and helical pile groups under compressive loading in cohesive and cohesionless soils*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment.

- [67] Ali M. (2020), *Field axial loading testing of helical piles at a cohesionless soil site*, A project report submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Engineering in Geotechnical Engineering.
- [68] Qi W., Qifei L., Haiyang Z., Chengshun X., Guoxing C. (2022), *Experimental investigation of dynamic shear modulus of saturated marine coral sand*, Ocean Engineering.
- [69] Wang J., Cao A., Song D., Feng B., Li H., Long Y., Ye Z. (2023), *Laboratory Experiments and Numerical Simulation on Dynamic Response of Island Reclamation Coral Sand under Aircraft Load*, Materials 2023, 16, 3465.
- [70] Long H., Zhuang K., Deng B., Jiao J., Zuo J., You E. (2022), *Dynamic Characteristics of Coral Sand in the Condition of Particle Breakage*, Hindawi Geofluids.
- [71] Wang W., Li W., Yao Z. (2019), *Experimental study on shear characteristics of reef coral sand*, Earth and Environmental Science.
- [72] Puech A. (2013), *Advances in axial cyclic pile design: contribution of the SOLCYP project*, Proceedings TC 209 Workshop, 18th ICSMGE, Paris.
- [73] Portions 2019 Bentley Systems, Incorporated (2019), *Plaxis 3D Reference Manual Connect edition Version 20.1.0.98*.
- [74] Bailie P. (2013), *An investigation into the cyclic response of piles*, Imperial College London.
- [75] Peralta P.K. (2010), *Investigations on the behaviour of large diameter piles under long-term lateral cyclic loading in cohesionless soil*, PhD thesis, Leibnitz University, Hannover, 2010.
- [76] Poulos H.G. (2000), *Practical design procedures for piled raft foundations*, Hemsley J.A.
- [77] Poulos H.G. (1988), *The mechanics of calcareous sediments*. Australian Geomechanics, pp 8-41.
- [78] D'Aguiar S.C, Modaresi-Farahmand-Razavi A., dos Santos J.A, Lopez-Caballero F. (2011), *Elastoplastic constitutive modelling of soil-structure interfaces under monotonic and cyclic loading*, Computers and Geotechnics 38 (2011) 430–447.
- [79] Aksoy H.S., Mesut G., Esen İ. (2017), *Determination of Friction Angles*

- Between Soil and Steel-FRP Piles*, Turkish Journal of Science & Technology.
- [80] Aksoy H.S., Inal E., Gör M. (2016), *Skin Friction between Soil and Pile Materials*, 12th International congress on advances in civil engineering.
- [81] Liang Y., Lu X., Wang J., Liu M. (2016), *Experimental study of shear behavior of interfaces between crushed sandstone-mudstone particle mixture and smooth steel plate*, Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.53, No.3, DOI 10.1007/s11204-016-9380-x.
- [82] Han F., Ganju E., Salgado R., Prezzi M. (2018), *Effects of Interface Roughness, Particle Geometry, and Gradation on the Sand-Steel Interface Friction Angle*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, ISSN 1090-0241, DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001990.
- [83] Guo J., Wang X., Lei S., Wang R., Kou H., Wei D. (2020), *Effects of Groove Feature on Shear Behavior of Steel-Sand Interface*, Advances in Civil Engineering, doi.org/10.1155/2020/9593187.
- [84] Gavin K.G., O'Kelly B.C. (2007), *Effect of Friction Fatigue on Pile Capacity in Dense Sand*, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, DOI:10.1061/ASCE1090-02412007133:1.
- [85] Innovative Geotechnics Pty Ltd (2017), *User Manual for PileAXL - A Program for Single Piles under Axial Loading*, Australia.
- [86] Wang X.Z., Wang X., Jin Z.C., Meng Q.S., Zhu C.Q., Wang R. (2016), *Shear characteristics of calcareous gravelly soil*. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, published online on 2016 November 30th, 13 pages, doi:10.1007/s10064-016-0978-z.
- [87] Costa J.P.S. (2017), *Uplift behavior of helical piles in sand subjected to cyclic loading*, Universidade federal do rio grande do norte.
- [88] Rimoy S., Jardine R.J., Standing J.R. (2013), *Displacement response to axial cyclic loading of driven piles in sand*, Proceedings 18th ICSMGE, Paris.
- [89] Tsuha C., Foray P., Jardine R.J. (2012), *Behaviour of displacement piles in sand under cyclic axial loading*, Soils and Foundations, vol. 52, no. 3, pp. 393–410.
- [90] Prakash S., Sharma H.D. (1990), *Pile foundation in Engineering Practice*, A Wiley Interscience Publication, Inc.
- [91] Shahrour M.I., Vincens M.E., Emeriault M.F., Canou M.J., Puech M.A.

- (2013), *Behaviour of soil-structure interfaces subjected to a large number of cycles - Application to Piles*. PhD thesis, University of Grenoble, France.
- [92] Mittal S., Ganjoo B., Shekhar S. (2010), *Static equilibrium of screw anchor pile under lateral load in sand*, Geotech. Geol. Eng. 28.
- [93] Narasimha S., Prasad Y. (1993), *Estimation of uplift capacity of helical pile anchors in clay*, J. Geotech. Eng., ASCE 119 (2), P352–357.
- [94] Narasimha S., Prasad Y., Shetty M. (1991), *The behavior of model screw piles in cohesive soils*, Soils Found. 31 (2), P35–50.
- [95] Abdrabbo F.M., El Wakil A.Z. (2016), *Laterally loaded helical piles in sand*, Alexandria Engineering Journal - Alexandria University.
- [96] Verruijt A., Kooijman A.P. (1989), *Laterally loaded piles in a layered elastic medium*, Geotechnique 39:39–49.
- [97] Wang X.Z. (2011), *Engineering characteristics of the calcareous sand in Nansha Islands, South China Sea*. Engineering Geology 120, 40–47.
- [98] Wang X.Z. (2016), *Shear characteristics of calcareous gravelly soil*, Bulletin of Engineering Geology Environment. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [99] Wang X., Wang X.Z., Zhu C.Q., Meng Q.S. (2018), *Shear tests of interfaces between calcareous sand and steel*, Marine Georesources & Geotechnology.
- [100] Prasad Y., Narasimha R. (1996), *Lateral capacity of helical piles in clays*, J. Geotech. Eng. 122 (11) - 938–941.
- [101] Zhang C., Yu J., Huang M. (2016), *A Winkler load transfer analysis for laterally loaded piles*, Can Geotech J 53:1110–1124.

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

NGUYỄN THANH SANG

NGHIÊN CỨU SỰ LÀM VIỆC CỦA CỌC ỚNG THÉP CÓ CÁNH
XOẮN TRONG NỀN CÁT SẠM SAN HỒ

PHỤ LỤC

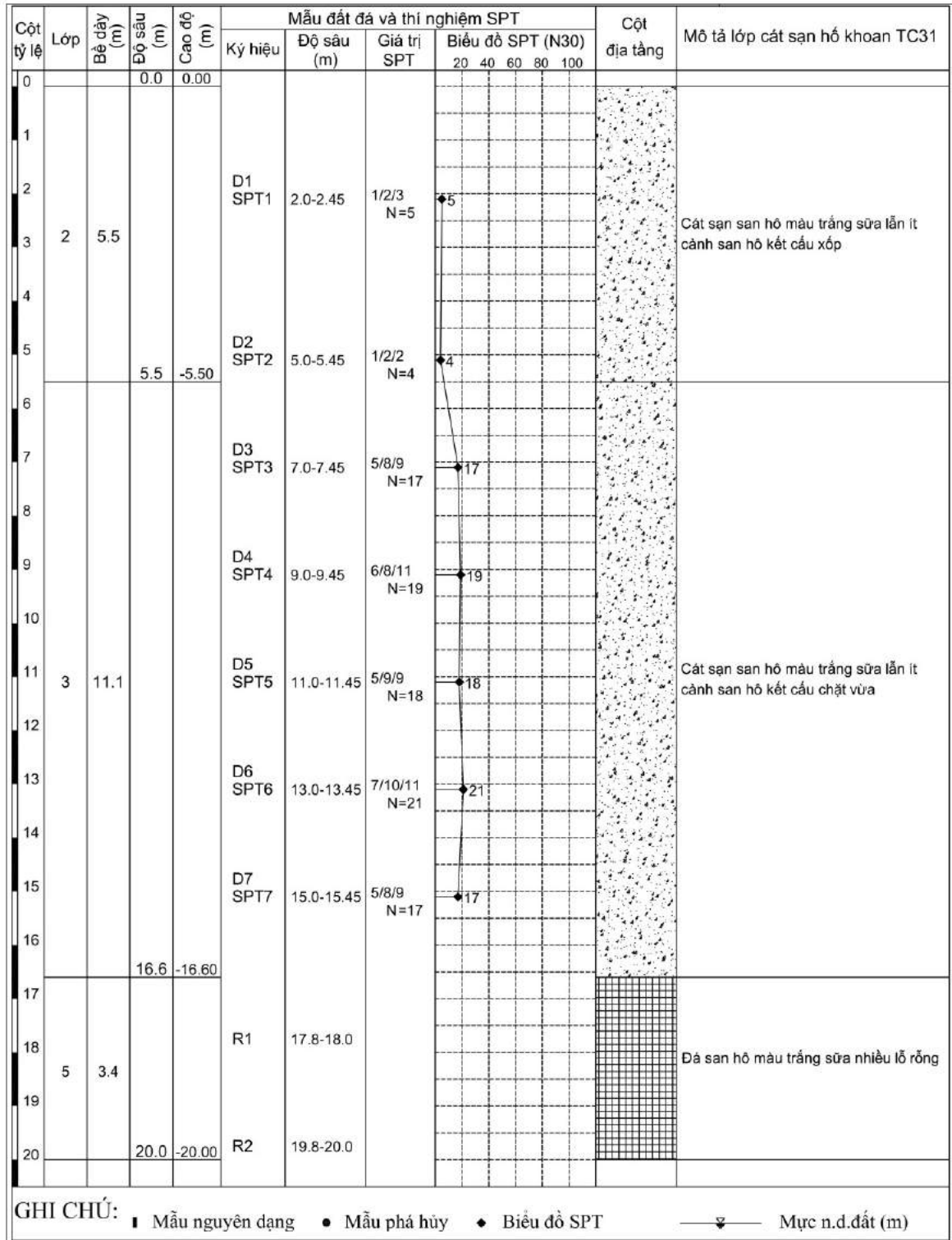
SỐ LIỆU NGHIÊN CỨU VÀ CÁC KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

HÀ NỘI - NĂM 2024

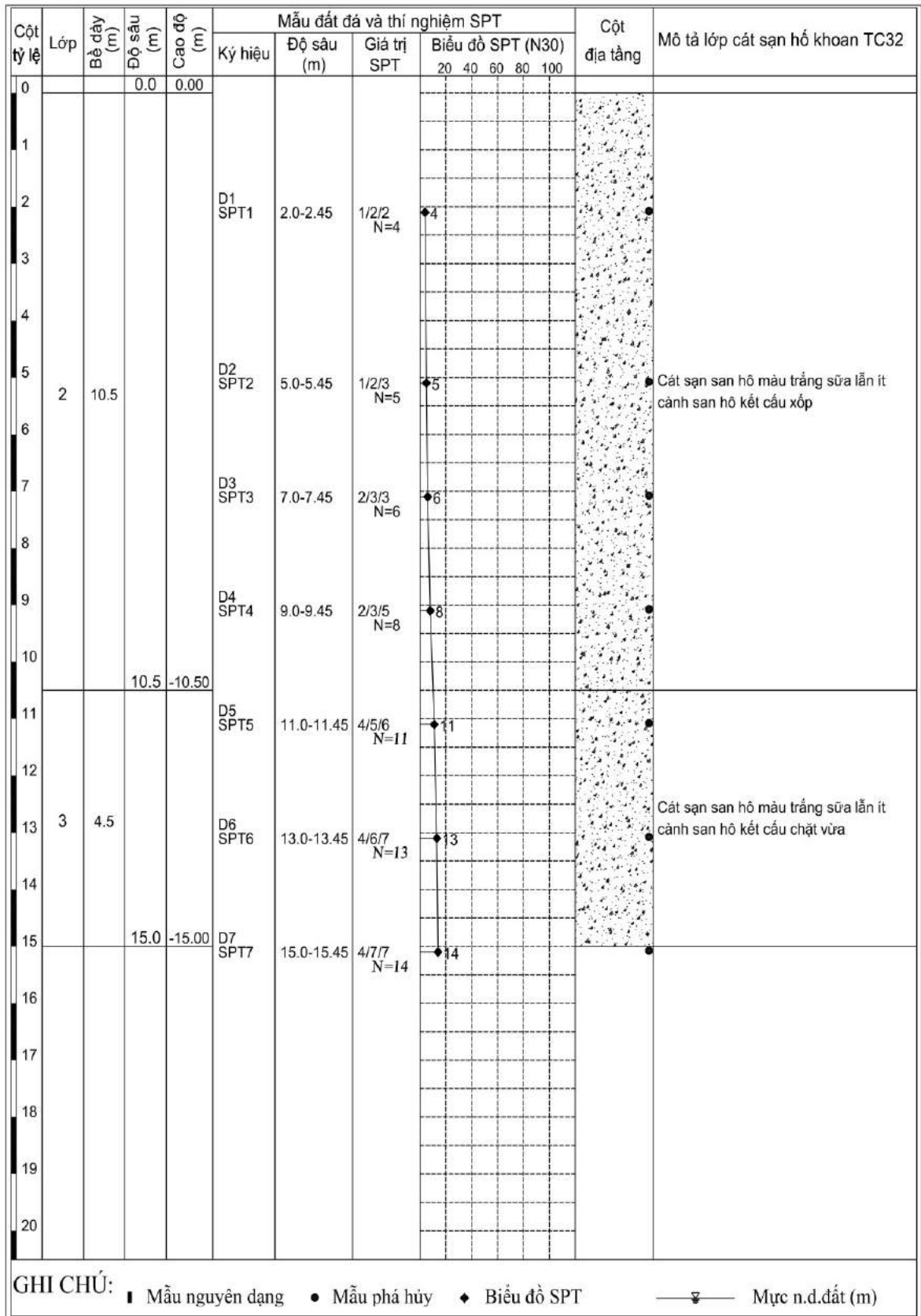
MỤC LỤC

Phụ lục 1. Tổng hợp mặt cắt phân bố nền cát sạn san hô tại một số đảo xa bờ thuộc vùng biển tỉnh Khánh Hoà	2
Phụ lục 2. Tổng hợp một số kết quả nghiên cứu về nền san hô trên thế giới	14
Phụ lục 3. Tổng hợp số liệu thực nghiệm cắt phẳng mẫu cát sạn san hô trên tấm thép trong phòng thí nghiệm	17
Phụ lục 4. Tóm lược cơ sở lý thuyết tính toán sức chịu tải của cọc ống thép theo phương pháp phần tử hữu hạn	29
Phụ lục 5. Kết quả khảo sát số sự làm việc cọc ống thép có cánh xoắn trong nền cát sạn san hô trên phần mềm PLAXIS 3D VERSION 20.1.0.98	35
Phụ lục 6. Tóm lược cơ sở lý thuyết tính toán sức chịu tải của cọc ống thép theo lý thuyết độ tin cậy	59
Phụ lục 7. Tổng hợp mã nguồn chương trình tính toán “PileHLC” trên phần mềm MATLAB VERSION 7.6.0.324 (R2008A)	66

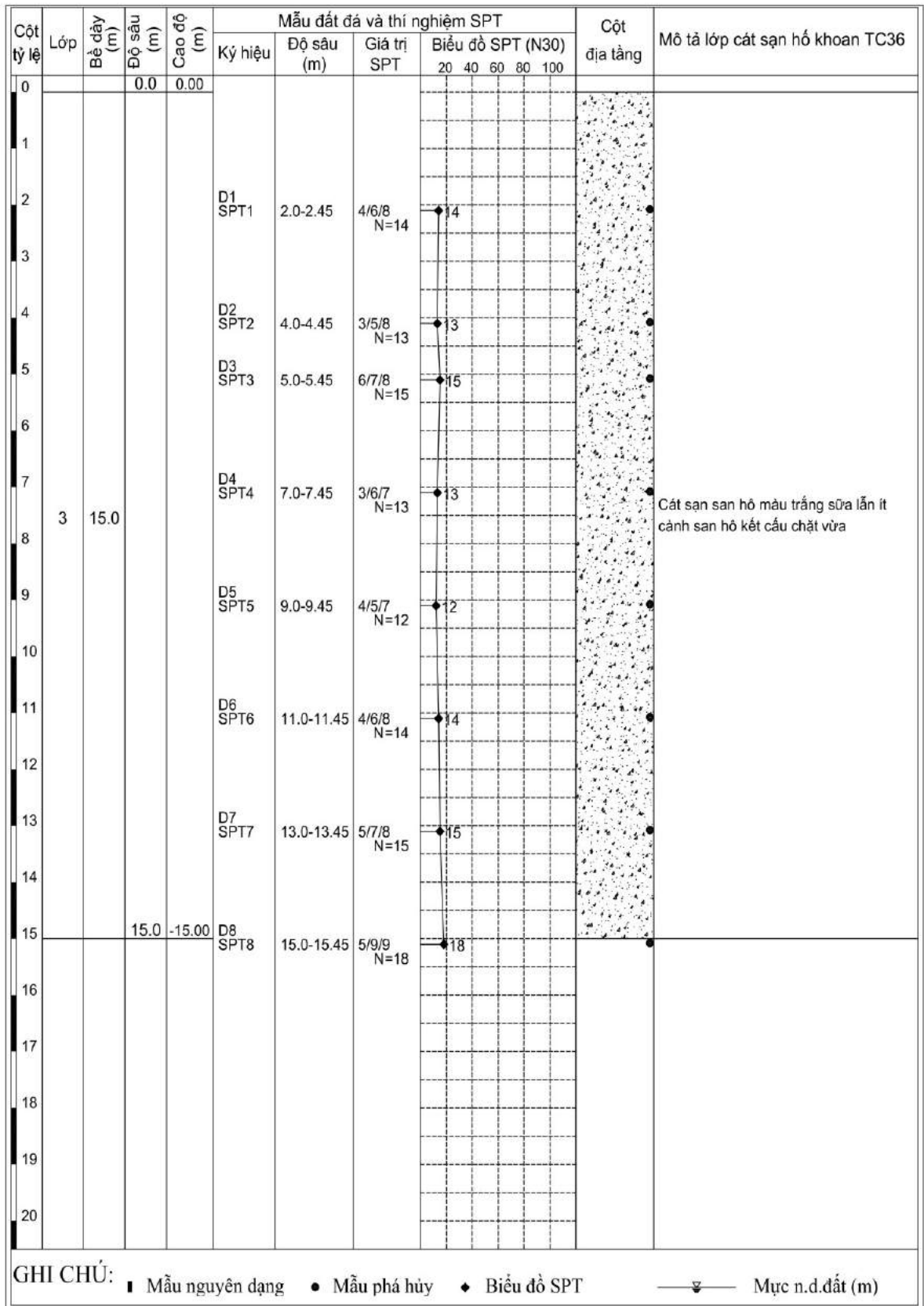
PHỤ LỤC 1 (CHƯƠNG 1)
TỔNG HỢP MẶT CẮT PHÂN BỐ NỀN CÁT SAN SAN HỒ
TẠI MỘT SỐ ĐẢO XA BỜ THUỘC VÙNG BIỂN TỈNH KHÁNH HOÀ



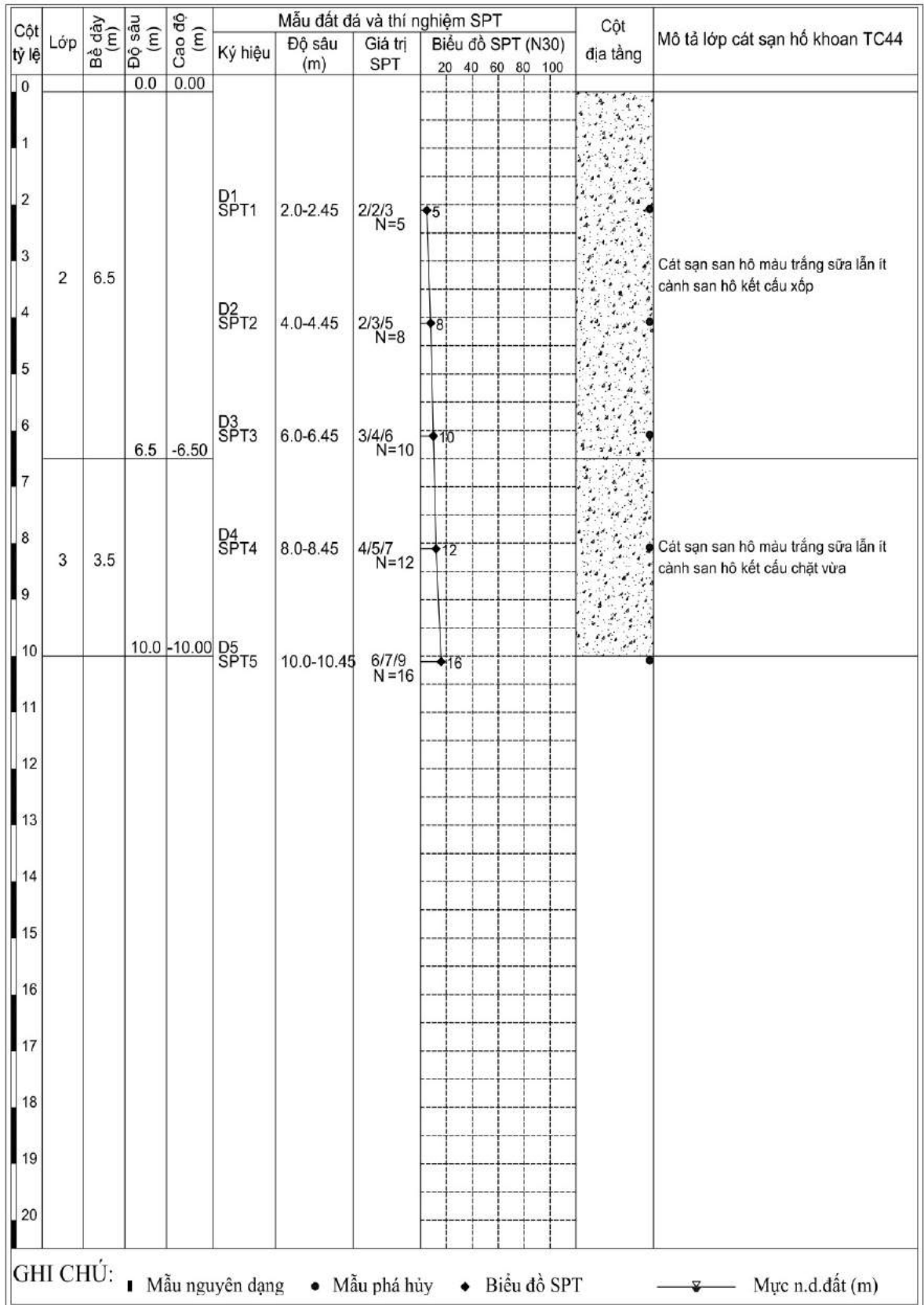
Hình PL1.1. Mặt cắt hình trụ hố khoan TC31 tại đảo TC (KTS23)



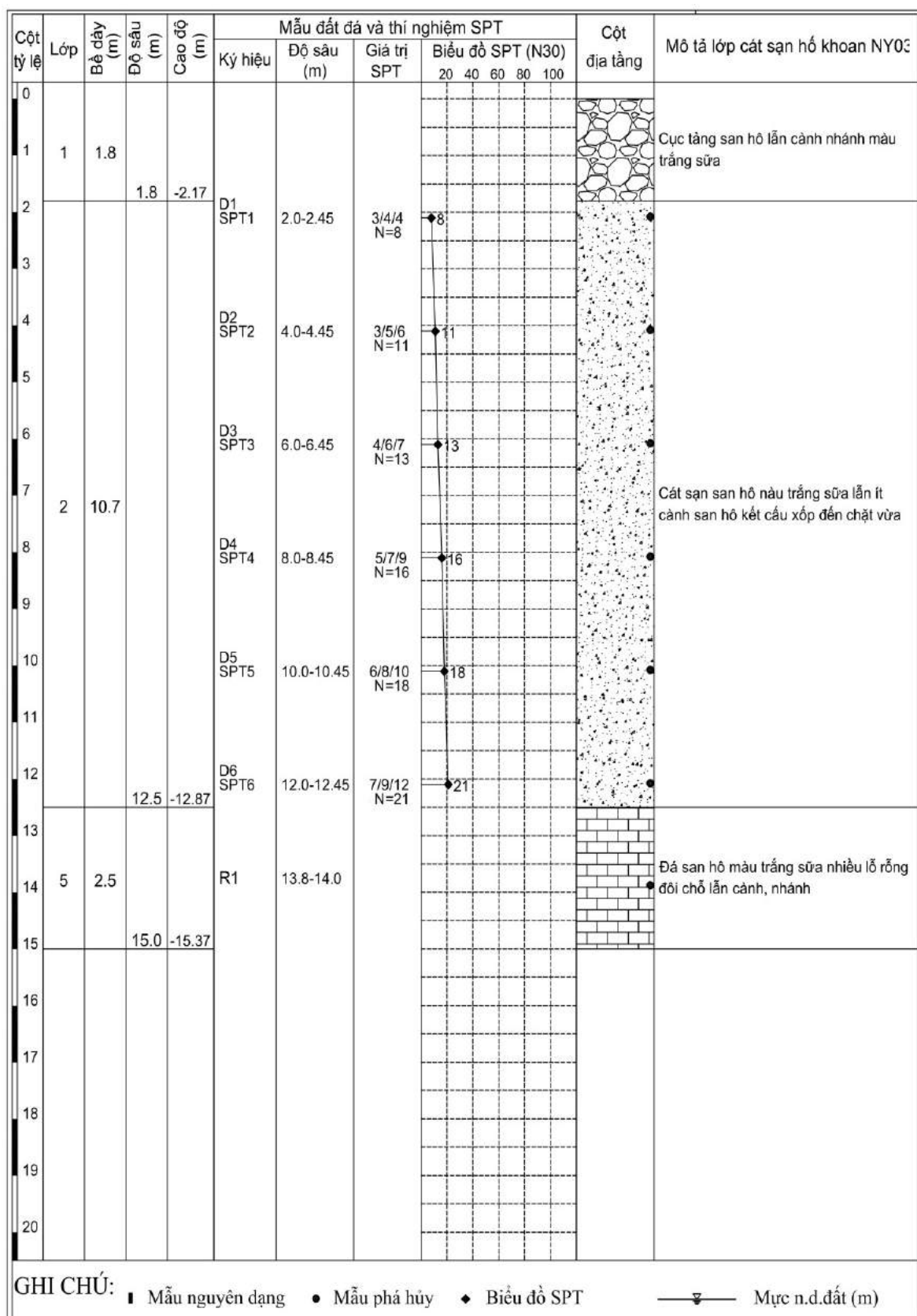
Hình PL1.2. Mặt cắt hình trụ hồ khoan TC32 tại đảo TC (KTS23)



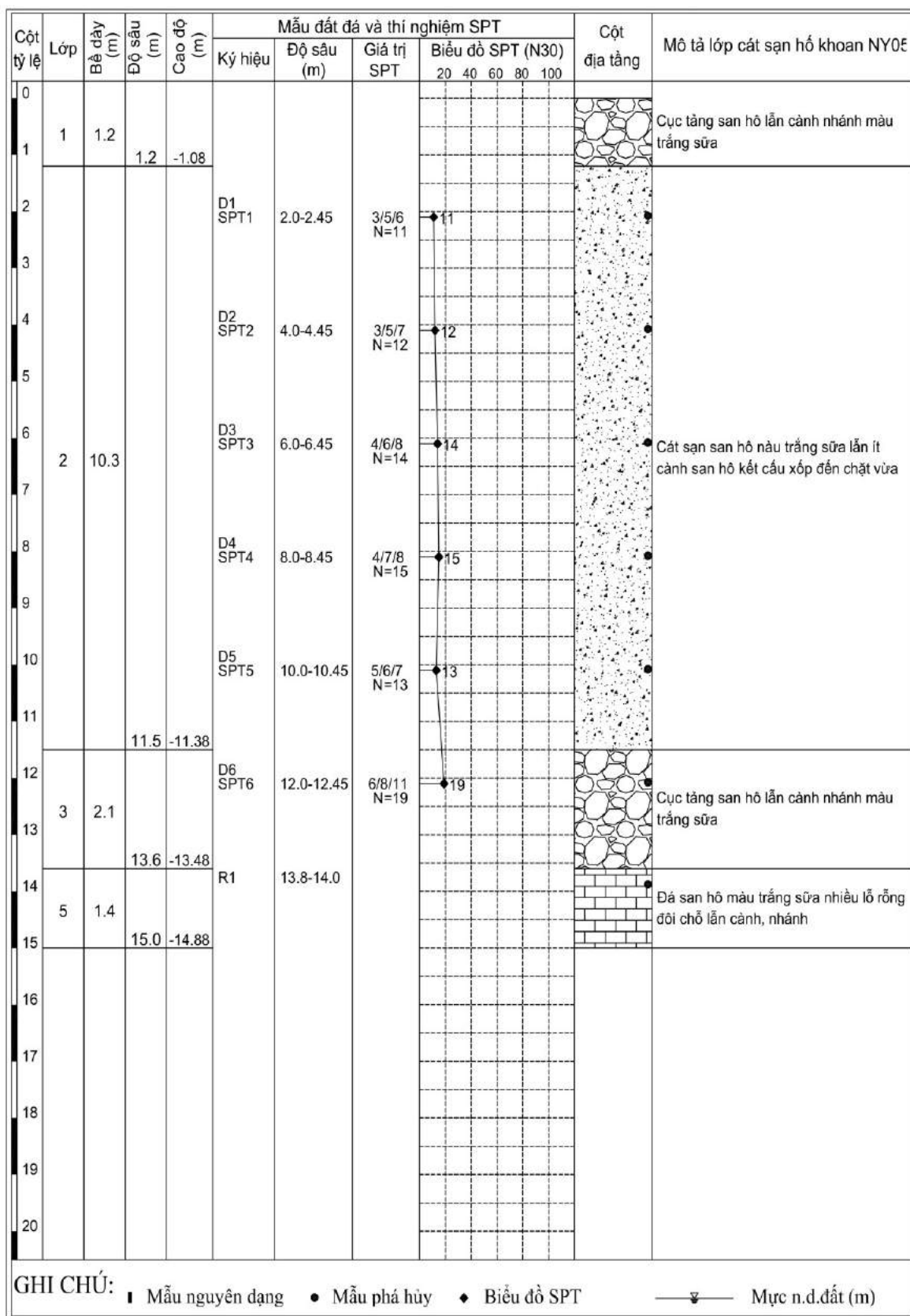
Hình PL1.3. Mặt cắt hình trụ hồ khoan TC36 tại đảo TC (KTS23)



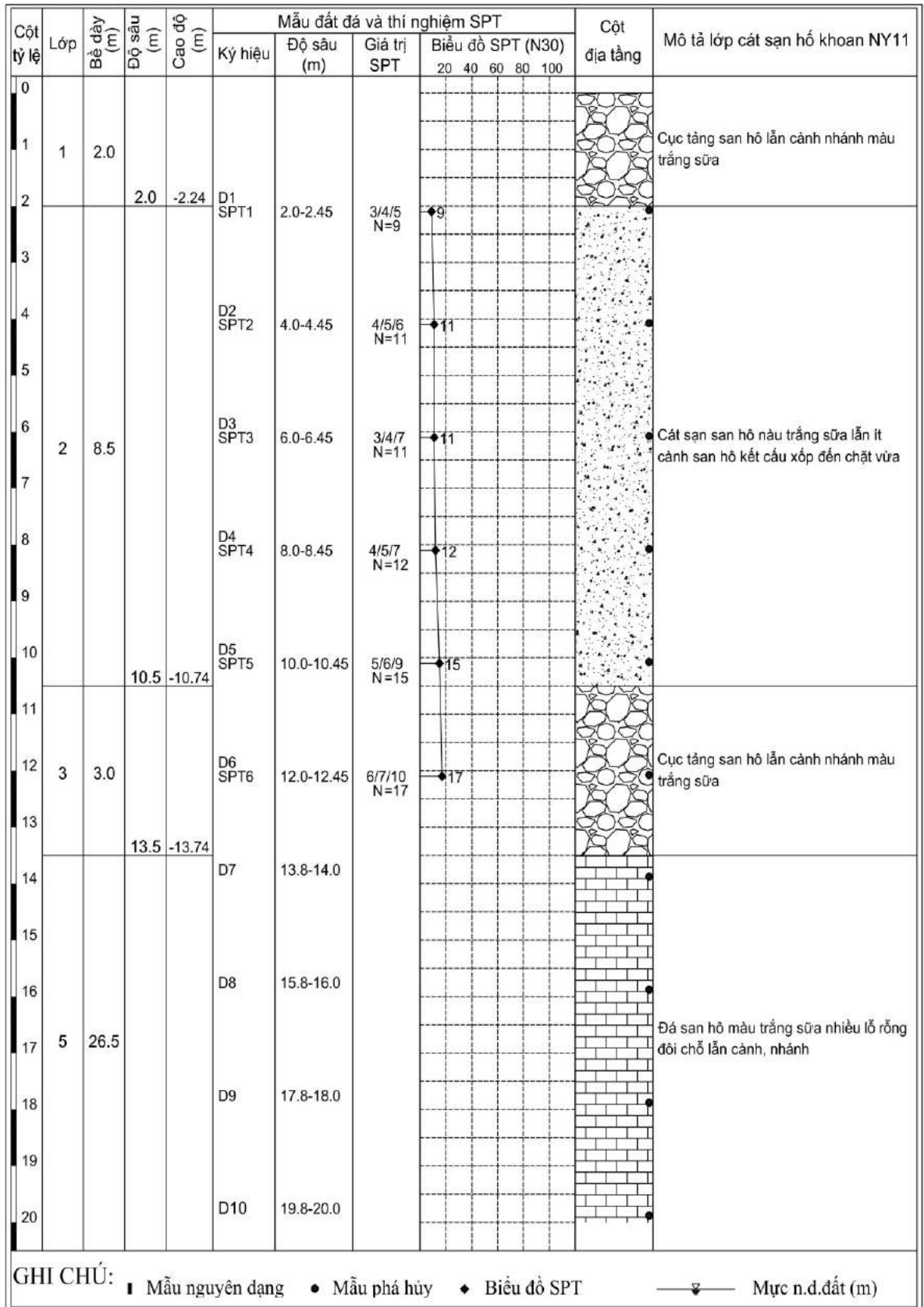
Hình PL1.4. Mặt cắt hình trụ hồ khoan TC44 tại đảo TC (KTS23)



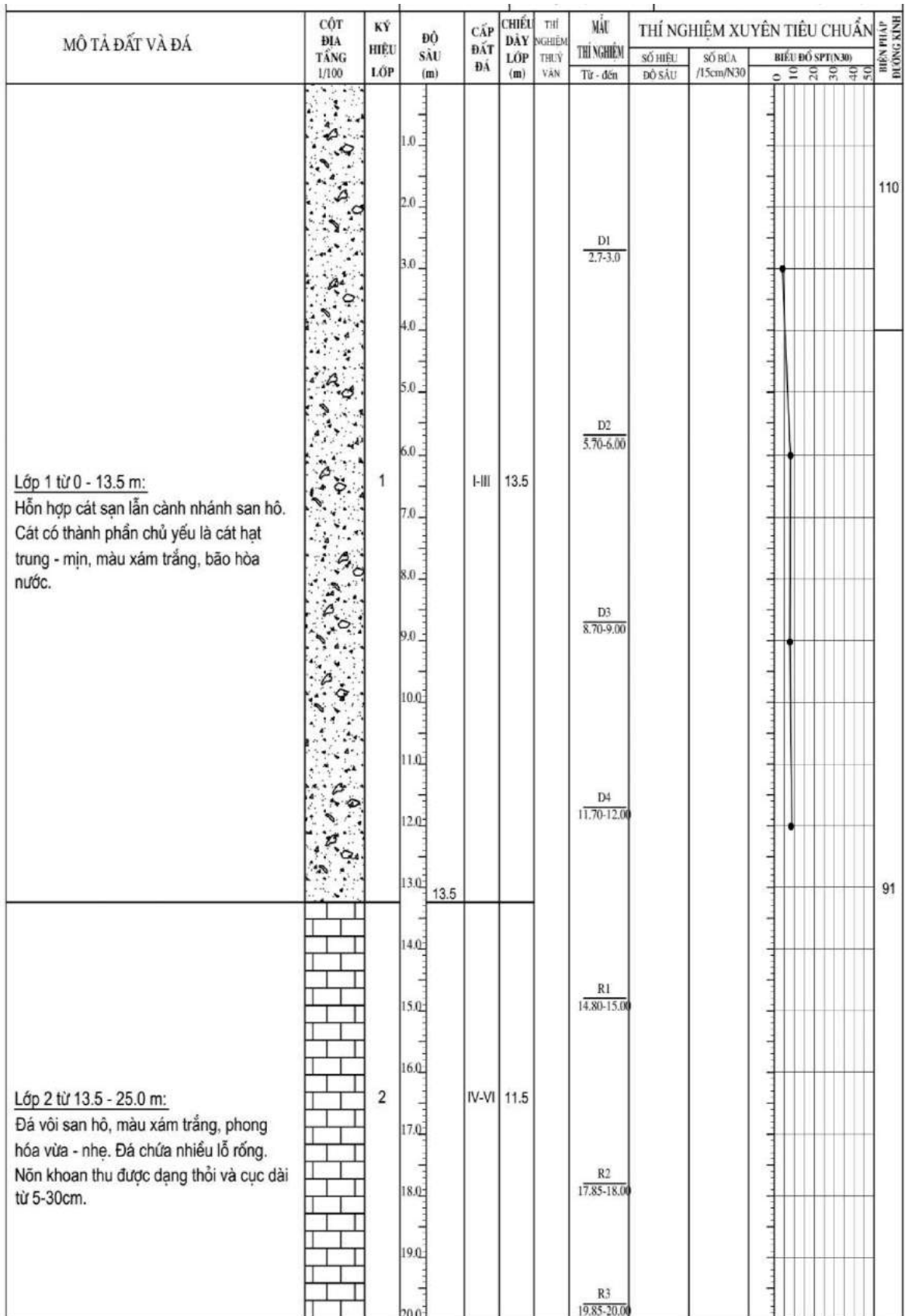
Hình PL1.5. Mặt cắt hình trụ hố khoan NY03 tại đảo NY (ĐTĐ11.3)



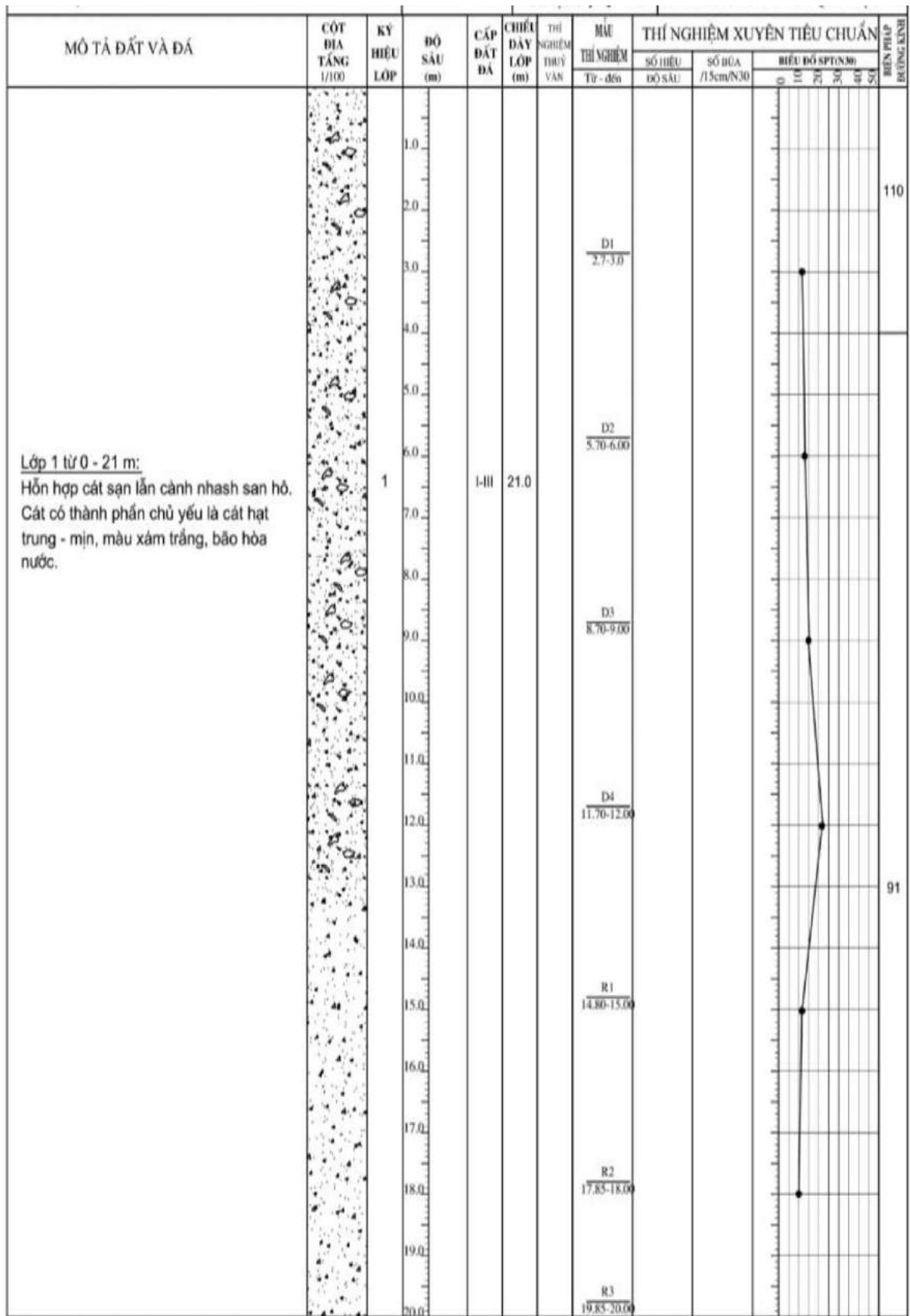
Hình PL1.6. Mặt cắt hình trụ hồ khoan NY05 tại đảo NY (ĐTĐ11.3)



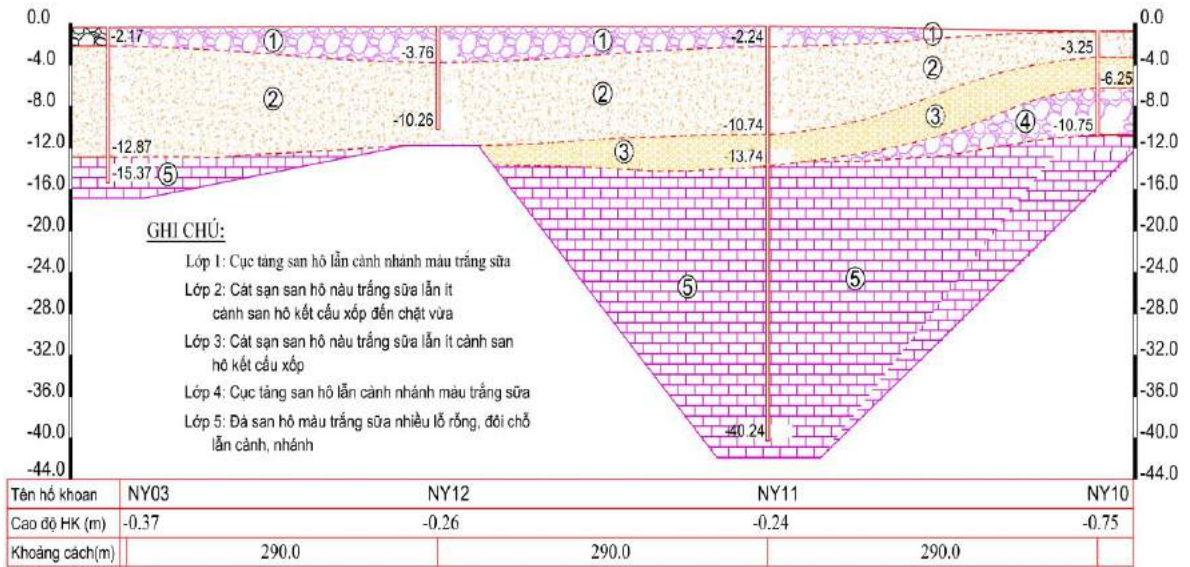
Hình PL1.7. Mặt cắt hình trụ hồ khoan NY11 tại đảo NY (ĐTĐ11.3)



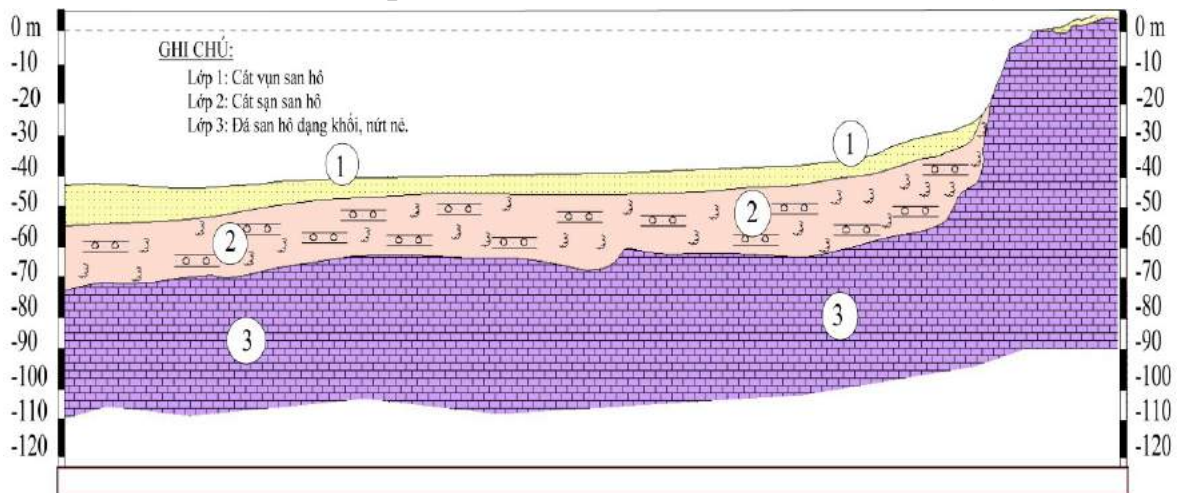
Hình PL1.8. Mặt cắt hình trụ hồ khoan lớp cát sạn san hô tại đảo TSL



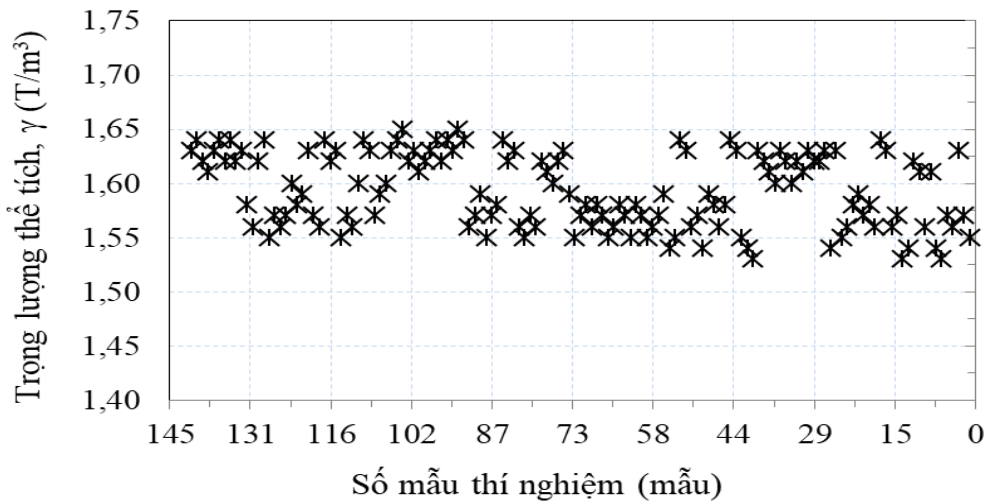
Hình PL1.9. Mặt cắt hình trụ hồ khoan lớp cát sạn san hô tại đảo ĐTA



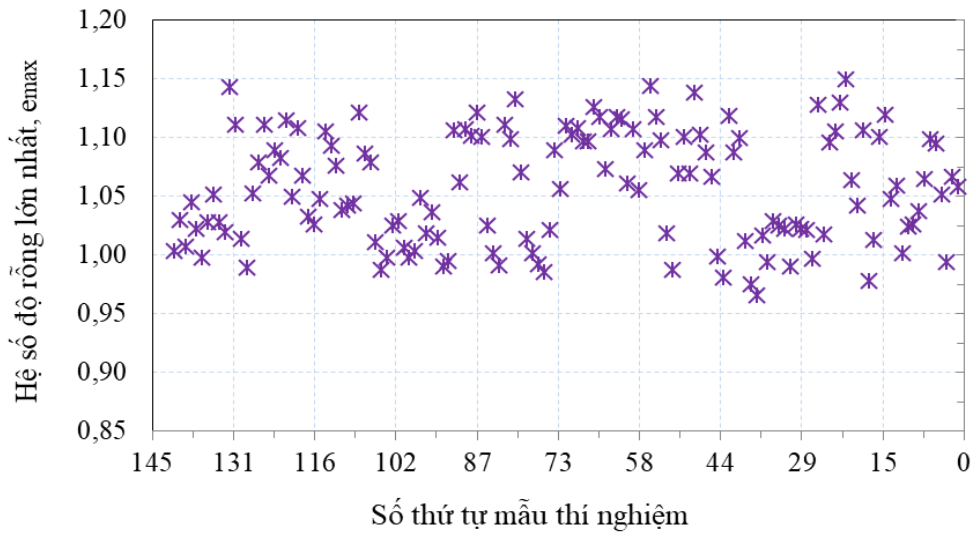
Hình PL1.10. Mặt cắt phân bố địa chất đại diện tại đảo NY (ĐTĐ11.3)



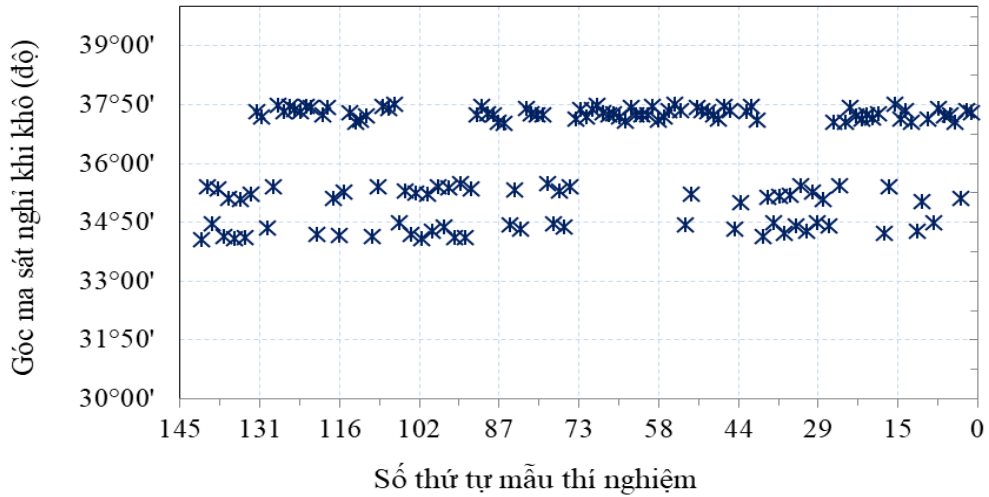
Hình PL1.11. Mặt cắt phân bố địa chất đại diện tại đảo STT (ĐTĐ11.3)



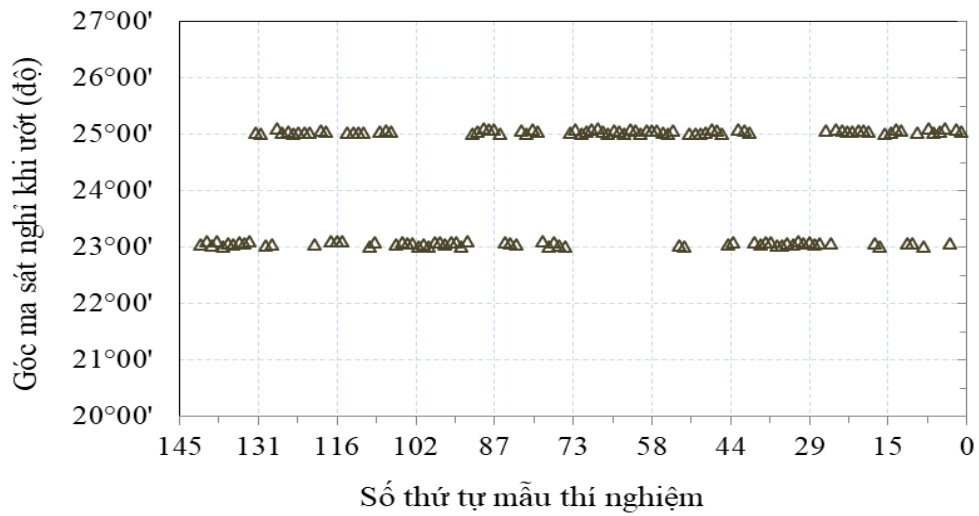
Hình PL1.12. Phân bố trọng lượng thể tích mẫu cát sạn san hô tại đảo TC



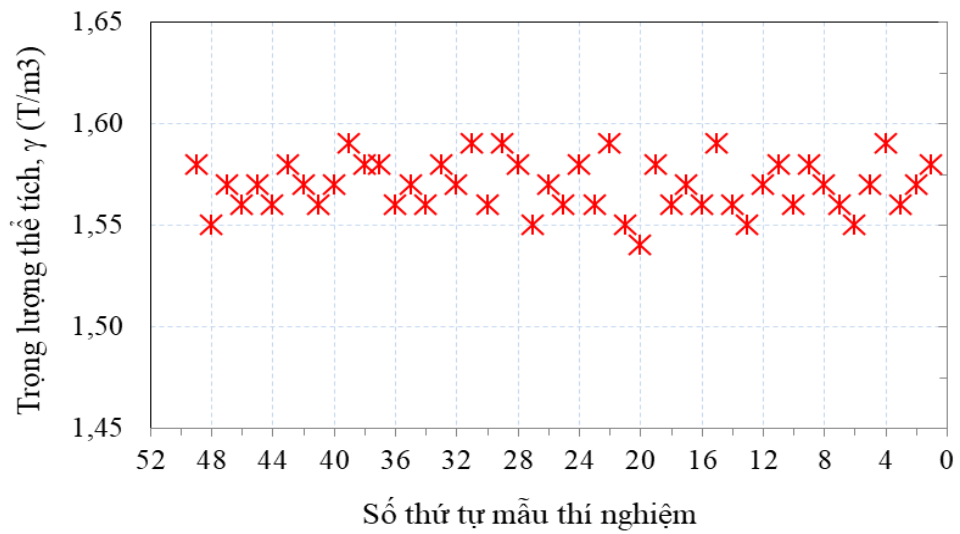
Hình PL1.13. Phân bố hệ số nở lớn nhất mẫu cát sạn san hô tại đảo TC



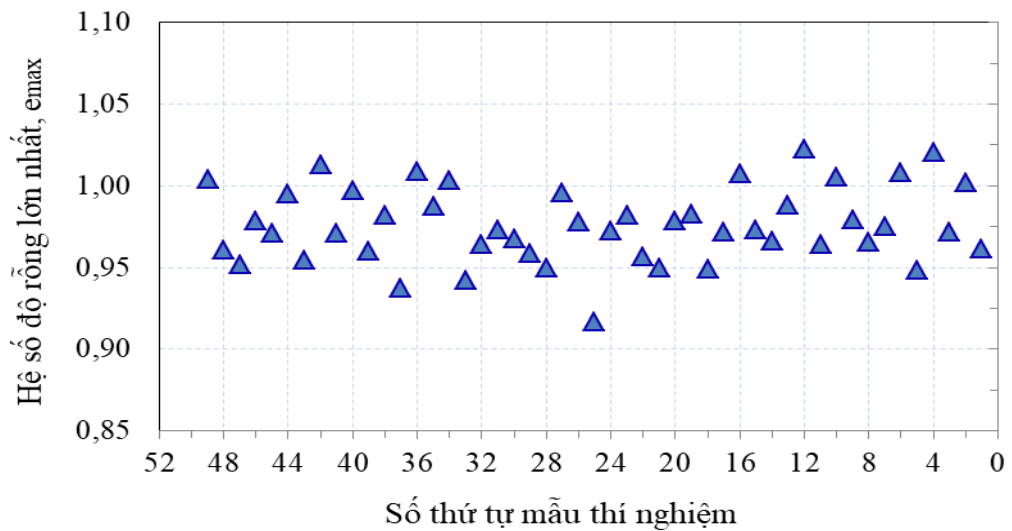
Hình PL1.14. Phân bố góc ma sát nghỉ khô mẫu cát sạn san hô tại đảo TC



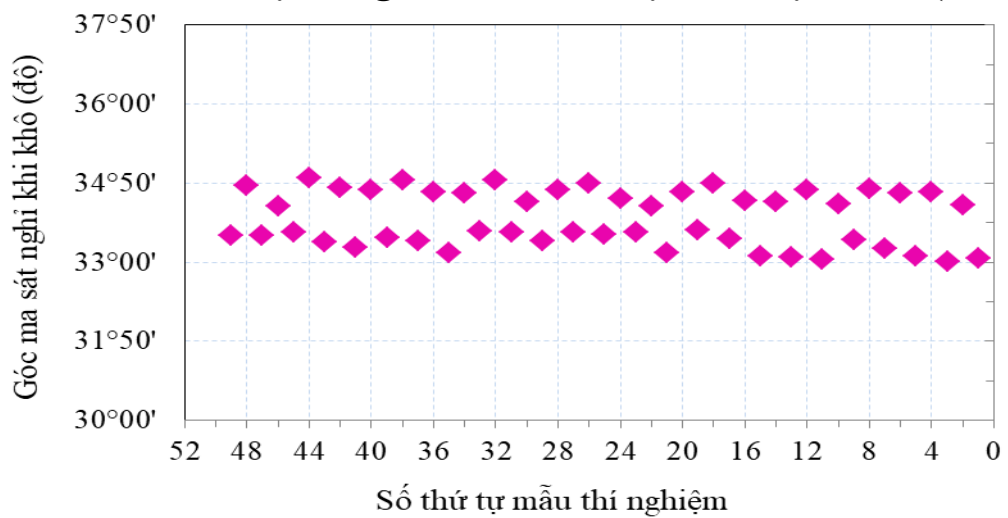
Hình PL1.15. Phân bố góc ma sát nghỉ ướt mẫu cát sạn san hô tại đảo TC



Hình PL1.16. Phân bố trọng lượng thể tích mẫu cát sạn san hô tại đảo NY (ĐTĐ11.3)

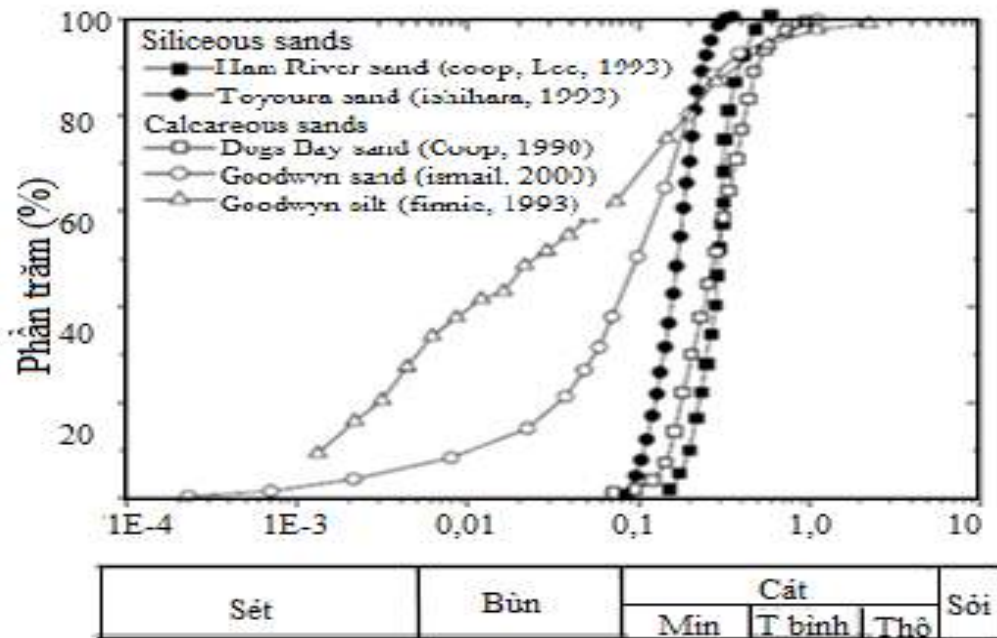


Hình PL1.17. Phân bố hệ số rỗng lớn nhất mẫu cát sạn san hô tại đảo NY (ĐTĐ11.3)



Hình PL1.18. Phân bố góc ma sát nghi khô mẫu cát sạn san hô tại đảo NY (ĐTĐ11.3)

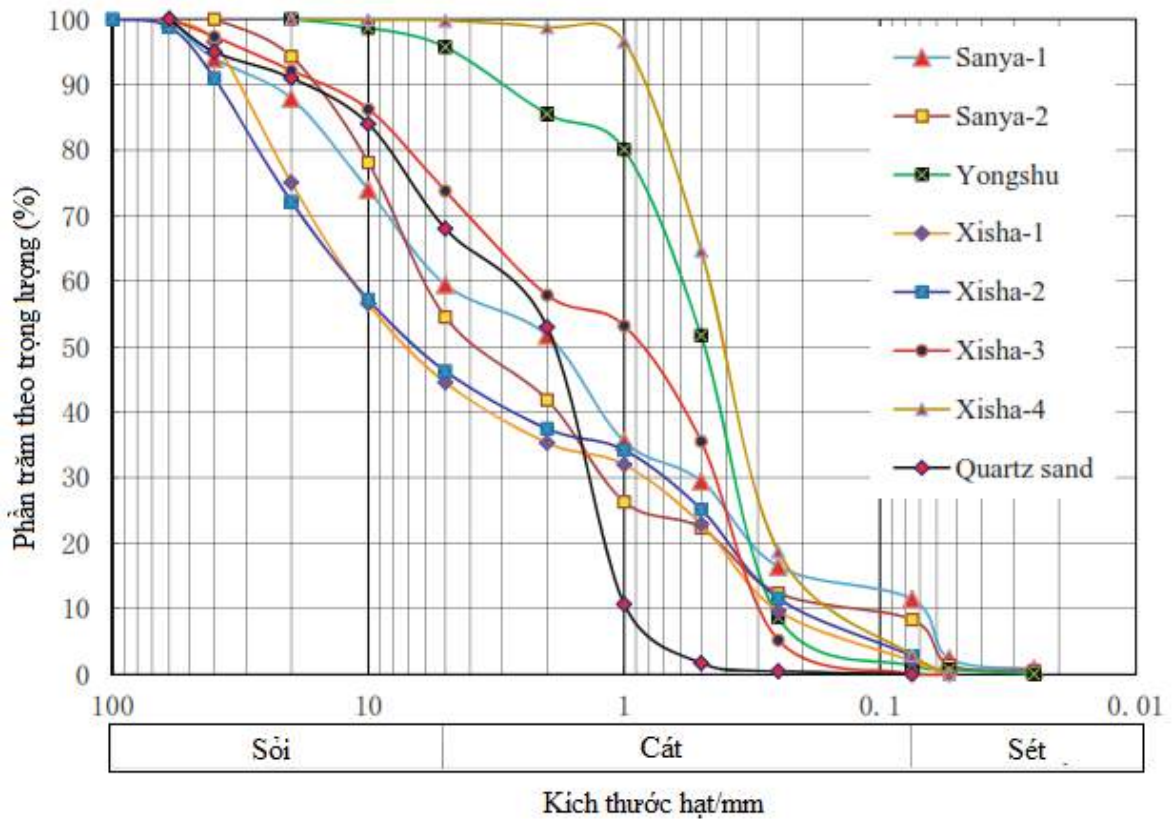
PHỤ LỤC 2 (CHƯƠNG 1)
TỔNG HỢP MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ NỀN SAN HỒ
TRÊN THẾ GIỚI



Hình PL2.1. Cấp phối hạt một số cát thường và cát san hô trên thế giới
 (Xu B. và Zhuge A., 2016)

Bảng PL2.1. Đặc trưng vật lý của một số loại cát san hô trên thế giới
 (Xu B. và Zhuge A., 2016)

Khu vực	Hàm lượng CaCO_3 (%)	Hệ số đồng nhất C_u	Khối lượng riêng hạt G_s (g/cm^3)	Hệ số rỗng	
				e_{\min}	e_{\max}
China	96,7	1,18	2,73	0,75	1,26
Ireland	92,5	1,11	2,72	1,62	1,98
India	75,0	2,23	2,80	0,75	1,07
North-west of Australia	94,0	2,43	2,72	1,22	1,92
South-east of Australia	88,0	4,6	2,73	0,54	1,01
America	92,0	3,4	2,82	1,00	2,97



Hình PL2.2. Cấp phối hạt của một số loại cát và cát san hô ở QDTS, QDHS (Wang X.Z., 2011)

Bảng PL2.2. Tính chất và các tham số trạng thái tới hạn của một số loại cát san hô trên thế giới (Xu B. và Zhuge A., 2016)

Khu vực	Cỡ hạt D_{50} (mm)	Hệ số đồng nhất C_u	Hệ số rỗng		Tham số Cam-Clay			Áp lực tới hạn p_y (kPa)
			e_{max}	e_{min}	λ	κ	N	
Dogs Bay	0,30	2,06	2,21	1,48	0,335	0,013	3,80	1,07
Goodwyn	0,10	4,6	2,04	1,41	0,290	0,017	3,30	0,81
Ledge Point	0,27	1,84	1,22	0,88	0,185	0,006	2,50	7,05
North Rankin	0,23	3,75	1,79	1,22	0,220	0,014	2,67	0,86
Rottnest	0,17	1,5	1,21	0,84	0,192	0,019	2,40	6,66
Quiou	0,70	4,5	1,20	0,78	0,152	-	2,02	4,61

Bảng PL2.3. Tính chất và các tham số trạng thái tới hạn của san hô rời (cành lẫn cát sạn) ở QĐHS (Yongshu), QĐTS (Xisha) và Hải Nam (Wang X.Z., 2011)

Vị trí lấy mẫu	Độ ẩm (%)	Khối lượng thể tích ở trạng thái khô (g/cm ³)	Độ chặt tương đối (%)	Tham số sức kháng cực đại		Tham số sức kháng dư	
				Lực dính đơn vị biểu kiến (kPa)	Góc ma sát trong (độ)	Lực dính đơn vị biểu kiến (kPa)	Góc ma sát trong (độ)
Sanya-1	1,2	1,50	72	68,2	24,9		
	BH	1,50		39,3	23,8		
Sanya-2	12,2	1,50	79	126,8	32,5	56,2	30,2
	BH	1,50		24,5	31,2	20,5	28,3
Yongshu	2,3	1,50	73	39,6	34,3	21,3	32,1
	BH	1,50		35,9	31,0	18,3	29,9
Xisha-1	4,43	1,77	88	315,4	42,9	179,3	41,5
Xisha-2	4,75	1,77	86	316,2	41,7	193,6	40,6
Xisha-3	8,64	1,64	81	16,9	35,5	6,3	28,4
Xisha-4	7,76	1,36	74	22,5	30,1	8,4	26,1
Xisha-5	2,28	1,59	79	133,5	56,0	44,6	54,8
Xisha-6	1,00	1,50	77	83,9	55,4	40,2	47,5

PHỤ LỤC 3 (CHƯƠNG 2)
TỔNG HỢP SỐ LIỆU THỰC NGHIỆM CẮT PHẪNG MẪU CÁT SẠN
SAN HỒ TRÊN TẦM THÉP TRONG PHÒNG THÍ NGHIỆM

Thời gian	Ứng suất cắt (áp lực nén 300 kPa)		Chuyển vị cắt ngang	Thời gian	Ứng suất cắt (áp lực nén 200 kPa)		Chuyển vị cắt ngang
	N	kPa	mm		N	kPa	mm
0	37,40	0,000	0,007	0	0,00	0,000	0,000
6	84,73	14,954	0,046	6	5,63	1,779	0,000
12	126,29	28,083	0,048	12	6,49	2,050	0,010
18	188,82	47,838	0,232	18	9,96	3,147	0,010
24	191,16	48,577	0,264	24	78,13	24,683	0,050
30	232,65	61,684	0,341	30	125,53	39,658	0,150
36	286,72	78,767	0,508	36	151,93	47,998	0,260
42	464,36	134,889	0,679	42	171,19	54,083	0,400
48	567,21	167,381	0,905	48	187,43	59,214	0,510
54	592,92	175,504	1,135	54	190,24	60,101	0,620
60	606,17	179,688	1,356	60	193,70	61,195	0,720
66	622,72	184,919	1,572	66	195,16	61,656	0,820
72	634,41	188,611	1,792	72	196,56	62,098	0,930
78	648,83	193,165	1,993	78	198,64	62,755	1,030
84	665,97	198,580	2,208	84	203,99	64,445	1,130
90	668,11	199,257	2,424	90	208,29	65,804	1,240
96	680,38	203,134	2,631	96	215,35	68,034	1,320
102	679,49	202,851	2,842	102	230,06	72,682	1,410
108	665,58	198,456	3,052	108	246,94	78,014	1,510
114	664,08	197,984	3,264	114	256,03	80,886	1,610
120	661,87	197,287	3,481	120	273,78	86,494	1,700
126	663,04	197,656	3,698	126	285,03	90,048	1,800
132	671,61	200,363	3,904	132	293,04	92,578	1,900
138	672,59	200,671	4,118	138	302,57	95,589	2,000
144	690,70	206,394	4,326	144	309,27	97,706	2,090
150	694,21	207,502	4,537	150	318,15	100,511	2,200
156	701,41	209,779	4,752	156	346,80	109,563	2,290
162	701,41	209,779	4,968	162	352,86	111,477	2,390
168	707,26	211,625	5,182	168	367,41	116,074	2,490
174	697,91	208,671	5,407	174	387,80	122,515	2,600
180	693,04	207,132	5,620	180	380,61	120,244	2,690

Thời gian	Ứng suất cắt (áp lực nén 300 kPa)		Chuyển vị cắt ngang mm	Thời gian	Ứng suất cắt (áp lực nén 200 kPa)		Chuyển vị cắt ngang mm
	N	kPa			N	kPa	
186	685,05	204,610	5,834	186	378,19	119,479	2,800
192	682,33	203,748	6,044	192	389,27	122,980	2,900
198	686,03	204,917	6,256	198	382,52	120,847	3,000
204	695,38	207,871	6,459	204	388,14	122,623	3,100
210	707,65	211,748	6,668	210	387,28	122,351	3,200
216	706,09	211,256	6,877	216	380,09	120,080	3,300
222	710,96	212,794	7,092	222	385,50	121,789	3,410
228	721,67	216,178	7,298	228	386,58	122,130	3,510
234	733,16	219,809	7,509	234	388,70	122,800	3,610
240	721,48	216,117	7,728	240	388,70	122,800	3,710
246	715,44	214,209	7,942	246	398,23	125,810	3,820
252	709,21	212,240	8,157	252	391,47	123,675	3,920
258	718,17	215,071	8,361	258	390,15	123,258	4,020
264	717,00	214,702	8,573	264	394,89	124,755	4,120
270	722,65	216,486	8,790	270	401,17	126,739	4,220
276	710,57	212,671	9,012	276	406,58	128,448	4,320
282	700,64	209,533	9,231	282	403,90	127,602	4,420
288	699,08	209,040	9,440	288	404,67	127,845	4,530
294	689,92	206,148	9,650	294	405,88	128,227	4,640
300	688,36	205,656	9,857	300	406,08	128,290	4,730
306	692,26	206,887	9,896	306	407,73	128,812	4,840

Thời gian	Ứng suất cắt (áp lực nén 150 kPa)		Chuyển vị cắt ngang mm	Thời gian	Ứng suất cắt (áp lực nén 100 kPa)		Chuyển vị cắt ngang mm
	N	kPa			N	kPa	
0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000
6,00	39,78	12,567	0,033	6,000	35,28	11,145	0,070
12,00	45,99	14,530	0,051	12,000	37,66	11,897	0,213
18,00	49,99	15,794	0,054	18,000	43,50	13,743	0,294
24,00	56,99	18,005	0,055	24,000	87,65	27,692	0,344
30,00	58,21	18,390	0,083	30,000	88,52	27,965	0,540
36,00	59,64	18,843	0,128	36,000	92,20	29,128	0,738
42,00	61,64	19,475	0,175	42,000	117,74	37,196	0,926
48,00	64,08	20,243	0,217	48,000	158,86	50,187	1,144
54,00	75,97	24,001	0,242	54,000	176,39	55,725	1,365
60,00	76,92	24,301	0,246	60,000	185,91	58,734	1,572

Thời gian	Ứng suất cắt (áp lực nén 150 kPa)		Chuyển vị cắt ngang	Thời gian	Ứng suất cắt (áp lực nén 100 kPa)		Chuyển vị cắt ngang
	N	kPa	mm		N	kPa	mm
66,00	78,35	24,753	0,246	66,000	191,54	60,511	1,769
72,00	78,57	24,822	0,246	72,000	198,46	62,700	1,967
78,00	86,36	27,283	0,247	78,000	203,23	64,204	2,165
84,00	86,44	27,309	0,269	84,000	206,69	65,298	2,358
90,00	102,85	32,492	0,306	90,000	216,21	68,306	2,560
96,00	103,06	32,560	0,352	96,000	217,94	68,853	2,752
102,00	101,55	32,081	0,398	102,000	212,32	67,075	2,956
108,00	102,63	32,424	0,450	108,000	214,05	67,622	3,152
114,00	102,41	32,355	0,501	114,000	216,21	68,306	3,344
120,00	101,98	32,218	0,544	120,000	217,94	68,853	3,545
126,00	102,85	32,492	0,596	126,000	220,54	69,674	3,741
132,00	104,15	32,902	0,645	132,000	213,83	67,554	3,945
138,00	105,23	33,244	0,688	138,000	216,43	68,375	4,134
144,00	108,04	34,133	0,744	144,000	218,81	69,127	4,325
150,00	113,02	35,705	0,787	150,000	221,84	70,084	4,524
156,00	123,62	39,056	0,834	156,000	224,00	70,768	4,724
162,00	138,56	43,774	0,878	162,000	226,60	71,588	4,922
168,00	151,33	47,808	0,937	168,000	226,38	71,520	5,119
174,00	164,75	52,047	0,987	174,000	227,47	71,862	5,315
180,00	176,00	55,602	1,040	180,000	229,20	72,409	5,509
186,00	186,39	58,884	1,103	186,000	228,11	72,067	5,710
192,00	193,75	61,209	1,155	192,000	226,38	71,520	5,902
198,00	201,54	63,671	1,215	198,000	229,20	72,409	6,096
204,00	207,60	65,585	1,271	204,000	232,23	73,366	6,296
210,00	214,52	67,773	1,332	210,000	235,04	74,255	6,497
216,00	219,93	69,482	1,384	216,000	234,39	74,050	6,689
222,00	225,99	71,397	1,438	222,000	238,07	75,212	6,896
228,00	233,57	73,790	1,490	228,000	233,96	73,913	7,096
234,00	238,76	75,431	1,543	234,000	236,12	74,597	7,297
240,00	243,52	76,935	1,590	240,000	236,56	74,733	7,495
246,00	245,91	77,687	1,645	246,000	236,56	74,733	7,696
252,00	247,64	78,235	1,696	252,000	237,85	75,144	7,894
258,00	251,32	79,397	1,741	258,000	240,02	75,827	8,091
264,00	252,18	79,670	1,793	264,000	239,37	75,622	8,291
270,00	254,78	80,491	1,840	270,000	243,48	76,921	8,483

Thời gian	Ứng suất cắt (áp lực nén 150 kPa)		Chuyển vị cắt ngang	Thời gian	Ứng suất cắt (áp lực nén 100 kPa)		Chuyển vị cắt ngang
	N	kPa	mm		N	kPa	mm
276,00	258,24	81,585	1,886	276,000	244,56	77,263	8,682
282,00	259,76	82,063	1,938	282,000	246,51	77,878	8,880
288,00	260,84	82,405	1,988	288,000	245,21	77,468	9,078
294,00	261,70	82,679	2,037	294,000	245,21	77,468	9,278
300,00	262,35	82,884	2,082	300,000	245,86	77,673	9,473

Số thứ tự	Thời gian (giây)	Thời gian (phút)	Lực cắt (N)	Ứng suất cắt (kPa)	Áp lực nén (kPa)	Chuyển vị cắt ngang (mm)
1	00:00:00:00	0	6,493	0,000	99,516	0,000
2	00:00:00:06	0,1	17,314	1,378	99,489	0,049
3	00:00:00:12	0,2	17,098	1,351	99,461	0,131
4	00:00:00:18	0,3	17,098	1,351	99,516	0,141
5	00:00:00:24	0,4	17,314	1,378	99,572	0,144
6	00:00:00:30	0,5	20,128	1,737	99,461	0,192
7	00:00:00:36	0,6	19,695	1,682	99,516	0,192
8	00:00:00:42	0,7	59,085	6,700	98,936	0,22
9	00:00:00:48	0,8	135,916	16,487	98,77	0,289
10	00:00:00:54	0,9	224,651	27,791	98,991	0,364
11	00:00:01:00	1	299,102	37,275	99,24	0,443
12	00:00:01:06	1,1	346,283	43,285	99,489	0,527
13	00:00:01:12	1,2	369,224	46,208	99,489	0,619
14	00:00:01:18	1,3	385,023	48,220	99,489	0,713
15	00:00:01:24	1,4	396,927	49,737	99,516	0,802
16	00:00:01:30	1,5	402,337	50,426	99,516	0,903
17	00:00:01:36	1,6	406,233	50,922	99,489	1,001
18	00:00:01:42	1,7	413,592	51,860	99,489	1,091
19	00:00:01:48	1,8	416,405	52,218	99,489	1,189
20	00:00:01:54	1,9	417,92	52,411	99,544	1,286
21	00:00:02:00	2	421,816	52,907	99,516	1,39
22	00:00:02:06	2,1	424,629	53,266	99,516	1,48
23	00:00:02:12	2,2	426,361	53,486	99,516	1,579
24	00:00:02:18	2,3	428,092	53,707	99,489	1,675
25	00:00:02:24	2,4	428,742	53,790	99,489	1,768
26	00:00:02:30	2,5	430,04	53,955	99,516	1,865

Số thứ tự	Thời gian (giây)	Thời gian (phút)	Lực cắt (N)	Ứng suất cắt (kPa)	Áp lực nén (kPa)	Chuyển vị cắt ngang (mm)
27	00:00:02:36	2,6	430,689	54,038	99,544	1,963
28	00:00:02:42	2,7	431,555	54,148	99,544	2,062
29	00:00:02:48	2,8	434,801	54,562	99,544	2,161
30	00:00:02:54	2,9	435,018	54,589	99,544	2,255
31	00:00:03:00	3	436,316	54,755	99,572	2,354
32	00:00:03:06	3,1	434,801	54,562	99,489	2,457
33	00:00:03:12	3,2	432,204	54,231	99,516	2,556
34	00:00:03:18	3,3	434,585	54,534	99,544	2,651
35	00:00:03:24	3,4	431,122	54,093	99,489	2,752
36	00:00:03:30	3,5	430,689	54,038	99,572	2,848
37	00:00:03:36	3,6	435,234	54,617	99,516	2,945
38	00:00:03:42	3,7	435,234	54,617	99,572	3,047
39	00:00:03:48	3,8	437,831	54,948	99,572	3,141
40	00:00:03:54	3,9	436,533	54,782	99,572	3,239
41	00:00:04:00	4	434,801	54,562	99,516	3,342
42	00:00:04:06	4,1	431,772	54,176	99,572	3,441
43	00:00:04:12	4,2	436,966	54,837	99,516	3,538
44	00:00:04:18	4,3	440,212	55,251	99,544	3,639
45	00:00:04:24	4,4	439,563	55,168	99,572	3,74
46	00:00:04:30	4,5	437,182	54,865	99,544	3,841
47	00:00:04:36	4,6	439,779	55,196	99,516	3,941
48	00:00:04:42	4,7	442,376	55,526	99,572	4,036
49	00:00:04:48	4,8	442,376	55,526	99,544	4,133
50	00:00:04:54	4,9	443,026	55,609	99,516	4,237

Số thứ tự	Thời gian (giây)	Thời gian (phút)	Lực cắt (N)	Ứng suất cắt (kPa)	Áp lực nén (kPa)	Chuyển vị cắt ngang (mm)
1	00:00:00:00	0	0,216	0,000	99,544	0,00
2	00:00:00:06	0,1	0,216	0,000	99,516	0,00
3	00:00:00:12	0,2	77,481	9,843	99,544	0,016
4	00:00:00:18	0,3	206,471	26,275	98,88	0,07
5	00:00:00:24	0,4	319,662	40,694	99,35	0,132
6	00:00:00:30	0,5	398,225	50,702	99,655	0,201
7	00:00:00:36	0,6	431,988	55,003	100,125	0,289
8	00:00:00:42	0,7	435,451	55,444	100,208	0,384
9	00:00:00:48	0,8	436,533	55,582	100,208	0,48

Số thứ tự	Thời gian (giây)	Thời gian (phút)	Lực cắt (N)	Ứng suất cắt (kPa)	Áp lực nén (kPa)	Chuyển vị cắt ngang (mm)
10	00:00:00:54	0,9	438,264	55,802	100,097	0,577
11	00:00:01:00	1	439,13	55,913	100,097	0,676
12	00:00:01:06	1,1	438,481	55,830	100,069	0,776
13	00:00:01:12	1,2	441,511	56,216	100,042	0,872
14	00:00:01:18	1,3	441,078	56,161	99,986	0,971
15	00:00:01:24	1,4	438,264	55,802	99,876	1,066
16	00:00:01:30	1,5	440,429	56,078	99,765	1,166
17	00:00:01:36	1,6	442,593	56,354	99,682	1,26
18	00:00:01:42	1,7	441,511	56,216	99,516	1,356
19	00:00:01:48	1,8	443,458	56,464	99,516	1,454
20	00:00:01:54	1,9	443,675	56,492	99,516	1,552
21	00:00:02:00	2	442,809	56,381	99,544	1,648
22	00:00:02:06	2,1	443,458	56,464	99,516	1,743
23	00:00:02:12	2,2	445,406	56,712	99,572	1,841
24	00:00:02:18	2,3	445,406	56,712	99,544	1,931
25	00:00:02:24	2,4	446,056	56,795	99,572	2,031
26	00:00:02:30	2,5	446,056	56,795	99,516	2,125
27	00:00:02:36	2,6	445,406	56,712	99,544	2,226
28	00:00:02:42	2,7	443,458	56,464	99,516	2,319
29	00:00:02:48	2,8	445,406	56,712	99,489	2,423
30	00:00:02:54	2,9	445,19	56,685	99,572	2,518
31	00:00:03:00	3	443,458	56,464	99,516	2,617
32	00:00:03:06	3,1	445,839	56,767	99,544	2,715
33	00:00:03:12	3,2	445,839	56,767	99,516	2,81
34	00:00:03:18	3,3	445,19	56,685	99,516	2,909
35	00:00:03:24	3,4	444,324	56,574	99,544	3,009
36	00:00:03:30	3,5	444,757	56,629	99,599	3,109
37	00:00:03:36	3,6	444,757	56,629	99,627	3,207
38	00:00:03:42	3,7	444,108	56,547	99,655	3,305
39	00:00:03:48	3,8	448,003	57,043	99,627	3,405
40	00:00:03:54	3,9	446,705	56,878	99,627	3,504
41	00:00:04:00	4	444,541	56,602	99,516	3,601
42	00:00:04:06	4,1	444,757	56,629	99,599	3,7
43	00:00:04:12	4,2	443,242	56,436	99,544	3,801
44	00:00:04:18	4,3	444,757	56,629	99,544	3,901
45	00:00:04:24	4,4	446,705	56,878	99,516	3,998
46	00:00:04:30	4,5	446,272	56,822	99,489	4,095
47	00:00:04:36	4,6	445,623	56,740	99,516	4,192

Số thứ tự	Thời gian (giây)	Thời gian (phút)	Lực cắt (N)	Ứng suất cắt (kPa)	Áp lực nén (kPa)	Chuyển vị cắt ngang (mm)
48	00:00:04:42	4,7	443,026	56,409	99,516	4,297
49	00:00:04:48	4,8	446,921	56,905	99,516	4,395
50	00:00:04:54	4,9	446,056	56,795	99,516	4,489
STT	Thời gian (giây)	Thời gian (phút)	Lực cắt (N)	Ứng suất cắt (kPa)	Áp lực nén (kPa)	Chuyển vị cắt ngang (mm)
1	00:00:00:00	0	2,381	0,000	149,565	0,000
2	00:00:00:06	0,1	11,254	1,130	149,316	0,052
3	00:00:00:12	0,2	13,418	1,406	149,15	0,138
4	00:00:00:18	0,3	13,851	1,461	149,482	0,139
5	00:00:00:24	0,4	13,851	1,461	149,565	0,139
6	00:00:00:30	0,5	14,501	1,544	149,261	0,14
7	00:00:00:36	0,6	49,562	6,010	149,15	0,151
8	00:00:00:42	0,7	147,82	18,527	148,265	0,214
9	00:00:00:48	0,8	237,204	29,914	148,099	0,288
10	00:00:00:54	0,9	344,768	43,616	147,933	0,354
11	00:00:01:00	1	440,429	55,802	148,127	0,429
12	00:00:01:06	1,1	512,066	64,928	148,542	0,505
13	00:00:01:12	1,2	554,702	70,359	148,901	0,591
14	00:00:01:18	1,3	580,457	73,640	149,15	0,679
15	00:00:01:24	1,4	597,771	75,846	149,316	0,774
16	00:00:01:30	1,5	611,622	77,610	149,344	0,867
17	00:00:01:36	1,6	618,115	78,437	149,454	0,962
18	00:00:01:42	1,7	623,742	79,154	149,454	1,061
19	00:00:01:48	1,8	628,936	79,816	149,454	1,154
20	00:00:01:54	1,9	637,593	80,919	149,482	1,251
21	00:00:02:00	2	645,601	81,939	149,482	1,35
22	00:00:02:06	2,1	647,333	82,159	149,509	1,449
23	00:00:02:12	2,2	654,258	83,042	149,509	1,547
24	00:00:02:18	2,3	654,691	83,097	149,482	1,639
25	00:00:02:24	2,4	652,31	82,794	149,482	1,738
26	00:00:02:30	2,5	659,02	83,648	149,509	1,837
27	00:00:02:36	2,6	657,721	83,483	149,482	1,933
28	00:00:02:42	2,7	658,587	83,593	149,482	2,035
29	00:00:02:48	2,8	662,482	84,089	149,482	2,128
30	00:00:02:54	2,9	656,423	83,317	149,509	2,222
31	00:00:03:00	3	655,34	83,179	149,509	2,319
32	00:00:03:06	3,1	659,02	83,648	149,482	2,417

Số thứ tự	Thời gian (giây)	Thời gian (phút)	Lực cắt (N)	Ứng suất cắt (kPa)	Áp lực nén (kPa)	Chuyển vị cắt ngang (mm)
33	00:00:03:12	3,2	663,565	84,227	149,509	2,515
34	00:00:03:18	3,3	662,699	84,117	149,537	2,612
35	00:00:03:24	3,4	663,132	84,172	149,537	2,71
36	00:00:03:30	3,5	661,4	83,951	149,482	2,81
37	00:00:03:36	3,6	661,184	83,924	149,509	2,913
38	00:00:03:42	3,7	660,967	83,896	149,482	3,007
39	00:00:03:48	3,8	662,266	84,062	149,509	3,109
40	00:00:03:54	3,9	662,266	84,062	149,509	3,208
41	00:00:04:00	4	665,08	84,420	149,509	3,3
42	00:00:04:06	4,1	665,729	84,503	149,509	3,4
43	00:00:04:12	4,2	662,915	84,144	149,537	3,501
44	00:00:04:18	4,3	661,833	84,007	149,454	3,6
45	00:00:04:24	4,4	665,729	84,503	149,482	3,698
46	00:00:04:30	4,5	665,08	84,420	149,454	3,798
47	00:00:04:36	4,6	663,997	84,282	149,509	3,892
48	00:00:04:42	4,7	664,43	84,337	149,482	3,993
49	00:00:04:48	4,8	666,595	84,613	149,482	4,092
50	00:00:04:54	4,9	666,811	84,641	149,509	4,19
STT	Thời gian (giây)	Thời gian (phút)	Lực cắt (N)	Ứng suất cắt (kPa)	Áp lực nén (kPa)	Chuyển vị cắt ngang (mm)
1	00:00:00:00	0	3,463	0,000	199,503	0,000
2	00:00:00:06	0,1	15,366	1,516	199,613	0,043
3	00:00:00:12	0,2	15,15	1,489	199,475	0,078
4	00:00:00:18	0,3	14,717	1,434	199,503	0,078
5	00:00:00:24	0,4	15,366	1,516	199,503	0,13
6	00:00:00:30	0,5	17,098	1,737	199,447	0,177
7	00:00:00:36	0,6	17,747	1,820	199,475	0,181
8	00:00:00:42	0,7	110,378	13,620	199,06	0,204
9	00:00:00:48	0,8	244,562	30,713	197,982	0,261
10	00:00:00:54	0,9	375,284	47,366	197,982	0,321
11	00:00:01:00	1	496,699	62,833	198,175	0,381
12	00:00:01:06	1,1	602,749	76,342	198,535	0,448
13	00:00:01:12	1,2	678,931	86,047	198,839	0,519
14	00:00:01:18	1,3	726,545	92,112	199,088	0,6
15	00:00:01:24	1,4	756,195	95,889	199,281	0,695
16	00:00:01:30	1,5	779,136	98,812	199,392	0,785
17	00:00:01:36	1,6	792,555	100,521	199,447	0,879

Số thứ tự	Thời gian (giây)	Thời gian (phút)	Lực cắt (N)	Ứng suất cắt (kPa)	Áp lực nén (kPa)	Chuyển vị cắt ngang (mm)
18	00:00:01:42	1,7	807,488	102,424	199,475	0,973
19	00:00:01:48	1,8	816,795	103,609	199,475	1,07
20	00:00:01:54	1,9	824,153	104,546	199,447	1,166
21	00:00:02:00	2	830,862	105,401	199,503	1,262
22	00:00:02:06	2,1	835,191	105,953	199,503	1,363
23	00:00:02:12	2,2	841,467	106,752	199,503	1,457
24	00:00:02:18	2,3	848,177	107,607	199,503	1,556
25	00:00:02:24	2,4	847,527	107,524	199,503	1,655
26	00:00:02:30	2,5	848,609	107,662	199,447	1,75
27	00:00:02:36	2,6	847,311	107,497	199,475	1,848
28	00:00:02:42	2,7	846,229	107,359	199,503	1,945
29	00:00:02:48	2,8	848,826	107,690	199,503	2,039
30	00:00:02:54	2,9	844,281	107,111	199,503	2,14
31	00:00:03:00	3	846,012	107,331	199,475	2,238
32	00:00:03:06	3,1	852,072	108,103	199,503	2,335
33	00:00:03:12	3,2	848,609	107,662	199,475	2,429
34	00:00:03:18	3,3	846,012	107,331	199,53	2,52
35	00:00:03:24	3,4	846,445	107,386	199,53	2,622
36	00:00:03:30	3,5	846,878	107,441	199,503	2,717
37	00:00:03:36	3,6	844,714	107,166	199,475	2,816
38	00:00:03:42	3,7	843,632	107,028	199,475	2,918
39	00:00:03:48	3,8	844,497	107,138	199,475	3,016
40	00:00:03:54	3,9	847,744	107,552	199,475	3,113
41	00:00:04:00	4	845,796	107,304	199,503	3,21
42	00:00:04:06	4,1	839,087	106,449	199,503	3,312
43	00:00:04:12	4,2	842,333	106,862	199,447	3,409
44	00:00:04:18	4,3	846,012	107,331	199,503	3,509
45	00:00:04:24	4,4	845,579	107,276	199,475	3,607
46	00:00:04:30	4,5	848,826	107,690	199,503	3,704
47	00:00:04:36	4,6	847,744	107,552	199,503	3,804
48	00:00:04:42	4,7	849,692	107,800	199,475	3,9
49	00:00:04:48	4,8	848,826	107,690	199,447	3,999
50	00:00:04:54	4,9	851,856	108,076	199,503	4,101
51	00:00:05:00	5	851,856	108,076	199,503	4,195
52	00:00:05:06	5,1	854,453	108,406	199,503	4,293

Số thứ tự	Thời gian (giây)	Thời gian (phút)	Lực cắt (N)	Ứng suất cắt (kPa)	Áp lực nén (kPa)	Chuyển vị cắt ngang (mm)
1	00:00:00:00	0	29,001	0,000	199,558	0,001
2	00:00:00:06	0,1	50,427	2,729	199,475	0,039
3	00:00:00:12	0,2	50,644	2,757	199,171	0,118
4	00:00:00:18	0,3	51,943	2,923	199,309	0,185
5	00:00:00:24	0,4	51,293	2,840	199,475	0,185
6	00:00:00:30	0,5	51,293	2,840	199,475	0,186
7	00:00:00:36	0,6	53,241	3,088	199,42	0,187
8	00:00:00:42	0,7	104,967	9,677	199,005	0,205
9	00:00:00:48	0,8	220,972	24,455	197,678	0,267
10	00:00:00:54	0,9	344,984	40,253	197,567	0,333
11	00:00:01:00	1	483,93	57,953	197,346	0,387
12	00:00:01:06	1,1	608,159	73,778	197,65	0,449
13	00:00:01:12	1,2	705,768	86,212	198,148	0,522
14	00:00:01:18	1,3	768,748	94,235	198,507	0,596
15	00:00:01:24	1,4	801,645	98,426	198,811	0,679
16	00:00:01:30	1,5	821,123	100,907	199,032	0,77
17	00:00:01:36	1,6	842,982	103,692	199,198	0,864
18	00:00:01:42	1,7	853,587	105,043	199,281	0,961
19	00:00:01:48	1,8	863,11	106,256	199,364	1,06
20	00:00:01:54	1,9	870,252	107,166	199,337	1,152
21	00:00:02:00	2	878,476	108,213	199,42	1,251
22	00:00:02:06	2,1	885,618	109,123	199,447	1,352
23	00:00:02:12	2,2	889,298	109,592	199,447	1,45
24	00:00:02:18	2,3	891,029	109,812	199,475	1,549
25	00:00:02:24	2,4	890,813	109,785	199,447	1,644
26	00:00:02:30	2,5	895,141	110,336	199,447	1,74
27	00:00:02:36	2,6	898,388	110,750	199,475	1,838
28	00:00:02:42	2,7	899,253	110,860	199,447	1,933
29	00:00:02:48	2,8	899,037	110,833	199,475	2,035
30	00:00:02:54	2,9	906,612	111,798	199,503	2,125
31	00:00:03:00	3	902,933	111,329	199,503	2,229
32	00:00:03:06	3,1	903,365	111,384	199,447	2,323
33	00:00:03:12	3,2	899,686	110,915	199,475	2,421
34	00:00:03:18	3,3	903,149	111,356	199,475	2,52
35	00:00:03:24	3,4	905,53	111,660	199,503	2,613
36	00:00:03:30	3,5	905,963	111,715	199,503	2,709
37	00:00:03:36	3,6	902,716	111,301	199,475	2,809
38	00:00:03:42	3,7	904,88	111,577	199,503	2,911

Số thứ tự	Thời gian (giây)	Thời gian (phút)	Lực cắt (N)	Ứng suất cắt (kPa)	Áp lực nén (kPa)	Chuyển vị cắt ngang (mm)
39	00:00:03:48	3,8	902,933	111,329	199,475	3,007
40	00:00:03:54	3,9	909,209	112,128	199,503	3,108
41	00:00:04:00	4	902,716	111,301	199,503	3,207
42	00:00:04:06	4,1	905,097	111,605	199,503	3,3
43	00:00:04:12	4,2	912,455	112,542	199,475	3,397
44	00:00:04:18	4,3	907,261	111,880	199,447	3,496
45	00:00:04:24	4,4	904,448	111,522	199,475	3,595
46	00:00:04:30	4,5	905,963	111,715	199,475	3,694
47	00:00:04:36	4,6	911,373	112,404	199,503	3,79
48	00:00:04:42	4,7	910,508	112,294	199,475	3,884
49	00:00:04:48	4,8	910,94	112,349	199,503	3,984
50	00:00:04:54	4,9	909,209	112,128	199,475	4,082
51	00:00:05:00	5	915,918	112,983	199,503	4,177
52	00:00:05:06	5,1	912,023	112,487	199,503	4,27
53	00:00:05:06	5,1	912,239	112,514	199,475	4,272

STT	Thời gian (giây)	Thời gian (phút)	Lực cắt (N)	Ứng suất cắt (kPa)	Áp lực nén (kPa)	Chuyển vị cắt ngang (mm)
1	00:00:00:00	0	1,948	0,000	299,555	0,001
2	00:00:00:06	0,1	13,418	1,461	300,136	0,04
3	00:00:00:12	0,2	13,418	1,461	299,887	0,038
4	00:00:00:18	0,3	13,851	1,516	299,859	0,044
5	00:00:00:24	0,4	14,717	1,627	300,136	0,14
6	00:00:00:30	0,5	15,15	1,682	299,5	0,147
7	00:00:00:36	0,6	24,889	2,922	299,472	0,158
8	00:00:00:42	0,7	144,79	18,196	299,196	0,196
9	00:00:00:48	0,8	336,111	42,569	297,372	0,238
10	00:00:00:54	0,9	495,401	62,860	295,989	0,295
11	00:00:01:00	1	637,593	80,974	295,824	0,344
12	00:00:01:06	1,1	764,203	97,103	296,293	0,403
13	00:00:01:12	1,2	877,394	111,522	296,763	0,466
14	00:00:01:18	1,3	977,167	124,232	297,261	0,539
15	00:00:01:24	1,4	1054,431	134,074	297,676	0,622
16	00:00:01:30	1,5	1104,426	140,443	298,035	0,71
17	00:00:01:36	1,6	1139,271	144,882	298,367	0,801
18	00:00:01:42	1,7	1164,593	148,108	298,588	0,896
19	00:00:01:48	1,8	1182,989	150,451	298,726	0,988

STT	Thời gian (giây)	Thời gian (phút)	Lực cắt (N)	Ứng suất cắt (kPa)	Áp lực nén (kPa)	Chuyển vị cắt ngang (mm)
20	00:00:01:54	1,9	1191,862	151,581	298,864	1,086
21	00:00:02:00	2	1207,229	153,539	299,002	1,179
22	00:00:02:06	2,1	1219,132	155,055	299,168	1,279
23	00:00:02:12	2,2	1218,05	154,917	299,168	1,379
24	00:00:02:18	2,3	1228,655	156,268	299,251	1,472
25	00:00:02:24	2,4	1234,066	156,958	299,334	1,569
26	00:00:02:30	2,5	1240,558	157,785	299,389	1,662
27	00:00:02:36	2,6	1245,969	158,474	299,389	1,762
28	00:00:02:42	2,7	1246,185	158,502	299,389	1,853
29	00:00:02:48	2,8	1243,372	158,143	299,389	1,952
30	00:00:02:54	2,9	1243,156	158,116	299,389	2,048
31	00:00:03:00	3	1247,917	158,722	299,389	2,148
32	00:00:03:06	3,1	1256,358	159,797	299,445	2,245
33	00:00:03:12	3,2	1251,38	159,163	299,472	2,342
34	00:00:03:18	3,3	1250,081	158,998	299,472	2,441
35	00:00:03:24	3,4	1249,648	158,943	299,5	2,535
36	00:00:03:30	3,5	1251,596	159,191	299,472	2,632
37	00:00:03:36	3,6	1252,029	159,246	299,5	2,728
38	00:00:03:42	3,7	1247,917	158,722	299,5	2,828
39	00:00:03:48	3,8	1248,566	158,805	299,528	2,924
40	00:00:03:54	3,9	1247,051	158,612	299,528	3,023
41	00:00:04:00	4	1244,454	158,281	299,528	3,122
42	00:00:04:06	4,1	1253,76	159,466	299,528	3,215
43	00:00:04:12	4,2	1242,723	158,061	299,5	3,315
44	00:00:04:18	4,3	1244,021	158,226	299,5	3,414
45	00:00:04:24	4,4	1244,454	158,281	299,528	3,506
46	00:00:04:30	4,5	1245,969	158,474	299,5	3,606
47	00:00:04:36	4,6	1247,917	158,722	299,5	3,7
48	00:00:04:42	4,7	1248,35	158,777	299,5	3,8
49	00:00:04:48	4,8	1244,454	158,281	299,472	3,903
50	00:00:04:54	4,9	1253,977	159,494	299,5	3,995
51	00:00:05:00	5	1260,686	160,349	299,472	4,093
52	00:00:05:06	5,1	1256,358	159,797	299,445	4,196

PHỤ LỤC 4 (CHƯƠNG 3)

TÓM LƯỢC CƠ SỞ LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN SỨC CHỊU TẢI CỦA CỌC ỚNG THÉP THEO PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

Phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) là một phương pháp tổng quát và hiệu quả cho lời giải số của nhiều bài toán kỹ thuật khác nhau. Với sự phát triển không ngừng của công nghệ, nên nhiều kết cấu cọc phức tạp đã được tính toán và thiết kế chi tiết theo phương pháp này. Cơ sở lý thuyết và trình tự tính toán sức chịu tải của cọc theo phương pháp PTHH sơ lược như sau:

4.1. Cơ sở lý thuyết tính toán

4.1.1. Phương trình cân bằng

Phương trình cân bằng tĩnh học của hệ kết cấu cọc ống thép làm việc trong nền cát sạn san hô có xét tính phi tuyến vật liệu nền khi chịu tác dụng của tải trọng tĩnh có dạng:

$$[K(\{U\})] \cdot \{U\} = \{R\}, \quad (\text{PL4.1})$$

trong đó:

$\{R\}$ - véc tơ ngoại lực tác dụng của hệ quy nút, bao gồm tải trọng ngoài, ứng suất ban đầu, biến dạng ban đầu;

$$[K(\{U\})] = \sum_e [K]_e - \text{ma trận độ cứng tổng thể của hệ;}$$

$\{U\}$ - véc tơ chuyển vị nút của hệ trong hệ tọa độ tổng thể.

Để giải hệ phương trình trên, cần tìm mối liên hệ giữa các yếu tố trong đó và sử dụng phương pháp lặp dựa trên lời giải của hệ phương trình tuyến tính để tìm nghiệm. Có nhiều phương pháp giải lặp khi giải phương trình phi tuyến trên như phương pháp Newton-Raphson, phương pháp giải gần đúng, phương pháp nghiệm đàn hồi... Trong đó, nhiều tác giả trên thế giới đã giải bài toán bằng phương pháp Newton-Raphson. Theo đó, tải trọng chia ra nhiều cấp khác nhau, tiếp hành giải lặp cho từng cấp tải đến khi thỏa mãn điều kiện hội tụ. Các bước giải bài toán phi tuyến theo phương pháp này như sau:

– Tính toán sơ bộ:

+ Tính ma trận cơ độ cứng ban đầu $[K_0]$;

- + Xác định bước tích phân Δt và các tham số tích phân α, δ với các hệ số tính toán tương ứng: a_0, a_1 ;
- + Xác định các véc tơ điều kiện ban đầu $\{U_0\}$;
- + Tính các ma trận hệ số phản lực biên $[K_s]$;
- Tính tích phân các bước tại các thời điểm $t = \Delta t, 2\Delta t, \dots$
- + Tính véc tơ tải trọng ngoài $\{R_{t+\Delta t}\}$ tại thời điểm $(t+\Delta t)$;
- + Dùng phương pháp lặp giải hệ phương trình tìm véc tơ chuyển vị nút $\{U_{t+\Delta t}\}$ tại thời điểm $(t+\Delta t)$;
- + Tính ứng suất, biến dạng, phản lực biên tại thời điểm $(t+\Delta t)$.
- + Tăng bước thời gian $t = t+\Delta t$ và lặp lại từ bước 1.

4.1.2. Lập hệ phương trình liên hệ biến dạng - chuyển vị

Trong bài toán biên dạng phẳng, tại mỗi điểm gồm 3 thành phần biến dạng cơ bản là biến dạng dọc trục theo phương x, theo phương y và biến dạng trượt trong mặt phẳng oxy, do đó:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = [B]_e \cdot \{U\}_e, \quad (\text{PL4.2})$$

trong đó: $\{\varepsilon\}$ - véc tơ biến dạng của phần tử; $[B]_e$ - ma trận liên hệ chuyển vị-biến dạng của phần tử; $\{U\}_e$ - véc tơ chuyển vị nút của phần tử.

4.1.3. Xác định ma trận độ cứng của phần tử

Ma trận độ cứng của phần tử được xác định theo nguyên lý chuyển vị khả dĩ sau:

$$[K]_e = \int_{A_e} h [B]_e^T [D]_e [B]_e dA_e, \quad (\text{PL4.3})$$

trong đó:

$[B]_e$ - ma trận liên hệ chuyển vị-biến dạng của phần tử;

$[D]_e$ - ma trận đặc trưng vật liệu của phần tử, phụ thuộc vào loại vật liệu khác nhau, đối với vật liệu ứng xử phi tuyến thì $[D]_e$ không là hằng số mà phụ thuộc ứng suất, biến dạng của hệ; h, A_e - chiều dày, diện tích của phần tử.

4.1.4. Lập mối quan hệ ứng suất-biến dạng tại một điểm trong phần tử

Ứng suất trong phần tử được xác định tại điểm tích phân và liên hệ với biến dạng bằng ma trận vật liệu [D] theo biểu thức tổng quát sau:

$$\{\sigma\} = [D(\{\varepsilon\})] \cdot \{\varepsilon\}, \quad (\text{PL4.4})$$

trong đó:

$\{\sigma\}$ - véc tơ ứng suất;

$\{\varepsilon\}$ - véc tơ biến dạng.

Hệ phương trình cân bằng đối với bài toán tĩnh đã xét đến ứng xử phi tuyến của vật liệu, được thể hiện qua ma trận vật liệu [D] có các giá trị trong ma trận không phải là hằng số.

a) Đối với cọc ống thép

Khi cọc giả thiết tính toán theo mô hình vật liệu đàn hồi tuyến tính, thì quan hệ ứng suất biến dạng tuân theo định luật Hook:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}, \quad (\text{PL4.5})$$

trong đó: các véc tơ ứng suất $\{\sigma\}$; biến dạng $\{\varepsilon\}$ và ma trận vật liệu [D] sẽ có dạng khác nhau tùy theo trạng thái ứng suất - biến dạng điểm khảo sát. Đối với bài toán 3 chiều thì:

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & \text{sym} & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}\}^T = \{\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{zx}\}^T \quad (\text{PL3.6})$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}\}^T = \{\varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{zz} \quad \varepsilon_{xy} \quad \varepsilon_{yz} \quad \varepsilon_{zx}\}^T$$

trong đó: E - mô đun biến dạng (mô đun Young); ν - hệ số Poisson.

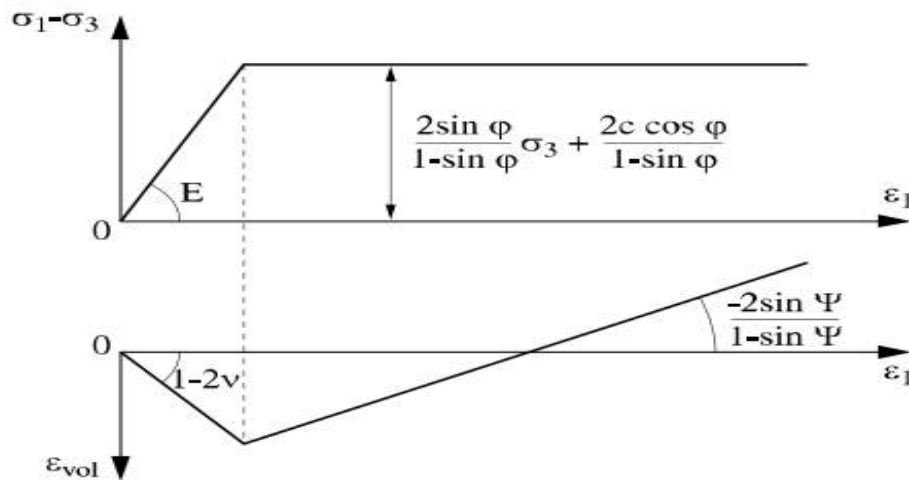
Mô hình vật liệu đàn hồi tuyến tính chỉ xét đến 2 tham số vật liệu cơ bản

là mô đun biến dạng E (mô đun Young) và hệ số Poisson ν cho trường hợp vật liệu đẳng hướng; trường hợp vật liệu trục hướng sẽ cần năm tham số để mô tả gồm mô đun biến dạng E; hệ số Poisson ν theo hai hướng và mô đun trượt. Đây là mô hình đơn giản và cơ bản trong các phép tính của môi trường biến dạng, các lời giải với các loại mô hình vật liệu khác thường được xây dựng từ lời giải của mô hình đàn hồi tuyến tính.

b) Đối với nền cát sạn san hô

Khi sử dụng phần tử dạng khối 3 chiều đối nền cát sạn san hô, có thể sử dụng phần tử hình chóp. Việc mô hình hóa môi trường nền cát sạn san hô theo phương pháp PTHH phụ thuộc vào quy luật ứng xử của nền khi chịu tải trọng được phản ánh qua các mô hình cơ học của vật liệu nền, trong nghiên cứu này tác giả sử dụng mô hình đàn dẻo lý tưởng Mohr-Coulomb.

Quan hệ ứng suất biến dạng theo mô hình vật liệu đàn dẻo lý tưởng được thể hiện trên hình sau:



Hình PL3.1. Quan hệ ứng suất biến dạng theo mô hình vật liệu đàn dẻo lý tưởng Mohr-Coulomb

Khi giải các bài toán đàn dẻo, thay ma trận $[D]$ trong quan hệ ứng suất biến dạng (PL4.5) sẽ dùng ma trận $[D^{ep}]$ theo quan hệ số gia ứng suất và số gia biến dạng:

$$\{d\sigma\} = ([D^e] - [D^p])\{d\varepsilon\} = [D^{ep}]\{d\varepsilon\}, \quad (\text{PL4.7})$$

trong đó:

$[D^{ep}]$ là ma trận vật liệu đàn dẻo;

$\{d\sigma\}, \{d\varepsilon\}$ tương ứng là số gia ứng suất và số gia biến dạng;

$[D^p]$ là ma trận dẻo.

Để tính được ma trận đàn dẻo trước tiên ta cần biết tiêu chuẩn dẻo và hàm thế dẻo. Đối với mô hình Mohr-Coulomb, hàm tiêu chuẩn dẻo có dạng:

$$f(\{\sigma\}) = \sigma_1 - \sigma_3 - (\sigma_1 + \sigma_3)\sin\varphi - 2c.\sin\varphi \quad (\text{PL3.8})$$

Hàm thế dẻo đối với vật liệu đàn dẻo lý tưởng theo tiêu chuẩn Mohr-Coulomb và tuân theo quy luật chảy dẻo liên hợp là:

$$g(\{\sigma\}) = \sigma_1 - \sigma_3 - (\sigma_1 + \sigma_3)\sin\psi \quad (\text{PL4.9})$$

Từ đó nhận được biểu thức ma trận đàn dẻo cho vật liệu đàn dẻo lý tưởng Mohr-Coulomb như sau:

$$[D^{ep}] = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 3G \end{bmatrix} - \frac{1}{K.M.M^* + 3G} \begin{bmatrix} M.M^*.K^2 & -3M^*.G.K \\ -3M.G.K & 9G^2 \end{bmatrix} \quad (\text{PL4.10})$$

trong đó: ψ - góc trương nở; G - mô đun trượt; K - mô đun biến dạng thể tích.

c) Tương tác trên bề mặt tiếp xúc cọc và nền cát sạn san hô

Khi mô phỏng số theo phương pháp PTHH, có thể sử dụng mô hình cơ học cùng một mạng lưới phần tử liên tục nhưng với tính chất cơ học khác nhau của phần tử để phân chia môi trường. Theo mô hình này, coi mặt tiếp xúc giữa hai môi trường không có chuyển vị tương đối, lực ma sát và lực dính trên mặt tiếp xúc là vô cùng.

Nhưng trong thực tế, khi mặt tiếp xúc giữa hai môi trường có lực ma sát khá nhỏ hoặc ứng suất cắt tại mặt tiếp xúc lớn, có thể phát sinh trượt tương đối trên mặt tiếp xúc đó.

Để mô phỏng phù hợp với sự làm việc thực tế trong trường hợp này có thể sử dụng phần tử tiếp xúc không có chiều dày để mô phỏng mặt tiếp xúc giữa hai môi trường không liên tục là cọc ống thép và nền cát sạn san hô.

4.2. Trình tự các bước tính toán

Khi vận dụng phương pháp PTHH như trên, trình tự xác định sức chịu

tải và sức kháng của cọc khi vận dụng phương pháp hữu hạn là công cụ tính toán được thực hiện theo các bước tổng quát sau:

- Bước 1: Nhập các dữ liệu đầu vào, bao gồm các thông tin mô tả nút và phần tử (lưới phần tử), các thông số cơ học của vật liệu (mô đun đàn hồi, hệ số dẫn nhiệt), các thông tin về tải trọng tác dụng và thông tin về liên kết của kết cấu (điều kiện biên);
- Bước 2: Tính toán ma trận độ cứng phần tử K và véc tơ lực nút F của mỗi phần tử;
- Bước 3: Xây dựng ma trận độ cứng tổng thể K và véc tơ lực nút F chung cho cả hệ (ghép nối phần tử);
- Bước 4: Áp đặt các điều kiện liên kết trên biên kết cấu bằng cách biến đổi ma trận độ cứng K và véc tơ lực nút tổng thể F ;
- Bước 5: Giải phương trình PTHH, xác định nghiệm của hệ là véc tơ chuyển vị chung Q ;
- Bước 6: Tính toán các đại lượng khác (ứng suất, biến dạng, v.v.);
- Bước 7: Lưu trữ số liệu tính toán và in kết quả, vẽ các biểu đồ, đồ thị của các đại lượng theo yêu cầu.

Trong bài toán nghiên cứu tương tác của cọc ống thép với nền cát sạn san hô theo phương pháp PTHH, đối với môi trường nền cát sạn san hô tác giả sử dụng dạng phần tử khối 3D. Còn đối với kết cấu cọc ống thép sử dụng tính chất của phần tử vỏ, tương tác của cọc và nền sử dụng phần tử tiếp xúc không có chiều dày.

Hiện nay, khi các phần mềm chuyên dụng phát triển đủ mạnh như ANSYS; PLAXIS 3D; ABAQUS; ASTERcó thể mô phỏng được nhiều bài toán kết cấu cọc khác nhau theo mục tiêu đặt ra. Do vậy, trong phạm vi nghiên cứu của luận án, tác giả sử dụng phần mềm PLAXIS 3D.

PHỤ LỤC 5 (CHƯƠNG 3)
KẾT QUẢ KHẢO SÁT SỰ LÀM VIỆC CỌC ống THÉP CÓ CÁNH
XOẪN TRONG NỀN CÁT SẠC SAN HỒ TRÊN PHẦN MỀM
PLAXIS 3D VERSION 20.1.0.98

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/1		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=2d=1,2 m; h/L=1/1		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=5d=3,0 m; h/L=1/1	
F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z [m]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	-7,402	0,049	-7,308	0,049
0,000	0,000	-22,205	0,148	-21,925	0,146
-6,529	0,043	-51,811	0,345	-51,159	0,341
-19,586	0,130	-111,024	0,740	-109,625	0,730
-45,700	0,304	-229,427	1,529	-226,536	1,510
-97,928	0,652	-374,760	2,498	-374,694	2,498
-202,370	1,348	-384,439	2,562	-384,256	2,561
-374,830	2,498	-403,786	2,691	-403,368	2,689
-384,827	2,564	-442,463	2,950	-441,575	2,944
-404,809	2,698	-519,778	3,466	-517,947	3,454
-444,757	2,964	-674,263	4,499	-670,556	4,475
-524,608	3,498	-981,703	6,565	-974,341	6,516
-684,165	4,564	-1.263,088	8,631	-1.254,593	8,558
-1.001,464	6,698	-1.493,328	10,698	-1.486,533	10,599
-1.288,341	8,832	-1.662,179	12,689	-1.680,483	12,641
-1.521,753	10,966	-1.669,884	12,756	-1.682,778	12,689
-1.674,343	12,689	-1.683,421	12,890	-1.690,503	12,755
-1.682,436	12,758	-1.707,314	13,158	-1.704,354	12,888
-1.696,850	12,896	-1.745,764	13,693	-1.729,249	13,152
-1.722,645	13,171	-1.820,045	14,763	-1.772,878	13,681
-1.767,349	13,722	-1.894,696	15,833	-1.811,008	14,210
-1.846,709	14,823	-1.967,935	16,904	-1.849,188	14,739
-1.925,538	15,924	-2.038,564	17,974	-1.888,465	15,268
-2.002,928	17,026	-2.173,155	20,115	-1.927,975	15,798
-2.078,248	18,127	-2.295,640	22,255	-1.966,865	16,327

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/1		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=2d=1,2 m; h/L=1/1		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=5d=3,0 m; h/L=1/1	
-2.224,085	20,330	-2.409,858	24,396	-2.042,628	17,385
-2.364,415	22,533	-2.461,033	25,384	-2.187,552	19,501
-2.500,482	24,735	-2.468,253	25,450	-2.326,676	21,618
-2.539,865	25,384	-2.480,324	25,582	-2.460,886	23,734
-2.547,431	25,452	-2.498,490	25,846	-2.563,466	25,384
-2.560,332	25,589	-2.526,306	26,373	-2.570,737	25,449
-2.580,640	25,862	-2.577,749	27,428	-2.583,147	25,580
-2.613,849	26,408	-2.672,443	29,538	-2.604,250	25,841
-2.677,120	27,500	-2.692,061	29,983	-2.635,118	26,363
-2.799,865	29,684	-2.699,310	30,049	-2.694,683	27,408
-2.816,433	29,982	-2.711,344	30,182	-2.815,114	29,498
-2.823,998	30,051	-2.729,138	30,448	-2.843,333	29,982
-2.836,797	30,189	-2.752,578	30,980	-2.850,650	30,048
-2.856,568	30,464	-2.796,865	32,044	-2.863,086	30,180
-2.888,117	31,015	-2.885,235	34,172	-2.884,079	30,443
-2.947,535	32,117	-3.068,580	38,428	-2.914,044	30,971
-3.062,830	34,321	-3.136,647	39,980	-2.971,497	32,025
-3.288,254	38,729	-3.143,857	40,047	-3.086,777	34,134
-3.351,184	39,979	-3.155,764	40,180	-3.324,235	38,353
-3.358,654	40,048	-3.173,109	40,446	-3.415,875	39,978
-3.371,142	40,186	-3.195,045	40,979	-3.423,145	40,045
-3.389,880	40,463	-3.236,052	42,045	-3.435,417	40,177
-3.415,355	41,016	-3.317,808	44,176	-3.455,911	40,442
-3.463,834	42,123	-3.468,988	47,978	-3.484,090	40,971
-3.560,965	44,337	-3.476,297	48,046	-3.537,581	42,030
-3.726,220	47,976	-3.488,311	48,181	-3.644,398	44,149
-3.733,755	48,046	-3.505,627	48,452	-3.843,099	47,976
-3.746,325	48,187	-3.527,003	48,995	-3.850,451	48,043
-3.764,980	48,467	-3.566,720	50,081	-3.862,831	48,178
-3.789,784	49,029	-3.645,910	52,251	-3.883,393	48,447
-3.836,880	50,152	-3.812,662	56,593	-3.908,226	48,986
-3.931,497	52,398	-3.946,757	59,975	-3.956,710	50,064

-4.130,732	56,890			-4.059,326	52,220
-4.269,616	59,973			-4.170,313	54,375
				-4.393,855	58,686
				-4.460,474	59,972
Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=3d=1,8 m; h/L=1/1		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; h/L=1/1 (cọc có 01 cánh xoắn)		Lc=18 m; d=0,6 m (Cọc tròn trơn)	
F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z [m]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-9,259	0,062	-10,213	0,069	-9,775	0,067
-27,778	0,185	-30,638	0,206	-29,324	0,201
-64,816	0,432	-71,489	0,481	-68,423	0,468
-138,890	0,925	-153,187	1,030	-146,617	1,003
-286,995	1,912	-316,520	2,129	-302,944	2,073
-374,892	2,498	-371,356	2,498	-364,939	2,498
-384,405	2,561	-381,878	2,568	-377,025	2,581
-403,420	2,688	-402,909	2,710	-401,180	2,746
-441,435	2,942	-444,952	2,993	-449,465	3,077
-517,424	3,449	-528,989	3,560	-545,963	3,740
-669,259	4,464	-696,892	4,693	-738,643	5,064
-971,810	6,494	-1.029,399	6,960	-1.111,017	7,713
-1.250,814	8,524	-1.318,525	9,227	-1.258,844	9,038
-1.481,056	10,554	-1.426,524	10,361	-1.383,882	10,364
-1.662,148	12,585	-1.596,679	12,628	-1.395,634	11,026
-1.668,604	12,689	-1.596,203	12,690	-1.417,019	12,352
-1.676,328	12,755	-1.603,935	12,763	-1.422,985	12,691
-1.690,029	12,887	-1.616,941	12,908	-1.431,046	12,775
-1.714,470	13,149	-1.635,330	13,199	-1.443,597	12,943
-1.756,824	13,675	-1.667,916	13,781	-1.451,421	13,278
-1.832,259	14,726	-1.690,415	14,363	-1.463,953	13,949
-1.907,507	15,778	-1.713,638	14,945	-1.488,260	15,291
-1.981,573	16,829	-1.739,939	15,527	-1.544,987	17,974
-2.053,652	17,880	-1.795,416	16,691	-1.605,561	20,658
-2.192,839	19,983	-1.903,984	19,019	-1.666,879	23,341

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=3d=1,8 m; h/L=1/1		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; h/L=1/1 (cọc có 01 cánh xoắn)		Lc=18 m; d=0,6 m (Cọc tròn trơn)	
-2.326,710	22,086	-2.004,422	21,348	-1.712,600	25,389
-2.456,115	24,189	-2.101,090	23,676	-1.720,569	25,473
-2.528,108	25,384	-2.170,720	25,386	-1.732,790	25,640
-2.535,339	25,449	-2.178,174	25,458	-1.739,066	25,975
-2.547,605	25,579	-2.190,302	25,602	-1.748,098	26,645
-2.568,269	25,840	-2.206,411	25,890	-1.764,920	27,984
-2.597,610	26,361	-2.226,428	26,466	-1.793,045	29,989
-2.653,644	27,403	-2.264,497	27,617	-1.801,052	30,073
-2.764,983	29,486	-2.344,530	29,916	-1.813,363	30,240
-2.791,866	29,982	-2.347,647	29,985	-1.819,807	30,576
-2.799,108	30,048	-2.355,186	30,058	-1.829,174	31,247
-2.811,294	30,179	-2.367,435	30,203	-1.846,699	32,589
-2.829,913	30,442	-2.383,550	30,493	-1.884,448	35,274
-2.859,100	30,967	-2.402,947	31,073	-1.935,347	37,959
-2.913,735	32,017	-2.439,505	32,234	-1.975,078	39,988
-3.020,217	34,117	-2.513,853	34,555	-1.983,087	40,072
-3.227,649	38,317	-2.678,959	39,197	-1.995,418	40,239
-3.308,823	39,979	-2.708,024	39,983	-2.001,871	40,575
-3.315,984	40,045	-2.715,515	40,056	-2.011,168	41,247
-3.327,865	40,177	-2.727,645	40,201	-2.028,349	42,590
-3.345,438	40,440	-2.743,420	40,491	-2.065,161	45,277
-3.368,626	40,968	-2.761,849	41,072	-2.114,765	47,964
-3.412,602	42,023	-2.796,281	42,235	-2.116,510	47,987
-3.500,937	44,132	-2.866,231	44,559	-2.124,593	48,071
-3.669,685	47,977	-2.980,917	47,981	-2.137,000	48,240
-3.676,934	48,044	-2.988,481	48,055	-2.143,243	48,579
-3.688,939	48,178	-3.000,669	48,202	-2.151,964	49,255
-3.706,566	48,445	-3.016,286	48,497	-2.167,716	50,609
-3.772,570	50,052	-3.066,461	50,265	-2.201,251	53,316
-3.859,308	52,194	-3.132,626	52,623	-2.245,311	56,022
-4.043,227	56,479	-3.282,811	57,338	-2.318,007	59,985
-4.195,591	59,973	-3.369,864	59,979		

Lc=18m; d=0,6m; D=1,2m; H=0,3m; S=4d=2,4m; h/L=1/1		Lc=18m; d=0,6m; D=1,2m; H=0,3m; S=2d=1,2m; h/L=1/1		Lc=18m; d=0,6m; D=1,2m; H=0,3m; S=5d=3,0m; h/L=1/1	
F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z [m]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	9,406	0,063	9,307	0,062
0,000	0,000	28,192	0,188	27,895	0,186
0,000	0,000	65,666	0,439	64,974	0,434
0,000	0,000	140,332	0,940	138,862	0,930
0,000	0,000	288,383	1,943	285,256	1,923
0,000	0,000	369,756	2,498	369,634	2,498
0,000	0,000	379,263	2,562	379,032	2,561
0,000	0,000	398,122	2,690	397,684	2,688
0,000	0,000	435,645	2,946	434,798	2,941
6,409	0,043	510,475	3,458	508,810	3,448
19,217	0,128	659,661	4,483	656,365	4,461
44,779	0,299	954,003	6,532	947,599	6,487
95,751	0,641	1.219,458	8,582	1.211,505	8,514
197,135	1,324	1.419,895	10,631	1.423,461	10,541
369,728	2,498	1.575,710	12,682	1.594,227	12,568
379,771	2,565	1.575,234	12,690	1.602,648	12,690
399,692	2,701	1.582,543	12,755	1.609,851	12,755
439,330	2,971	1.594,982	12,886	1.622,255	12,884
518,372	3,512	1.616,459	13,148	1.644,018	13,143
675,837	4,595	1.652,605	13,672	1.683,753	13,662
985,714	6,759	1.720,676	14,719	1.756,940	14,699
1.258,842	8,924	1.849,938	16,813	1.890,208	16,772
1.468,408	11,089	1.974,076	18,908	2.021,635	18,846
1.596,435	12,690	2.090,880	21,002	2.151,389	20,919
1.604,103	12,759	2.199,307	23,097	2.278,493	22,993
1.617,368	12,897	2.301,571	25,192	2.402,681	25,067
1.640,744	13,174	2.310,215	25,386	2.421,442	25,384
1.683,449	13,728	2.317,112	25,452	2.428,391	25,449
1.758,274	14,835	2.328,156	25,584	2.439,830	25,580
1.899,583	17,049	2.345,782	25,847	2.458,886	25,842

Lc=18m; d=0,6m; D=1,2m; H=0,3m; S=4d=2,4m; h/L=1/1		Lc=18m; d=0,6m; D=1,2m; H=0,3m; S=2d=1,2m; h/L=1/1		Lc=18m; d=0,6m; D=1,2m; H=0,3m; S=5d=3,0m; h/L=1/1	
2.038,681	19,263	2.368,429	26,374	2.489,379	26,365
2.175,301	21,478	2.411,930	27,429	2.547,650	27,411
2.309,024	23,692	2.501,872	29,537	2.661,225	29,503
2.409,095	25,385	2.521,380	29,984	2.687,048	29,982
2.416,515	25,455	2.528,195	30,050	2.693,955	30,048
2.428,691	25,595	2.538,996	30,182	2.705,211	30,179
2.448,889	25,875	2.554,208	30,446	2.723,668	30,441
2.480,964	26,434	2.579,816	30,975	2.752,367	30,966
2.542,137	27,553	2.623,064	32,032	2.806,785	32,015
2.661,312	29,791	2.703,702	34,146	2.912,373	34,114
2.671,324	29,983	2.785,520	36,260	3.018,052	36,214
2.678,778	30,053	2.867,165	38,375	3.122,991	38,313
2.690,881	30,193	2.928,598	39,983	3.204,783	39,979
2.708,929	30,473	2.935,303	40,049	3.211,619	40,045
2.740,674	31,034	2.945,793	40,182	3.222,678	40,177
2.797,449	32,155	2.960,136	40,447	3.239,065	40,441
2.905,936	34,398	2.980,420	40,978	3.264,973	40,969
3.014,652	36,641	3.016,690	42,041	3.314,460	42,025
3.121,586	38,884	3.084,588	44,166	3.410,421	44,138
3.172,795	39,979	3.154,208	46,291	3.504,549	46,251
3.180,075	40,049	3.210,053	47,982	3.580,001	47,977
3.191,720	40,190	3.216,708	48,049	3.586,773	48,043
3.208,627	40,473	3.227,005	48,182	3.597,610	48,176
3.231,958	41,037	3.239,575	48,449	3.613,221	48,442
3.277,504	42,166	3.260,132	48,983	3.637,098	48,973
3.371,581	44,424	3.293,916	50,050	3.682,317	50,036
3.466,465	46,682	3.355,023	52,185	3.770,432	52,162
3.520,288	47,976	3.418,547	54,321	3.857,584	54,288
3.527,481	48,047	3.484,145	56,456	3.943,583	56,414
3.538,818	48,189	3.550,144	58,591	4.028,458	58,540
3.553,673	48,473	3.592,972	59,981	4.085,101	59,976
3.576,339	49,040				

Lc=18m; d=0,6m; D=1,2m; H=0,3m; S=4d=2,4m; h/L=1/1		Lc=18m; d=0,6m; D=1,2m; H=0,3m; S=2d=1,2m; h/L=1/1		Lc=18m; d=0,6m; D=1,2m; H=0,3m; S=5d=3,0m; h/L=1/1	
3.619,575	50,175				
3.705,031	52,444				
3.790,524	54,713				
3.875,011	56,982				
3.957,933	59,251				
3.984,022	59,974				

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=3d=1,8 m; h/L=1/1		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; h/L=1/1 (Cọc có 01 cánh xoắn)		Lc=18 m; d=0,6 m (Cọc tròn trơn)	
F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z [m]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9,259	0,062	10,208	0,069	0,000	0,000
27,752	0,185	30,591	0,206	11,775	0,081
64,641	0,432	71,242	0,480	35,281	0,242
138,152	0,925	152,224	1,030	82,143	0,564
283,921	1,912	312,579	2,128	175,458	1,209
369,900	2,498	366,226	2,498	267,760	1,854
379,265	2,561	376,560	2,568	359,646	2,498
397,849	2,687	397,050	2,708	371,572	2,580
434,822	2,939	437,809	2,989	395,212	2,745
508,553	3,444	519,067	3,551	442,218	3,076
655,548	4,453	680,874	4,675	535,843	3,736
945,822	6,471	997,340	6,923	721,408	5,057
1.209,102	8,490	1.265,810	9,170	1.070,758	7,698
1.413,515	10,508	1.343,787	10,295	1.165,969	9,019
1.578,367	12,527	1.474,497	12,544	1.223,729	10,341
1.589,461	12,690	1.480,646	12,691	1.241,942	11,662
1.596,693	12,754	1.487,917	12,762	1.251,744	12,692
1.609,109	12,884	1.499,499	12,905	1.259,297	12,775
1.630,777	13,142	1.516,087	13,191	1.270,092	12,941
1.670,104	13,659	1.544,357	13,762	1.275,864	13,273

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=3d=1,8 m; h/L=1/1		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; h/L=1/1 (Cọc có 01 cánh xoắn)		Lc=18 m; d=0,6 m (Cọc tròn trơn)	
1.742,092	14,693	1.592,838	14,905	1.282,776	13,937
1.807,214	15,727	1.683,669	17,190	1.283,303	14,601
1.934,831	17,795	1.775,880	19,475	1.291,013	15,928
2.061,937	19,863	1.867,579	21,760	1.308,561	17,256
2.187,016	21,931	1.957,331	24,045	1.328,557	18,584
2.308,036	23,998	2.008,996	25,387	1.348,767	19,911
2.386,607	25,385	2.016,159	25,459	1.368,015	21,239
2.393,504	25,450	2.027,275	25,603	1.385,987	22,567
2.404,763	25,580	2.042,295	25,891	1.402,429	23,895
2.423,238	25,841	2.063,410	26,466	1.419,947	25,392
2.451,899	26,361	2.101,612	27,616	1.427,560	25,475
2.505,905	27,402	2.138,460	28,767	1.438,480	25,642
2.608,326	29,484	2.176,186	29,918	1.440,921	25,975
2.632,399	29,983	2.178,514	29,986	1.443,078	26,643
2.639,213	30,048	2.185,771	30,058	1.444,025	27,310
2.650,154	30,179	2.197,005	30,202	1.446,401	27,978
2.667,687	30,440	2.210,754	30,489	1.451,618	28,645
2.690,716	30,963	2.233,261	31,065	1.465,079	29,980
2.735,244	32,008	2.269,006	32,216	1.465,336	29,992
2.827,376	34,098	2.336,160	34,519	1.473,007	30,075
2.920,837	36,188	2.406,746	36,821	1.484,021	30,241
3.012,924	38,279	2.477,574	39,124	1.486,414	30,574
3.085,752	39,979	2.503,878	39,986	1.488,249	31,240
3.092,463	40,045	2.510,906	40,058	1.487,177	31,906
3.103,071	40,176	2.521,612	40,203	1.489,935	33,238
3.117,992	40,439	2.534,237	40,492	1.499,575	34,569
3.140,067	40,965	2.551,094	41,070	1.509,958	35,901
3.181,397	42,016	2.579,104	42,226	1.520,145	37,232
3.259,623	44,117	2.606,799	43,382	1.529,375	38,564
3.337,727	46,219	2.665,238	45,694	1.537,196	39,896
3.402,883	47,977	2.726,022	47,985	1.537,521	39,991
3.409,538	48,043	2.733,018	48,057	1.545,065	40,074

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=3d=1,8 m; h/L=1/1		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; h/L=1/1 (Cọc có 01 cánh xoắn)		Lc=18 m; d=0,6 m (Cọc tròn trơn)	
3.419,925	48,175	2.743,592	48,202	1.553,991	40,241
3.433,034	48,440	2.755,617	48,492	1.558,127	40,574
3.452,228	48,968	2.770,884	49,072	1.559,073	41,241
3.488,577	50,025	2.796,324	50,233	1.552,833	41,908
3.560,976	52,139	2.821,787	51,393	1.548,136	43,242
3.634,293	54,253	2.875,614	53,713	1.550,454	43,908
3.707,079	56,366	2.933,165	56,033	1.555,597	45,242
3.778,894	58,480	2.990,808	58,353	1.559,933	46,575
3.828,984	59,976	3.030,859	59,983	1.563,238	47,908
				1.563,346	47,990
				1.570,878	48,073
				1.578,124	48,240
				1.583,835	48,573
				1.581,080	48,907
				1.569,905	49,574
				1.566,180	50,241
				1.567,692	50,908
				1.572,934	52,242
				1.576,921	53,576
				1.579,947	54,910
				1.582,557	56,244
				1.585,026	57,577
				1.587,409	58,911
				1.589,273	59,985

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/1		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4m; h/L=7/8		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4m; h/L=3/4		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4m; h/L=2/3	
F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z[kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z[m]	F_Z [kN]	u_z[m]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	-9,577	0,064	0,000	0,000	0,000	0,000

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4m; h/L=1/1		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4m; h/L=7/8		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4m; h/L=3/4		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4m; h/L=2/3	
-6,529	0,043	-28,730	0,193	0,000	0,000	0,000	0,000
-19,586	0,130	-67,038	0,450	-6,284	0,042	-8,901	0,060
-45,700	0,304	-143,650	0,964	-18,852	0,127	-26,703	0,180
-97,928	0,652	-296,823	1,992	-43,989	0,296	-62,307	0,419
-202,370	1,348	-372,212	2,498	-94,262	0,634	-133,513	0,898
-374,830	2,498	-382,068	2,564	-194,795	1,310	-275,885	1,856
-384,827	2,564	-401,765	2,696	-371,380	2,498	-371,171	2,498
-404,809	2,698	-441,140	2,961	-380,998	2,562	-380,418	2,560
-444,757	2,964	-519,851	3,490	-400,221	2,692	-398,900	2,684
-524,608	3,498	-677,131	4,549	-438,651	2,951	-435,849	2,934
-684,165	4,564	-989,940	6,668	-515,472	3,469	-509,709	3,432
-1.001,464	6,698	-1.273,277	8,786	-668,978	4,504	-657,305	4,428
-1.288,341	8,832	-1.507,502	10,904	-974,454	6,576	-951,529	6,421
-1.521,753	10,966	-1.676,361	12,690	-1.255,147	8,648	-1.227,292	8,414
-1.674,343	12,689	-1.684,314	12,758	-1.496,734	10,720	-1.471,487	10,407
-1.682,436	12,758	-1.698,699	12,895	-1.687,692	12,690	-1.674,253	12,400
-1.696,850	12,896	-1.724,888	13,169	-1.695,296	12,757	-1.689,466	12,689
-1.722,645	13,171	-1.772,420	13,717	-1.708,988	12,890	-1.696,776	12,754
-1.767,349	13,722	-1.813,341	14,265	-1.733,913	13,158	-1.709,832	12,883
-1.846,709	14,823	-1.854,468	14,814	-1.780,471	13,694	-1.733,426	13,142
-1.925,538	15,924	-1.896,398	15,362	-1.818,776	14,229	-1.776,170	13,659
-2.002,928	17,026	-1.980,172	16,458	-1.897,768	15,301	-1.854,560	14,694
-2.078,248	18,127	-2.061,485	17,554	-1.978,993	16,372	-2.008,286	16,764
-2.224,085	20,330	-2.218,710	19,747	-2.139,605	18,514	-2.160,391	18,834
-2.364,415	22,533	-2.369,641	21,940	-2.294,191	20,657	-2.309,888	20,904
-2.500,482	24,735	-2.515,770	24,133	-2.442,752	22,799	-2.599,498	25,044
-2.539,865	25,384	-2.597,348	25,384	-2.617,014	25,384	-2.621,997	25,383
-2.547,431	25,452	-2.604,840	25,452	-2.624,238	25,450	-2.628,928	25,447
-2.560,332	25,589	-2.617,727	25,588	-2.636,640	25,583	-2.640,821	25,574
-2.580,640	25,862	-2.639,891	25,859	-2.658,022	25,850	-2.661,369	25,828
-2.613,849	26,408	-2.673,504	26,403	-2.693,442	26,382	-2.696,673	26,338
-2.677,120	27,500	-2.738,949	27,490	-2.761,282	27,447	-2.763,682	27,357
-2.799,865	29,684	-2.871,934	29,665	-2.894,886	29,577	-2.894,679	29,394
-2.816,433	29,982	-2.891,735	29,982	-2.920,033	29,982	-2.931,538	29,981
-2.823,998	30,051	-2.899,282	30,051	-2.927,298	30,049	-2.938,520	30,045
-2.836,797	30,189	-2.912,218	30,188	-2.939,724	30,183	-2.950,427	30,174
-2.856,568	30,464	-2.934,330	30,463	-2.961,002	30,452	-2.970,813	30,432
-2.888,117	31,015	-2.967,265	31,013	-2.995,821	30,990	-3.005,419	30,949

-2.947,535	32,117	-3.031,187	32,112	-3.062,189	32,066	-3.070,805	31,981
-3.062,830	34,321	-3.159,647	34,312	-3.192,970	34,218	-3.198,396	34,046
-3.288,254	38,729	-3.426,144	38,710	-3.322,769	36,371	-3.446,724	38,176
-3.351,184	39,979	-3.502,791	39,978	-3.539,094	39,978	-3.551,784	39,976
-3.358,654	40,048	-3.510,245	40,047	-3.546,288	40,045	-3.558,694	40,041
-3.371,142	40,186	-3.522,913	40,185	-3.558,480	40,181	-3.570,363	40,171
-3.389,880	40,463	-3.544,277	40,462	-3.579,055	40,452	-3.590,059	40,430
-3.415,355	41,016	-3.574,716	41,014	-3.608,948	40,994	-3.621,443	40,949
-3.463,834	42,123	-3.633,004	42,120	-3.666,725	42,077	-3.680,520	41,986
-3.560,965	44,337	-3.749,333	44,330	-3.782,651	44,245	-3.795,839	44,061
-3.726,220	47,976	-3.946,284	47,975	-3.987,070	47,975	-4.008,827	47,973
-3.733,755	48,046	-3.953,769	48,046	-3.994,301	48,043	-4.015,790	48,039
-3.746,325	48,187	-3.966,436	48,186	-4.006,495	48,181	-4.027,485	48,171
-3.764,980	48,467	-3.985,959	48,467	-4.026,917	48,456	-4.047,073	48,436
-3.789,784	49,029	-4.017,057	49,028	-4.055,877	49,005	-4.077,900	48,964
-3.836,880	50,152	-4.075,782	50,152	-4.111,661	50,105	-4.135,734	50,021
-3.931,497	52,398	-4.191,209	52,399	-4.223,910	52,303	-4.248,554	52,136
-4.130,732	56,890	-4.421,637	56,893	-4.456,754	56,700	-4.471,281	56,364
-4.269,616	59,973	-4.579,346	59,971	-4.630,961	59,971	-4.657,207	59,969
Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/2							
F_Z [kN]		u_z [m]		F_Z [kN]		u_z [m]	
Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/2,5							
F_Z [kN]		u_z [m]		F_Z [kN]		u_z [m]	
Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/3							
F_Z [kN]		u_z [m]		F_Z [kN]		u_z [m]	
Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/4							
F_Z [kN]		u_z [m]		F_Z [kN]		u_z [m]	
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	-6,105	0,041	0,000	0,000	-8,041	0,054
-8,776	0,059	-18,314	0,123	0,000	0,000	-24,123	0,162
-61,433	0,413	-91,571	0,615	-20,108	0,135	-120,615	0,809
-131,640	0,885	-189,234	1,271	-46,919	0,315	-249,220	1,671
-272,013	1,829	-371,735	2,498	-100,541	0,675	-372,374	2,498
-371,323	2,498	-380,758	2,558	-207,761	1,394	-381,531	2,559
-380,466	2,559	-398,793	2,680	-372,042	2,498	-399,835	2,683
-398,739	2,682	-434,852	2,922	-381,027	2,558	-436,405	2,929
-435,272	2,928	-506,933	3,408	-398,988	2,679	-509,466	3,422
-508,306	3,421	-650,977	4,378	-434,900	2,920	-655,432	4,407
-654,259	4,405	-938,217	6,320	-506,689	3,403	-946,619	6,378
-945,271	6,375	-1.221,418	8,261	-650,104	4,369	-1.235,278	8,348

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/2		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/2,5		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/3		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/4	
F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z[m]	F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z[m]
-1.227,097	8,344	-1.490,602	10,202	-935,339	6,301	-1.506,814	10,320
-1.487,708	10,314	-1.697,552	12,144	-1.490,258	10,165	-1.697,797	12,292
-1.689,536	12,284	-1.742,614	12,688	-1.743,727	12,689	-1.731,366	12,691
-1.723,942	12,689	-1.749,597	12,751	-1.750,631	12,752	-1.738,425	12,755
-1.743,526	12,880	-1.784,034	13,128	-1.784,857	13,126	-1.773,025	13,136
-1.766,026	13,135	-1.825,218	13,632	-1.825,988	13,625	-1.814,072	13,645
-1.807,938	13,645	-1.904,640	14,638	-1.905,349	14,623	-1.892,906	14,663
-1.888,567	14,666	-2.060,809	16,650	-2.060,170	16,619	-2.046,626	16,699
-2.045,291	16,707	-2.211,752	18,663	-2.209,984	18,616	-2.195,130	18,735
-2.345,521	20,789	-2.359,242	20,675	-2.355,668	20,612	-2.338,189	20,771
-2.632,595	24,871	-2.646,515	24,701	-2.636,749	24,605	-2.479,114	22,807
-2.667,656	25,381	-2.694,153	25,382	-2.690,565	25,384	-2.655,021	25,393
-2.674,345	25,444	-2.700,716	25,443	-2.697,119	25,445	-2.661,727	25,454
-2.685,925	25,568	-2.712,021	25,565	-2.708,377	25,567	-2.673,230	25,578
-2.706,212	25,817	-2.731,709	25,809	-2.727,903	25,812	-2.693,072	25,826
-2.743,074	26,315	-2.767,303	26,297	-2.763,100	26,300	-2.727,064	26,322
-2.809,900	27,311	-2.834,263	27,273	-2.829,191	27,278	-2.789,235	27,314
-2.938,558	29,304	-2.960,863	29,226	-2.955,396	29,233	-2.911,603	29,297
-2.981,389	29,979	-3.008,534	29,980	-3.002,593	29,982	-2.954,576	29,994
-2.988,136	30,042	-3.015,173	30,042	-3.009,186	30,044	-2.961,349	30,057
-2.999,750	30,168	-3.026,543	30,166	-3.020,434	30,167	-2.972,897	30,182
-3.019,950	30,421	-3.046,192	30,414	-3.039,783	30,414	-2.992,660	30,434
-3.056,391	30,926	-3.081,431	30,910	-3.074,361	30,908	-3.026,127	30,937
-3.121,800	31,935	-3.147,299	31,902	-3.138,890	31,896	-3.089,239	31,943
-3.244,950	33,955	-3.268,056	33,887	-3.263,158	33,873	-3.211,456	33,956
-3.488,047	37,995	-3.505,532	37,857	-3.497,134	37,824	-3.451,508	37,981
-3.605,175	39,974	-3.629,187	39,974	-3.620,535	39,977	-3.569,023	39,996
-3.611,835	40,037	-3.635,743	40,036	-3.627,067	40,039	-3.575,714	40,059
-3.623,164	40,164	-3.646,833	40,160	-3.638,065	40,163	-3.586,973	40,185
-3.642,509	40,416	-3.665,680	40,408	-3.656,645	40,410	-3.605,905	40,436
-3.676,736	40,922	-3.698,916	40,904	-3.687,529	40,906	-3.635,836	40,940
-3.736,556	41,932	-3.756,849	41,895	-3.745,195	41,896	-3.692,180	41,947
-3.851,215	43,954	-3.869,267	43,879	-3.856,999	43,877	-3.802,803	43,961
-4.071,659	47,952	-4.086,300	47,846	-4.071,266	47,839	-4.020,689	47,961
-4.071,870	47,970	-4.092,201	47,969	-4.077,476	47,972	-4.022,602	47,998
-4.078,815	48,035	-4.098,931	48,032	-4.084,146	48,035	-4.029,484	48,062
-4.090,475	48,164	-4.110,135	48,159	-4.095,246	48,161	-4.041,001	48,190

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/2		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/2,5		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/3		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/4	
F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z[m]	F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z[m]
-4.109,857	48,422	-4.128,732	48,413	-4.113,648	48,413	-4.060,137	48,447
-4.141,042	48,938	-4.158,859	48,921	-4.142,048	48,918	-4.086,527	48,962
-4.196,583	49,971	-4.214,566	49,936	-4.195,088	49,928	-4.137,080	49,990
-4.304,337	52,037	-4.322,381	51,967	-4.299,036	51,948	-4.238,648	52,047
-4.517,519	56,168	-4.534,857	56,029	-4.506,645	55,986	-4.453,077	56,160
-4.711,993	59,964	-4.737,771	59,961	-4.711,869	59,965	-4.653,677	59,995

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/1		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=7/8		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=2/3	
F_Z [kN]	u_z[m]	F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z [m]	F_Z [kN]	u_z[m]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	7,009	0,047	8,988	0,060
0,000	0,000	9,484	0,064	21,014	0,141	26,941	0,181
6,409	0,043	28,426	0,191	48,960	0,330	62,755	0,423
19,217	0,128	66,208	0,446	104,676	0,707	134,125	0,907
44,779	0,299	141,492	0,956	215,473	1,461	275,655	1,874
95,751	0,641	290,636	1,975	325,322	2,215	366,249	2,498
197,135	1,324	366,766	2,498	366,374	2,498	375,356	2,560
369,728	2,498	376,375	2,563	375,823	2,562	393,420	2,683
379,771	2,565	395,442	2,693	394,564	2,690	429,359	2,931
399,692	2,701	433,383	2,954	431,852	2,947	501,024	3,426
439,330	2,971	509,040	3,477	506,193	3,461	643,591	4,417
518,372	3,512	659,526	4,521	654,081	4,488	925,130	6,398

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/1		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=7/8		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=2/3	
675,837	4,595	955,737	6,609	945,442	6,542	1.185,048	8,379
985,714	6,759	1.220,592	8,698	1.208,560	8,597	1.402,588	10,360
1.258,842	8,924	1.429,581	10,787	1.419,973	10,652	1.554,547	12,342
1.468,408	11,089	1.580,242	12,690	1.578,936	12,690	1.578,505	12,690
1.596,435	12,690	1.587,460	12,757	1.585,981	12,756	1.585,252	12,753
1.604,103	12,759	1.599,824	12,890	1.597,939	12,887	1.596,577	12,879
1.617,368	12,897	1.621,498	13,157	1.618,721	13,149	1.616,000	13,132
1.640,744	13,174	1.661,224	13,690	1.656,624	13,674	1.651,100	13,637
1.683,449	13,728	1.733,974	14,758	1.727,252	14,723	1.717,674	14,648
1.758,274	14,835	1.871,300	16,892	1.859,972	16,822	1.841,655	16,669
1.899,583	17,049	2.004,624	19,027	1.989,428	18,922	1.965,547	18,690
2.038,681	19,263	2.136,248	21,161	2.118,364	21,021	2.089,602	20,711
2.175,301	21,478	2.266,343	23,296	2.245,838	23,120	2.211,663	22,732
2.309,024	23,692	2.391,332	25,385	2.370,527	25,220	2.330,203	24,754
2.409,095	25,385	2.398,381	25,452	2.380,038	25,385	2.366,341	25,385
2.416,515	25,455	2.409,959	25,587	2.386,984	25,451	2.372,956	25,449
2.428,691	25,595	2.429,261	25,856	2.398,397	25,584	2.383,815	25,576
2.448,889	25,875	2.460,356	26,394	2.417,374	25,849	2.401,856	25,831
2.480,964	26,434	2.520,064	27,470	2.445,339	26,379	2.428,274	26,340
2.542,137	27,553	2.636,354	29,622	2.500,673	27,439	2.480,281	27,359
2.661,312	29,791	2.655,634	29,983	2.615,460	29,559	2.587,607	29,396
2.671,324	29,983	2.662,679	30,050	2.638,563	29,983	2.618,553	29,983
2.678,778	30,053	2.674,114	30,185	2.645,454	30,050	2.625,124	30,047
2.690,881	30,193	2.691,305	30,455	2.656,667	30,183	2.635,813	30,174
2.708,929	30,473	2.721,808	30,994	2.673,602	30,448	2.651,895	30,430
2.740,674	31,034	2.777,079	32,074	2.703,646	30,979	2.680,334	30,941
2.797,449	32,155	2.883,626	34,232	2.757,786	32,042	2.729,332	31,963
2.905,936	34,398	2.989,120	36,391	2.860,165	34,167	2.825,871	34,008
3.014,652	36,641	3.092,809	38,550	2.961,965	36,293	2.923,031	36,052
3.121,586	38,884	3.160,386	39,979	3.062,736	38,418	3.018,973	38,097
3.172,795	39,979	3.167,320	40,047	3.135,689	39,979	3.105,583	39,979
3.180,075	40,049	3.178,386	40,183	3.142,476	40,046	3.112,086	40,044

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/2		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/2,5		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/3		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/4	
0,000	0,000	7,900	0,053	0,000	0,000	0,000	0,000
8,775	0,059	23,682	0,159	0,000	0,000	0,000	0,000
26,302	0,177	55,175	0,371	0,000	0,000	0,000	0,000
61,271	0,413	117,949	0,796	26,912	0,181	0,000	0,000
130,961	0,885	242,628	1,645	62,692	0,422	8,812	0,059
269,191	1,829	366,429	2,494	134,000	0,904	26,415	0,177
366,415	2,498	366,931	2,498	275,464	1,868	61,530	0,414
375,311	2,558	375,687	2,557	367,339	2,498	131,514	0,886
392,961	2,679	393,061	2,676	376,441	2,559	270,392	1,832
428,080	2,921	427,630	2,913	394,502	2,683	367,631	2,498
498,113	3,404	496,565	3,389	430,442	2,930	376,521	2,558
637,454	4,371	633,841	4,339	502,114	3,423	394,163	2,679
913,336	6,305	905,669	6,239	644,484	4,410	429,267	2,921
1.178,279	8,239	1.171,628	8,140	926,655	6,384	499,222	3,404
1.403,243	10,174	1.393,449	10,042	1.203,286	8,358	638,119	4,369
1.541,767	12,109	1.522,414	11,944	1.405,971	10,333	912,991	6,301
1.577,779	12,690	1.568,643	12,691	1.525,325	12,308	1.179,266	8,233
1.584,255	12,751	1.575,013	12,751	1.546,873	12,692	1.358,654	10,165
1.595,049	12,875	1.585,522	12,872	1.553,468	12,754	1.456,705	12,098
1.613,391	13,121	1.603,071	13,113	1.564,212	12,880	1.484,902	12,692
1.646,264	13,613	1.633,965	13,596	1.581,869	13,130	1.491,262	12,753
1.708,385	14,599	1.691,633	14,563	1.612,405	13,631	1.501,370	12,875
1.764,154	15,584	1.743,934	15,529	1.668,521	14,633	1.517,281	13,119
1.822,879	16,569	1.797,209	16,495	1.718,231	15,635	1.543,423	13,608
1.883,566	17,554	1.906,889	18,427	1.767,145	16,637	1.583,584	14,586
2.005,379	19,525	2.119,456	22,292	1.867,186	18,641	1.617,287	15,564
2.122,867	21,495	2.274,881	25,390	1.969,106	20,646	1.690,444	17,519
2.341,904	25,387	2.281,047	25,451	2.067,534	22,650	1.768,912	19,475
2.348,167	25,449	2.290,940	25,572	2.159,787	24,654	1.844,068	21,431
2.358,367	25,572	2.306,849	25,815	2.191,981	25,392	1.913,145	23,387
2.375,091	25,820	2.333,705	26,301	2.198,402	25,455	1.977,361	25,342
2.402,176	26,316	2.380,167	27,272	2.208,545	25,581	1.978,548	25,388

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/2		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/2,5		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/3		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/4	
2.449,155	27,307	2.419,782	28,243	2.224,533	25,832	1.984,807	25,449
2.541,626	29,289	2.491,215	29,990	2.247,360	26,336	1.994,544	25,572
2.574,660	29,986	2.497,381	30,051	2.286,729	27,344	2.009,319	25,817
2.580,934	30,048	2.507,202	30,172	2.322,868	28,351	2.021,680	26,307
2.591,105	30,172	2.522,850	30,416	2.382,699	29,992	2.045,855	27,288
2.607,648	30,421	2.548,979	30,902	2.389,111	30,055	2.073,785	28,269
2.635,794	30,918	2.591,914	31,875	2.399,219	30,181	2.121,760	29,985
2.683,135	31,912	2.629,828	32,849	2.415,074	30,433	2.127,984	30,047
2.769,868	33,900	2.706,290	34,795	2.437,287	30,937	2.137,598	30,169
2.857,685	35,889	2.786,278	36,741	2.473,359	31,946	2.152,081	30,415
2.945,622	37,877	2.866,730	38,687	2.506,811	32,954	2.166,622	30,906
3.032,559	39,865	2.920,014	39,989	2.575,827	34,971	2.187,520	31,887
3.037,695	39,985	2.926,120	40,050	2.647,688	36,988	2.209,789	32,869
3.043,954	40,047	2.935,697	40,172	2.719,782	39,005	2.257,410	34,832
3.053,909	40,172	2.950,658	40,416	2.754,783	39,992	2.307,313	36,795
3.069,684	40,422	2.975,101	40,905	2.761,130	40,055	2.356,695	38,759
3.095,794	40,922	3.010,361	41,882	2.770,985	40,182	2.386,721	39,980
3.134,458	41,921	3.042,662	42,859	2.786,146	40,435	2.392,875	40,042
3.207,863	43,920	3.109,005	44,814	2.806,443	40,941	2.402,231	40,165
3.285,187	45,919	3.179,099	46,768	2.834,330	41,954	2.415,993	40,411
3.363,272	47,918	3.223,703	47,987	2.861,608	42,966	2.428,348	40,903
3.365,888	47,983	3.229,743	48,049	2.890,147	43,979	2.434,576	41,395
3.372,065	48,045	3.239,098	48,172	2.950,472	46,005	2.438,680	41,887
3.381,752	48,171	3.253,483	48,417	3.010,869	47,992	2.450,650	42,872
3.396,795	48,423	3.274,541	48,909	3.017,198	48,055	2.469,616	43,856
3.419,051	48,926	3.308,508	49,892	3.026,924	48,182	2.491,338	44,840
3.456,780	49,931	3.337,120	50,875	3.041,666	48,437	2.535,941	46,809
3.522,686	51,943	3.395,926	52,841	3.060,683	48,946	2.561,148	47,977
3.591,040	53,955	3.459,192	54,806	3.083,641	49,963	2.567,293	48,038
3.661,230	55,967	3.524,790	56,772	3.107,089	50,981	2.576,567	48,162
3.731,767	57,979	3.590,319	58,737	3.131,940	51,999	2.590,040	48,409
3.801,581	59,980	3.631,446	59,984	3.185,188	54,035	2.601,294	48,903

Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/2		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/2,5		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/3		Lc=18 m; d=0,6 m; D=1,2 m; H=0,3 m; S=4d=2,4 m; h/L=1/4	
				3.239,402	56,071	2.605,051	49,397
				3.293,366	58,107	2.607,166	49,891
				3.342,573	59,991	2.615,601	50,878
						2.631,358	51,866
						2.668,652	53,842
						2.704,573	55,818
						2.738,908	57,794
						2.771,814	59,770
						2.775,045	59,971

d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=1,5d=0,9 m; H=0.5d=0,3 m		d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=1,5d=0,9 m; H=0.833d=0,5 m		d=0,6 m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=1,5d=0,9 m; H=1.167d=0,7 m		d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=2,0d=1,2 m; H=0.5d=0,3 m	
F_Z [kN]	u_z [mm]	F_Z [kN]	u_z [mm]	F_Z [kN]	u_z [mm]	F_Z [kN]	u_z [mm]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-2,951	0,020	-3,409	0,023	-4,427	0,030	-3,915	0,026
	0,060	-10,228	0,069	-13,280	0,090	-11,744	0,079
-20,656	0,140	-23,864	0,162	-30,987	0,210	-27,402	0,184
-44,264	0,300	-51,138	0,347	-66,400	0,450	-58,719	0,395
-91,478	0,619	-105,685	0,716	-137,225	0,930	-121,352	0,817
-185,899	1,258	-214,761	1,456	-278,831	1,890	-246,591	1,660
-368,858	2,497	-368,683	2,500	-368,739	2,500	-370,954	2,497
-373,993	2,532	-373,789	2,535	-373,707	2,534	-380,572	2,562
-384,255	2,601	-383,995	2,604	-383,636	2,601	-399,796	2,692
-404,773	2,741	-404,401	2,743	-403,485	2,736	-438,227	2,951
-445,793	3,019	-445,199	3,020	-443,171	3,006	-515,045	3,469
-527,787	3,576	-526,753	3,574	-522,508	3,545	-668,539	4,506
-691,536	4,689	-689,617	4,683	-680,953	4,624	-973,802	6,580
-1.015,819	6,915	-1.012,185	6,901	-995,502	6,781	-1.250,990	8,654
-1.159,315	8,028	-1.155,321	8,010	-1.136,772	7,859	-1.489,552	10,728
-1.293,229	9,142	-1.289,037	9,119	-1.268,547	8,938	-1.675,386	12,687

d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=1,5d=0,9 m; H=0.5d=0,3 m		d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=1,5d=0,9 m; H=0.833d=0,5 m		d=0,6 m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=1,5d=0,9 m; H=1.167d=0,7 m		d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=2,0d=1,2 m; H=0.5d=0,3 m	
-1.414,526	10,255	-1.410,437	10,228	-1.388,818	10,017	-1.682,950	12,754
-1.517,656	11,369	-1.514,086	11,336	-1.496,085	11,095	-1.696,488	12,888
-1.599,169	12,483	-1.596,029	12,445	-1.575,994	12,174	-1.720,985	13,156
-1.603,509	12,611	-1.609,785	12,700	-1.610,791	12,700	-1.765,344	13,692
-1.606,482	12,688	-1.613,563	12,736	-1.614,483	12,735	-1.803,346	14,228
-1.610,290	12,723	-1.620,069	12,807	-1.620,829	12,804	-1.880,874	15,301
-1.616,417	12,795	-1.630,681	12,949	-1.631,805	12,943	-1.960,403	16,373
-1.626,360	12,938	-1.650,121	13,234	-1.648,890	13,221	-2.117,695	18,517
-1.645,078	13,224	-1.686,625	13,803	-1.682,275	13,777	-2.269,181	20,662
-1.680,980	13,796	-1.755,992	14,941	-1.750,128	14,889	-2.414,840	22,806
-1.752,068	14,939	-1.893,518	17,217	-1.818,551	16,000	-2.556,489	24,951
-1.822,791	16,083	-2.026,554	19,494	-1.951,854	18,223	-2.584,405	25,380
-1.892,592	17,227	-2.154,745	21,770	-2.077,635	20,446	-2.591,602	25,447
-2.028,695	19,514	-2.350,423	25,400	-2.198,765	22,668	-2.603,915	25,580
-2.159,201	21,801	-2.354,039	25,435	-2.315,452	24,890	-2.625,054	25,846
-2.284,859	24,089	-2.360,083	25,506	-2.341,364	25,400	-2.657,448	26,380
-2.353,532	25,382	-2.369,364	25,647	-2.344,894	25,434	-2.721,042	27,446
-2.363,281	25,488	-2.409,574	26,492	-2.359,676	25,640	-2.875,289	29,978
-2.372,590	25,630	-2.463,469	27,620	-2.372,551	25,915	-2.882,539	30,045
-2.386,165	25,914	-2.577,117	29,875	-2.397,680	26,463	-2.894,924	30,180
-2.412,708	26,481	-2.583,900	30,000	-2.448,783	27,561	-2.916,087	30,449
-2.466,720	27,616	-2.587,548	30,036	-2.557,874	29,756	-2.948,059	30,987
-2.524,563	28,751	-2.593,603	30,107	-2.570,578	30,000	-3.010,606	32,064
-2.588,010	29,980	-2.602,010	30,249	-2.574,143	30,035	-3.138,469	34,219
-2.591,693	30,016	-2.616,960	30,534	-2.580,059	30,104	-3.400,646	38,527
-2.597,823	30,088	-2.645,265	31,105	-2.588,219	30,243	-3.488,266	39,973
-2.606,354	30,231	-2.700,947	32,245	-2.602,664	30,521	-3.495,438	40,041
-2.621,517	30,518	-2.812,129	34,525	-2.629,910	31,077	-3.507,567	40,176
-2.650,177	31,091	-2.923,527	36,805	-2.683,429	32,188	-3.526,471	40,447
-2.706,490	32,239	-3.078,404	40,000	-2.790,340	34,410	-3.557,421	40,990
-2.818,935	34,533	-3.082,017	40,036	-2.897,873	36,632	-3.616,715	42,074
-3.043,770	39,122	-3.088,003	40,107	-3.059,457	40,000	-3.734,200	44,244
-3.084,912	39,976	-3.096,246	40,250	-3.062,989	40,035	-3.936,180	47,969
-3.088,563	40,012	-3.109,503	40,536	-3.068,822	40,105	-3.943,372	48,038

d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=1,5d=0,9 m; H=0.5d=0,3 m		d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=1,5d=0,9 m; H=0.833d=0,5 m		d=0,6 m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=1,5d=0,9 m; H=1.167d=0,7 m		d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=2,0d=1,2 m; H=0.5d=0,3 m	
-3.094,600	40,084	-3.134,930	41,108	-3.077,001	40,244	-3.955,443	48,176
-3.102,811	40,228	-3.185,608	42,252	-3.089,832	40,522	-3.973,966	48,451
-3.117,238	40,516	-3.288,220	44,539	-3.114,238	41,079	-4.003,758	49,001
-3.144,249	41,092	-3.445,784	48,000	-3.162,801	42,192	-4.060,589	50,101
-3.196,937	42,243	-3.449,426	48,036	-3.261,793	44,419	-4.173,289	52,302
-3.301,652	44,547	-3.455,415	48,109	-3.423,339	48,000	-4.399,876	56,703
-3.456,402	47,973	-3.463,026	48,254	-3.426,909	48,035	-4.569,022	59,965
-3.460,077	48,010	-3.476,485	48,545	-3.432,774	48,106		
-3.466,122	48,083	-3.501,951	49,125	-3.440,141	48,248		
-3.474,503	48,229	-3.552,080	50,287	-3.453,096	48,531		
-3.487,512	48,521	-3.652,333	52,610	-3.477,573	49,098		
-3.512,184	49,106	-3.853,870	57,255	-3.525,837	50,232		
-3.561,287	50,275	-3.971,498	60,000	-3.622,630	52,498		
-3.661,629	52,613			-3.818,425	57,032		
-3.865,784	57,289			-3.944,841	60,000		

d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=2,0d=1,2 m; H = 0,833d = 0,5 m		d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=2,0d=1,2 m; H = 1,167d = 0,7 m		d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=2,5d=1,5 m; H = 0,5 d = 0,3 m		d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=2,5d=1,5 m; H = 0,833d = 0,5 m	
F_Z [kN]	u_z [mm]	F_Z [kN]	u_z [mm]	F_Z [kN]	u_z [mm]	F_Z [kN]	u_z [mm]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-4,658	0,031	-4,181	0,028	-4,363	0,029	-3,203	0,022
-13,973	0,094	-12,542	0,085	-13,088	0,088	-9,608	0,065
	0,220	-29,265	0,197	-30,539	0,206	-22,420	0,151
-69,866	0,471	-62,711	0,423	-65,441	0,441	-48,042	0,323
-144,389	0,973	-129,602	0,873	-135,243	0,911	-99,287	0,668
-293,386	1,977	-263,351	1,775	-274,810	1,850	-201,766	1,358
-370,827	2,500	-370,865	2,500	-371,169	2,500	-371,246	2,500
-375,817	2,534	-375,421	2,531	-375,720	2,531	-375,592	2,529
-385,791	2,601	-384,527	2,592	-384,815	2,592	-384,278	2,588
-405,733	2,736	-402,734	2,715	-403,000	2,715	-401,645	2,705
-445,605	3,005	-439,136	2,961	-439,360	2,960	-436,370	2,939
-525,312	3,544	-511,911	3,453	-512,048	3,451	-505,789	3,408
-684,503	4,621	-657,295	4,436	-657,253	4,432	-644,477	4,345

d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=2,0d=1,2 m; H = 0,833d = 0,5 m		d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=2,0d=1,2 m; H = 1,167d = 0,7 m		d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=2,5d=1,5 m; H = 0,5 d = 0,3 m		d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=2,5d=1,5 m; H = 0,833d = 0,5 m	
-1.000,687	6,776	-946,917	6,403	-946,524	6,395	-920,992	6,219
-1.144,042	7,854	-1.083,615	7,387	-1.083,068	7,377	-1.179,860	8,094
-1.279,034	8,931	-1.212,416	8,370	-1.211,742	8,358	-1.292,301	9,031
-1.403,272	10,008	-1.330,134	9,354	-1.328,772	9,340	-1.504,508	10,905
-1.518,966	11,086	-1.441,884	10,337	-1.440,053	10,321	-1.672,900	12,700
-1.620,086	12,163	-1.544,776	11,321	-1.542,715	11,303	-1.676,419	12,730
-1.664,735	12,700	-1.634,856	12,305	-1.634,453	12,284	-1.682,730	12,791
-1.668,660	12,735	-1.667,378	12,700	-1.669,802	12,700	-1.694,216	12,913
-1.675,661	12,804	-1.670,987	12,732	-1.673,457	12,732	-1.715,796	13,157
-1.688,367	12,943	-1.677,449	12,796	-1.679,999	12,795	-1.757,427	13,645
-1.711,157	13,220	-1.689,166	12,923	-1.691,880	12,923	-1.796,006	14,133
-1.732,374	13,497	-1.711,080	13,179	-1.714,175	13,177	-1.873,032	15,109
-1.774,826	14,051	-1.729,239	13,434	-1.756,248	13,687	-1.950,348	16,084
-1.860,892	15,160	-1.767,613	13,945	-1.796,714	14,196	-2.026,862	17,060
-1.944,951	16,269	-1.807,952	14,455	-1.877,255	15,214	-2.102,235	18,036
-2.026,475	17,377	-1.888,565	15,476	-1.957,368	16,233	-2.249,150	19,987
-2.184,655	19,595	-1.965,847	16,497	-2.036,491	17,251	-2.392,319	21,938
-2.337,882	21,812	-2.040,539	17,519	-2.114,333	18,270	-2.532,483	23,889
-2.487,240	24,030	-2.185,646	19,561	-2.266,630	20,306	-2.639,207	25,400
-2.577,624	25,400	-2.327,824	21,603	-2.414,863	22,343	-2.642,531	25,430
	25,434	-2.466,975	23,645	-2.560,502	24,380	-2.648,257	25,489
-2.587,659	25,503	-2.584,273	25,400	-2.632,385	25,400	-2.658,193	25,609
-2.598,600	25,640	-2.587,671	25,431	-2.635,855	25,431	-2.674,910	25,847
-2.615,582	25,913	-2.593,503	25,494	-2.641,839	25,494	-2.707,199	26,325
-2.648,937	26,461	-2.603,564	25,619	-2.652,241	25,619	-2.771,527	27,279
-2.716,329	27,556	-2.620,265	25,870	-2.669,809	25,869	-2.901,399	29,188
-2.856,400	29,747	-2.652,285	26,372	-2.703,758	26,370	-2.957,577	30,000
-2.872,896	30,000	-2.715,639	27,374	-2.771,297	27,371	-2.960,947	30,030
-2.876,634	30,035	-2.842,346	29,380	-2.907,367	29,374	-2.966,729	30,091
-2.882,958	30,104	-2.881,587	30,000	-2.950,207	30,000	-2.976,705	30,213
-2.893,081	30,242	-2.885,012	30,032	-2.953,712	30,032	-2.993,329	30,456
-2.910,146	30,520	-2.890,855	30,095	-2.959,720	30,095	-3.025,334	30,942
-2.943,244	31,074	-2.900,834	30,222	-2.970,078	30,223	-3.089,024	31,915
-3.009,411	32,182	-2.915,866	30,477	-2.987,316	30,477	-3.217,770	33,861
-3.144,615	34,399	-2.945,282	30,985	-3.020,484	30,986	-3.347,519	35,807
-3.411,155	38,833	-3.004,870	32,001	-3.086,456	32,004	-3.602,780	39,698

d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=2,0d=1,2 m; H = 0,833d = 0,5 m		d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=2,0d=1,2 m; H = 1,167d = 0,7 m		d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=2,5d=1,5 m; H = 0,5 d = 0,3 m		d=0,6 m; S=4d=2,4 m; h/L=3/4; D=2,5d=1,5 m; H = 0,833d = 0,5 m	
-3.479,241	40,000	-3.067,775	33,018	-3.219,801	34,041	-3.621,837	40,000
-3.482,928	40,035	-3.193,995	35,051	-3.354,006	36,077	-3.625,151	40,030
-3.489,118	40,104	-3.439,911	39,117	-3.607,478	40,000	-3.630,790	40,091
-3.498,887	40,244	-3.491,253	40,000	-3.610,931	40,032	-3.640,431	40,213
-3.513,880	40,522	-3.494,627	40,032	-3.616,813	40,096	-3.656,215	40,456
-3.543,298	41,079	-3.500,331	40,096	-3.626,877	40,223	-3.686,300	40,943
-3.602,769	42,193	-3.509,976	40,223	-3.642,180	40,479	-3.745,622	41,916
-3.726,132	44,421	-3.524,066	40,478	-3.672,103	40,990	-3.863,946	43,862
-3.924,168	48,000	-3.551,291	40,988	-3.732,408	42,011	-4.098,335	47,755
-3.927,879	48,035	-3.605,812	42,007	-3.856,118	44,054	-4.112,664	48,000
-3.934,062	48,106	-3.716,410	44,046	-4.095,762	48,000	-4.116,023	48,031
-3.942,951	48,248	-3.933,629	48,000	-4.099,247	48,033	-4.121,682	48,094
-3.958,979	48,531	-3.937,042	48,033	-4.105,127	48,098	-4.131,207	48,218
-3.989,515	49,097	-3.942,761	48,098	-4.115,036	48,228	-4.145,057	48,468
-4.049,594	50,230	-3.951,546	48,228	-4.129,532	48,489	-4.171,988	48,967
-4.169,302	52,495	-3.965,664	48,488	-4.157,783	49,011	-4.226,483	49,964
-4.407,211	57,025	-3.992,618	49,008	-4.215,037	50,054	-4.341,372	51,960
-4.560,459	60,000	-4.046,176	50,048	-4.335,925	52,141	-4.571,439	55,951
		-4.154,506	52,128	-4.578,213	56,314	-4.798,016	59,942
		-4.374,026	56,288	-4.787,463	60,000	-4.801,061	60,000
		-4.566,444	60,000				

d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=2,5d=1,5m; H=1,167d=0,7m		d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=3,0d=1,8m; H=0,5d=0,3m		d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=3,0d=1,8m; H=0,833d=0,5m		d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=3,0d=1,8m; H=1,167d=0,7m	
F_Z [kN]	u_z [mm]	F_Z [kN]	u_z [mm]	F_Z [kN]	u_z [mm]	F_Z [kN]	u_z [mm]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-4,157	0,028	-3,714	0,025	-3,943	0,027	-1,191	0,008
-12,471	0,084	-11,143	0,075	-11,828	0,080	-3,575	0,024
	0,196	-26,000	0,175	-27,598	0,186	-8,341	0,056
-62,353	0,419	-55,714	0,375	-59,139	0,398	-17,873	0,120
-128,862	0,867	-115,141	0,775	-122,219	0,822	-36,938	0,248
-261,846	1,762	-233,973	1,575	-248,352	1,671	-75,068	0,505
-371,429	2,500	-371,173	2,500	-371,347	2,500	-151,326	1,017
-375,966	2,531	-375,232	2,527	-375,469	2,528	-303,788	2,043

d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=2,5d=1,5m; H=1,167d=0,7m		d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=3,0d=1,8m; H=0,5d=0,3m		d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=3,0d=1,8m; H=0,833d=0,5m		d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=3,0d=1,8m; H=1,167d=0,7m	
-385,032	2,592	-383,341	2,582	-383,709	2,583	-371,650	2,500
-403,159	2,714	-399,555	2,691	-400,183	2,694	-375,860	2,528
-439,402	2,958	-431,974	2,910	-433,123	2,917	-384,286	2,585
-511,863	3,447	-496,790	3,348	-498,974	3,361	-401,121	2,699
-656,614	4,425	-626,295	4,223	-630,550	4,250	-434,784	2,925
-945,052	6,381	-884,666	5,973	-893,014	6,027	-502,089	3,379
-1.081,842	7,358	-1.132,669	7,724	-1.143,301	7,805	-636,546	4,287
-1.210,056	8,336	-1.240,585	8,599	-1.252,205	8,694	-904,791	6,102
-1.327,919	9,314	-1.443,911	10,349	-1.458,538	10,471	-1.159,397	7,917
-1.440,118	10,292	-1.620,146	12,100	-1.635,704	12,249	-1.270,260	8,825
-1.544,094	11,270	-1.672,489	12,700	-1.673,844	12,700	-1.480,450	10,640
-1.636,293	12,247	-1.675,819	12,729	-1.677,231	12,729	-1.659,168	12,456
-1.676,262	12,700	-1.681,756	12,786	-1.683,286	12,787	-1.669,386	12,608
-1.679,912	12,732	-1.692,508	12,900	-1.694,283	12,903	-1.676,627	12,700
-1.686,475	12,795	-1.712,659	13,128	-1.714,941	13,135	-1.680,101	12,730
-1.698,442	12,922	-1.751,150	13,585	-1.754,088	13,598	-1.686,330	12,789
-1.720,955	13,176	-1.787,986	14,041	-1.792,150	14,062	-1.697,658	12,907
-1.763,451	13,683	-1.861,484	14,955	-1.867,926	14,989	-1.718,956	13,144
-1.804,487	14,190	-1.934,785	15,868	-1.943,101	15,916	-1.758,735	13,619
-1.885,817	15,205	-2.007,070	16,781	-2.017,098	16,843	-1.837,314	14,567
-1.966,513	16,219	-2.078,162	17,694	-2.090,002	17,770	-1.915,429	15,515
-2.046,128	17,234	-2.217,013	19,521	-2.232,398	19,624	-1.992,315	16,463
-2.201,583	19,263	-2.352,722	21,348	-2.371,483	21,477	-2.067,854	17,411
-2.352,208	21,292	-2.486,647	23,174	-2.508,082	23,331	-2.142,292	18,359
-2.499,049	23,321	-2.618,780	25,001	-2.657,983	25,400	-2.215,525	19,307
-2.646,564	25,400	-2.650,381	25,428	-2.666,651	25,484	-2.500,936	23,100
-2.650,031	25,431	-2.655,770	25,483	-2.676,215	25,597	-2.639,618	24,996
-2.656,023	25,494	-2.665,108	25,594	-2.692,906	25,822	-2.668,780	25,400
-2.666,468	25,619	-2.681,322	25,816	-2.724,865	26,273	-2.672,042	25,429
-2.684,150	25,869	-2.712,373	26,261	-2.787,857	27,174	-2.677,669	25,487
-2.718,326	26,369	-2.773,725	27,149	-2.913,349	28,975	-2.687,464	25,602
-2.786,311	27,369	-2.896,436	28,926	-2.984,503	30,000	-2.704,542	25,833
-2.923,125	29,369	-2.970,849	30,000	-2.987,730	30,029	-2.737,269	26,295
-2.966,584	30,000	-2.974,034	30,028	-2.993,253	30,086	-2.801,894	27,219
-2.970,076	30,032	-2.979,473	30,085	-3.002,772	30,201	-2.930,896	29,066
-2.976,076	30,095	-2.988,821	30,199	-3.018,664	30,432	-2.996,079	30,000
-2.986,437	30,222	-3.004,350	30,426	-3.049,317	30,892	-2.999,383	30,030

d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=2,5d=1,5m; H=1,167d=0,7m		d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=3,0d=1,8m; H=0,5d=0,3m		d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=3,0d=1,8m; H=0,833d=0,5m		d=0,6m; S=4d=2,4m; h/L=3/4; D=3,0d=1,8m; H=1,167d=0,7m	
-3.003,720	30,477	-3.034,281	30,879	-3.110,393	31,812	-3.005,050	30,089
-3.037,011	30,985	-3.093,970	31,787	-3.234,465	33,653	-3.014,823	30,207
-3.103,250	32,002	-3.215,486	33,603	-3.483,034	37,336	-3.031,149	30,443
-3.237,547	34,035	-3.459,570	37,234	-3.658,090	40,000	-3.062,662	30,915
-3.372,120	36,069	-3.640,812	40,000	-3.661,263	40,029	-3.125,498	31,859
-3.627,245	40,000	-3.643,951	40,028	-3.666,666	40,087	-3.253,162	33,747
-3.630,681	40,032	-3.649,265	40,085	-3.675,934	40,202	-3.508,448	37,523
-3.636,545	40,096	-3.658,321	40,199	-3.691,205	40,433	-3.671,095	40,000
-3.646,585	40,223	-3.673,129	40,427	-3.719,391	40,894	-3.674,337	40,030
-3.661,859	40,478	-3.701,432	40,882	-3.775,503	41,817	-3.679,849	40,089
-3.691,719	40,988	-3.757,458	41,793	-3.889,065	43,662	-3.689,261	40,207
-3.751,920	42,008	-3.869,696	43,614	-4.119,530	47,353	-3.704,696	40,444
-3.875,467	44,047	-4.095,243	47,257	-4.159,791	48,000	-3.734,242	40,917
-4.115,530	48,000	-4.140,920	48,000	-4.163,009	48,030	-3.792,782	41,863
-4.118,992	48,032	-4.144,102	48,029	-4.168,445	48,089	-3.910,007	43,757
-4.124,847	48,097	-4.149,449	48,088	-4.177,631	48,207	-4.145,208	47,543
-4.134,728	48,227	-4.158,432	48,204	-4.191,233	48,444	-4.173,357	48,000
-4.149,214	48,487	-4.172,780	48,438	-4.217,819	48,918	-4.176,636	48,030
-4.177,437	49,007	-4.200,054	48,905	-4.271,695	49,865	-4.182,169	48,091
-4.234,613	50,047	-4.254,127	49,839	-4.385,217	51,761	-4.191,483	48,212
-4.355,147	52,127	-4.363,468	51,707	-4.612,849	55,551	-4.205,168	48,455
-4.596,812	56,286	-4.586,225	55,444	-4.836,259	59,341	-4.231,980	48,940
-4.808,247	60,000	-4.806,241	59,180	-4.874,587	60,000	-4.286,582	49,911
		-4.853,725	60,000			-4.345,087	50,882
						-4.462,900	52,823
						-4.695,518	56,705
						-4.886,359	60,000

PHỤ LỤC 6 (CHƯƠNG 4)
TÓM LƯỢC CƠ SỞ LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN SỨC CHỊU TẢI CỦA
CỌC ÓNG THÉP THEO LÝ THUYẾT ĐỘ TIN CẬY

Khi trình bày sức chịu tải của cọc theo lý thuyết độ tin cậy, trong luận án định nghĩa “*Độ tin cậy sức chịu tải của cọc là xác suất mà cọc đó bảo đảm sức kháng và an toàn như thiết kế đề ra trong suốt quá trình khai thác*”. Sức chịu tải của cọc phụ thuộc vào các yếu tố như: dạng tải trọng tác dụng; đặc điểm của kết cấu cọc và tính chất tham số nền (trọng lượng thể tích, góc ma sát trong, góc ma sát ngoài, lực dính đơn vị,...). Do các yếu tố này trong thực tế có tính chất ngẫu nhiên, nên sức chịu tải của cọc cũng là một đại lượng ngẫu nhiên và theo các quy luật phân bố nhất định.

Phương trình xác định sức chịu tải của cọc đơn theo lý thuyết độ tin cậy được thể hiện theo hàm ngược như sau:

$$[P_{gh}] = F^{-1}(1 - P_s), \quad (PL6.1)$$

trong đó: $[P_{gh}]$ - sức chịu tải giới hạn cho phép của cọc; P_s - xác suất an toàn của cọc, phụ thuộc loại và cấp của công trình; F - hàm phân phối tích lũy của sức chịu tải.

Các biến ngẫu nhiên đầu vào của bài toán sức chịu tải của cọc có thể là các tham số cọc, đặc điểm tải trọng và đặc trưng của nền. Còn biến ngẫu nhiên đầu ra chính là sức chịu tải của cọc cần tìm, sức chịu tải này phân bố theo sự thay đổi của các biến ngẫu nhiên đầu vào. Do đó, để xác định giá trị sức chịu tải trung bình cần xác định độ nhạy theo kỳ vọng và độ lệch cho phép theo biểu thức sau:

$$COV = \frac{d_c}{\mu}, \quad (PL6.2)$$

trong đó: μ là kỳ vọng hay giá trị trung bình của sức chịu tải; d_c là độ lệch và độ nhạy (COV) của sức chịu tải, xác định theo bộ số liệu thực nghiệm hoặc các kết quả đã công bố có đủ cơ sở khoa học.

Từ biểu thức (PL6.1), để xác định sức chịu tải trung bình của cọc từ một tập dữ liệu sức chịu tải tính toán nhận được ứng với mỗi giá trị tiền định của các các tham số đầu vào, cần xác định và xây dựng hàm phân phối tích lũy của tập hợp các giá trị sức chịu tải, và căn cứ vào xác suất an toàn yêu cầu sẽ tính toán được sức chịu tải của cọc theo lý thuyết độ tin cậy.

Mức độ an toàn của kết cấu cọc được xác định bằng xác suất sự cố hay chỉ số độ tin cậy nhận được từ kết quả tính toán theo lý thuyết độ tin cậy. Để dự báo xác suất sự cố sức chịu tải của cọc, một hàm trạng thái giới hạn được xác định ứng với một dạng thức phá hoại được xác định như sau:

$$f = R - Q, \quad (\text{PL6.3})$$

trong đó:

f - hàm trạng thái giới hạn tính toán sức chịu tải của cọc;

R - tổng sức kháng của kết cấu cọc;

Q - tổng hiệu ứng do tải trọng tác động.

Kết cấu cọc làm việc an toàn theo quy ước của các tiêu chuẩn thiết kế, hay cọc đảm bảo sức chịu tải cho phép khi tổng sức kháng của kết cấu cọc lớn hơn tổng hiệu ứng do tải trọng gây ra. Tuy nhiên, vẫn có xác suất xảy ra khi hiệu ứng tải trọng tác dụng lớn hơn sức kháng của cọc.

Xác suất an toàn của kết cấu cọc được thể hiện theo biểu thức sau:

$$P_s = P(f > 0) = P(R > Q) = 1 - P_c, \quad (\text{PL6.4})$$

trong đó:

P_c - xác suất sự cố hay không đảm bảo sức chịu tải của cọc;

P_s - xác suất an toàn hay khả năng đảm bảo sức chịu tải của cọc;

$P(f > 0)$ - xác suất hàm trạng thái giới hạn.

Kết cấu cọc được coi là đảm bảo sức chịu tải cho phép (hoặc đảm bảo an toàn trong khai thác) khi thoả mãn điều kiện sau:

$$P_c \leq [P_c], \quad (\text{PL6.5})$$

trong đó:

P_c - xác suất sự cố có thể xảy ra của cọc;

$[P_c]$ - xác suất sự cố cho phép của cọc.

Mức độ an toàn còn có thể được biểu thị thông qua chỉ số độ tin cậy, là

bội số của độ lệch chuẩn giữa giá trị trung bình của hàm trạng thái giới hạn và giới hạn phá hoại của kết cấu cọc trong nền. Khi đó mức độ an toàn của cọc đạt được còn được thể hiện qua biểu thức sau:

$$\beta_t \geq \beta_T, \quad (\text{PL6.6})$$

trong đó:

β_t - chỉ số độ tin cậy, sao cho $0 \leq \beta_t \cdot d_c \leq \bar{f}$;

d_c - độ lệch chuẩn;

\bar{f} - giá trị trung bình của hàm trạng thái giới hạn;

β_T - chỉ số độ tin cậy mục tiêu, phản ánh xác suất sự cố cho phép của cọc có thể xảy ra.

Một yếu tố có vai trò quan trọng đến kết quả tính toán sức chịu tải của cọc theo lý thuyết độ tin cậy, đó là giá trị của các tham số trong mô hình tính, như tham số nền đất, đặc trưng kết cấu cọc và đặc điểm của tải trọng tác dụng. Các tham số này có thể coi là các biến ngẫu nhiên, nên sức chịu tải của cọc cũng có tính ngẫu nhiên. Biến ngẫu nhiên là một đại lượng phụ thuộc vào kết cục của một phép thử ngẫu nhiên nào đó. Thông thường có 2 loại biến ngẫu nhiên là biến ngẫu nhiên rời rạc và biến ngẫu nhiên liên tục.

Biến ngẫu nhiên được gọi là rời rạc nếu tập giá trị của nó là một tập hữu hạn hoặc vô hạn đếm được của các phần tử. Trong khi đó, các tham số ngẫu nhiên có tập giá trị của nó lấp kín một khoảng trên trục số, hay số phần tử của tập giá trị là vô hạn không đếm được thì được gọi là biến ngẫu nhiên liên tục.

Mỗi biến ngẫu nhiên có thể phân bố theo một quy luật nào đó, luật mô tả phép đo xác suất đối với các giá trị của một biến ngẫu nhiên được gọi là phân bố xác suất và được mô tả bởi hàm phân bố tích lũy có dạng như sau:

$$F_x(x) \equiv P(X \leq x), \quad (\text{PL6.7})$$

trong đó:

x - biến ngẫu nhiên tính toán;

X - giá trị của biến ngẫu nhiên;

$F_x(x)$ - hàm phân bố tích lũy.

Phân bố xác suất của biến ngẫu nhiên rời rạc biểu thị thông qua hàm tập trung xác suất, khi đó hàm phân bố xác suất có dạng như sau:

$$F_x(x) = P(X \leq x) = \sum_{x_i \leq x} P(X = x_i) = \sum_{x_i \leq x} p_x(x_i). \quad (\text{PL6.8})$$

Trường hợp biến ngẫu nhiên liên tục thì hàm phân bố xác suất có dạng:

$$F_x(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f_x(\xi) d\xi. \quad (\text{PL6.9})$$

Các tham số của mô hình tính toán sức chịu tải của cọc có các biến ngẫu nhiên của đất nền, kết cấu cọc và tải trọng là rời rạc, nên hàm phân bố xác suất có dạng như biểu thức (PL6.8). Các giá trị của biến ngẫu nhiên luôn dao động quanh giá trị trung bình hay giá trị kỳ vọng của biến ngẫu nhiên, tức là biến ngẫu nhiên có sự phân tán quanh giá trị trung bình, khi biến ngẫu nhiên rời rạc thì giá trị trung bình của nó biểu thị bởi $E(X)$ như sau:

$$E(X) = \sum_{x_i} x_i p_x(x_i). \quad (\text{PL6.10})$$

Đặc trưng cho sự phân tán của biến ngẫu nhiên là phương sai, đối với biến ngẫu nhiên rời rạc X thì phương sai có dạng sau:

$$\text{Var}(X) = \sum_{x_i} (x_i - \mu_x)^2 p_x(x_i), \quad (\text{PL6.11})$$

trong đó:

μ_x – giá trị trung bình của biến ngẫu nhiên X .

Để đánh giá mức độ phân tán của biến ngẫu nhiên X , thường sử dụng khái niệm độ lệch chuẩn và hệ số biến thiên của nó, được xác định theo các biểu thức sau:

$$d_x = \sqrt{\text{Var}(X)}; \quad (\text{PL6.12})$$

$$\text{COV}_x = \frac{d_x}{\mu_x}, \quad (\text{PL6.13})$$

trong đó: d_x – độ lệch chuẩn của biến ngẫu nhiên X ; COV_x – hệ số biến thiên biểu thị mức độ của độ lệch chuẩn so với giá trị trung bình.

Phân bố xác suất của biến ngẫu nhiên X có thể theo các dạng khác nhau như phân bố chuẩn, phân bố chuẩn logarit hoặc phân bố hình học. Đối với bài toán sức chịu tải của cọc, phân bố xác suất theo dạng phân bố chuẩn có hàm mật độ xác suất như sau:

$$f_x(x) = \frac{1}{d\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{d}\right)^2\right], \quad (\text{PL6.14})$$

trong đó:

d, μ – tương ứng là độ lệch chuẩn và giá trị trung bình của biến ngẫu nhiên X .

Như nội dung nghiên cứu đã trình bày ở trên, sức chịu tải của cọc có thể được biểu thị qua xác suất sự cố của cọc (P_c) hoặc chỉ số độ tin cậy (β), kết cấu cọc làm việc đảm bảo độ tin cậy khi thoả mãn biểu thức sau:

$$P_c \leq [P_c] \quad \text{hoặc} \quad \beta \geq [\beta]; \quad (\text{PL6.15})$$

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{d_R^2 + d_Q^2}} \quad \text{và} \quad P_c = 1 - \Phi(\beta), \quad (\text{PL6.16})$$

trong đó:

d_R và d_Q – lần lượt là độ lệch chuẩn của biến ngẫu nhiên sức kháng của cọc và biến ngẫu nhiên hiệu ứng của tải trọng;

μ_R và μ_Q – lần lượt là giá trị trung bình của biến ngẫu nhiên sức kháng của cọc và biến ngẫu nhiên hiệu ứng của tải trọng;

Φ - hàm phân bố xác suất của phân bố chuẩn.

Để giải quyết bài toán sức chịu tải của cọc theo lý thuyết độ tin cậy đặt ra, có thể sử dụng phương pháp mô phỏng số Monte-Carlo để tính toán.

Mô phỏng số Monte-Carlo là mô phỏng có sử dụng phương pháp Monte-Carlo, một công cụ toán học rất mạnh để mô hình hóa các hệ thống phức tạp, trong đó có sự tham gia của các yếu tố ngẫu nhiên. Đây là phương pháp có thể mô hình hóa các đại lượng ngẫu nhiên có quy luật phân bố cho trước, tính gần đúng tính phân xác định một lớp, nhiều lớp. Tư tưởng phương pháp đã hình thành từ lâu và do tính mạnh mẽ của nó, mô phỏng số Monte-Carlo lần lượt được áp dụng vào các lĩnh vực khác nhau của khoa học kỹ thuật. Tuy nhiên lời giải các bài toán phức tạp theo phương pháp này trên máy tính đòi hỏi nhiều về thời gian cũng như bộ nhớ của máy. Vì vậy chỉ tới những năm gần đây, khi công nghệ máy tính đã đạt tới sự hoàn thiện về mọi mặt, mô phỏng số Monte-Carlo mới thực sự được sử dụng rộng rãi. Phương pháp Monte-Carlo được sử

dụng đặc biệt thuận lợi khi nghiên cứu các hệ thống được miêu tả bằng các phương trình các biến ngẫu nhiên phức tạp như: tích phân nhiều chiều, các phương trình vi phân, hệ phương trình của các biến ngẫu nhiên.

Nội dung của phương pháp mô phỏng Monte-Carlo thường thực hiện theo 3 giai đoạn sau: Trước hết là mô hình hóa các biến ngẫu nhiên đầu vào từ các hàm mật độ hoặc hàm phân phối xác suất cho trước; tiếp theo cần tính toán cụ thể theo các thể hiện đầu vào để nhận các thể hiện đầu ra; cuối cùng là xử lý thống kê các thể hiện đầu ra để tìm các đặc trưng xác suất.

Việc tạo ra các giá trị ngẫu nhiên được tiến hành đối với từng biến trong hàm trạng thái giới hạn từ các số ngẫu nhiên phân bố đồng nhất có giá trị từ 0 đến 1 và thông qua sự chuyển đổi thích hợp để nhận được các giá trị tương ứng tuân theo hàm phân bố xác suất của chính biến đó. Theo đó, xác suất tích lũy nhận được từ hàm phân bố xác suất của biến ngẫu nhiên X là:

$$x = F_x^{-1}(u), \quad (\text{PL6.17})$$

trong đó:

X – biến ngẫu nhiên tính toán;

$F_x(x)$ – hàm phân bố xác suất;

u – giá trị của biến có phân bố đồng nhất chuẩn U nào đó với hàm mật độ phân bố chuẩn chỉ thay đổi biến số từ 0 đến 1.

$$F_U(u) = u. \quad (\text{PL6.18})$$

Xác suất tích lũy của $U \leq u$ chính bằng u . Do đó, nếu u là giá trị của U , thì giá trị tương ứng của X nhận được sẽ có xác suất tích lũy như sau:

$$P(X \leq x) = P[F_U^{-1}(U) \leq x] = P[U \leq F_x(x)] = F_U[F_x(x)] = F_x(x) \quad (\text{PL6.19})$$

Khi đó, nếu tập hợp các giá trị của phân bố chuẩn U là (u_1, u_2, \dots, u_n) thì nhận được tập hợp các xác suất tích lũy thoả mãn hàm phân bố tích lũy $F_X(x)$ có dạng như sau:

$$x_i = F_x^{-1}(u_i). \quad (\text{PL6.20})$$

Với mỗi lần mô phỏng số ta sẽ nhận được một tập hợp các giá trị của biến X_i và giá trị của các hàm trạng thái thời hạn $f(X)$ lặp lại với lượng lớn lần mô phỏng nào đó. Khi đó, xác suất sự cố của cọc có thể được dự báo theo

biểu thức sau:

$$P_c \approx \frac{n_f}{n}, \quad (\text{PL6.21})$$

trong đó:

n – tổng số lần mô phỏng của bài toán;

n_f – số lần mô phỏng mà khi đó hàm $f(X) < 0$.

Khi mô phỏng theo lý thuyết Monte Carlo, một vấn đề đặt ra có ảnh hưởng rất lớn đến kết quả tính toán, đó là số lần mô phỏng cần thiết là bao nhiêu thì đảm bảo độ tin cậy và tính chính xác của kết quả. Theo Vrijling và Van Gelder (2022) thì, khi độ tin cậy mục tiêu là 95% và sai số tương đối lớn nhất là 0,1 thì số lần mô phỏng yêu cầu phụ thuộc vào xác suất sự cố mục tiêu và được biểu thị công thức sau:

$$n \geq 400 \cdot \left(\frac{1}{P_c} - 1 \right). \quad (\text{PL6.22})$$

Để mô hình hoá các biến ngẫu nhiên theo phương pháp mô phỏng số Monte-Carlo trong bài toán sức chịu tải của cọc, trong luận án sử dụng thuật toán hàm ngược.

PHỤ LỤC 7 (CHƯƠNG 4)
TỔNG HỢP MÃ NGUỒN CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN “PILEHLC”
TRÊN PHẦN MỀM MATLAB VERSION 7.6.0.324 (R2008A)

```
function
[SCT]=SucchiutaiPile(NumEle1,NumEle2,NumEle3,NumEle,L1,L2,L3,
Lc,U,P,dc,tc,E,Umax,Option)
Fc=0.25*pi*(dc*dc-(dc-2*tc)^2);
if Option==1
    Le=Lc/NumEle;
else
    Le1=L1/NumEle1;
    Le2=L2/NumEle2;
    Le3=L3/NumEle3;
    NumEle=NumEle1+NumEle2+NumEle3;
end
so_nut=NumEle+1;
so_btd=NumEle+1;
so_ptu=NumEle;
%Xac dinh bac tu do cho nut
btd_nut=zeros(so_nut,1);
for i=1:so_nut
    btd_nut(i,:)=[i];
end
% So lieu cac phan tu [nut_i,nut_j]
phan_tu=[];
for i=1:so_ptu
    phan_tu(i,:)=[i i+1];
end
% Xac dinh bac tu do cho phan tu
btd_ptu=zeros(so_ptu,2);
for i=1:so_ptu
    nut_i=phan_tu(i,1);
    nut_j=phan_tu(i,2);
    btd_ptu(i,:)=[btd_nut(nut_i,:) btd_nut(nut_j,:)];
end
% Xac dinh bac tu do cho ket cau
btd_kcau = (1:so_btd)';
%% XAY DUNG MA TRAN DO CUNG, MA TRAN TAI TRONG, MA TRAN
CHUYEN VI
% Dinh nghia cac ma tran tong the ket cau
%Ma tran do cung
K=zeros(so_btd,so_btd);
%% Xay dung cac ma tran phan tu
%disp('===== Cac ma tran phan tu =====');
```

```

    if Option==1
        for i=1:NumEle
            Ke=(E*Fc/Le)*[1 -1;-1 1];
            % Tap hop cac ma tran tong the vao ma
tran
            edof = btd_ptu(i,:);
            K(edof, edof) = K(edof, edof) + Ke;
        end
    else
        for i=1:NumEle1
            Ke=(E*Fc/Le1)*[1 -1;-1 1];
            % Tap hop cac ma tran tong the vao ma
tran
            edof = btd_ptu(i,:);
            K(edof, edof) = K(edof, edof) + Ke;
        end
        for i=(NumEle1+1):(NumEle1+NumEle2)
            Ke=(E*Fc/Le2)*[1 -1;-1 1];
            % Tap hop cac ma tran tong the vao ma
tran
            edof = btd_ptu(i,:);
            K(edof, edof) = K(edof, edof) + Ke;
        end
        for i=(NumEle1+NumEle2+1):NumEle
            Ke=(E*Fc/Le3)*[1 -1;-1 1];
            % Tap hop cac ma tran tong the vao ma
tran
            edof = btd_ptu(i,:);
            K(edof, edof) = K(edof, edof) + Ke;
        end
    end
    KKC=K;
    Pver=500;
    Finish=true;
    while Finish
        %Veto tai trong ngoai
        F=zeros(so_btd,1);
        F(1,1)=Pver;
        Ui=zeros(so_btd,1);
        Ki=KKC;
        Fi=F;
        DeltaU=zeros(so_btd,1);
        DeltaR=zeros(so_btd,1);
        Plx=zeros(so_btd,1);
    end

```

```

dolech=1;
NuRe=0;
while (dolech>0.0000001)&(NuRe<200)
    NuRe=NuRe+1;
    %=====Tim do cung tiep tuyen cua tung lo xo=====
    for i=1:so_btd
        Plx(i)=0;
        j=1;
        while (U(i,j+1)<=Ui(i))&(j<6)
            j=j+1;
            Plx(i)=P(i,j);
        end
        Kj=(P(i,j+1)-P(i,j))/(U(i,j+1)-U(i,j));
        Plx(i)=Plx(i)+Kj*(Ui(i)-U(i,j));
        K(i,i)=Ki(i,i)+Kj;
        if i==so_btd
            j=1;
            while (U(i+1,j+1)<=Ui(i))&(j<6)
                j=j+1;
            end
            Kj=(P(i+1,j+1)-P(i+1,j))/(U(i+1,j+1)-
U(i+1,j));
            Plx(i)=Plx(i)+P(i+1,j)+Kj*(Ui(i)-
U(i+1,j));
            K(i,i)=Ki(i,i)+Kj;
        end
        end
        DeltaR=Fi-Plx-Ki*Ui;
        %Giai phuong trinh can bang
        DeltaU(btd_kcau) = K(btd_kcau,
btd_kcau)\DeltaR(btd_kcau);
        Ui=Ui+DeltaU;
        dolech=norm(DeltaU)/norm(Ui);
    end
    %disp(NuRe);
    if Ui(1)<Umax
        Pver=Pver+10;
    else Finish=false;
    end
end
SCT=Pver-10;
End

%%=====
function [U
P]=Loxonen(n,Phi,Deltams,gama,hi,Lc,dc,NumEle1,NumEle2,NumEle

```

```

3, NumEle, L1, L2, L3, D, Option)
s=0;
U=[];
P=[];
a0=-0.173181106546089;
a1=0.0268471355437375;
a2=-0.000359256284952918;
a3=5.83950119553873E-06;
b0=11903.1407331009;
b1=-2595.9811456721;
b2=232.838500660711;
b3=-10.9821867081727;
b4=0.287160350457087;
b5=-0.00394434837565516;
b6=0.0000222351844224589;
Kh=1.0;
C=29.83;
if Option==1
    for i=1:(n-1)
        s=s+hi(i,1);
    end
    hi(n,:)=[Lc-s];
    li=Lc/NumEle;
    for i=0:NumEle
        %Xac dinh vi tri cua lo xo
        zi=i*li;
        k=0;
        s=0;
        for j=1:(n-1)
            s=s+hi(j,1);
            if s>zi
                k=j-1;
                break;
            end
        end
        end
        Lii=li;
        if or(i==0, i==NumEle)
            Lii=li/2;
        end
        [sigmaZ]=Trongluongbanthan(zi,hi,gama);
        Delta_TT=Deltams(k+1,1);
        Phi_TT=Phi(k+1,1);
        gama_TT=gama(k+1,1);
        Beta=Kh*tan(Delta_TT*pi/180);
        tmax=Beta*(sigmaZ +C/tan(Phi*pi/180));
        Sxq=Lii*pi*dc;
    end
end

```

```

                                U(i+1,:)= [0 0.00250 0.00300 0.00400 0.00600
0.00800 1];
                                P(i+1,:)= [0 tmax*Sxq tmax*Sxq tmax*Sxq
tmax*Sxq tmax*Sxq tmax*Sxq];
                                end
                                %Xac dinh do cung mui coc

Nqt=b6*Phi_TT^6+b5*Phi_TT^5+b4*Phi_TT^4+b3*Phi_TT^3+b2*Phi_TT
^2+b1*Phi_TT+b0;
                                if Phi_TT>40
                                    Nqt=50;
                                end
                                if sigmaZ>150
                                    sigmaZ=150;
                                end
                                q=sigmaZ*Nqt;
                                Qp=0.25*q*pi*dc^2;
                                U(NumEle+2,:)=dc*[0 0.002 0.013 0.042 0.073 0.1
1];
                                P(NumEle+2,:)=Qp*[0 0.25 0.5 0.75 0.9 1.0 1.0];
else
                                for i=1:(n-1)
                                    s=s+hi(i,1);
                                end
                                hi(n,:)= [Lc-s];
                                li1=L1/NumEle1;
                                li2=L2/NumEle2;
                                li3=L3/NumEle3;

                                % Do cung lo xo Doan Tren
                                for i=0:(NumEle1-1)
                                    %Xac dinh vi tri cua lo xo
                                    zi=i*li1;
                                    k=0;
                                    s=0;
                                    for j=1:(n-1)
                                        s=s+hi(j,1);
                                        if s>zi
                                            k=j-1;
                                            break;
                                        end
                                    end
                                    end
                                    Lii=li1;

                                    if (i==0)
                                        Lii=li1/2;

```

```

end
    if (i==(NumEle1-1))
        Lii=1.5*li1;
    end

    [sigmaZ]=Trongluongbanthan(zi,hi,gama);
    Delta_TT=Deltams(k+1,1);
    Beta=Kh*tan(Delta_TT*pi/180);
    tmax=Beta*(sigmaZ +C/tan(Phi*pi/180));
    Sxq=Lii*pi*dc;
    U(i+1,:)= [0 0.00250 0.00300 0.00400 0.00600
0.00800 1];
    P(i+1,:)= [0 tmax*Sxq tmax*Sxq tmax*Sxq
tmax*Sxq tmax*Sxq tmax*Sxq];
    end

    % Do cung lo xo Doan Canh
    for i=0:NumEle2
        %Xac dinh vi tri cua lo xo
        zi=L1+i*li2;
        k=0;
        s=0;
        for j=1:(n-1)
            s=s+hi(j,1);
            if s>zi
                k=j-1;
                break;
            end
        end
        Lii=li2;
        if or(i==0,i==(NumEle2))
            Lii=li2/2;
        end
        [sigmaZ]=Trongluongbanthan(zi,hi,gama);
        Phi_TT=Phi(k+1,1);
        Beta1=Kh*tan(Phi_TT*pi/180);

        %tmax=0.66*(sigmaZ+C/tan(Phi*pi/180))*(0.09*exp(0.08*Phi_TT))
        %tan(Phi_TT*pi/180);
        tmax=Beta1*(sigmaZ+C/tan(Phi*pi/180));
        Sxq=Lii*pi*D;
        U(NumEle1+i+1,:)= [0 0.00415 0.00500 0.00600
0.00700 0.00800 1];
        P(NumEle1+i+1,:)= [0 tmax*Sxq tmax*Sxq
tmax*Sxq tmax*Sxq tmax*Sxq tmax*Sxq];
    end

```



```

% Do cung lo xo Doan Duoi
for i=1:NumEle3
    %Xac dinh vi tri cua lo xo
    zi=L1+L2+i*li3;
    k=0;
    s=0;
    for j=1:(n-1)
        s=s+hi(j,1);
        if s>zi
            k=j-1;
            break;
        end
    end
    Lii=li3;
    if (i==1)
        Lii=1.5*li3;
    end
    if (i==NumEle3)
        Lii=0.5*li3;
    end
    [sigmaZ]=Trongluongbanthan(zi,hi,gama);
    Delta_TT=Deltams(k+1,1);
    Phi_TT=Phi(k+1,1);
    gama_TT=gama(k+1,1);
    Beta=Kh*tan(Delta_TT*pi/180);
    tmax=Beta*(sigmaZ +C/tan(Phi*pi/180));
    Sxq=Lii*pi*dc;
    U(NumEle1+NumEle2+i+1,:)= [0 0.00250 0.00300
0.00400 0.00600 0.00800 1];
    P(NumEle1+NumEle2+i+1,:)= [0 tmax*Sxq tmax*Sxq
tmax*Sxq tmax*Sxq tmax*Sxq tmax*Sxq];
    end

    %Xac dinh do cung mui coc

Nqt1=b6*Phi_TT^6+b5*Phi_TT^5+b4*Phi_TT^4+b3*Phi_TT^3+b2*Phi_T
T^2+b1*Phi_TT+b0;
    if Phi_TT>40
        Nqt1=50;
    end
    if sigmaZ>150
        sigmaZ=150;
    end
    q1=sigmaZ*Nqt1;
    Qp_m=0.25*q1*pi*dc^2;

```

```

Phi_r=Phi_TT*pi/180;

Nqt=exp(pi*tan(Phi_r))*((tan(pi/4+Phi_r/2))^2)*(1+tan(Phi_r))
*(1+pi*tan(Phi_r))*((1-sin(Phi_r))^2);
    if Phi_TT>40
        Nqt=50;
    end
    Qp=2*D*(gama_TT-10)*(Nqt-1)*(pi*D*D/4-
pi*dc*dc/4)+Qp_m;
    U(NumEle1+NumEle2+NumEle3+2,:)=dc*[0 0.002 0.013
0.042 0.073 0.1 1];
    P(NumEle1+NumEle2+NumEle3+2,:)=Qp*[0 0.25 0.5
0.75 0.9 1 1];
end
end

%%=====%%
function Pc1_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Lc;
global D;
global L1;
global L2;
global L3;
global U;
global P;
global NumEle1;
global NumEle2;
global NumEle3;
global NumEle;
global dc;
global tc;
global E;
global Phi;
global deltaPhi;
global Deltams
global Lech_Deltams;
global gama;
global deltaGama
global hi;
global n;
global Option;
Option=get(handles.TH1,'Value');
% CAP NHAP SO LIEU TU BANG DU LIEU DAU VAO
dc=str2num(get(handles.DK,'String'));
tc=str2num(get(handles.CD,'String'));
E=str2num(get(handles.Modun,'String'));

```

```

Umax=0.01*str2num(get(handles.CVgh,'String'));
NMC=str2num(get(handles.NMC,'String'));
[U
P]=Loxonen(n,Phi,Deltams,gama,hi,Lc,dc,NumEle1,NumEle2,NumEle3,
NumEle,L1,L2,L3,D,Option);
U
P
[SCT]=(SucchiutaiPile(NumEle1,NumEle2,NumEle3,NumEle,L1,L2,L3
,Lc,U,P,dc,tc,E,Umax,Option));
set(handles.SCT,'String',SCT/1.4);
%% TINH TOAN SUC CHIU TAI THEO Monte Carlo
Pc=[];
for i=1:NMC
%% THUC HIEN MO HINH HOA CAC DAI LUONG NGAU NHUEN
Phi1=[];
C1=[];
gama1=[];
for k=1:n
Phi1(k,:)=[norminv(rand,Phi(k,1),deltaPhi(k,1))];

C1(k,:)=[norminv(rand,Deltams(k,1),Lech_Deltams(k,1))];
gama1(k,:)=[norminv(rand,gama(k,1),deltaGama(k,1))];
end
%% TINH TOAN SUC CHIU TAI THEO SO LIEU DA MO HINH HOA
[U
P]=Loxonen(n,Phi1,C1,gama1,hi,Lc,dc,NumEle1,NumEle2,NumEle3,
NumEle,L1,L2,L3,D,Option);
%Xac dinh suc chiu tai
[SCT]=SucchiutaiPile(NumEle,U,P,Lc,dc,tc,E,Umax);

[SCT]=(SucchiutaiPile(NumEle1,NumEle2,NumEle3,NumEle,L1,L2,L3
,Lc,U,P,dc,tc,E,Umax,Option));
Pc(i,:)=[i SCT];
disp(i)
end

set(handles.BDL,'Data',Pc);
%% XU LY THONG KE SUC CHIU TAI CUA COC
Pmax=max(Pc(:,2));
Pmin=min(Pc(:,2));
d = (Pmax - Pmin) / (1 + 3.32 *log10(NMC));
SK = round((Pmax - Pmin) / d);
if SK<6
SK=6;
elseif SK>20
SK=20;

```

```

end
d=(Pmax-Pmin)/SK;
hn=[];
X=[];
for i=1:SK
    Pi = Pmin + (i - 1) * d;
    Pj = Pi + d;
    dem = 0;
    for j=1:NMC
        if (Pc(j,2) >= Pi) & (Pc(j,2) < Pj)
            dem = dem + 1;
        end
    end
    hn(i,:) = [dem / NMC];
    X(i,:)=0.5*(Pi+Pj);
end
Pkv=sum(Pc(:,2))/NMC;
tam=Pc(:,2)-Pkv;
Delta=sqrt((tam'*tam)/(NMC-1));
%% VE DO THI HAM MAT DO SCT CUA COC
axes(handles.DThmd);
hold off;
bar(X,hn,'r');
%hist(Pc(:,2));
hold on;
X=(Pkv-3*Delta):0.5:(Pkv+3*Delta);
plot(X,d*normpdf(X,Pkv,Delta),'b','LineWidth',1.5);
xlabel('Suc chiu tai cua coc [Pc] (KN)');
grid on;
axes(handles.axes10);
%hist(Pc(:,2));
hold off;
%normplot(Pc(:,2));
X=(Pkv-3*Delta):0.5:(Pkv+3*Delta);
plot(X,100*normcdf(X,Pkv,Delta),'b','LineWidth',1.5);
xlabel('Suc chiu tai cua coc [Pc] (KN)');
ylabel('Ham luong(%)');
grid on;
%% TINH SUC CHIU TAI THEO LT DO TIN CAY
n2=get(handles.CapCT,'value')-1;
switch n2
    case 0
        Ps=0.9998900;
    case 1
        Ps=0.9993189;
    case 2

```

```

        Ps=0.9965330;
end
Pc_DTC=norminv(1-Ps,Pkv,Delta);
% -----%
set(handles.Pmax,'String',Pmax);
set(handles.Pmin,'String',Pmin);
set(handles.Pkv,'String',Pkv);
set(handles.DLP,'String',Delta);
set(handles.Pcdtc,'String',Pc_DTC);
function Pc2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to Pc2 (see GCBO)
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
i=get(handles.Layer,'Value')-1;
global n;
global H;
global Phi;
global Deltams;
global hi;
global gama;
global deltaPhi;
global Lech_Deltams;
global deltaGama;
global Option;
if i<n
    x=str2num(get(handles.High,'String'))
    H(i,:)=[x];
    hi(i,:)=[x];
end
if i<=n
    x=str2num(get(handles.Gocms,'String'));
    Phi(i,:)=[x];
    x=str2num(get(handles.DPhi,'String'));
    deltaPhi(i,:)=[x];
    x=str2num(get(handles.Lucdinh,'String'));
    Deltams(i,:)=[x];
    x=str2num(get(handles.DC,'String'));
    Lech_Deltams(i,:)=[x];
    x=str2num(get(handles.TLR,'String'));
    gama(i,:)=[x];
    x=str2num(get(handles.DG,'String'));
    deltaGama(i,:)=[x];
end
end

```