

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

PHAN THANH CẦU

**NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG HẠ CỌC ỐNG THÉP TRÊN NỀN
SAN HỒ TẠI ĐẢO TRƯỜNG SA CỦA BỘ CÔNG TÁC KIỂU
XOAY-ÉP LẮP TRÊN MÁY ĐÀO THỦY LỰC**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - NĂM 2020

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

PHAN THANH CẦU

**NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG HẠ CỌC ỐNG THÉP TRÊN NỀN
SAN HỒ TẠI ĐẢO TRƯỜNG SA CỦA BỘ CÔNG TÁC KIỂU
XOAY-ÉP LẤP TRÊN MÁY ĐÀO THỦY LỰC**

Chuyên ngành: Kỹ thuật cơ khí động lực

Mã số: 9 52 01 16

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

- 1. TS Trần Hữu Lý**
- 2. TS Nguyễn Thế Minh**

HÀ NỘI - NĂM 2020

LỜI CAM ĐOAN

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

Tác giả luận án

Phan Thanh Cầu

LỜI CẢM ƠN

Tác giả luận án xin bày tỏ lòng biết ơn chân thành đối với tập thể cán bộ hướng dẫn đã đưa ý tưởng nghiên cứu và tận tình hướng dẫn tác giả về phương pháp tiếp cận, nội dung nghiên cứu. Tác giả luôn trân trọng sự động viên, khuyến khích và những kiến thức khoa học mà tập thể hướng dẫn đã chia sẻ cho tác giả trong thời gian thực hiện luận án.

Tác giả xin trân trọng cảm ơn tập thể bộ môn Xe máy công binh, Khoa Động lực, Phòng Sau đại học, Học viện KTQS đã tạo mọi điều kiện thuận lợi cho tác giả trong suốt quá trình nghiên cứu.

Tác giả xin chân thành cảm ơn Thủ trưởng Bộ Tư lệnh Công binh, Văn phòng Bộ Tư lệnh Công binh, Trường Sĩ Quan Công binh đã tạo điều kiện thuận lợi nhất để tác giả tiến hành nghiên cứu và hoàn thành Luận án.

Tác giả xin chân thành cảm ơn các nhà khoa học cùng bạn bè, đồng nghiệp đã cung cấp cho tác giả những tài liệu, thiết bị và các ý tưởng nghiên cứu bổ ích, có giá trị cao.

Đặc biệt, tác giả xin bày tỏ sự biết ơn vô hạn đối với gia đình và những người thân đã luôn thông cảm, động viên, sẻ chia những khó khăn để tác giả có một hậu phương vững chắc tạo sự yên tâm trong quá trình thực hiện luận án.

Tác giả

Phan Thanh Cầu

MỤC LỤC

| | Trang |
|--|--------------|
| LỜI CAM ĐOAN | i |
| LỜI CẢM ƠN | ii |
| MỤC LỤC | iii |
| DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU CÁC ĐẠI LƯỢNG | vii |
| DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU | xi |
| DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ | xiii |
| MỞ ĐẦU | 1 |
| Chương 1 TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU | 5 |
| 1.1. Tổng quan về môi trường đá san hô | 5 |
| 1.1.1. Đặc điểm và địa chất đảo đá san hô | 5 |
| 1.1.1.1. Đặc điểm phân bố địa chất đảo đá san hô tại Trường Sa | 5 |
| 1.1.1.2. Đặc điểm địa tầng | 7 |
| 1.1.2. Đặc điểm thạch học san hô các đảo thuộc quần đảo Trường Sa..... | 8 |
| 1.1.3. Tính chất cơ lý đá san hô tại Trường Sa | 9 |
| 1.1.4. Đặc trưng nền san hô..... | 12 |
| 1.2. Tổng quan về các phương pháp và thiết bị hạ cọc ống thép | 13 |
| 1.2.1. Phương pháp và thiết bị hạ cọc vít ống thép | 13 |
| 1.2.2. Phương pháp và thiết bị hạ cọc ống thép bằng búa va rung | 15 |
| 1.2.3. Phương pháp và thiết bị thi công hạ cọc ống thép bằng búa đóng.. | 16 |
| 1.2.4. Phương pháp khoan xoay hạ cọc ống thép..... | 17 |
| 1.2.5. Bộ công tác kiểu xoay-ép lắp trên máy đào thủy lực..... | 18 |
| 1.2.5.1. Bộ công tác kiểu xoay-ép hạ cọc..... | 18 |
| 1.2.5.2. Cọc ống thép..... | 21 |
| 1.3. Nguyên lý cực đại Pontryagin | 23 |
| 1.3.1. Bài toán điều khiển tối ưu tổng quát | 23 |
| 1.3.2. Nguyên lý cực đại Pontryagin..... | 24 |
| 1.3.3. Nguyên lý cực đại Pontryagin đối với hệ phi ô-tônôm | 27 |
| 1.3.4. Các bước thực hiện giải bài toán điều khiển tối ưu theo nguyên lý cực đại Pontryagin..... | 27 |

| | |
|--|-----------|
| 1.4. Tổng quan các nghiên cứu trong nước, quốc tế có liên quan đến luận án..... | 27 |
| 1.4.1. Các công trình nghiên cứu ở nước ngoài | 27 |
| 1.4.1.1. Mô hình tương tác cọc nền | 27 |
| 1.4.1.2. Mô hình động lực học ống khoan..... | 31 |
| 1.4.2. Các công trình nghiên cứu trong nước | 35 |
| 1.4.2.1. Nghiên cứu về tương tác cọc – nền | 35 |
| 1.4.2.2. Nghiên cứu về thiết bị thi công cọc vít ống thép | 36 |
| Kết luận chương 1 | 38 |
| Chương 2 ĐỘNG LỰC HỌC BỘ CÔNG TÁC KIỂU XOAY-ÉP LẮP TRÊN MÁY ĐÀO THỦY LỰC..... | 39 |
| 2.1. Cơ sở khoa học nghiên cứu động lực học bộ công tác kiểu xoay-ép lắp trên máy đào thủy lực..... | 39 |
| 2.1.1. Các thông số đặc trưng cho chế độ làm việc của bộ công tác..... | 39 |
| 2.1.2. Các thông số động lực học cần xác định của quá trình xoay-ép hạ cọc ống thép | 39 |
| 2.2. Tương tác giữa cọc ống thép với nền san hô khi xoay-ép hạ cọc.... | 40 |
| 2.2.1. Xây dựng mô hình tương tác của cọc ống thép với nền san hô | 40 |
| 2.2.1.1. Mô hình tương tác các loại nền san hô | 40 |
| 2.2.1.2. Phân tích sự khác nhau giữa hạ cọc ống thép vào nền đất với nền san hô..... | 41 |
| 2.2.2. Xây dựng mô hình tính toán các thành phần lực cản | 43 |
| 2.2.2.1. Các giả thiết khi xây dựng mô hình | 43 |
| 2.2.2.2. Xác định lực cản theo phương thẳng đứng tác dụng lên bề mặt cọc ống thép..... | 44 |
| 2.2.2.3. Xác định mô men cản theo phương nằm ngang tác dụng lên bề mặt cọc ống thép..... | 48 |
| 2.2.2.4. Xác định mô men cản cắt gây ra tại răng cắt | 49 |
| 2.2.3. Khảo sát sự thay đổi lực cản và mô men cản theo chiều sâu | 55 |
| 2.2.4. So sánh kết quả tính toán lực cản và mô men cản giữa mô hình lý thuyết với thực nghiệm..... | 57 |
| 2.2.5. Quy luật biến thiên và mối quan hệ giữa các thông số đặc trưng cho chế độ làm việc của bộ công tác xoay-ép hạ cọc | 58 |
| 2.3. Mô hình động lực học bộ công tác kiểu xoay-ép hạ cọc ống thép... | 60 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.1. Các giả thiết xây dựng mô hình động lực học..... | 60 |
| 2.3.2. Mô hình động lực học bộ công tác kiểu xoay-ép | 61 |
| 2.3.3. Thiết lập phương trình vi phân chuyển động | 63 |
| 2.3.4. Xác định các thông số đầu vào | 68 |
| 2.3.4.1. Điều kiện ban đầu | 68 |
| 2.3.4.2. Các tham số của mô hình..... | 68 |
| 2.3.4.3. Các thông số đầu vào..... | 70 |
| Kết luận chương 2 | 71 |
| Chương 3 KHẢO SÁT CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN KHẢ NĂNG LÀM VIỆC, XÁC ĐỊNH THÔNG SỐ LÀM VIỆC HỢP LÝ VÀ KHẢ NĂNG HẠ CỌC CỦA BỘ CÔNG TÁC KIỂU XOAY-ÉP LẮP TRÊN MÁY ĐÀO THỦY LỰC | 73 |
| 3.1. Khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng làm việc của bộ công tác | 73 |
| 3.1.1. Kết quả khảo sát các thông số động lực học | 74 |
| 3.1.2. Khảo sát lực cản theo phương thẳng đứng và mô men cản tác dụng lên ống thép khi xoay-ép hạ cọc..... | 77 |
| 3.1.3. Khảo sát ảnh hưởng của đường kính cọc đến đặc tính chuyển động tịnh tiến của cọc ống thép..... | 78 |
| 3.1.4. Khảo sát ảnh hưởng trọng lượng riêng của nền san hô đến lực cản và mô men cản khi xoay-ép hạ cọc | 79 |
| 3.1.5. So sánh kết quả tính toán vận tốc dẫn tiến ống thép giữa mô hình lý thuyết với thực nghiệm..... | 80 |
| 3.2. Xác định thông số làm việc hợp lý và khả năng hạ cọc của bộ công tác kiểu xoay-ép lắp trên máy đào thủy lực | 81 |
| 3.2.1. Phát biểu bài toán | 81 |
| 3.2.2. Xác định thông số làm việc hợp lý..... | 81 |
| 3.2.2.1. Xây dựng hàm mục tiêu và thuật toán giải..... | 81 |
| 3.2.2.2. Các thông số yêu cầu | 85 |
| 3.2.2.3. Xác định thông số làm việc hợp lý của bộ công tác kiểu xoay-ép lắp trên máy đào thủy lực | 85 |
| 3.2.3. Khảo sát xác định khả năng hạ cọc | 91 |
| 3.2.3.1. Bộ số liệu đầu vào | 91 |
| 3.2.3.2. Kết quả khảo sát khả năng hạ cọc | 92 |

| | |
|---|------------|
| Kết luận chương 3 | 93 |
| Chương 4 NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM | 95 |
| 4.1. Mục tiêu, các thông số làm thực nghiệm và trang thiết bị thực nghiệm 95 | |
| 4.1.1. Mục tiêu nghiên cứu thực nghiệm..... | 95 |
| 4.1.2. Các thông số làm thực nghiệm..... | 95 |
| 4.1.3. Trang thiết bị làm thực nghiệm | 97 |
| 4.1.3.1. Máy cơ sở và bộ công tác | 97 |
| 4.1.3.2. Cọc ống thép..... | 98 |
| 4.1.3.3. Các đầu đo trực tiếp..... | 99 |
| 4.1.3.4. Thiết bị ghi và xử lý tín hiệu | 101 |
| 4.2. Các bước tổ chức thực nghiệm và xử lý kết quả thực nghiệm..... 103 | |
| 4.2.1. Chuẩn bị làm thực nghiệm | 103 |
| 4.2.2. Bố trí các đầu đo và thiết bị đo..... | 104 |
| 4.3. Tiến hành thực nghiệm | 106 |
| 4.3.1. Trình tự tiến hành thực nghiệm..... | 106 |
| 4.3.2. Kết quả đo thực nghiệm | 108 |
| 4.3.3. Xử lý kết quả thực nghiệm | 109 |
| 4.3.3.1. Cơ sở xác định giá trị các tham số thực nghiệm | 109 |
| 4.3.3.2. Đồ thị và phân tích kết quả thực nghiệm..... | 111 |
| Kết luận chương 4 | 114 |
| KẾT LUẬN CHUNG | 115 |
| DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ | 117 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO | 118 |
| PHỤ LỤC | 122 |

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU CÁC ĐẠI LƯỢNG

1. Chữ viết tắt:

| | |
|--------|---------------------------|
| BTCT | Bê tông cốt thép |
| HVKTQS | Học viện Kỹ thuật Quân sự |
| KHCN | Khoa học công nghệ |
| TBCT | Thiết bị công tác |

2. Ký hiệu các đại lượng:

| Ký hiệu | Đơn vị | Ý nghĩa |
|----------|------------------|---|
| b | m | Bề rộng răng cắt |
| c_c | kN | Lực dính kết cấu của san hô với thép |
| c_l | Ns/m | Hệ số giảm chấn nhớt của mối ghép ren |
| c_{2r} | Nms/rad | Hệ số giảm chấn nhớt cụm đầu khoan, ống thép |
| D | m | Đường kính ngoài của cọc ống thép |
| d | m | Đường kính trong của cọc ống thép |
| F_h | kN | Lực cản cắt theo phương ngang |
| F_v | kN | Lực cản cắt theo phương đứng |
| g | m/s ² | Gia tốc trọng trường |
| G | kN | Mô đun đàn hồi loại hai của thép |
| h | m | Chiều sâu của cọc trong đất |
| h_i | m | Chiều dày lớp cắt |
| h_b | m | Chiều cao răng cắt |
| I_p | kgm ² | Mô men quán tính độc cực của tiết diện |
| J_1 | kgm ² | Mô men quán tính của cụm đầu xoay |
| J_2 | kgm ² | Mô men quán tính của cụm ống thép |
| k_l | N/m | Hệ số độ cứng của mối ghép ren |
| k_{2r} | Nm/rad | Hệ số độ cứng chống xoắn của cụm đầu xoay, ống thép |
| K_l | kN | Lực tác dụng lên mặt phẳng trượt |

| | | |
|-----------|---------------------|---|
| K_2 | kN | Lực tác dụng lên răng cắt |
| m_1 | kg | Khối lượng của đầu xoay |
| m_2 | kg | Khối lượng của ống thép |
| M_c | kNm | Tổng mô men cản trên bề mặt cọc ống thép |
| M_s | kNm | Mô men cản trên bề mặt cọc ống thép |
| M_{is} | kNm | Mô men cản trượt ở bề mặt bên trong cọc ống thép |
| M_{sp} | kNm | Mô men cản trượt ở bề mặt bên ngoài cọc ống thép |
| M_t | kNm | Mô men xoay cọc ống thép |
| n | vòng/phút | Tốc độ vòng xoay ống thép |
| $n_{t,r}$ | vòng/phút | Tốc độ vòng xoay của các mô tơ dẫn động |
| N_b | kN | Lực cản tác dụng lên đầu cọc ống thép |
| N_c | kN | Tổng lực cản tác dụng lên cọc ống thép |
| N_{is} | kN | Lực cản theo phương thẳng đứng tác dụng lên thành ngoài cọc ống thép |
| N_s | kN | Lực cản tác dụng lên thành bên trong và bên ngoài ống thép |
| N_{sp} | kN | Lực cản theo phương thẳng đứng do khối san hô bên trong tác dụng lên thành cọc ống thép |
| N_t | kN | Lực dẫn tiến cọc ống thép |
| N_1 | kN | Lực tác dụng lên mặt phẳng cắt do áp lực của các hạt |
| N_2 | kN | Lực tác dụng lên răng cắt do áp lực của các hạt |
| P_t | kW | Công suất mô tơ dẫn tiến cọc |
| P_r | kW | Công suất mô tơ xoay cọc |
| q_b | kN | Cường độ sức kháng mũi cọc ống thép |
| q_t | cm ³ /vg | Lưu lượng riêng của mô tơ dẫn tiến |
| q_{max} | kN | Khả năng chịu lực đầu cọc lớn nhất |
| Q_{max} | N | Lực dẫn động lớn nhất |
| Q_{min} | N | Lực dẫn động nhỏ nhất |
| $Q_{t,r}$ | Lít/phút | Lưu lượng dầu làm việc qua các mô tơ |

| | | |
|------------|-----------------------|---|
| Q_{si} | kN | Lực ma sát dọc trục của đất tác dụng lên bề mặt bên trong cọc |
| Q_{so} | kN | Lực ma sát dọc trục của đất tác dụng lên bề mặt bên ngoài |
| Q_p | kN | Lực cản của đất tác dụng lên đầu bịt cọc |
| Q_w | kN | Lực cản tại mũi cọc |
| r | m | Bán kính trong của cọc ống thép |
| R | m | Bán kính ngoài của cọc ống thép |
| R_t | m | Bán kính bánh sao của hệ dẫn động xích |
| S_1 | kN | Lực trượt do ma sát trong của nền |
| S_2 | kN | Lực trượt do ma sát ngoài của nền |
| t | m | Chiều dày chân cọc |
| T_{max} | Nm | Mô men dẫn động lớn nhất |
| T_{min} | Nm | Mô men dẫn động nhỏ nhất |
| v | m/ph | Vận tốc trượt |
| v_c | m/ph | Vận tốc cắt |
| v_t | m/s | Tốc độ dẫn tiến cọc |
| v_r | m/s | Vận tốc dài trong mặt phẳng nằm ngang |
| $V_{t,r}$ | cm ³ /vòng | Lưu lượng riêng của các mô tơ |
| x_1 | m | Dịch chuyển của đầu xoay |
| x_2 | m | Dịch chuyển của ống thép |
| W_p | kg | Khối lượng đầu bịt cọc |
| W_1 | kN | Lực do áp lực lỗ rỗng tác dụng lên vùng trượt |
| W_2 | kN | Lực do áp lực lỗ rỗng tác dụng lên răng cắt |
| α | Độ | Góc nghiêng răng cắt |
| α_1 | Độ | Góc giữa vận tốc dẫn tiến và vận tốc vòng cọc ống thép |
| β | Độ | Góc trượt |
| γ | Tấn/m ³ | Trọng lượng riêng của san hô |
| δ | Độ | Góc ma sát ngoài |

| | | |
|--------------|-----------------|---|
| δ_s | Độ | Góc ma sát giữa san hô và thép |
| η_h | % | Hiệu suất thủy lực |
| η_m | % | Hiệu suất cơ khí |
| η_q | % | Hiệu suất lưu lượng |
| λ_s | - | Chỉ số cường độ vận tốc |
| ν | - | Hệ số Poisson của san hô |
| ρ | g/cm^3 | Khối lượng riêng của san hô |
| σ_b | N/m | Áp lực do đất tác dụng lên mặt dưới của cọc |
| σ_h | N/m | Ứng suất hữu hiệu theo phương ngang |
| τ_b | N/m^2 | Áp lực ma sát ngang trực bên trong cọc |
| τ_{max} | kN | Lực cản trượt dọc trực lớn nhất |
| τ_s | kN | Lực cản trượt dọc trực tác dụng lên bề mặt ngoài cọc ống thép |
| τ_{sh} | N/m^2 | Áp lực ma sát ngang trực bên ngoài cọc |
| τ_{sv} | N/m^2 | Áp lực ma sát dọc trực |
| φ_1 | rad | Góc xoay của cụm đầu xoay |
| φ_2 | rad | Góc xoay của cụm ống thép |
| ω | rad/s | Vận tốc góc ống thép |
| ω_r | rad/s | Vận tốc góc mô tơ xoay cọc |
| Δ_p | bar | Độ chênh áp của dầu đi qua mô tơ |
| | | |

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

| | Trang |
|---|--------------|
| Bảng 1.1. Phân nhóm thạch học san hô quần đảo Trường Sa | 9 |
| Bảng 1.2. Môđun đàn hồi, hệ số Poisson của san hô | 10 |
| Bảng 1.3. Chỉ tiêu kỹ thuật về cơ lý của các lớp đất đá san hô | 11 |
| Bảng 1.4. Hệ số ma sát của san hô tăng với thép, bê tông..... | 11 |
| Bảng 1.5. Hệ số ma sát trượt giữa thép và san hô cát..... | 11 |
| Bảng 1.6. Hệ số từ biến a và n của vật liệu san hô (theo thuyết già hoá) | 11 |
| Bảng 2.1. Kết quả tính toán lý thuyết giá trị mô men cản M_c và lực cản N_c | 57 |
| Bảng 2.2. So sánh kết quả mô men cản giữa lý thuyết và thực nghiệm | 57 |
| Bảng 2.3. So sánh kết quả lực cản giữa lý thuyết và thực nghiệm | 58 |
| Bảng 2.4. Sự biến thiên N_c và M_c theo α_1 | 60 |
| Bảng 2.5. Thông số của bộ công tác xoay – ép..... | 70 |
| Bảng 2.6. Bảng thông số đầu vào của nền san hô..... | 70 |
| Bảng 2.7. Các thông số động của mô hình động lực học..... | 71 |
| Bảng 2.8. Thông số kết cấu của ống thép | 71 |
| Bảng 3.1. Thông số đầu vào khảo sát các thông số động lực học | 73 |
| Bảng 3.2. So sánh kết quả vận tốc dẫn tiến giữa lý thuyết và thực nghiệm ... | 80 |
| Bảng 3.3. Chế độ làm việc hợp lý của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép trên nền đá san hô (D=200 mm)..... | 87 |
| Bảng 3.4. Chế độ làm việc hợp lý của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép trên nền đá san hô (D=300 mm)..... | 89 |
| Bảng 3.5. Chế độ làm việc hợp lý của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép trên nền đá san hô (D=400 mm)..... | 91 |
| Bảng 3.6. Thông số mô tơ xoay cọc và mô tơ dẫn tiến cọc ống thép | 92 |
| Bảng 4.1. Các thông số vận hành của máy xúc PC 450-6 | 97 |
| Bảng 4.2. Tham số làm việc của bộ công tác xoay – ép..... | 98 |
| Bảng 4.3. Thông số của cọc ống thép dùng cho thí nghiệm | 99 |
| Bảng 4.4. Các thông số cơ bản của đầu đo OEM-511 | 100 |

| | |
|--|-----|
| Bảng 4.5. Các thông số cơ bản của đầu đo R4S-7HD-25, R4S-7HD-50, R4S-7HD-100 | 100 |
| Bảng 4.6. Thông số cơ bản của đầu đo HHT13 | 101 |
| Bảng 4.7. Tính chất cơ lý của san hô chủ yếu ở đảo Trường Sa lớn | 104 |
| Bảng 4.8. Kết quả đo lần 1 | 108 |
| Bảng 4.9. Kết quả đo lần 2 | 108 |
| Bảng 4.10. Kết quả đo lần 3 | 109 |
| Bảng 4.11. Kết quả thực nghiệm giá trị mô men cản xoay (M_c) | 113 |
| Bảng 4.12. Kết quả thực nghiệm giá trị lực cản (N_c) | 114 |

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

| | Trang |
|--|--------------|
| Hình 1.1. Mặt cắt địa chất quần đảo Trường Sa Đông [5]..... | 6 |
| Hình 1.2. Phân lớp địa tầng nền san hô [5]..... | 8 |
| Hình 1.3 . Cọc vít | 13 |
| Hình 1.4. Thiết bị thi công cọc vít ống thép lắp trên máy đào thủy lực | 14 |
| Hình 1.5. Sơ đồ búa va rung hạ cọc ống thép | 15 |
| Hình 1.6. Sơ đồ thiết bị thi công hạ cọc ống thép bằng búa đóng | 16 |
| Hình 1.7. Thiết bị xoay hạ cọc ống thép di chuyển bước | 17 |
| Hình 1.8. Bộ công tác xoay hạ cọc ống thép..... | 19 |
| Hình 1.9. Bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép lắp trên máy đào PC-450 | 20 |
| Hình 1.10. Bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép khi hạ cọc ống thép vào nền | 21 |
| Hình 1.11. Cọc ống thép hạ đầu tiên gắn răng cắt | 22 |
| Hình 1.12. Cọc ống thép hạ tiếp theo..... | 22 |
| Hình 1.13. Áp lực phân bố trên toàn bộ cọc khi thâm nhập vào đất đá..... | 28 |
| Hình 1.14. Sự thay đổi cơ chế thâm nhập và lực cản tác dụng lên cọc | 29 |
| Hình 1.15. Miêu tả lõi đất trong cọc | 30 |
| Hình 1.16. Mô hình động lực học mô tả chuyển động xoắn của ống khoan .. | 32 |
| Hình 1.17. Mô hình hệ thống khoan | 33 |
| Hình 1.18. Mô hình động lực học | 33 |
| Hình 1.19. Mô hình giàn khoan xoay..... | 34 |
| Hình 1.20. Mô hình động lực học hệ thống khoan xoay..... | 34 |
| Hình 1.21. Sơ đồ thiết bị thi công cọc vít theo công nghệ ôm xoay đầu cọc . | 37 |
| Hình 2.1. Mô hình tương tác giữa cọc thép và nền san hô trong quá trình xoay-ép hạ cọc..... | 40 |
| Hình 2.2. Mô hình hóa tương tác cọc ống thép với nền san hô | 42 |
| Hình 2.3. Mô hình tính toán các thành phần lực cản tác dụng lên cọc ống thép | 44 |
| Hình 2.4. Đường trượt ma sát | 46 |
| Hình 2.5. Ứng suất hữu hiệu tác dụng lên ống thép xuyên qua nhiều lớp san hô | 46 |
| Hình 2.6. Sơ đồ bố trí răng cắt | 49 |

| | |
|--|----|
| Hình 2.7. Sơ đồ lực cản tác dụng lên răng cắt..... | 49 |
| Hình 2.8. Sơ đồ tính toán lực cản cắt | 50 |
| Hình 2.9. Lực tác dụng lên lớp cắt..... | 51 |
| Hình 2.10. Các lực tác dụng lên răng cắt | 51 |
| Hình 2.11. Sự thay đổi lực cản theo chiều sâu..... | 55 |
| Hình 2.12. Sự thay đổi mô men cản theo chiều sâu..... | 56 |
| Hình 2.13. Quy luật biến thiên của N_c và M_c theo α_1 | 59 |
| Hình 2.14. Mô hình vật lý bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép | 61 |
| Hình 2.15. Mô hình động lực học bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép | 62 |
| Hình 2.16. Sơ đồ thuật toán giải hệ phương trình vi phân..... | 67 |
| Hình 2.17. Chi tiết ống..... | 69 |
| Hình 2.18. Mối ghép ren | 70 |
| Hình 3.1. Chuyển vị của khâu 1 | 74 |
| Hình 3.2. Chuyển vị của khâu 2 | 74 |
| Hình 3.3. Vận tốc chuyển vị của khâu 1 | 74 |
| Hình 3.4. Vận tốc chuyển vị của..... | 74 |
| Hình 3.5. Chuyển vị góc của khâu 1 | 75 |
| Hình 3.6. Chuyển vị góc của khâu 2 | 75 |
| Hình 3.7. Vận tốc xoay của khâu 1 | 75 |
| Hình 3.8. Vận tốc xoay của khâu 2 | 75 |
| Hình 3.9. Gia tốc dịch chuyển pha của khâu 1 theo thời gian | 76 |
| Hình 3.10. Gia tốc dịch chuyển pha của khâu 2 theo thời gian | 76 |
| Hình 3.11. Gia tốc góc của khâu 1 theo thời gian..... | 76 |
| Hình 3.12. Gia tốc góc của khâu 2 theo thời gian..... | 76 |
| Hình 3.13. Lực cản theo phương thẳng đứng tác dụng lên ống thép | 77 |
| Hình 3.14. Mô men cản tác dụng lên ống thép | 77 |
| Hình 3.15. Ảnh hưởng của đường kính cọc đến dịch chuyển ống thép..... | 78 |
| Hình 3.16. Ảnh hưởng của đường kính cọc đến vận tốc dẫn tiến ống thép.... | 78 |
| Hình 3.17. Sự thay đổi lực cản khi hạ cọc vào các lớp san hô khác nhau | 79 |
| Hình 3.18. Sự thay đổi mô men cản khi hạ cọc vào các lớp san hô khác nhau | 80 |
| Hình 3.19. Đồ thị vận tốc dẫn tiến biến thiên theo thời gian ($D=200$ mm).... | 86 |
| Hình 3.20. Đồ thị tốc độ xoay biến thiên theo thời gian ($D=200$ mm)..... | 87 |
| Hình 3.21. Đồ thị vận tốc dẫn tiến biến thiên theo thời gian ($D=300$ mm).... | 88 |

| | |
|---|-----|
| Hình 3.22. Đồ thị tốc độ xoay biến thiên theo thời gian (D=300 mm)..... | 89 |
| Hình 3.23. Đồ thị vận tốc dẫn tiến biến thiên theo thời gian (D=400 mm).... | 90 |
| Hình 3.24. Đồ thị tốc độ xoay biến thiên theo thời gian (D=400 mm)..... | 90 |
| Hình 3.25. Kết quả tính toán lý thuyết sự phụ thuộc của lực cản (trái) và mô men cản (phải) vào đường kính ống khoan (D=200/300/400 mm) và đặc tính của san hô $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$ (trên) và $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$ (dưới) | 93 |
| Hình 4.1. Nghiên cứu sinh cùng đoàn cán bộ tại vị trí thực nghiệm trong đất liền cầu Mai Lĩnh | 96 |
| Hình 4.2. Nghiên cứu sinh cùng đoàn cán bộ tại vị trí thực nghiệm | 96 |
| Hình 4.3. Bộ công tác lắp trên máy xúc PC- 450 làm thực nghiệm tại đảo Trường Sa lớn..... | 97 |
| Hình 4.4. Cọc ống thép làm thực nghiệm | 98 |
| Hình 4.5. Đầu đo OEM-511 | 99 |
| Hình 4.6. Đầu đo lưu lượng R4S-7HD-25 | 100 |
| Hình 4.7. Đầu đo tốc độ vòng xoay HHT13 | 101 |
| Hình 4.8. Thiết bị ghi và xử lý tín hiệu NI-6009 | 102 |
| Hình 4.9. Máy tính Lenovo cài phần mềm DasyLab 10 | 102 |
| Hình 4.10. Các mô đun xây dựng từ phần mềm DasyLab 10 | 103 |
| Hình 4.11. Sơ đồ đầu nối thiết bị đo vào thiết bị nhận tín hiệu và máy tính | 104 |
| Hình 4.12. Bố trí các đầu đo | 105 |
| Hình 4.13. Sơ đồ cấu trúc các kênh đo áp suất, lưu lượng và tốc độ vòng xoay | 106 |
| Hình 4.14. Thực nghiệm tại đảo Trường Sa Lớn..... | 107 |
| Hình 4.15. Vận hành đo các thông số và kết thúc thực nghiệm | 108 |
| Hình 4.16. Kết quả thí nghiệm đo áp suất và lưu lượng 2 mô tơ xoay và ép | 111 |
| Hình 4.17. Sự thay đổi mô men cản, công suất và vận tốc theo chiều sâu ... | 112 |
| Hình 4.18. Sự thay đổi lực cản và công suất theo chiều sâu..... | 113 |

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Xây dựng công trình biển đảo hiện nay là nhiệm vụ quan trọng hàng đầu trong chiến lược an ninh quốc phòng, giữ gìn biển đảo và toàn vẹn lãnh thổ của Việt Nam. Các công trình biển ven đảo và xa bờ hiện nay khi xây dựng sử dụng phổ biến là dùng móng trọng lực vì vậy rất công, tốn kém. Các phương pháp hạ cọc chủ yếu bao gồm: phương pháp đóng cọc, phương pháp sử dụng búa rung, phương pháp đào trong và phương pháp xoay. Những phương pháp này được lựa chọn căn cứ trên các điều kiện địa chất, thi công, các điều kiện môi trường và khả năng chống chịu cần thiết nhưng không phù hợp với nền san hô ở quần đảo Trường Sa. Căn cứ trên các khảo sát thực tế, việc sử dụng bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép là một giải pháp khả thi cho hệ móng cọc. Khi thi công các công trình biển, yêu cầu đặt ra với thiết bị là phải nhỏ gọn có tính linh hoạt và cơ động cao, hoạt động an toàn, ổn định và hiệu quả, phù hợp với các thiết bị hiện có của các đơn vị thi công trên đảo.

Thiết bị xoay-ép hạ cọc ống thép do nước ngoài chế tạo có tính năng hiện đại, thi công hiệu quả và năng suất cao, tuy nhiên sản phẩm chưa phổ biến ở nước ta do giá thành cao và khó đưa ra đảo vì kích thước lớn. Xuất phát từ nhu cầu cần có thiết bị hạ cọc ống thép trên nền san hô với điều kiện phù hợp của quân đội để xây dựng công trình biển đảo, gần đây, một số nhà khoa học của Học viện Kỹ thuật quân sự đã có những nghiên cứu thiết kế, chế tạo bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép tích hợp vào máy đào thủy lực phục vụ thi công trong điều kiện địa hình nền san hô trên đảo. Các kết quả nghiên cứu bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép được chế tạo tại nhà máy Z49 để thực hiện nhiệm vụ hạ cọc ống thép tại quần đảo Trường Sa tới nay vẫn chưa được công bố. Bên cạnh đó môi trường san hô tại quần đảo Trường Sa cũng có những đặc điểm

riêng biệt so với các khu vực khác trên thế giới. Chính vì vậy **“Nghiên cứu khả năng hạ cọc ống thép trên nền san hô tại đảo Trường Sa của bộ công tác kiểu xoay-ép lắp trên máy đào thủy lực”** nhằm làm cơ sở khoa học cho việc chọn máy thi công, thiết kế mới và khai thác hiệu quả bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép là vấn đề có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu nghiên cứu của luận án là xác định khả năng hạ cọc ống thép với công suất và mô men đã có của bộ công tác xoay-ép hạ cọc vào nền san hô tại khu vực đảo Trường Sa.

3. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép bằng thủy lực được chế tạo tại Nhà máy Z49 (có tốc độ xoay: $5 \div 20$ vòng/phút, tốc độ hạ cọc $0,1 \div 0,8$ m/phút), được lắp trên máy đào thủy lực phục vụ hạ cọc ống thép vào nền san hô tại khu vực đảo Trường Sa.

4. Phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp thống kê, phân tích tổng hợp để xây dựng các mục tiêu, nhiệm vụ và mô hình tính toán của luận án.
- Phương pháp toán học để phân tích xây dựng, giải các bài toán theo mô hình tính toán và xác định chế độ làm việc hợp lý.
- Phương pháp thực nghiệm để đánh giá và rút ra các kết luận theo kết quả nghiên cứu của luận án.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài Luận án

*** Ý nghĩa khoa học**

- Nghiên cứu, xây dựng mô hình tương tác, mô hình động lực học quá trình xoay-ép hạ cọc ống thép. Thiết lập được hệ phương trình vi phân chuyển động, từ đó xác định khả năng làm việc của bộ công tác xoay-ép hạ cọc vào nền san hô tại quần đảo Trường Sa.

- Xác định được các thông số ảnh hưởng đến quá trình làm việc của bộ công tác. Xác định được chế độ làm việc hợp lý để hạ được cọc và xác định độ sâu hạ cọc tối đa của bộ công tác.

*** Ý nghĩa thực tiễn**

- Đã xây dựng được phương pháp đo các thông số động học, động lực học của cơ hệ trong thực nghiệm. Từ đó xác định gián tiếp được các thành phần lực cản của nền san hô tác dụng lên ống thép.

- Kết quả xác định các thông số làm việc hợp lý của bộ công tác xoay-ép hạ cọc làm cơ sở cho quá trình thi công hạ cọc làm việc ổn định, hạ được cọc theo chiều sâu thiết kế, góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng bộ công tác xoay-ép hạ cọc.

6. Tính mới của Luận án

- Nghiên cứu xây dựng được mô hình tính các thành phần lực cản tác dụng lên bộ công tác khi xoay-ép hạ cọc ống thép trên nền san hô.

- Xây dựng được mô hình động lực học cho bài toán hạ cọc ống thép vào nền san hô bằng bộ công tác xoay-ép hạ cọc có tính đến cơ chế tương tác giữa các lớp san hô với cọc ống thép trong quá trình hạ cọc.

- Xây dựng phương pháp xác định thông số làm việc hợp lý và khả năng hạ cọc ống thép với các thông số kỹ thuật đã có của bộ công tác trong điều kiện địa chất nền san hô tại quần đảo Trường Sa.

- Đã xây dựng thực nghiệm lần đầu tiên xác định các thông số khi xoay-ép hạ cọc ống thép trên nền san hô ở Trường Sa.

7. Bố cục của Luận án

Ngoài phần mở đầu, phần kết luận và danh mục các tài liệu tham khảo, phụ lục, các nội dung chính của luận án được chia thành 04 chương sau:

Chương 1. Tổng quan về vấn đề nghiên cứu

Nội dung cơ bản của chương này: Tổng hợp và phân tích về nền san hô, nghiên cứu tổng quan về các phương pháp và thiết bị hạ cọc ống thép, giới thiệu

về bộ công tác xoay ép hạ cọc, phân tích các công trình nghiên về tương tác cọc nền và mô hình động lực học. Từ những nội dung trên xây dựng mục tiêu và nhiệm vụ của luận án.

Chương 2. Động lực học bộ công tác kiểu xoay-ép lắp trên máy đào thủy lực

Trên cơ sở phân tích tổng quan về các công trình nghiên cứu. Tiến hành xây dựng mô hình tương tác tính các thành phần lực cản, xây dựng mô hình động lực học và giải bài toán động lực học làm cơ sở khoa học để tính toán lựa chọn chế độ làm việc hợp lý bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép trên nền san hô.

Chương 3. Khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng làm việc, xác định thông số làm việc hợp lý và khả năng hạ cọc của bộ công tác kiểu xoay-ép lắp trên máy đào thủy lực

Nội dung chương này khảo sát các thông số ảnh hưởng đến chế độ làm việc của bộ công tác. Khảo sát lực cản, mô men cản tác dụng lên ống thép khi thay đổi đường kính cọc và trọng lượng riêng của san hô thay đổi. Trên cơ sở đó, xác định chế độ làm việc hợp lý nhằm xác định khả năng hạ cọc tối đa của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép trên nền san hô ở điều kiện địa chất ở Trường Sa.

Chương 4. Nghiên cứu thực nghiệm

Mục đích của chương này là tiến hành làm thực nghiệm xác định các thông số động lực học của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép vào nền san hô ở đảo Trường Sa. Một số kết quả được sử dụng làm đầu vào cho việc giải bài toán động lực học ở chương 2. Một số kết quả được sử dụng để so sánh giữa tính toán lý thuyết và thực nghiệm nhằm rút ra kết luận về tính sát thực của mô hình động lực học.

Chương 1

TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Tổng quan về môi trường đá san hô

1.1.1. Đặc điểm và địa chất đảo đá san hô

1.1.1.1. Đặc điểm phân bố địa chất đảo đá san hô tại Trường Sa

Cấu trúc địa chất chung của Quần đảo Trường Sa được hình thành do các quần thể san hô phát triển và diệt vong theo các chu kỳ phát triển của lịch sử Trái Đất trong kỷ Đệ Tứ [5]. Phần gốc san hô do nằm dưới, bị nén chặt và tác động của các yếu tố bên ngoài nên quá trình hoá đá diễn ra mãnh liệt, các tinh thể Aragonit hầu hết bị biến tinh thành các tinh thể Canxit nên tạo thành lớp đá san hô có cấu tạo đặc xít, vững chắc, có độ bền cao. Phần trên là cành, nhánh san hô dưới tác dụng của sóng, biển và các tác động khác, phá huỷ thành các vật liệu vụn, rời tích tụ lại, do hình dạng, kích thước rất khác nhau nên độ rỗng rất lớn mặc dù trong các khe hở đã được lấp nhét bằng các vật liệu vụn rời khác (cát, sạn san hô, vỏ các loại sinh vật biển...). Vì vậy, lớp này luôn có trạng thái rời, xốp, gắn kết yếu, khả năng chịu tải không cao. Một phần của đá san hô lộ thiên trên mặt, dưới tác dụng của quá trình phong hoá làm cho san hô bị phá huỷ, thay đổi cả về thành phần và tính chất, tạo nên một lớp cát san hô bao phủ trên bề mặt các đảo, lớp này có bề dày thường mỏng, phân bố không ổn định, có độ rỗng lớn. Do nằm trên cùng và ở một thời gian địa chất cách đây hàng ngàn năm, các bầy chim đến trú ngụ đã tạo nên những lớp phân chim xen lẫn vào lớp này. Chính vì vậy, đá san hô vùng Quần đảo Trường Sa 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.

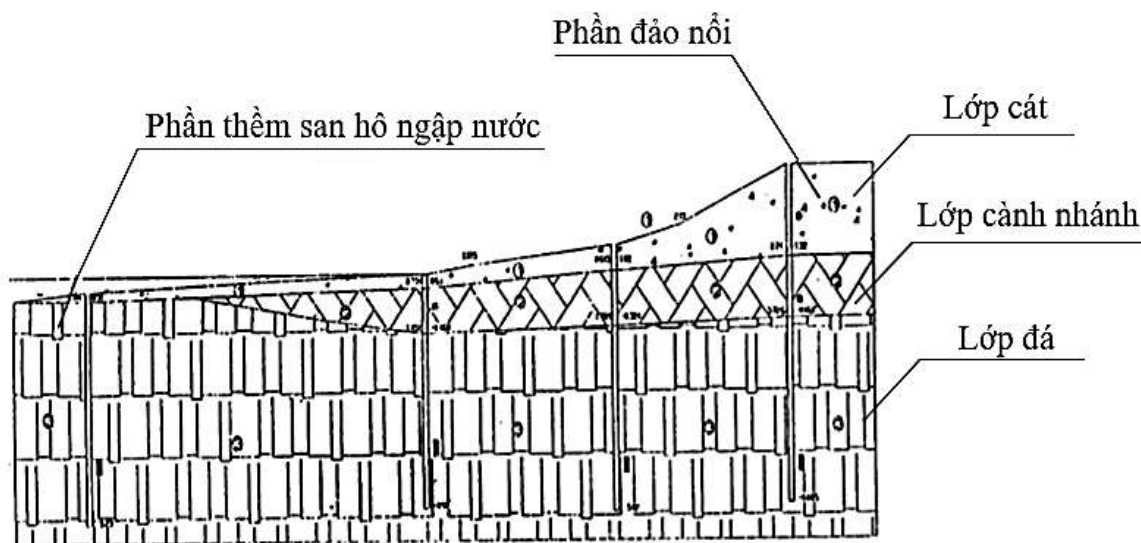
- Đa số các đảo là đảo tích tụ san hô, có nguồn gốc trầm tích, kết quả của quá trình tích tụ và xói mòn.

- Vật liệu chủ yếu là những mảnh vụn của khung cốt san hô, ít vỏ xác chết sinh vật đáy, vật chất hữu cơ giàu photpho.

- Nguồn cung cấp vật liệu chính là khung cốt san hô và sản phẩm biến đổi của nó - đá vôi san hô kết tinh.

Theo kết quả nghiên cứu [1], [5] cấu tạo địa chất của quần đảo Trường Sa theo chiều sâu mũi khoan được khái quát lại như sau:

Về phân bố địa chất ở độ sâu < 20 m, nền địa chất của quần đảo được phân thành 3 lớp chính: Lớp 1 phân bố chủ yếu ở trên các bề mặt đảo nổi ở độ sâu < 3 m, lớp này chủ yếu là cát san hô có kết cấu xốp rời, lớp này chỉ còn lại một ít ở mép nước và ra xa bờ thì mất hẳn, để lộ các thành tạo thuộc lớp thứ hai. Lớp thứ 2 phân bố ở độ sâu < 7 m, thành phần chủ yếu của lớp này là lớp đá san hô cành vụn, san hô cục và các tầng đá san hô mô côi.



Hình 1.1. Mặt cắt địa chất quần đảo Trường Sa Đông [5]

Hầu hết bề mặt đảo được bao phủ bởi một lớp cát san hô không dày lắm, khu vực ngoài thềm do tác động của sóng, lớp cát này không còn nữa để lộ lớp đá san hô cành vụn, san hô cục và các tầng đá san hô mô côi. Ta có thể thấy rõ điều này thông qua các mặt cắt địa chất của một số đảo san hô (Hình 1.1). Theo các mặt cắt này, lớp cát san hô bao phủ hoàn toàn phần nổi của đảo, lớp này chỉ

còn lại một ít ở mép nước và ra xa bờ thì mất hẳn. Theo các tài liệu địa chất, ta có thể khẳng định rằng cấu tạo lớp mặt của các đảo chính là lớp cát san hô vụn, lớp mặt của phần thềm san hô ngập nước là lớp đá san hô, san hô vụn và các tầng san hô mô côi.

1.1.1.2. Đặc điểm địa tầng

Theo [1], [5] chiều sâu (< 10 m) tính từ mặt đảo, qua công tác khoan thăm dò và thí nghiệm, ta có thể nêu đặc điểm của các lớp từ trên xuống dưới như sau:

Lớp số 1: Căn cứ vào các tài liệu khảo sát và các lỗ khoan địa chất, lớp số 1 có thể chia thành hai phụ lớp như sau:

Phụ lớp 1: Bao gồm cát sạn màu vàng, trắng sữa có kết cấu xốp rời, bão hoà nước. Thành phần thạch học là cát san hô được tạo thành trong điều kiện va đập trực tiếp của sóng, gió và các yếu tố thiên nhiên khác. Phạm vi phân bố của lớp này gần khắp khu vực phần nổi của đảo.

Phụ lớp 2: Bao gồm san hô cành mềm màu trắng ngà, đôi chỗ xen kẹp cát sạn. Mức độ gắn kết của lớp này yếu. Phạm vi phân bố của lớp này gần khắp bề mặt đảo. Cao độ mặt lớp và đáy lớp này không đồng đều. Chiều dày lớp biến đổi dao động trong khoảng từ 1 m đến 4 m.

Lớp số 2: Bao gồm san hô tầng cứng, màu trắng sữa, trong lớp này đôi chỗ kẹp san hô cành và cát sạn. Lớp này tương đối cứng. Cao độ mặt lớp biến đổi dao động không lớn lắm, chỉ trong khoảng 2 m. Cao độ đáy lớp và chiều dày của lớp chưa phát hiện được... Gần đây, trong khi thiết kế các công trình trên đảo, đặc biệt là các công trình chống xói lở bảo vệ bờ, lớp này đã được sử dụng làm lớp đặt móng cho công trình và qua quá trình khai thác đã chứng tỏ sự đúng đắn của lựa chọn này.

Qua nghiên cứu và phân tích các kết quả khảo sát, khoan thăm dò và thí nghiệm so sánh với địa tầng phần nông đã có được tại khu vực quần đảo Trường Sa cho thấy về mặt địa chất đối với phần nông các đảo thuộc quần đảo Trường Sa có cấu tạo phân lớp rõ rệt (Hình 1.2).



Hình 1.2. Phân lớp địa tầng nền san hô [5]

1.1.2. Đặc điểm thạch học san hô các đảo thuộc quần đảo Trường Sa

Kết quả nghiên cứu thạch học cho thấy đá vôi san hô gốc dạng khối cỡ hơn, trải qua quá trình thành đá lâu hơn, sâu sắc hơn, tạo nên kiến trúc hạt đồng nhất, xoá nhoà ranh giới giữa khung xương và vật chất lấp đầy lỗ rỗng. Vì thế đá cứng chắc, có độ bền lớn. Đá san hô dạng khung xương lỗ rỗng lớn chúng tỏ chưa trải qua quá trình thành đá cao. Loại này có độ bền thấp, giòn, dễ vỡ vụn và bị phong hoá. Đá vôi vụn san hô gắn kết, đặc biệt là vụn thô gắn kết yếu, có độ bền thấp. Trong các đá san hô vụn kết, loại vụn kết hạt nhỏ như cát sạn kết hoặc cát bột kết san hô gắn kết chắc có độ bền tốt, ít khe nứt và ít bị vỡ vụn. Đá vôi san hô dạng khối tùy theo đặc điểm kiến trúc có độ bền nén một trục ở trạng thái khô gió trong khoảng $70 \div 110 \text{ kG/cm}^2$, còn đá vôi san hô dăm sạn kết có độ bền nén $40 \div 50 \text{ kG/cm}^2$.

Theo [1], [5] phân loại thạch học san hô theo điều kiện thành tạo và các tiêu chí thành phần khoáng vật, cấu tạo và kiến trúc các đá bên trong khung xương san hô khu vực quần đảo Trường Sa phân ra 3 nhóm và 9 kiểu (Bảng 1.1).

Bảng 1.1. Phân nhóm thạch học san hô quần đảo Trường Sa

| TT | Nhóm | Kiểu | Cấu tạo và kiến trúc đá |
|----|---|------|--|
| 1 | Nhóm đá san hô gốc | 1 | Đá vôi san hô dạng khối đặc xít, cấu trúc sợi mầu, kiến trúc hạt không đều hoá đá mạnh. |
| | | 2 | Đá vôi san hô dạng khung xương lấp đầy có cấu tạo khảm da báo, kiến trúc sợi, tinh thể và hạt hoá đá trung bình. |
| | | 3 | Đá vôi san hô khung xương hình toả tia đồng tâm, kiến trúc sợi - vi hạt độ rỗng thấp. |
| | | 4 | Đá vôi san hô dạng khung xương, nền khung xương có kiến trúc vi tinh, ẩn tinh và sợi ẩn tinh, độ rỗng lớn đang được lấp đầy bởi vật liệu hỗn hợp canxit, vụn san hô và ôxít sắt ($Fe_2O_3.nH_2O$). |
| | | 5 | Đá vôi san hô ẩn tinh - vi hạt dạng khối đặc xít giàu tảo lục. |
| 2 | Nhóm đá vôi san hô vụn cơ học gắn kết chắc | 1 | Đá vôi san hô vụn cơ học gắn kết chắc, liên quan đến hoạt động của sóng và quá trình gắn kết ngoại sinh. |
| 3 | Nhóm đá vôi san hô vụn cơ học bờ rời và gắn kết yếu | 1 | Đá vôi san hô vụn gắn kết yếu. |
| | | 2 | Trầm tích vụn san hô hiện đại. |
| | | 3 | Trầm tích san hô vụn chứa hạnh nhân silic kích thước lớn. |

1.1.3. Tính chất cơ lý đá san hô tại Trường Sa

Qua các nghiên cứu về đặc điểm hình thành và tính chất cơ lý của các lớp đá san hô trong cấu trúc địa chất của các đảo [2] có thể thấy rằng:

- Trên cùng của đảo là lớp cát, sạn san hô lẫn ít cuội, sỏi nhỏ, ở trạng thái vụn rời. Các lớp này được tạo thành từ sản phẩm phong hoá các đá san hô tảng, khối và cành, nhánh san hô dưới tác dụng của các yếu tố tự nhiên (sóng, gió, nhiệt độ, không khí, các hoạt động hoá học, vi sinh vật...). Ở phần trung tâm

đảo, bề dày lớp dao động từ 0,5 ÷ 1,6 m, riêng phần rìa đảo lớp cát này tạo thành bãi, có chiều dày lớn hơn nhưng chúng liên tục bị sóng vận chuyển quanh đảo và bị mài mòn (đảo Trường Sa lớn).

- Nằm dưới lớp một là lớp cãnh, nhánh san hô lẫn ít cát, sạn. Lớp này không đồng nhất về hình dạng, kích thước và mức độ gồ ghề nên có độ rỗng rất lớn (40 – 50 %). Theo chiều sâu, sự phân bố về thành phần vật chất không đồng đều, phần trên của lớp thỉnh thoảng gặp san hô ở dạng cục, tầng kích thước 10 ÷ 15 cm (ở độ sâu 4.0 ÷ 5.0 m).

- Dưới cùng là lớp đá san hô (san hô gốc). Đây là phần gốc của san hô khi chết hoá đá (các khoáng vật Aragonit biến thành khoáng vật canxit – hoá đá). Có kết cấu đặc xít, vững chắc, nên khả năng chịu lực khá cao.

Kết quả thí nghiệm tính chất cơ lý cho thấy độ bền vững của đá tăng lên theo chiều sâu trong mỗi nhịp. Giữa các nhịp trong 1 khu tính chất cơ lý không có nhiều thay đổi. Trong điều kiện ngập nước, đá san hô đã bị mềm hoá, nên khả năng chịu lực kém hơn [2].

Theo [1], [5] Tính chất cơ lý của san hô được đặc trưng bởi cường độ kháng nén, mô đun đàn hồi E, hệ số Poisson ν , hệ số mềm hóa, độ hút nước, độ rỗng, khối lượng thể tích, khối lượng riêng, hệ số ma sát của san hô với một số loại vật liệu, cũng như lực ma sát giữa cọc và nền san hô. Tính chất cơ lý của nền san hô được thể hiện trên bảng 1.2, bảng 1.3, bảng 1.4, bảng 1.5, bảng 1.6.

Bảng 1.2. Mô đun đàn hồi, hệ số Poisson của san hô

| Đảo | Tĩnh (Thí nghiệm mẫu) | | Động (Thí nghiệm nền) | |
|-------------|---|-------------|---|---------------|
| | $E_t \times 104$ (kG/cm ²) | ν_t | $E_d \times 104$ (kG/cm ²) | ν_d |
| Song Tử Tây | 1,12 ÷ 3,79 | 0,23 ÷ 0,17 | 0,184 ÷ 3,38 | 0,267 ÷ 0,465 |
| Sinh Tồn | 0,31 ÷ 2,10 | 0,28 ÷ 0,14 | - | - |

Bảng 1.3. Chỉ tiêu kỹ thuật về cơ lý của các lớp đất đá san hô

| Đảo | Lớp | Khối lượng thể tích [g/cm ³] | | Khối lượng riêng [g/cm ³] | Cường độ kháng nén [kG/cm ²] | | Hệ số mềm hoá |
|---------------|-------------|--|---------|---------------------------------------|--|---------|---------------|
| | | Khô | Bão hòa | | Khô | Bão hòa | |
| Trường Sa Lớn | Cát san hô | 1,463 | 1,671 | 2,807 | | | |
| | San hô khối | 2,062 | 2,257 | 2,505 | 119,75 | 85,73 | 0,88 |
| Song Tử Tây | Cát san hô | 1,255 | 1,314 | 2,753 | | | |
| | San hô khối | 1,971 | 2,230 | 2,441 | 117,01 | 87,78 | 0,75 |
| Sinh Tồn | Cát san hô | 1,250 | 1,320 | 2,767 | | | |
| | San hô khối | 1,975 | 2,232 | 2,450 | 89,510 | 83,09 | 0,93 |

Bảng 1.4. Hệ số ma sát của san hô tăng với thép, bê tông

| Đảo | Bê tông | Thép |
|-------------|---------|-------|
| Song Tử Tây | 0,430 | 0,292 |
| Sinh Tồn | 0,452 | 0,358 |

Bảng 1.5. Hệ số ma sát trượt giữa thép và san hô cát

| Loại san hô | Hệ số ma sát trượt với thép | |
|--------------|-----------------------------|----------------|
| | Khi bề mặt khô | Khi bề mặt ướt |
| Kiểu cát kết | 0,383 | 0,341 |

Bảng 1.6. Hệ số từ biến a và n của vật liệu san hô (theo thuyết già hoá)

| TT | Tên đảo | n | a |
|----|----------------|--------|----------|
| 1 | Trường Sa Lớn | 3,6372 | 0,001113 |
| 2 | Trường Sa Đông | 3,7080 | 0,001413 |
| 3 | Song Tử Tây | 3,7072 | 0,001430 |
| 4 | Sinh Tồn | 3,6940 | 0,000863 |

1.1.4. Đặc trưng nền san hô

Nền san hô khác với nền đất đá ở sự hình thành, đá được tạo ra từ khi trái đất hình thành, nền đất được hình thành từ quá trình phong hóa khoáng vật và đá. San hô là các sinh vật biển, các cá thể này tiết ra cacbonat canxi (đá vôi) để tạo bộ xương cứng, khi sống chúng có khung vỏ và nhân, khi san hô chết tạo thành lỗ rỗng trong khung vỏ san hô, sóng gió có thể làm vỡ một bộ phận của chúng, nhưng những mảnh vụn đó lại lấp đầy khoảng trống trong “rừng san hô” làm cho chúng càng thêm chắc chắn. Cùng với xương của các sinh vật khác, chúng tích tụ lại thành những tảng đá ngầm và hình thành đảo san hô mọc thẳng đứng trong biển. Như vậy nền san hô được hình thành bởi vật liệu hữu cơ từ khung cốt san hô và kèm theo một ít vỏ xác sinh vật và vật chất hữu cơ giàu photpho [1]. Do đó đặc trưng của nền san hô là vật liệu rời, giòn, độ rỗng lớn, lớp đá san hô tương đối cứng, đặc trưng sức kháng cắt của nền san hô gồm có góc ma sát trong và lực dính biểu kiến [4].

Nền san hô là một yếu tố chính rất quan trọng trong bài toán xoay-ép hạ cọc ống thép khi thi công cọc tại Trường Sa. Tính chất cơ lý và cấu trúc của san hô sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến việc xác định các thành phần lực cản lên cọc ống thép. Ở nước ta chưa có công trình nào nghiên cứu chi tiết xác định cơ chế tương tác giữa cọc ống thép với san hô cũng như xây dựng mô hình san hô dưới tác dụng của lực động. Đặc tính động của nền san hô được đặc trưng bởi áp lực nền, chiều sâu hạ cọc, tính chất cơ lý của từng lớp san hô. Các loại san hô khác nhau, các thông số của lực động khác nhau thì cơ chế tương tác của san hô với cọc ống thép (tại vùng xung quanh cọc) cũng khác nhau, do đó giá trị lực cản động của san hô lên cọc ống thép cũng khác nhau.

Nhận xét: Từ những đặc điểm về thành phần cấu trúc của các lớp san hô như đã nêu ở trên, có thể rút ra một số nhận xét sau:

- Nhìn chung địa chất bề mặt của đảo chủ yếu là cát, sỏi, sạn, cành nhánh san hô màu xám trắng có độ rỗng lớn (trong đó tỷ lệ cát/san hô cành khoảng 3/4), môi trường có thể coi là đồng nhất và đặc trưng cho lớp địa chất bề mặt của các đảo san hô. Vật liệu san hô rời trên bề mặt đảo (cát san hô, san hô cành vụn) có tính chất gần giống như cát vụn;

- San hô là vật liệu giòn, quan hệ ứng suất – biến dạng gần tuyến tính, liên kết giữa nền san hô và kết cấu có tính chất một chiều (nền san hô chỉ chịu nén, không chịu kéo). Nền san hô phân lớp, trong đó mỗi lớp nền là vật liệu đồng nhất, đẳng hướng, đàn hồi tuyến tính;

- Lớp đá san hô phân bố ở độ sâu > 7 m, lớp này chủ yếu là san hô gốc tảng cứng. Lớp này tương đối cứng và thường được sử dụng làm lớp đặt móng cho công trình.

1.2. Tổng quan về các phương pháp và thiết bị hạ cọc ống thép

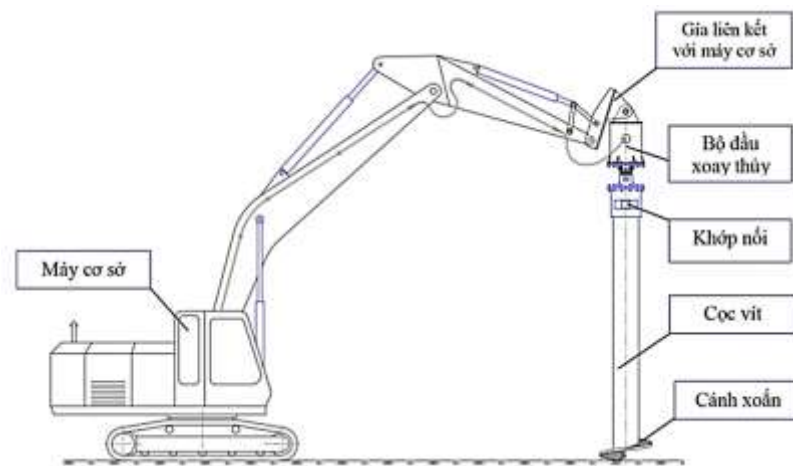
1.2.1. Phương pháp và thiết bị hạ cọc vít ống thép

Cọc vít Nippon steel (NS) Eco-Pile (Hình 1.3) là cọc ống thép được hàn cánh xoắn ở mũi cọc và hạ bằng phương pháp xoay, giúp dễ dàng thi công, tạo khả năng chịu lực cao và sức kháng nhổ lớn. Trong quá trình thi công, máy chính sẽ xoay cọc và lưỡi cắt ở biên sẽ đào và ép cọc vào nền đất giống như đóng vít vào gỗ.



Hình 1.3 . Cọc vít

Cọc vít NS Eco-Pile có thể áp dụng cho cọc đường kính 100 - 1600 mm và chiều dày thép từ 6 - 25,4 mm, đường kính cánh xoắn có thể áp dụng từ 1,5 đến 2,0 lần đường kính của cọc ống thép, đường kính cánh xoắn tối đa là 2400 mm, độ sâu xuyên cọc tối đa là 70 m; khả năng chịu tải lớn hơn cọc khoan nhồi nhờ vào lưỡi cắt cánh xoắn ở mũi cọc.



Hình 1.4. Thiết bị thi công cọc vít ống thép lắp trên máy đào thủy lực

Cọc vít NS Eco-Pile có ưu điểm được triển khai thi công trong điều kiện diện tích thi công hẹp, chiều rộng cần thiết cho thi công của cọc vít chỉ khoảng từ 8 - 10 m, trong trường hợp dùng máy xoay ống vách và chỉ cần 6 m nếu dùng loại máy kiểu cột dẫn. Phương pháp thi công móng cọc dùng cọc vít NS Eco-Pile có thiết bị thi công rất ít, máy chính là máy xoay ống vách và chỉ có một cầu bánh xích phục vụ cho máy này thi công cọc (Hình 1.4).

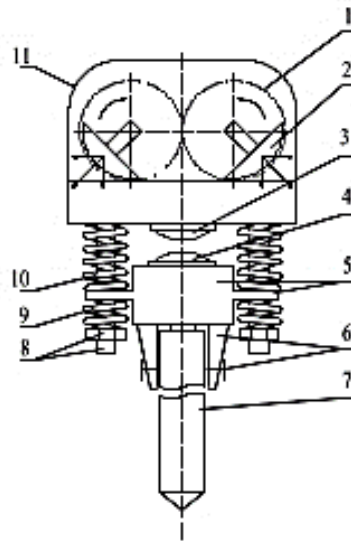
Bên cạnh đó, công nghệ này sẽ giảm tiếng ồn, độ rung chấn thấp, không gây ô nhiễm môi trường, không có đất thải, không ảnh hưởng đến nước ngầm, giảm thiểu được lượng xe máy thi công, khả năng thi công nhanh, từ đó đem lại hiệu quả kinh tế cao cho các dự án, thân thiện với môi trường. Tuy nhiên phương pháp vít cọc chỉ phù hợp với thi công trên nền đất, nếu nền gặp vật liệu cứng như đá, bê tông... thì hiệu quả hạ cọc sẽ bị hạn chế do lực cản của nền tác dụng lên cánh vít ở đầu cọc.

1.2.2. Phương pháp và thiết bị hạ cọc ống thép bằng búa va rung

Việc áp dụng búa rung để chìm cọc đã được áp dụng từ lâu tại các công trường xây dựng cầu, hồ móng lớn. Búa rung có thể hạ được cọc ván thép, cọc thép ống hoặc ống rỗng trong thi công cọc cát xử lý nền yếu. Búa rung được phân loại theo nguyên lý hoạt động như sau:

- Búa rung thuần túy: Chỉ tạo ra lực rung thuần túy truyền xuống đầu cọc, được thiết kế để chuyên đóng cọc có lực cản nhỏ như cọc ván thép hay cọc thép hình với chiều dài đến 20 m.

- Búa va rung: Có đặc điểm là tận dụng phần rung động tạo ra lực đập tập trung truyền qua đế và đập lên đầu búa, lực đóng cọc chủ yếu là lực xung kích. Ngoài công dụng hạ cọc như các búa rung khác, búa va rung còn có thể dùng để nhổ các cọc ván thép, cọc thép (Hình 1.5)



Hình 1.5. Sơ đồ búa va rung hạ cọc ống thép

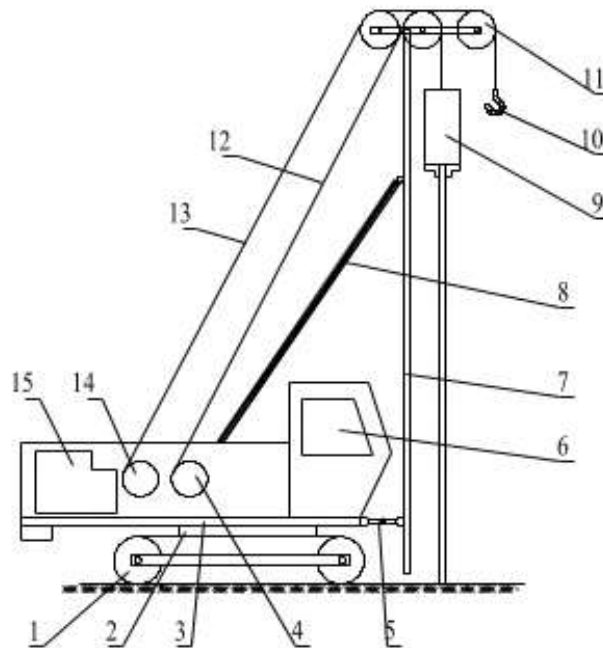
1 - Cặp bánh răng trụ; 2 - Quả lệch tâm; 3 - Búa; 4 - Đế; 5 - Đế búa và tai búa; 6 - Dẫn hướng và kẹp cọc; 7 - Cọc thép; 8 - Bu lông và ê cu thay đổi tần số; 9 - Bôn lò xo đỡ dưới; 10 - Bôn lò xo đỡ trên; 11 - Vỏ che

Nguyên lý làm việc của búa rung là lợi dụng lực gây rung của đĩa lệch tâm hoặc trục lệch tâm sinh ra để truyền lực ép vào cọc. Khi bộ phận này làm việc, cọc dao động rất nhanh theo chiều dọc với tần số $f = 400 - 2500$ lần/phút, biên

độ $A = 10 - 35$ mm, truyền dao động cho đất, từ đó phá hủy mối liên kết giữa các phần tử đất dẫn đến lực ma sát giữa cọc và đất giảm đi, đồng thời làm giảm lực kháng đầu cọc. Mặt khác trọng lượng bản thân của cọc và búa sẽ làm cọc lún xuống thâm nhập vào nền.

Với phương pháp hạ cọc thép bằng búa rung thiết bị nhỏ gọn dễ dàng thi công tác tại các công trường chật hẹp như: trung tâm thành phố, góc hẹp, cầu cống..., giảm thời gian thi công, sử dụng được ở nhiều địa hình, không ảnh hưởng đến các công trình xung quanh, giảm khả năng vỡ rạn đầu cọc, hoạt động không gây tiếng ồn và ô nhiễm môi trường. Tuy nhiên cần đến nhiều công cụ máy móc và chỉ phù hợp với nền đất yếu, khi gặp nền cứng dễ gây phá hủy cọc và hiệu quả hạ cọc bị hạn chế.

1.2.3. Phương pháp và thiết bị thi công hạ cọc ống thép bằng búa đóng



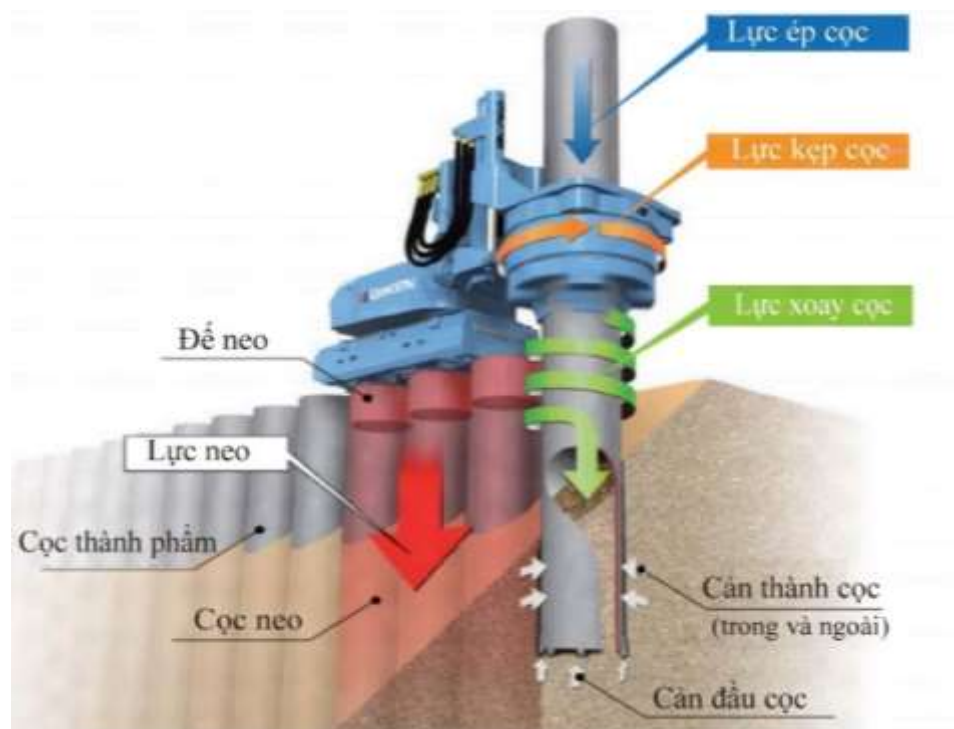
Hình 1.6. Sơ đồ thiết bị thi công hạ cọc ống thép bằng búa đóng

1 - Cơ cấu di chuyển; 2 - Cơ cấu xoay; 3 - Bàn xoay; 4 - Cơ cấu nâng hạ móc cầu; 5 - Thanh giằng ngang; 6 - Cabin; 7 - Giá búa; 8 - Thanh giằng xiên; 9 - Đầu búa; 10 - Móc cầu; 11 - Cụm pully đầu giá búa; 12 - Cáp nâng hạ móc cầu; 13 - Cáp nâng hạ và khởi động đầu búa; 14 - Cơ cấu nâng hạ đầu búa; 15 - Động cơ

Các búa đóng cọc được sử dụng gồm búa diesel, búa thủy lực, búa rơi tự do. Nguyên lý làm việc của thiết bị này là dùng lực xung kích và trọng lượng của búa tác dụng vào đầu cọc để hạ cọc vào nền (Hình 1.6).

Thiết bị thi công này thường gây tiếng ồn, gây ô nhiễm, gây chấn động rất lớn, ảnh hưởng đến môi trường xung quanh và làm hỏng các công trình lân cận... do đó phương pháp đóng cọc thường bị cấm áp dụng ở trong thành phố, thị xã, khu vực đông dân cư... Hơn nữa, với đất tốt, có thể không đóng được cọc xuống vì đầu cọc thường bị vỡ, méo, v.v... tốc độ đóng chậm nên năng suất đóng cọc không cao. Phương pháp này được sử dụng để đóng những cọc gỗ, cọc thép, cọc bê tông cốt thép loại nhỏ, cọc ống có đường kính nhỏ hơn hoặc bằng 45 cm và các loại ván dài không quá 8 m.

1.2.4. Phương pháp khoan xoay hạ cọc ống thép



Hình 1.7. Thiết bị xoay hạ cọc ống thép di chuyển bước

Khoan xoay là phương pháp dùng lực tĩnh nên không làm ảnh hưởng đến địa chất quanh cọc, cũng như các công trình và nền quanh khu vực thi công [6], [22]. Có hai phương pháp khoan xoay điển hình là: Khoan xoay kiểu dao động

và khoan xoay kiểu xoay tròn. Với phương pháp kiểu dao động: ống thép (ống vách) với chân cắt phía dưới được kẹp chặt và xoay dao động ($\pm 25^\circ$) bởi các xy lanh thủy lực với mô men xoắn từ $166 \div 835$ kNm, lực ép từ $153 \div 725$ kN. Các ống thép được nối với nhau bằng các khớp nối đặc biệt để đạt được độ khoan sâu cần thiết. Lực ép thẳng đứng và mô men dao động có thể giữ không đổi hoặc điều chỉnh trong quá trình khoan. Với thiết bị khoan kiểu xoay tròn, ống thép xoay tròn 360° theo một chiều nhất định với mô men xoay $185 \div 420$ kNm và lực ép từ $189 \div 375$ kN. Với phương pháp này, do xoay tròn liên tục nên tốc độ khoan nhanh và khi khoan qua tầng đá san hô thì ma sát trên ống thép nhỏ hơn đáng kể (Hình 1.7), thêm vào đó trên mũi cọc ống thép có bố trí các răng cắt để phá vỡ nền đá san hô trong quá trình xoay-ép dẫn tiến cọc vào nền.

Nhận xét: Trong các phương pháp thi công hạ cọc vào nền thì phương pháp xoay kiểu xoay tròn ống thép là phù hợp với điều kiện thi công hạ cọc ống thép trên nền san hô. Khi hạ cọc ống thép đến tầng san hô tăng cứng, các răng cắt bố trí ở mũi cọc sẽ cắt san hô tạo thành một hình vành khăn để giảm lực cản và bảo vệ cọc không bị biến dạng trong quá trình hạ cọc vào nền. Chính vì vậy luận án tập trung nghiên cứu bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép trên nền san hô.

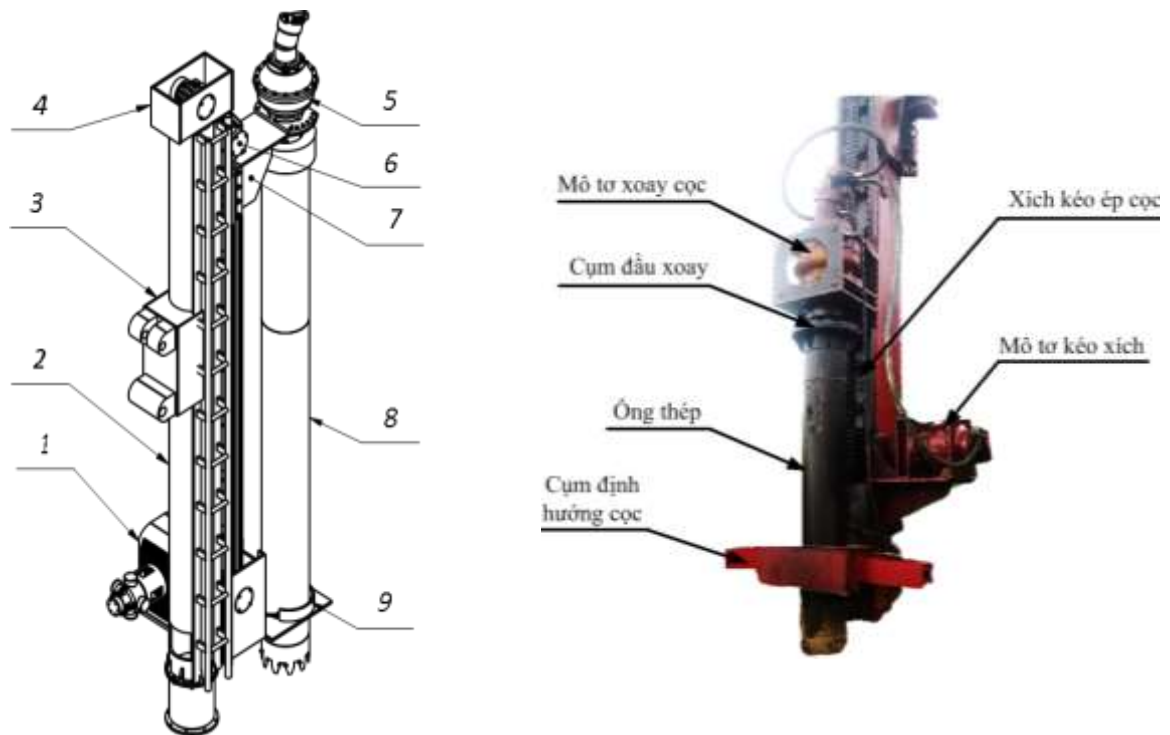
1.2.5. Bộ công tác kiểu xoay-ép lắp trên máy đào thủy lực

1.2.5.1. Bộ công tác kiểu xoay-ép hạ cọc

Bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép là sản phẩm của đề tài KHCN độc lập cấp Nhà nước mã số ĐTĐL.CN-17/15, trong đó TS Trần Hữu Lý - HVKTQS chủ trì đề tài nhánh 3 về “Nghiên cứu thiết kế và chế tạo thử nghiệm bộ công tác xoay hạ cọc ống thép phù hợp với điều kiện ở khu vực Trường Sa” (Hình 1.8), đề tài đã được nghiệm thu tháng 3/2019 đạt kết quả xuất sắc và đăng ký kết quả thực hiện đề tài Khoa học Công nghệ tháng 8/2019 số 2019.73.037/KQ-KHCN.

Bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép được nghiên cứu tích hợp lên xe cơ sở là máy xúc thủy lực bánh xích để tận dụng nguồn thủy lực của máy và khả

năng cơ động ở địa hình phức tạp ở đảo san hô (Hình 1.9). Bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép bên cạnh khả năng hạ cọc tương đương với máy hạ cọc chuyên dụng khác, khi cần thiết có thể thay thế bộ công tác xoay-ép hạ cọc bằng thiết bị công tác khác như gầu xúc, búa đục, đầu cắt,... để phục vụ công tác xây dựng công trình, đáp ứng đa dạng yêu cầu công việc khi thi công ngoài đảo. Mặt khác, xe cơ sở bánh xích có thể làm việc cả trên cạn, dưới nước ở độ sâu nhỏ hoặc đặt trên xà lan để thi công ở độ sâu lớn nên tính cơ động cao, phù hợp với điều kiện thi công tại các đảo ở Trường Sa.



Hình 1.8. Bộ công tác xoay hạ cọc ống thép

1- Cụm dẫn động xích; 2 - Cụm giá đỡ; 3 - Cụm lắp cần máy xúc; 4- Cụm đỉnh cần; 5 - Cụm dẫn động xoay cọc ; 6 - Hộp trục xích trên; 7- Cụm rãnh trượt và giá lắp động cơ; 8 - Cọc thép; 9 - Cụm định hướng cọc ống thép.

Bộ công tác xoay-ép hạ cọc thép bao gồm các cụm chính sau:

- Cụm giá đỡ

Cụm giá đỡ gồm 2 đốt làm bằng thép uốn và được liên kết với nhau bằng các bu lông qua mặt bích. Nó được lắp lên cần máy đào và được điều chỉnh

nâng hạ bằng cần máy đào. Trên cụm giá đỡ có lắp giá đỡ để lắp cụm dẫn động xích nâng hạ cọc thép. Đồng thời có lắp 2 rãnh ray trượt để di chuyển toàn bộ cụm cọc và cụm dẫn động cọc di chuyển lên xuống.

- Cụm dẫn động xích nâng hạ

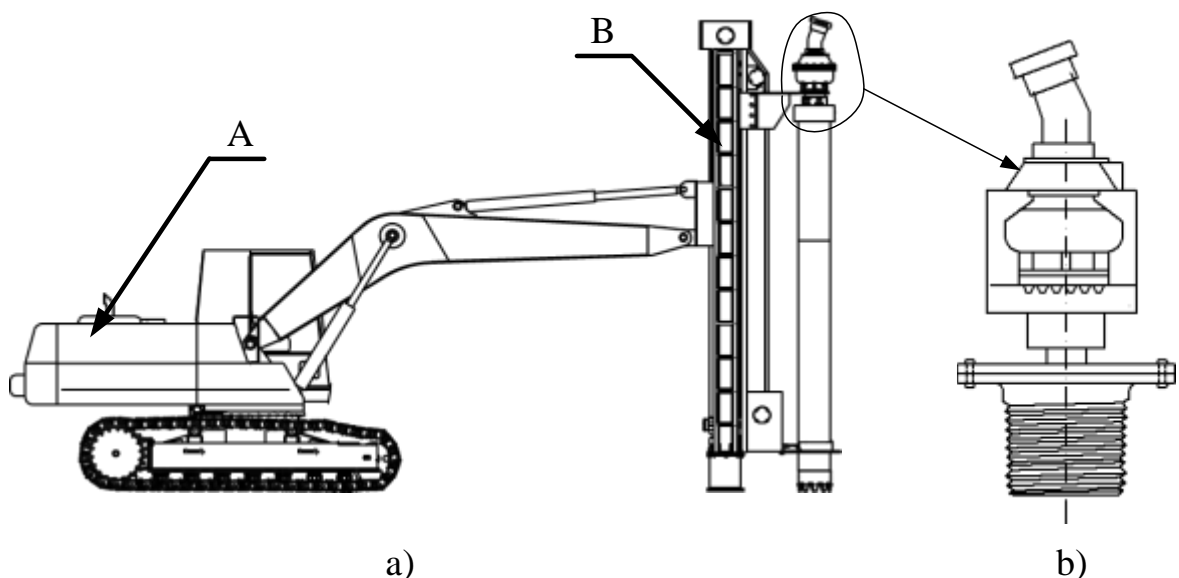
Bao gồm hộp giảm tốc hành tinh và mô tơ thủy lực lấy nguồn từ đường dầu chờ trên cần máy xúc. Khi làm việc nó sẽ tạo ra mô men để dẫn động trực xích chủ động. Từ đó nâng hạ và tạo ra lực ép dẫn động cọc thép.

- Cụm dẫn động xoay cọc

Cụm dẫn động xoay cọc bao gồm mô tơ thủy lực và hộp giảm tốc được gắn trên giá trượt và di chuyển dọc thân cần giá đỡ nhờ xích kéo.

- Cụm định hướng cọc ống thép

Cụm kẹp cần được gắn trên cần giá đỡ để giữ và định vị cọc thép khi hạ cọc. Lực giữ cọc được tạo ra nhờ 2 xy lanh được bố trí 2 bên và lấy nguồn dầu trích qua van phân phối từ đường dầu chung với cụm dẫn động xích nâng hạ.



Hình 1.9. Bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép lắp trên máy đào PC-450

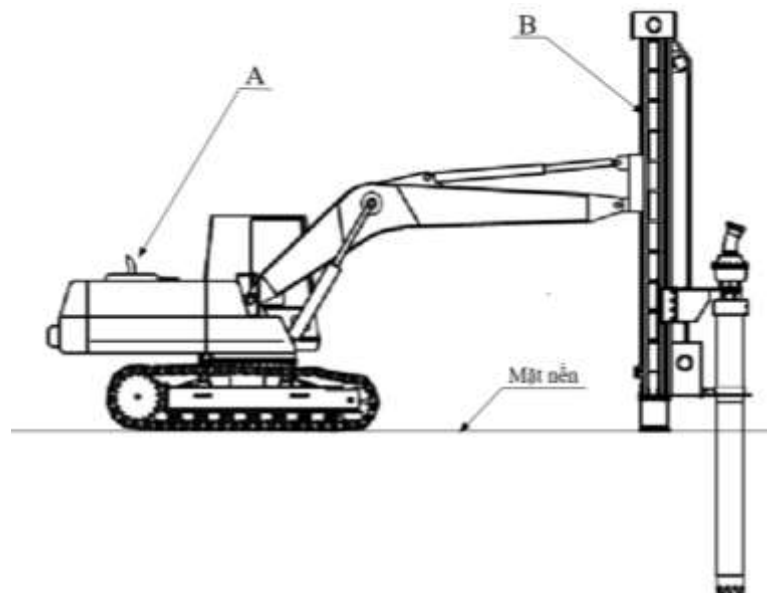
A - Máy cơ sở; B- Bộ công tác;

a) Bộ công tác lắp trên máy đào thủy lực; b) Mô tơ và đầu xoay ống thép

Trình tự làm việc bộ công tác xoay hạ cọc ống thép

- Bước 1: Tập kết máy và cọc đến vị trí cần thi công hạ cọc thép.
 - Bước 2: Định vị máy thi công hạ cọc, đảm bảo máy ổn định trong quá trình làm việc.
 - Bước 3: Lắp chốt cọc số 1 vào thiết bị.
 - Bước 4: Nâng hạ, xoay và dẫn tiến cọc đến vị trí chuẩn bị hạ cọc.
 - Bước 5: Xoay hạ chốt cọc số 1.
 - Bước 6: Tháo đầu nối ra khỏi chốt cọc đã hạ .
 - Bước 7: Điều khiển cần máy xúc để đưa thiết bị ra ngoài để lắp chốt cọc 2 lên thiết bị.
 - Bước 8: Điều khiển đưa thiết bị và chốt cọc 2 vào vị trí kết nối với chốt cọc 1.
 - Bước 9: Xoay hạ chốt cọc 1 và 2
- Cứ tiếp tục như vậy với các chốt cọc tiếp theo.

Khi đã đủ chiều sâu cọc cần thi công thì tháo đầu nối ra khỏi chốt cuối và đưa máy, thiết bị đến vị trí mới.



Hình 1.10. Bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép khi hạ cọc ống thép vào nền

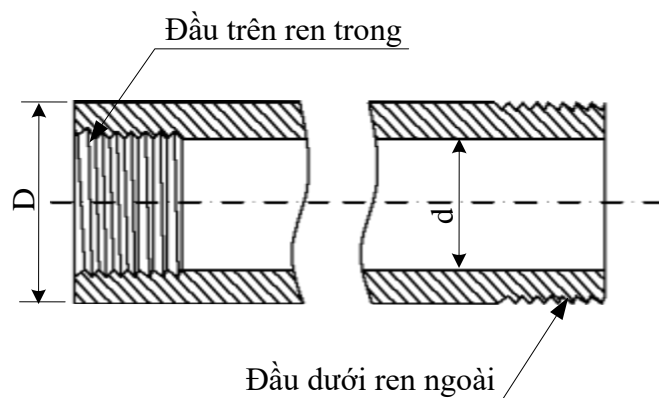
1.2.5.2. Cọc ống thép

Cọc ống thép có đường kính ngoài $D = 300$ mm, mỗi đoạn ống thép có chiều dài $l = 3000$ mm, cọc ống thép hạ thứ nhất có thể bịt đầu hay không bịt

đầu. Trong luận án sử dụng loại cọc ống thép không bịt đầu, cọc ống thép hạ đầu tiên một đầu có gắn 16 răng cắt bố trí trên một mặt phẳng hình 1.11 (đường kính ngoài của răng cắt lớn hơn đường kính ngoài của ống thép 10 mm), đầu còn lại có ren trong để lắp ống tiếp theo, các ống thép tiếp theo hai đầu có ren để nối các đốt cọc ống thép (một đầu có ren trong, một đầu có ren ngoài) (Hình 1.12).



Hình 1.11. Cọc ống thép hạ đầu tiên gắn răng cắt



Hình 1.12. Cọc ống thép hạ tiếp theo

1.3. Nguyên lý cực đại Pontryagin

1.3.1. Bài toán điều khiển tối ưu tổng quát

Cho hệ thống được mô tả bởi hệ phương trình vi phân trạng thái

$$\frac{dy}{dx} = \underline{y}' = \underline{f}(\underline{y}, \underline{u}, x), \text{ trong đó vector hàm } \underline{f}(\underline{y}, \underline{u}, x) \text{ trơn theo } \underline{y}, \underline{u} \quad (1.1)$$

với trạng thái đầu \underline{y}_0 , tiêu chuẩn tối ưu

$$J(\underline{y}, \underline{u}) = \int_0^{x_f} f_0(\underline{y}, \underline{u}, x) dx \rightarrow \min \quad (1.2)$$

và lớp các điều khiển cho phép $\underline{u} \in U$. Hãy xác định điều khiển $\underline{u}^* \in U$ sao cho \underline{u}^* thoả mãn phương trình trạng thái và các điều kiện của hệ thống đồng thời phiếm hàm mục tiêu đạt giá trị nhỏ nhất $J(\underline{u}^*) \leq J(\underline{u})$. Khi đó \underline{u}^* được gọi là điều khiển tối ưu, quỹ đạo tương ứng $\underline{y}^*(x)$ là quỹ đạo tối ưu, giá trị $J^* = J(\underline{u}^*)$ là giá trị tối ưu của mục tiêu.

Để giải bài toán điều khiển tối ưu có thể áp dụng ba phương pháp điều khiển tối ưu:

- Phương pháp biến phân
- Phương pháp quy hoạch động Bellman
- Phương pháp điều khiển tối ưu theo nguyên lý cực đại của Pontryagin.

Tùy thuộc vào từng đối tượng cụ thể để lựa chọn phương pháp điều khiển tối ưu theo chất lượng điều khiển mong muốn.

Phương pháp biến phân cổ điển chỉ áp dụng được đối với bài toán tối ưu khi điều khiển $\underline{u}(x)$ không bị ràng buộc, hoặc ràng buộc với miền U hở. Bài toán xác định profile tốc độ dẫn tiến và tốc độ xoay tối ưu cọc ống thép có biến điều khiển u_{tr}, u_{br} bị ràng buộc nằm trong khoảng $[0, 1]$.

Phương pháp quy hoạch động Bellman phù hợp với những bài toán có thời gian xác định, nhưng do cách tính lượng tử hóa, chia thành các bước tính nhỏ,

nên nhược điểm khối lượng tính toán lớn. Bài toán xác định profile tốc độ dẫn tiến và tốc độ xoay tối ưu cọc ống thép thời gian xoay ép cọc chưa biết nên sử dụng phương pháp này để giải bài toán chưa phù hợp.

Trong bài toán tìm tốc độ dẫn tiến và tốc độ xoay tối ưu cọc ống thép, tác giả sử dụng nguyên lý cực đại của Pontryagin (Pontryagin's Maximum Principle - PMP) là phù hợp, vì thời gian xoay ép cọc ống thép chưa biết.

1.3.2. Nguyên lý cực đại Pontryagin

Nguyên lý cực đại Pontryagin là điều kiện cần của điều khiển tối ưu áp dụng được đối với bài toán có ràng buộc trên điều khiển, tức là $\underline{u}(x)$ có thể nằm bên trong hoặc trên biên của miền U kín.

Nguyên lý cực đại Pontryagin được phát biểu đối với các loại bài toán khác nhau. Sau đây PMP được xét với một số loại bài toán thường gặp [9].

Xét hệ động lực được mô tả bởi hệ phương trình vi phân cấp 1:

$$\frac{dy}{dx} = \underline{f}(\underline{y}, \underline{u}, x) \quad (1.3)$$

Với $\underline{y} \in \mathbb{R}^n, \underline{u} \in \mathbb{R}^m, \underline{f} \in \mathbb{R}^n$.

Đây là hệ phi ô-tônôm vì phương trình vi phân mô tả hệ thống có chứa khoảng cách x dạng tường minh.

Điều kiện biên: $\underline{y}(0) = \underline{y}_0, \underline{y}(x_f) = \underline{y}_f; 0 \leq x \leq x_f$.

trong đó: x_f là khoảng cách điều khiển, $\underline{y}(0)$ là trạng thái ban đầu, và $\underline{y}(x_f)$ là trạng thái cuối được cho trước hoặc không cố định.

Tiêu chuẩn tối ưu có dạng:

$$J(\underline{u}) = \int_0^{x_f} f_0(\underline{y}, \underline{u}, x) dx \rightarrow \min \quad (1.4)$$

Bài toán đặt ra là xác định điều khiển $\underline{u}(x) \in U$ và quỹ đạo $\underline{y}(x)$ tương ứng sao cho hệ được chuyển từ trạng thái đầu $\underline{y}(0)$ đến trạng thái cuối \underline{y}_f và thỏa mãn tiêu chuẩn tối ưu (1.4).

Ta đưa vào các biến:

- Biến trạng thái phụ

$$\frac{dz}{dx} = f_0(\underline{y}, \underline{u}, x); z(0) = 0 \quad (1.5)$$

hay
$$z(x) = \int_0^x f_0(\underline{y}, \underline{u}, \tilde{x}) d\tilde{x} \quad (1.6)$$

Khi đó phiếm hàm mục tiêu (1.4) có thể viết dưới dạng:

$$J = z(x_f) \quad (1.7)$$

- Biến phụ:
$$y_{n+1} = x \quad (1.8)$$

khi đó
$$\frac{dy_{n+1}}{dx} = 1 \quad (1.9)$$

- Biến trạng thái mở rộng:

$$\underline{\tilde{y}} = (y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n \ x)^T = (\underline{y}^T, x)^T = (\underline{y}^T, y_{n+1})^T \quad (1.10)$$

$$\underline{\hat{y}} = (z \ y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n \ x)^T = (z \ y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n \ y_{n+1})^T = (z, \underline{\tilde{y}}^T)^T \quad (1.11)$$

- Biến liên hợp (hoặc biến đồng trạng thái):

$$\underline{\tilde{p}} = (p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n \ p_{n+1})^T = (\underline{p}^T, p_{n+1})^T \quad (1.12)$$

Phương trình (1.3) có dạng:

$$\frac{d\underline{\tilde{y}}}{dt} = \underline{\tilde{f}}(\underline{\tilde{y}}, \underline{u}) \quad (1.13)$$

trong đó

$$\underline{\tilde{f}}(\underline{\tilde{y}}, \underline{u}) = \left(\underline{f}(\underline{y}, \underline{u}, x)^T, 1 \right)^T = \left(\underline{f}(\underline{y}, \underline{u}, y_{n+1})^T, 1 \right)^T \quad (1.14)$$

Hệ phương trình vi phân (1.3) và hàm mục tiêu (1.4) có thể viết dưới dạng

$$\begin{cases} \frac{dz}{dx} = f_0(\underline{y}, \underline{u}, y_{n+1}) \\ \frac{dy}{dx} = f(\underline{y}, \underline{u}, y_{n+1}) \\ \frac{dy_{n+1}}{dx} = 1 \end{cases} \quad (1.15)$$

hay có dạng

$$\frac{d\underline{\hat{y}}}{dx} = \underline{\hat{f}}(\underline{\hat{y}}, \underline{u}) \quad (1.16)$$

trong đó

$$\underline{\hat{f}}(\underline{\hat{y}}, \underline{u}) = \left(f_0, \underline{\tilde{f}}(\underline{\tilde{y}}, \underline{u})^T \right)^T = \left(f_0, \underline{f}(\underline{y}, \underline{u}, x)^T, 1 \right)^T \quad (1.17)$$

Các điều kiện đầu của phương trình vi phân (1.15):

$$\underline{\hat{y}} = \left(0 \quad \underline{y}_0 \quad 0 \right)^T \quad (1.18)$$

Ta xây dựng hàm Hamilton:

$$H(\underline{\tilde{y}}, \underline{u}, \underline{\tilde{p}}) = -f_0(\underline{y}, \underline{u}, x_{n+1}) + \cdots + p_n f_n(\underline{y}, \underline{u}, x_{n+1}) + p_{n+1} = -f_0 + \underline{\tilde{p}}^T \underline{\tilde{f}} \quad (1.19)$$

Vecto biến đồng trạng thái $\underline{\tilde{p}}$, có thể chọn bởi

$$\frac{d\underline{\tilde{p}}}{dx} = - \left(\frac{\partial H}{\partial \underline{\tilde{y}}} \right)^T = \left(\frac{\partial f_0}{\partial \underline{\tilde{y}}} \right)^T - \underline{\tilde{p}}^T \frac{\partial \underline{\tilde{f}}}{\partial \underline{\tilde{y}}}(\underline{\tilde{y}}, \underline{u}) \quad (1.20)$$

hoặc dưới dạng

$$\begin{cases} \frac{dp_k}{dx} = - \frac{\partial H}{\partial y_k} = - \sum_{i=1}^n p_i \frac{\partial f_i}{\partial y_k}(\underline{y}, \underline{u}, x) + \frac{\partial f_0}{\partial y_k}(\underline{y}, \underline{u}, x) & (k=1, 2, \dots, n) \\ \frac{dp_{n+1}}{dx} = - \sum_{i=1}^n p_i \frac{\partial f_i}{\partial x}(\underline{y}, \underline{u}, x) + \frac{\partial f_0}{\partial x}(\underline{y}, \underline{u}, x) \end{cases} \quad (1.21)$$

Phương trình (1.21) được gọi là phương trình Euler - Lagrange.

1.3.3. Nguyên lý cực đại Pontryagin đối với hệ phi ôtonôm

Điều kiện cần để điều khiển tối ưu $\underline{u} = \underline{u}^*$ đưa hệ thống từ trạng thái đầu $\underline{y}(0)$ đến trạng thái cuối \underline{y}_f theo quỹ đạo tối ưu tương ứng \underline{y}^* để phiếm hàm mục tiêu đạt giá trị nhỏ nhất là tồn tại vectơ đồng trạng thái $\underline{\tilde{p}}^*(x)$ không đồng nhất bằng không, sao cho hàm Hamilton mở rộng $H(\underline{\tilde{y}}, \underline{u}, \underline{\tilde{p}})$ đạt cực đại theo \underline{u}^* :

$$H(\underline{\tilde{y}}, \underline{u}^*, \underline{\tilde{p}}) = \max_{u \in U} H(\underline{\tilde{y}}, \underline{u}, \underline{\tilde{p}}) \quad (1.22)$$

hay

$$\underline{u}^* = \arg \max_{u \in U} H(\underline{\tilde{y}}, \underline{u}, \underline{\tilde{p}}) \quad (1.23)$$

1.3.4. Các bước thực hiện giải bài toán điều khiển tối ưu theo nguyên lý cực đại Pontryagin

- Bước 1: Thiết lập phương trình vi phân trạng thái dạng (1.3)
- Bước 2: Lập tiêu chuẩn tối ưu dạng (1.4)
- Bước 3: Lập hàm Hamilton dạng (1.19)
- Bước 4: Lập phương trình Euler – Lagrange (1.20)
- Bước 5: Lập phương trình vi phân mục tiêu bằng cách đặt biến phụ $z(x)$ với điều kiện đầu $z(0) = 0$ theo (1.5)

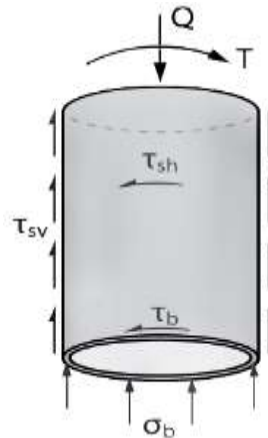
- Bước 6: Giải hệ hỗn hợp phương trình vi phân điều khiển (phương trình vi phân trạng thái, phương trình Euler – Lagrange, phương trình vi phân mục tiêu) với điều kiện biên. Số các phương trình vi phân bằng số các điều kiện biên.

1.4. Tổng quan các nghiên cứu trong nước, quốc tế có liên quan đến luận án

1.4.1. Các công trình nghiên cứu ở nước ngoài

1.4.1.1. Mô hình tương tác cọc nền

Theo [22] Ewa Hazla đã đưa ra mô hình tương tác giữa thân ống khoan với môi trường đất đá trong quá trình xoay-ép hạ cọc vào nền (Hình 1.13).



Hình 1.13. Áp lực phân bố trên toàn bộ cọc khi thâm nhập vào đất đá

Áp lực σ_b được tính như sau:

$$\sigma_b = \frac{Q_{max} + Q_{min}}{\pi D t} \quad (1.24)$$

trong đó:

σ_b – Áp lực do đất tác dụng lên mặt dưới của cọc (N/m);

Q_{max} – Lực dẫn động lớn nhất (N);

Q_{min} – Lực dẫn động nhỏ nhất (N);

t – Chiều dày chân cọc;

D – Đường kính ngoài của cọc (m).

Áp lực ma sát dọc trục τ_{sv} được tính như sau:

$$\tau_{sv} = \frac{-Q_{min}}{2\pi D h} \quad (1.25)$$

trong đó:

τ_{sv} – Áp lực ma sát dọc trục (N/m²);

h – Chiều sâu của cọc trong đất (m).

Áp lực ma sát ngang trục bên ngoài cọc τ_{sh} được tính như sau:

$$\tau_{sh} = \frac{T_{min}}{\pi D^2 h} \quad (1.26)$$

trong đó:

τ_{sh} – Áp lực ma sát ngang trục bên ngoài cọc (N/m²);

T_{min} – Mô men dẫn động nhỏ nhất (Nm).

Áp lực ma sát ngang trục bên trong cọc τ_b được tính như sau:

$$\tau_b = \frac{2(T_{max} - T_{min})}{\pi D^2 t} \quad (1.27)$$

trong đó:

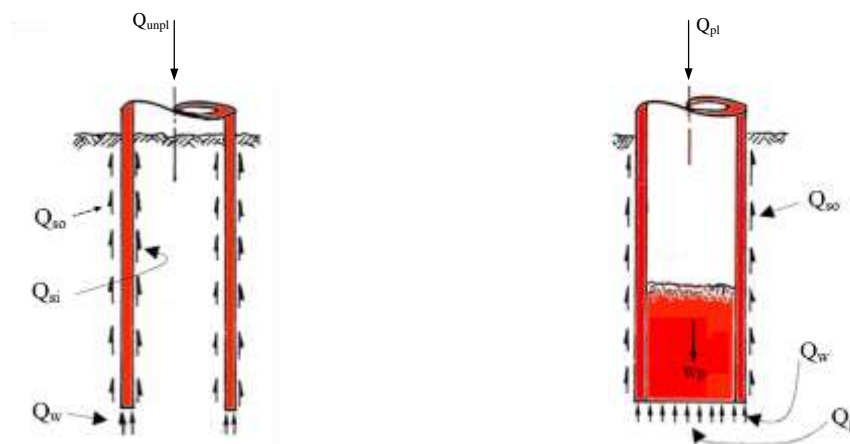
τ_b – Áp lực ma sát ngang trục bên trong cọc (N/m²);

T_{max} – Mô men dẫn động lớn nhất (Nm).

Tác giả Ewa Hazla chỉ tính đến áp lực ma sát của nền bên ngoài và đầu mũi cọc, đây là cơ sở để tính toán lực cản và mô men cản. Trong nghiên cứu này chưa tính lực cản và mô men cản cũng như chưa đề cập đến lực cản của khối đất đá tác dụng lên bên trong thành cọc ống thép trong quá trình hạ cọc, mũi ống thép không bố trí các răng cắt nên chưa tính đến lực cản cắt khi xoay hạ cọc vào nền.

Nghiên cứu ép cọc về ảnh hưởng của bịt đầu cọc đến khả năng thâm nhập của cọc vào nền, các tác giả David J. White và các cộng sự đã nghiên cứu sự tương tác cọc-nền của quá trình cọc thâm nhập vào nền (Hình 1.14) [19].

Q_{si}, Q_{so} - lực ma sát dọc trục của đất tác dụng lên bề mặt bên trong và bên ngoài cọc; Q_w - lực cản tại mũi cọc; Q_p - lực cản của đất tác dụng lên đầu bịt cọc; w_p - khối lượng đầu bịt cọc.



a) Thâm nhập không bịt đầu

b) Thâm nhập bịt đầu

Hình 1.14. Sự thay đổi cơ chế thâm nhập và lực cản tác dụng lên cọc

- Tải trọng ngưỡng phá hủy đất khi không bịt đầu Q_{unpl} :

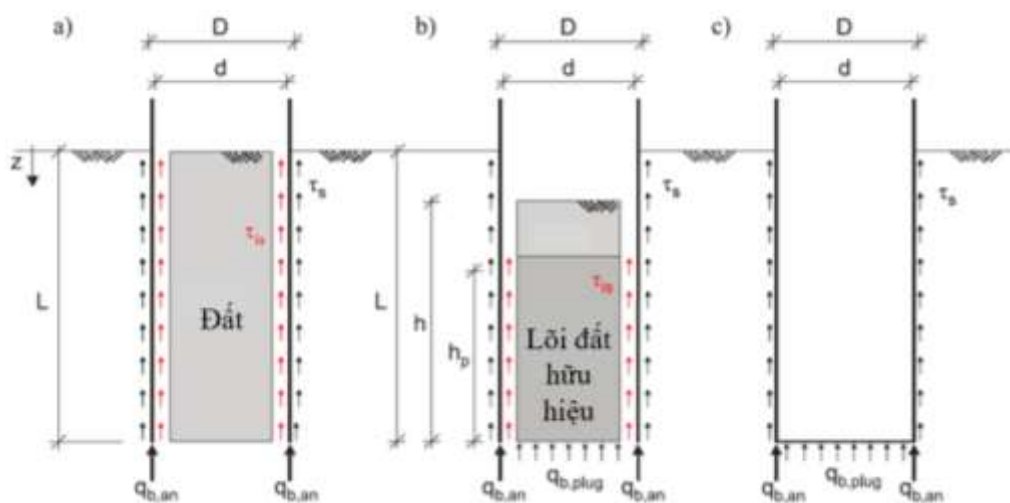
$$Q_{unpl} = Q_{so} + Q_{si} + Q_w \quad (1.28)$$

- Tải trọng ngưỡng phá hủy đất khi bịt đầu Q_{pl} :

$$Q_{pl} = Q_{so} + Q_w + Q_p - W_p \quad (1.29)$$

Ở nghiên cứu này các tác giả tính đến các lực cản ma sát của thành cọc, lực cản đầu cọc và lực cản tác dụng vào đầu bịt cọc. Mục đích của kết quả nghiên cứu làm cơ sở cho thiết kế cọc thép có đủ độ cứng, chiều dày thành cọc để ép cọc vào nền và chịu tải trọng công trình tương ứng với từng loại nền và tải trọng công trình khác nhau. Tuy nhiên, nghiên cứu này chỉ tính toán tương tác cọc-nền cho máy ép cọc theo chuyên dịch thâm nhập vào nền mà chưa tính đến mô men cản của nền tác dụng lên cọc.

Theo [18] Christian Moormann và nnk đã nghiên cứu mô phỏng ảnh hưởng của lõi đất trong cọc ống thép không bịt đầu, tính đến tính chất của đất trong quá trình ép cọc. Các tác giả đã mô tả sự hình thành của lõi đất trong ống thép không bịt đầu phụ thuộc vào các yếu tố khác nhau, đã thể hiện sự thâm nhập của đất vào trong lòng ống thép, sự hình thành của lõi đất, ứng suất và lực cản trong quá trình ép cọc (Hình 1.15)



Hình 1.15. Miêu tả lõi đất trong cọc
a - lõi điền đầy, b - lõi điền một phần, c – không có lõi.

Trong đất rời, công thức tính lực cản trượt dọc trục tác dụng lên bề mặt ngoài cọc ống thép ở độ sâu z cho trước và khả năng chịu lực của đầu ống thép

$$\tau_s = \beta \sigma'_{v0}(z) \leq \tau_{max} \quad (1.30)$$

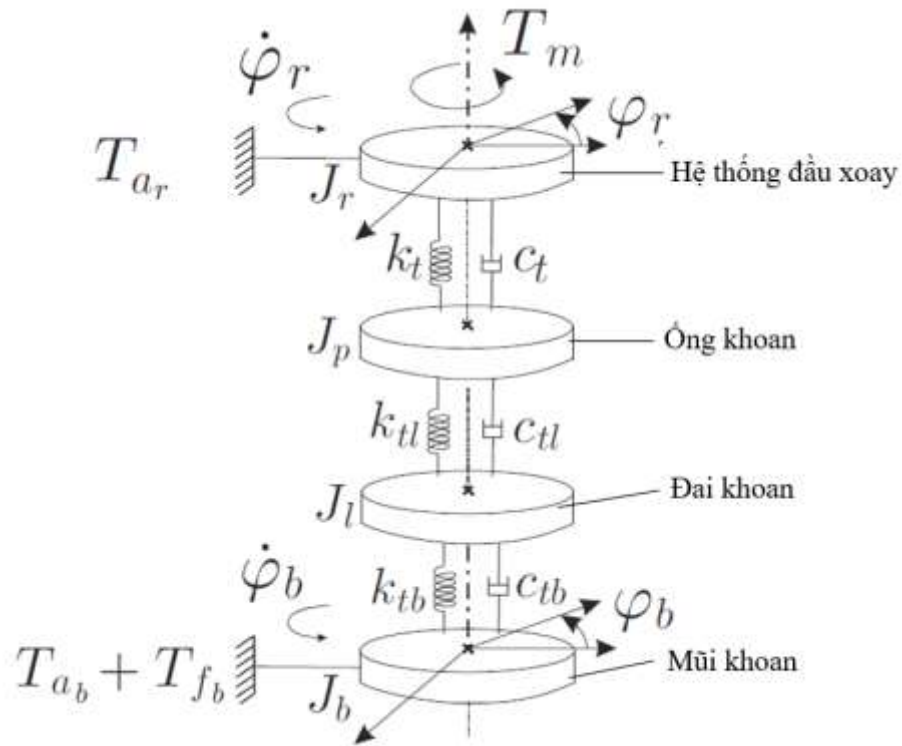
$$q_b = N_q \sigma'_{v0}(z) \leq q_{max} \quad (1.31)$$

trong đó: β - hệ số ma sát dọc trục, $\sigma'_{v0} = \gamma_{sub} \cdot z$, γ_{sub} - trọng lượng chìm của đất, z - độ sâu dưới mặt đất, τ_{max} - lực cản trượt dọc trục dọc trục lớn nhất, N_q - hệ số khả năng chịu lực không thứ nguyên và q_{max} - khả năng chịu lực đầu cọc lớn nhất.

Trong nghiên cứu này các tác giả đã mô phỏng sự tương tác và tính chất phức tạp của nền đất trong quá trình ép cọc, nghiên cứu tính đến lực cản bên trong và bên ngoài cọc ống thép, sự ảnh hưởng của đất tác dụng lên cọc khi không bịt đầu cọc và bịt đầu cọc. Mục đích của nghiên cứu này làm cơ sở để thiết kế tính toán cọc đủ khả năng chịu lực của cọc ống thép trong quá trình ép cọc thâm nhập vào nền theo chiều sâu thiết kế. Tuy nhiên do cọc thâm nhập vào nền chỉ theo một chuyển động dịch chuyển dọc trục thâm nhập nên các tác giả chỉ tính đến các lực cản theo phương dọc trục.

1.4.1.2. Mô hình động lực học ống khoan

Nghiên cứu mô hình động lực học khoan ống thép (khoan giếng dầu) đã được nhiều nhà khoa học trên thế giới quan tâm và đạt được những thành tựu to lớn, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn cao, làm cơ sở cho việc thiết kế, chế tạo và hoàn thiện các thiết bị khoan ống thép, phục vụ cho việc khai thác cũng như thi công các công trình. Trong công trình nghiên cứu hạn chế chế độ trượt và dính mũi khoan của ống khoan giếng dầu, tác giả Eva M. Navarro-López đã đưa ra mô hình động lực học 4 bậc tự do (Hình 1.16) [21].



Hình 1.16. Mô hình động lực học mô tả chuyển động xoắn của ống khoan

Trong đó bao gồm bốn phần tử: 1) hệ thống đầu xoay (J_r); 2) ống khoan (J_p); 3) vòng đai khoan (J_l); 4) mũi khoan (J_b). Các quán tính được liên kết với nhau bằng lò xo tuyến tính với độ cứng chống xoắn (k_t, k_{tl}, k_{tb}) và cản nhớt (c_t, c_{tl}, c_{tb}). Mô-men cản nhớt tại hệ thống truyền động phía trên (T_{ar}) và tại mũi khoan (T_{ab}). Mô-men cản xoắn ma sát khô (T_{fb}) tại mũi khoan.

Phương trình chuyển động của hệ như sau:

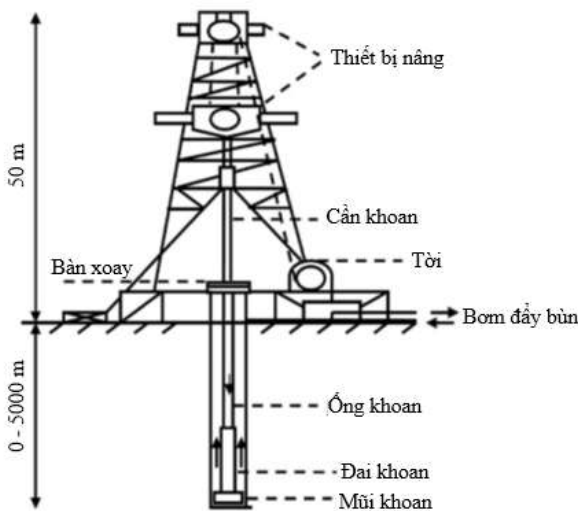
$$\begin{aligned}
 \ddot{\varphi}_r &= -\frac{c_t}{J_r}(\dot{\varphi}_r - \dot{\varphi}_p) - \frac{k_t}{J_r}(\varphi_r - \varphi_p) + \frac{T_m - T_{ar}}{J_r}(\dot{\varphi}_r) \\
 \ddot{\varphi}_p &= -\frac{c_t}{J_p}(\dot{\varphi}_r - \dot{\varphi}_p) - \frac{k_t}{J_p}(\varphi_r - \varphi_p) - \frac{c_{tl}}{J_p}(\dot{\varphi}_p - \dot{\varphi}_l) - \frac{k_{tl}}{J_p}(\varphi_p - \varphi_l) \\
 \ddot{\varphi}_l &= -\frac{c_{tl}}{J_l}(\dot{\varphi}_p - \dot{\varphi}_l) - \frac{k_{tl}}{J_l}(\varphi_p - \varphi_l) - \frac{c_{tb}}{J_l}(\dot{\varphi}_l - \dot{\varphi}_b) - \frac{k_{tb}}{J_l}(\varphi_l - \varphi_b) \\
 \ddot{\varphi}_b &= -\frac{c_{tb}}{J_b}(\dot{\varphi}_l - \dot{\varphi}_b) - \frac{k_{tb}}{J_b}(\varphi_l - \varphi_b) - \frac{T_b(\mathbf{x})}{J_b}
 \end{aligned} \quad (1.32)$$

Với $\varphi_i, \dot{\varphi}_i$ $i \in \{r, p, l, b\}$ dịch chuyển góc và vận tốc góc của các phần tử ống khoan tương ứng. T_m là mô-men xoắn từ động cơ điện. $T_m = u$, với u hàm điều khiển đầu vào. $T_{a_r} = c_r \dot{\varphi}_r$ với c_r hệ số cản nhớt; \mathbf{x} véc tơ suy rộng được viết như sau:

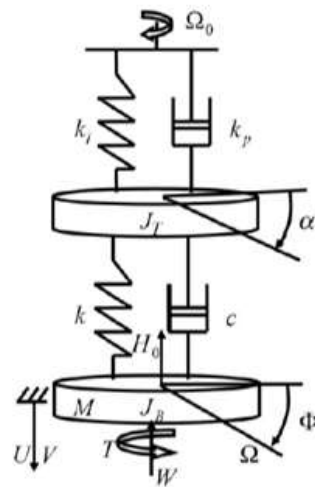
$$\mathbf{x} = (\dot{\varphi}_r, \varphi_r - \varphi_p, \dot{\varphi}_p, \varphi_p - \varphi_l, \dot{\varphi}_l, \varphi_l - \varphi_b, \dot{\varphi}_b)^T = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)^T \quad (1.33)$$

Nghiên cứu của Eva M. Navarro-L'opez đã mô hình hóa chuỗi khoan ống khoan giếng dầu bốn bậc tự do. Ở nghiên cứu này tác giả chỉ đề cập đến dịch chuyển vận tốc góc và gia tốc góc chuyển động xoay của các phần tử của chuỗi khoan, tính đến các thành phần mô men cản nhớt và ma sát khô tại mũi khoan của hệ thống ống khoan. Tác giả chưa đề cập đến sự dịch chuyển thâm nhập vào nền của ống khoan, các thành phần ma sát dọc trục do bùn khoan gây ra, lực cản của đá tại đầu mũi khoan, lực cản cắt của các răng cắt trong quá trình khoan.

Trong nghiên cứu của M. Zamanian, S.E. Khadem, M.R. Ghazavi, các tác giả đã đưa ra mô hình rời rạc với hai bậc tự do xoắn và một bậc tự do dọc trục [38]. Sự tiếp xúc ma sát cả hai chuyển động và quá trình cắt tại mặt tiếp xúc mũi khoan-đá được xét đến bởi quy luật tương tác mũi khoan-đá (Hình 1.17, Hình 1.18).



Hình 1.17. Mô hình hệ thống khoan



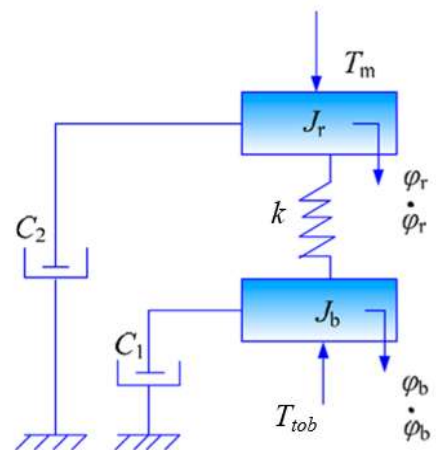
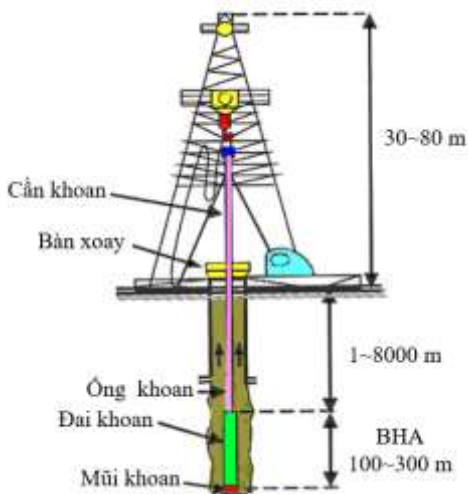
Hình 1.18. Mô hình động lực học

Phương trình chuyển động như sau:

$$\begin{cases} J_T \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + k_p \left(\frac{d\alpha}{dt} - \Omega_0 \right) + k_i (\alpha - \alpha_0) - k_p \Omega_0 + T_0 + Q(t) = 0 \\ J_B \frac{d^2 \Phi}{dt^2} - k (\alpha - \Phi) - c \left(\frac{d\alpha}{dt} - \frac{d\Phi}{dt} \right) + T = 0 \\ M \frac{d^2 U}{dt^2} = W_0 - W \end{cases} \quad (1.34)$$

Trong nghiên cứu này tác giả M. Zamanian và cộng sự đã mô hình hóa chuỗi khoan ba bậc tự do, trong đó hai chuyển động xoay và một chuyển động dịch chuyển của chuỗi ống khoan thâm nhập vào nền, nghiên cứu có kế thừa của tác giả Thomas Richard, Christophe Germy, Emmanuel Detournay [36] về sự tương tác của mũi khoan với đá, đã tính đến lực cản của đá tại đầu mũi khoan theo phương dọc trục và mô men cản xoay, lực cản cắt tại đầu mũi khoan. Ở nghiên cứu này tác giả chưa đề cập tới các lực cản trên thành của ống khoan do vật liệu nền gây ra trong quá trình khoan.

Tác giả Lin Li và nnk [31] đã tiến hành nghiên cứu thay đổi thời gian điều khiển chế độ trượt thích nghi cho hệ thống khoan xoay, đã đưa ra mô hình chuỗi khoan giếng dầu với hai bậc tự do xoắn và một bậc tự do dọc trục (Hình 1.19, Hình 1.20).



Hình 1.19. Mô hình giàn khoan xoay Hình 1.20. Mô hình động lực học hệ thống khoan xoay

Phương trình chuyển động của hệ thống như sau:

$$\begin{cases} J_b \ddot{\phi}_b + C_1 \dot{\phi}_b - k(\phi_r - \phi_b) = -T_{tob} \dot{\phi}_b \\ J_r \ddot{\phi}_r + C_2 \dot{\phi}_r + k(\phi_r - \phi_b) = -T_m \\ T_m = C_2 \dot{\phi}_{ref} + u \end{cases} \quad (1.35)$$

Trong nghiên cứu này các tác giả đã mô hình hóa chuỗi khoan ba bậc tự do, trong đó hai chuyển động xoay và một chuyển động dịch chuyển của chuỗi ống khoan thâm nhập vào nền, tác giả đã tính đến mô men cản của đá tại đầu mũi khoan và lực cản ma sát dọc trục đai khoan. Tuy nhiên tác giả chưa đề cập tới lực cản cắt của mũi khoan, lực cản trên thành của ống khoan do bùn khoan gây ra trong quá trình khoan cũng như chưa đề cập tới độ cứng và cản nhớt của bộ phận nâng hạ ống khoan.

1.4.2. Các công trình nghiên cứu trong nước

1.4.2.1. Nghiên cứu về tương tác cọc – nền

Nghiên cứu về tương tác cọc – nền đã có nhiều nhà nghiên cứu đề cập đến. Điển hình như đề tài “Nghiên cứu các đặc điểm địa chất công trình của nền san hô một số vùng trọng điểm và các giải pháp thích hợp cho các công trình biển phục vụ phát triển kinh tế và quốc phòng trong vùng đảo Trường Sa”, 2001-2005, mã số KC.09.08 do tác giả Hoàng Xuân Lượng Chủ nhiệm đề tài trong đó có nội dung nghiên cứu thực nghiệm về sự làm việc của móng cọc trong nền san hô tại đảo Song Tử Tây năm 2002 [5].

Các thí nghiệm được thực hiện với mô hình cọc thu nhỏ tại hiện trường; cọc thí nghiệm là các cọc ống thép có bịt mũi, đường kính cọc thay đổi từ 32mm đến 90mm, chiều dài cọc thí nghiệm từ 1,2-1,5m; bằng cách đo lực nhỏ tĩnh dọc trục ở đầu cọc, các tác giả đã xác định được sức kháng ma sát tĩnh của cọc với nền san hô và sự thay đổi sức kháng ma sát tĩnh theo số chu trình và thời gian chất tải khi cọc chịu tác dụng của tải trọng điều hòa tác dụng theo phương ngang ở đầu cọc; do điều kiện hạn chế về trang thiết bị thí nghiệm và thiết bị

hạ cọc nên chỉ nghiên cứu được sức kháng ma sát trung bình trên thân cọc mà chưa đánh giá được sự phân bố của ma sát dọc theo thân cọc cũng như chưa đo được sức kháng ma sát khi cọc chịu tải trọng động.

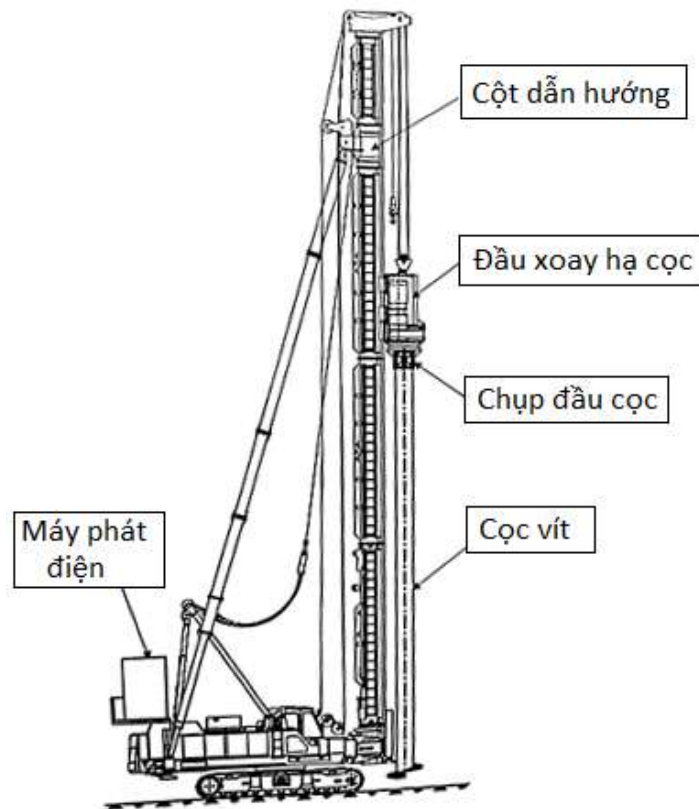
Năm 2010, trong phạm vi điều tra khảo sát của Dự án nhánh ĐTB11.3, các nhà khoa học của Viện Kỹ thuật công trình đặc biệt do tác giả Nguyễn Tương Lai chủ trì đã thực hiện thí nghiệm đo ma sát cọc-nền san hô tại đảo Trường Sa Lớn và đảo Phan Vinh thuộc quần đảo Trường Sa [3].

Các tác giả nghiên cứu tương tác giữa cọc và nền san hô mới đề cập đến tác dụng của tải trọng tĩnh và chủ yếu xác định ma sát cọc-nền để chịu tải trọng của công trình, các tác giả chưa đề cập đến tương tác cọc-nền trong quá trình hạ cọc.

1.4.2.2. Nghiên cứu về thiết bị thi công cọc vít ống thép

Theo [7] Đề tài “Nghiên cứu hoàn thiện công nghệ thiết kế và chế tạo thiết bị thi công cọc vít cỡ vừa và nhỏ lắp trên máy cơ sở có sẵn phục vụ xây dựng móng cọc cho các công trình giao thông đô thị ở Việt Nam”, 2018-2019, mã số DT183019 do tác giả Nguyễn Chí Minh Chủ nhiệm đề tài đã nghiên cứu chế tạo và thử nghiệm thành công máy xoay hạ cọc vít CV-DT183019 kiểu chụp xoay đầu cọc lắp trên máy cơ sở có sẵn là máy đóng cọc bánh xích (Hình 1.21). Nhóm đề tài đã tiến hành thử nghiệm thi công 01 cọc vít với đường kính thân cọc 600 mm, đường kính cánh vít 900 mm, dài 12 m trên nền đất.

Công nghệ này có ưu điểm không gây rung động, ít gây ồn; không tạo chất thải trong quá trình thi công, không gây ô nhiễm đất; sức kháng mũi cọc cao, khả năng chịu nhổ tốt, thi công nhanh. Tuy nhiên nhóm nghiên cứu mới thử nghiệm ở nền đất, chưa đề cập đến thử nghiệm ở nền đá hoặc nền san hô. Mặt khác do đường kính cánh vít lớn nên phương pháp hạ cọc vít ống thép chỉ phù hợp với thi công trên nền đất, nếu nền cứng như đá, bê tông... thì hiệu quả hạ cọc sẽ bị hạn chế do lực cản của nền tác dụng lên cánh vít ở đầu cọc.



Hình 1.21. Sơ đồ thiết bị thi công cọc vít theo công nghệ ôm xoay đầu cọc

Nhận xét: Qua quá trình phân tích các công trình nghiên cứu đã được công bố của các tác giả trên thế giới và trong nước có liên quan đến luận án có thể đưa ra nhận xét sau:

Cho đến thời điểm hiện tại, đã có nhiều công trình nghiên cứu mô hình tương tác cọc - nền, mô hình động lực học xoay hạ cọc ống thép trên nền đất, đá. Tuy nhiên các kết quả nghiên cứu về tương tác cọc ống thép - nền san hô chịu tác dụng của lực động, mô hình động lực học cũng như xác định chế độ làm việc hợp lý của bộ công tác xoay hạ cọc ống thép xuống nền san hô chưa có kết quả nghiên cứu nào được công bố. Vì vậy việc nghiên cứu tương tác giữa bộ công tác xoay hạ cọc ống thép với nền san hô là cần thiết với mục tiêu xác định các thành phần lực cản (lực cản ma sát, lực cản cắt), xây dựng mô hình động lực học xác định các quy luật biến thiên của độ dịch chuyển, vận tốc, gia tốc theo thời gian, khảo sát ảnh hưởng của các thông số làm việc đến năng suất

bộ công tác, từ đó tính toán lựa chọn chế độ làm việc hợp lý và độ sâu hạ cọc của bộ công tác xoay hạ cọc ống thép.

Kết luận chương 1

Trên cơ sở nghiên cứu về nền đá san hô và thống kê và phân tích tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước về vấn đề nghiên cứu nhận thấy:

- Nền san hô được hình thành ở nơi biển đảo, có cấu tạo phân lớp rõ rệt, san hô là vật liệu giòn, độ rỗng lớn. Việc thi công hạ cọc ống thép trên nền san hô với bộ công tác xoay-ép hạ cọc là công việc đặc thù trong điều kiện làm việc phức tạp, khó khăn, đặc biệt cần đảm bảo các điều kiện về chiến thuật và bí mật quân sự.

- Sử dụng bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép tích hợp trên máy cơ sở là máy đào thủy lực bánh xích là phương pháp khả thi, phù hợp với thi công hạ cọc ống thép xây dựng các công trình nơi biển đảo. Các nghiên cứu của các nhà khoa học trong nước và trên thế giới chưa có công trình nào về bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép vào nền san hô, chưa có mô hình động lực học và nghiên cứu về thông số làm việc hợp lý bộ công tác. Luận án tập trung nghiên cứu tương tác giữa cọc ống thép với nền san hô ở Trường Sa, nghiên cứu về động lực học, từ đó sử dụng nguyên lý cực đại của Pontryagin xác định thông số làm việc hợp lý của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép, để có chiều sâu hạ các loại cọc lý thuyết lớn nhất với bộ công tác xoay-ép đã có. Kết quả nghiên cứu sẽ là cơ sở cho việc thiết kế, lựa chọn và khai thác thiết bị trong điều kiện thực tế.

- Bên cạnh việc nghiên cứu lý thuyết, luận án cần tiến hành nghiên cứu thực nghiệm nhằm xác định các thông số đầu vào phục vụ việc khảo sát lý thuyết và kiểm chứng độ tin cậy của mô hình động lực học đã xây dựng cũng như các kết quả khảo sát.

Chương 2

ĐỘNG LỰC HỌC BỘ CÔNG TÁC KIỂU XOAY-ÉP LẤP TRÊN MÁY ĐÀO THỦY LỰC

2.1. Cơ sở khoa học nghiên cứu động lực học bộ công tác kiểu xoay-ép lấp trên máy đào thủy lực

2.1.1. Các thông số đặc trưng cho chế độ làm việc của bộ công tác

Thấy rằng tốc độ hạ ống thép vào nền san hô và tốc độ xoay ống thép là những thông số làm việc quan trọng có ảnh hưởng tới hiệu quả làm việc bộ công tác xoay hạ cọc. Ngoài ra các thông số khác như công suất tiêu thụ, độ mài mòn răng cắt, độ cứng chống xoắn của ống thép cũng cần phải được nghiên cứu khi đánh giá tổng thể. Để đánh giá được hiệu quả của bộ công tác trong quá trình làm việc cần đảm bảo các yêu cầu sau, lực dẫn tiến và mô men xoay phải đạt giá trị cần thiết để phá hủy kết cấu đá san hô, đồng thời tốc độ xoay ống thép phải đủ lớn để bóc lớp đá san hô khi răng cắt ăn sâu vào môi trường đá san hô. Bên cạnh đó, để duy trì sự tiếp xúc giữa răng cắt và môi trường đá san hô, tốc độ dẫn tiến phải tỷ lệ với tốc độ xoay khi xoay-ép ống thép vào môi trường đá san hô, lực dẫn tiến luôn phải tạo ra một phản lực tĩnh từ môi trường đá san hô. Nếu một trong các thông số trên quá lớn hoặc quá nhỏ đều làm giảm năng suất của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép.

2.1.2. Các thông số động lực học cần xác định của quá trình xoay-ép hạ cọc ống thép

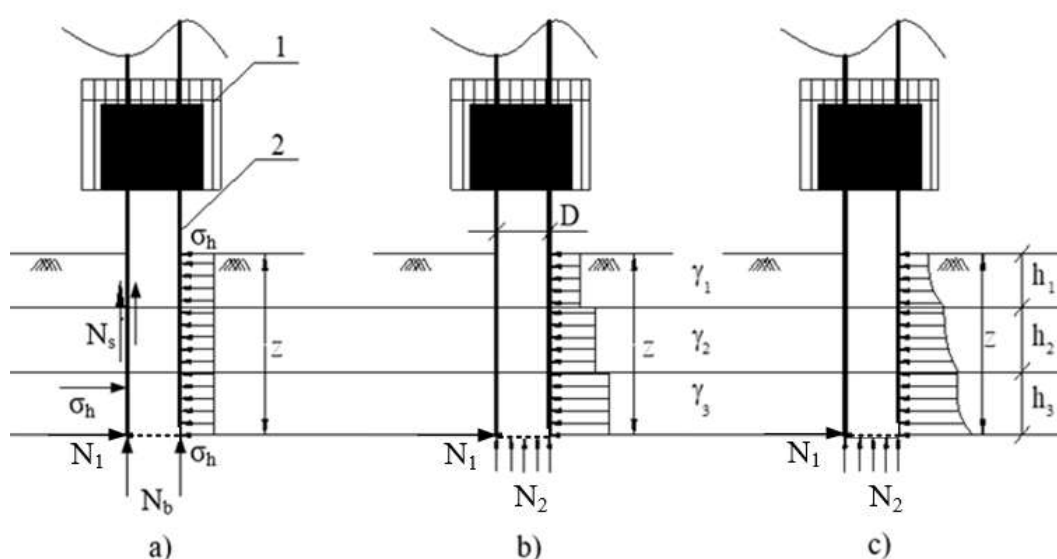
Các thông số động lực học cần xác định của quá trình xoay-ép hạ cọc ống thép là gia tốc, vận tốc, chuyển vị của chuyển động xoay và chuyển động tịnh tiến. Đây là các thông số phản ánh đặc trưng động lực học của hệ trong quá trình xoay-ép hạ cọc ống thép trên nền san hô, qua các thông số này cho phép chúng ta xác định được trạng thái dao động của cọc ống thép và có thể khảo sát được ảnh hưởng của sự thay đổi các thành phần lực cản của các lớp san hô đến

sự thay đổi các thông số động lực học của toàn hệ, từ đó phân tích và đưa ra các nhận xét, đánh giá, điều chỉnh hoặc lựa chọn các thông số động học (tốc độ vòng xoay, tốc độ dẫn tiến) của bộ công tác xoay-ép hạ cọc phù hợp trong quá trình thi công với từng đối tượng cụ thể.

2.2. Tương tác giữa cọc ống thép với nền san hô khi xoay-ép hạ cọc

2.2.1. Xây dựng mô hình tương tác của cọc ống thép với nền san hô

2.2.1.1. Mô hình tương tác các loại nền san hô



Hình 2.1. Mô hình tương tác giữa cọc thép và nền san hô trong quá trình xoay-ép hạ cọc

a - trọng lượng riêng san hô không thay đổi; b - trọng lượng riêng san hô thay đổi bậc; c - trọng lượng riêng san hô thay đổi phi tuyến

Theo kết quả thực nghiệm xác định ở một số quần đảo, phân bố trọng lượng riêng của san hô theo chiều sâu được mô tả trên hình 2.1. Hình 2.1a thể hiện vùng san hô hầu như không có sự thay đổi trọng lượng riêng theo chiều sâu, hình 2.1b thể hiện địa chất vùng san hô có sự thay đổi về trọng lượng riêng giữa các tầng, hình 2.1c thể hiện san hô với trọng lượng riêng thay đổi phi tuyến trong mỗi tầng.

So với các nền địa chất như đá, đất sét, cát, á sét, á cát... thông thường, thì nền san hô có những tính chất hoàn toàn khác biệt. Tính chất cơ lý của đá san

hồ quần đảo Trường Sa phụ thuộc chủ yếu vào tính chất và điều kiện hình thành các trầm tích cấu trúc nên các đảo. Do vậy, những đặc trưng chung về cấu trúc địa chất và sự hình thành các trầm tích là các yếu tố quyết định tính chất cơ lý của đá san hô. Đá san hô được hình thành từ san hô dạng khối và san hô dạng cành hoá đá, mức độ hoá đá tăng theo chiều sâu trong mỗi nhịp, cao nhất ở lớp đá vôi san hô, kế đến là lớp dăm, sạn kết san hô và mức độ thấp nhất là ở lớp san hô cành. Vì vậy, thành phần, kiến trúc, cấu tạo và tính chất cơ lý của đá san hô cũng biến đổi theo độ sâu một cách rõ rệt. Đặc điểm đá san hô là vật liệu giòn, khi khoan đá dễ bị vỡ, thường ngập trong nước biển, lực dính kết cấu của đá san hô gần như bằng không. Một đặc điểm khác, trong các rạn (khối đá) san hô có rất nhiều khe, rãnh, hang hốc và lỗ rỗng (10 - 20%), với kích thước và phương phát triển rất khác nhau, không có quy luật như phương phát triển của các hệ thống đứt gãy và khe nứt ở các khối đá thông thường. Từ những đặc điểm trên ta thấy rằng khối đá san hô có cấu trúc rất phức tạp, có đặc tính không đồng nhất, không liên tục.

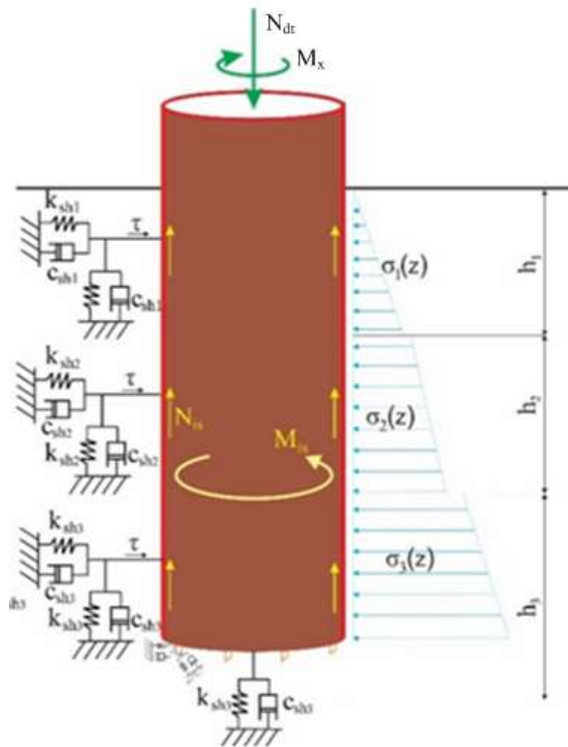
2.2.1.2. Phân tích sự khác nhau giữa hạ cọc ống thép vào nền đất với nền san hô

Qua thực tế thí nghiệm hạ cọc ống thép trên nền đất tại Cầu Mai Lĩnh ta thấy rằng khi hạ cọc vào nền đất có tồn tại lực ma sát bên trong giữa cọc và đất bên trong lòng cọc chỉ khi có dịch chuyển tương đối giữa cọc và đất. Khi cọc dịch chuyển vào nền đất, đất bên trong lòng cọc sẽ điền đầy vào trong lòng ống thép, do lực dính kết cấu của đất lớn ($0,053 \div 0,24 \text{ daN/cm}^2$) [11], hệ số ma sát trượt giữa đất và thép nhỏ ($0,2 \div 0,4$) [11], khi lực ma sát giữa cọc ống thép với lõi đất đủ lớn lõi đất sẽ chạy theo cọc. Khi đó không còn tồn tại ma sát bên trong cọc, ma sát chỉ tồn tại bên trong cọc ống thép khi đường kính cọc lớn, đối với loại đường kính nhỏ thì có thể bỏ qua thành phần ma sát bên trong lòng cọc. Mặt khác đối với nền đất không cần có răng cắt ở đầu cọc để phá vỡ nền đất

vẫn có thể xoay-ép hạ cọc đến độ sâu nhất định, như vậy không tính đến mô men cản cắt, tuy nhiên cần phải tính toán lực cản mũi cọc như tài liệu [8].

Đối với cát và cành nhánh san hô là vật liệu rời, độ rỗng lớn, có tính chất gần giống như cát vụn, đá san hô là vật liệu gốc tảng cứng và giòn, lực dính kết cấu gần bằng không, khi xoay-ép cọc qua các lớp cát, cành nhánh và đá san hô. Cát, cành nhánh và lõi đá san hô sẽ dịch chuyển trong lòng ống thép tạo nên ma sát bên trong lòng ống thép, như vậy luôn luôn tồn tại ma sát trong lòng ống thép ta cần phải tính toán. Do lớp cát và cành nhánh san hô là vật liệu rời nên khi xoay-ép hạ cọc, cát san hô và cành nhánh nhỏ luôn luôn điền vào khoảng trống giữa ống thép với nền san hô, cùng với áp lực nền tạo nên ma sát ngoài cọc ống thép. Mặt khác do đá san hô liên khối có kết cấu cứng nên yêu cầu phải có răng cắt để phá vỡ đá san hô, khi tính toán mô men cản phải tính đến mô men cản xoay gây ra tại răng cắt.

Từ những phân tích trên có thể mô hình hóa tương tác cọc ống thép với nền san hô cụ thể ở đảo Trường Sa như hình 2.2.



Hình 2.2. Mô hình hóa tương tác cọc ống thép với nền san hô

Đặc trưng của tương tác giữa cọc ống thép với nền san hô phụ thuộc vào các thông số như: áp lực nền san hô tác dụng lên ống thép σ , góc ma sát giữa san hô với thành ống thép δ_{sp} , lực dính kết cấu của san hô c_c , khối lượng riêng của san hô γ , hệ số ma sát giữa thép và san hô μ , góc ma sát trong ϕ là đặc trưng kháng cắt của san hô. Các thông số trên phụ thuộc vào tính chất cơ lý của từng lớp san hô, chiều sâu hạ cọc, nó ảnh hưởng trực tiếp đến việc xác định các thành phần lực cản tác dụng lên ống thép.

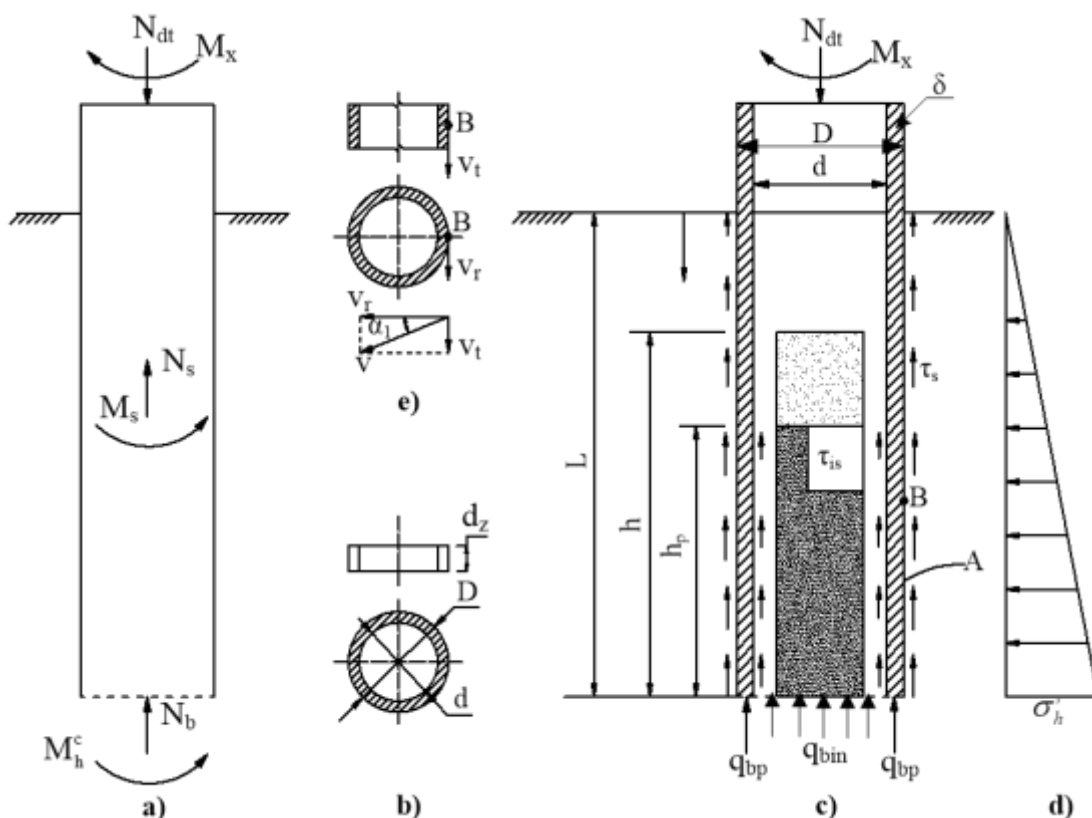
2.2.2. Xây dựng mô hình tính toán các thành phần lực cản

2.2.2.1. Các giả thiết khi xây dựng mô hình

Phân tích từ điều kiện thực tế của bộ công tác xoay-ép hạ cọc trên nền san hô tại Trường Sa, xây dựng mô hình tương tác tính toán các thành phần lực cản với các giả thiết sau:

- Ống thép thẳng đứng, thoát phoi hoàn toàn, răng sắc không bị mòn;
- Quá trình xoay-ép hạ cọc chỉ có răng cắt mới tham gia quá trình cắt san hô (bố trí theo chu vi của đầu cọc), bỏ qua ma sát cạnh bên răng cắt;
- Khi tính toán các thành phần lực cản xoay-ép hạ cọc, tốc độ dẫn tiến và tốc độ xoay ống thép là không đổi;
- San hô ở trạng thái bão hòa, mỗi lớp nền san hô là vật liệu đồng nhất, san hô biến dạng không đàn hồi.

Theo tài liệu [8] trong quá trình xoay-ép hạ cọc, ống thép được hạ xuống bằng hai chuyển động đồng thời là ép theo phương đứng và xoay trong mặt phẳng nằm ngang, khi hạ cọc, ống thép sẽ chịu tác dụng của lực cản ở mũi và lực cản thành bên do áp lực của nền san hô tác dụng lên ống thép gây ra làm xuất hiện lực cản ma sát theo phương thẳng đứng và mô men ma sát cản xoay do lực ma sát giữa thành cọc và nền san hô [8], các thành phần lực cản này được tổng hợp thành lực cản dọc trục theo phương thẳng đứng N_c và mô men cản trong mặt phẳng nằm ngang M_c (Hình 2.3).



Hình 2.3. Mô hình tính toán các thành phần lực cản tác dụng lên cọc ống thép
 a - sơ đồ cân bằng lực, b – phân tố diện tích ống theo phương dọc trục (z), c – sơ đồ các thành phần ứng suất của san hô tác dụng lên cọc ống thép trong quá trình hạ, d – áp lực san hô tác dụng lên thành cọc ống thép, e – vận tốc trên bề mặt cọc ống thép.

2.2.2.2. Xác định lực cản theo phương thẳng đứng tác dụng lên bề mặt cọc ống thép

Theo [8] lực cản tác dụng lên bề mặt ống thép theo phương thẳng đứng N_c được phân tích thành các lực cản cơ bản ở mũi cọc ống thép N_b và lực cản trên bề mặt cọc ống thép N_s (bên trong và bên ngoài cọc ống thép):

$$N_c = N_b + N_s \quad (2.1)$$

- Giá trị N_b trong công thức (2.1) được tính toán theo phương pháp của Lehane và Xu [28], [37], trong đó có kể đến ảnh hưởng của khối san hô ở bên trong thành cọc ống thép và sự thay đổi trạng thái của nền san hô dưới mũi khi cọc ống thép được ép và cọc di chuyển xuống.

$$N_b = q_b \pi (R^2 - r^2) \quad (2.2)$$

Với q_b là cường độ sức kháng mũi cọc ống thép được tính theo công thức sau:

$$q_b = q_{bp} A_r + q_{bin} (1 - A_r) \quad (2.3)$$

Trong đó: $q_{bp} = 0,6q_c$, $q_{bin} = (0,6 - 0,45k)q_c$, $A_r = 1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2$ và q_c là sức kháng mũi trung bình của nền san hô lấy theo thí nghiệm hiện trường [4].

$$k = \min \left[1, \left(\frac{d}{1,5} \right)^{0,2} \right] \quad (2.4)$$

Với d - Đường kính trong của cọc ống thép (m) (Hình 2.3b).

Thông thường có thể tính q_b theo công thức:

$$q_b = (0,15 + 0,45 A_{r,p}) q_c \quad (2.5)$$

Với $A_{r,p} = 1 - k(d/D)^2$, trong trường hợp cọc ống thép có đường kính lớn ta có:

$$q_b = (0,15 + 0,45 A_r) q_c \quad (2.6)$$

- Lực cản theo phương thẳng đứng do lực cản trượt phân bố thành bên của cọc ống thép gây ra gồm hai thành phần: N_{is} lực cản theo phương thẳng đứng do khối san hô bên trong tác dụng lên thành cọc ống thép và N_{sp} lực cản theo phương thẳng đứng tác dụng lên thành ngoài cọc ống thép, ta có:

$$N_s = N_{sp} + N_{is} \quad (2.7)$$

Do cọc ống thép là hình tròn có đường kính và tiết diện không đổi nên một phân tố diện tích bề mặt ngoài của cọc ống thép được tính như sau (Hình 2.3b): $dA = \pi D dz$, lực cản trượt phân bố tác dụng lên bề mặt ngoài cọc ống thép là τ_s vậy lực cản trượt tác dụng lên diện tích dA là:

$$dN_{sp} = \tau_s dA = \tau_s D dz \quad (2.8)$$

trong đó: D - Đường kính ngoài cọc ống thép.

Ứng với loại san hô lực cản trượt của san hô τ_s được xác định theo công thức Coulomb:

$$\tau_s = \sigma_h \tan \delta_s + c_c \quad (2.9)$$

trong đó:

δ_s - Góc ma sát giữa san hô và thép;

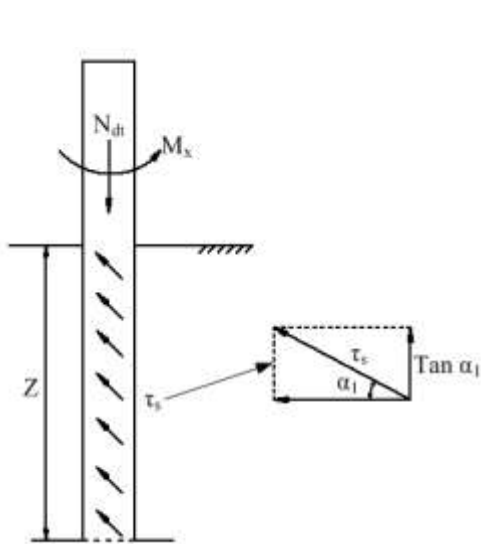
c_c - Lực dính kết cấu của san hô với thép lấy theo [3];

σ_h - Ứng suất hữu hiệu theo phương ngang (Hình 2.3d);

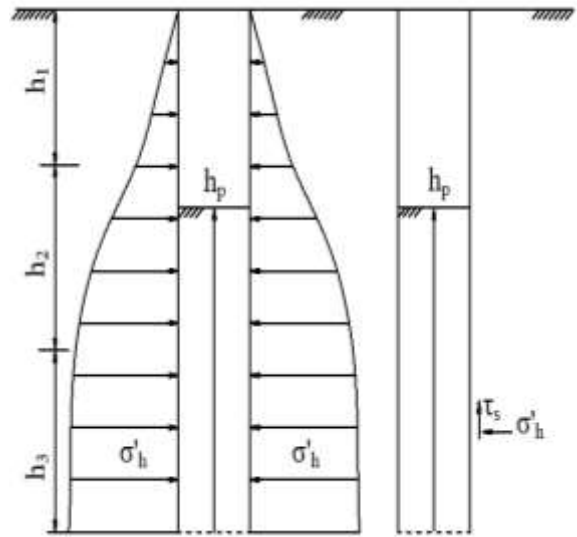
Ứng suất hữu hiệu theo phương ngang của nền san hô tác dụng lên thành cọc được tính [Lý thuyết Rankine]:

$$\sigma_h(z) = \gamma(z) \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.10)$$

trong đó: $\gamma(z)$ – Trọng lượng riêng của san hô, phụ thuộc vào chiều sâu và được xác định bằng thực nghiệm theo [5]; ϕ – góc ma sát trong của san hô.



Hình 2.4. Đường trượt ma sát đơn vị



Hình 2.5. Ứng suất hữu hiệu tác dụng lên ống thép xuyên qua nhiều lớp san hô

Xét vận tốc trong quá trình hạ của điểm B bất kỳ trên bề mặt ống thép (Hình 2.3e) ta có:

- v_r là vận tốc dài trong mặt phẳng nằm ngang, (m/ph);
- v là vận tốc trượt, (m/ph);
- v_t là vận tốc hạ cọc theo phương thẳng đứng, (m/ph);
- n vận tốc xoay ống thép, (vòng/phút)
- α_1 là góc giữa vận tốc dẫn tiến và vận tốc vòng cọc ống thép thì:

$$\tan\alpha_1 = \frac{v_t}{v_r}; n = \frac{60v_t}{D\pi\tan\alpha_1}; \alpha_1 = 0^\circ \div 90^\circ \quad (2.11)$$

Khi đó ta có được đường trượt của ma sát đơn vị (Hình 2.4) và lực cản theo phương thẳng đứng do ứng suất tiếp trên bề mặt ngoài cọc ống thép được tính theo công thức [8]:

$$N_{sp} = \frac{\tan\alpha_1}{\sqrt{1 + \tan^2\alpha_1}} \pi D \int_0^z \tau_s dz = \frac{\tan\alpha_1}{\sqrt{1 + \tan^2\alpha_1}} \pi D \int_0^z (\sigma_h \tan\delta_s + c_c) dz \quad (2.12)$$

Do cọc ống thép xuyên qua n lớp san hô, nếu ta lấy σ_{hi} là giá trị ứng suất hữu hiệu trung bình của lớp san hô thứ i , δ_i là góc ma sát của lớp san hô thứ i với thành cọc ống thép, c_i là lực dính kết cấu của lớp san hô thứ i với thành cọc ống thép (Hình 2.5) (các đại lượng này được lấy từ thí nghiệm [3]) thì công thức (2.12) được viết thành [8]:

$$N_{spi} = \frac{\tan\alpha_1}{\sqrt{1 + \tan^2\alpha_1}} \pi D \left(\sum_{i=1}^n h_i (\sigma_{hi} \tan\delta_{si} + c_{ci}) \right) \quad (2.13)$$

Với h_i là chiều dày lớp san hô thứ i .

- Tương tự lực cản ma sát theo phương thẳng đứng của lớp san hô trong lòng cọc ống thép N_{isi} được xác định bằng công thức [8]:

$$N_{isi} = \frac{\tan\alpha_1}{\sqrt{1 + \tan^2\alpha_1}} \pi dh_p (\sigma_{hp} \tan\delta_{sp} + c_p) \quad (2.14)$$

trong đó: σ_{hp} là ứng suất hữu hiệu theo phương ngang do tải trọng cọc san hô đáy cọc ống thép, δ_{sp} là góc ma sát của lớp san hô đáy cọc và thành cọc ống thép, c_p

là lực dính kết cấu của lớp đáy cột san hô và thành cọc ống thép, h_p chiều cao cột san hô hữu hiệu đáy cọc ống thép được lấy theo kinh nghiệm là $0,8h$ [28], [37].

- Từ công thức (2.2), (2.7), (2.13), (2.14) tổng lực cản tác dụng lên cọc ống thép theo phương thẳng đứng như sau:

$$N_{ci} = \pi \left\{ q_b (R^2 - r^2) + \frac{\tan \alpha_1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha_1}} \left[D \left(\sum_{i=1}^n h_i (\sigma_{hi} \tan \delta_{si} + c_{ci}) \right) + dh_p (\sigma_{hp} \tan \delta_{sp} + c_p) \right] \right\} \quad (2.15)$$

2.2.2.3. Xác định mô men cản theo phương nằm ngang tác dụng lên bề mặt cọc ống thép

Theo [8] mô men cản trên bề mặt cọc ống thép M_t^c được phân tích thành mô men cản trượt ở bề mặt bên ngoài cọc ống thép M_{sp} và bên trong cọc ống thép M_{is} .

Ta có:

$$M_t^c = M_{sp} + M_{is} \quad (2.16)$$

+ Mô men cản của bề mặt ngoài cọc ống thép M_{sp} được xác định theo công thức [8]:

$$M_{sp} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha_1}} \pi \frac{D^2}{2} \int_0^z \tau_s dz \quad (2.17)$$

Tương tự như biến đổi của công thức (2.13) ta có:

$$M_{spi} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha_1}} \pi \frac{D^2}{2} \left(\sum_{i=1}^n h_i (\sigma_{hi} \tan \delta_{si} + c_{ci}) \right) \quad (2.18)$$

trong đó: $h_i, \sigma_{hi}, \delta_{si}, c_{ci}$ và n lấy theo công thức (2.13).

+ Mô men cản của bề mặt trong cọc ống thép M_{is} được xác định theo công thức [8]:

$$M_{is} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha_1}} \pi \frac{d^2}{2} \int_0^z \tau_{is} dz \quad (2.19)$$

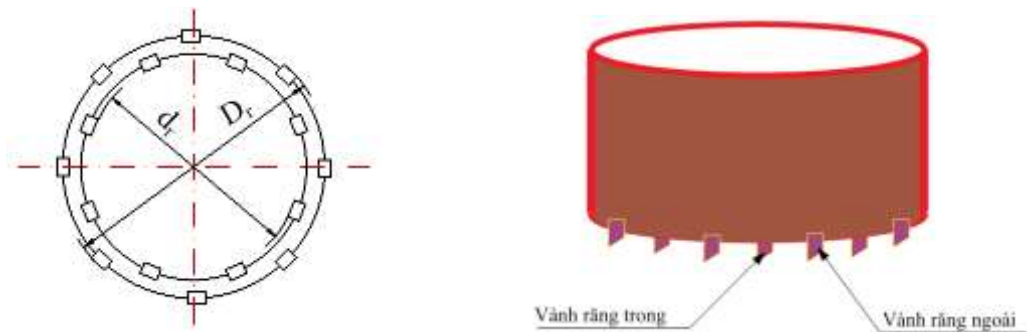
Biến đổi tương tự như của công thức (2.14) [8] ta có:

$$M_{isi} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha_1}} \frac{\pi d^2 h_p}{2} (\sigma_{hp} \tan \delta_{sp} + c_p) \quad (2.20)$$

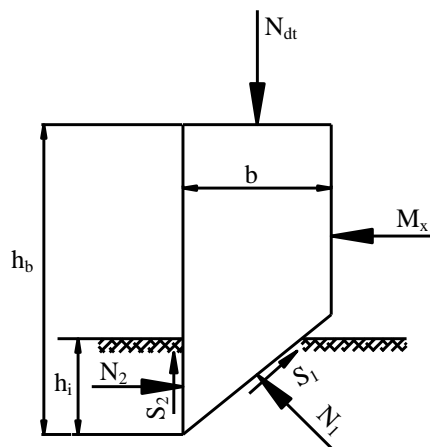
trong đó: $h_p, \delta_{sp}, \sigma_{hp}$ và c_p lấy theo công thức (2.14).

2.2.2.4. Xác định mô men cản cắt gây ra tại răng cắt

Theo [28] trong quá trình xoay-ép hạ cọc, mỗi điểm trên cạnh răng cắt thực hiện chuyển động tịnh tiến theo hướng đi sâu xuống dưới và chuyển động xoay, lượng ăn sâu vào san hô của răng cắt phụ thuộc vào lực ép dọc trục. Khi ống thép vừa xoay vừa đi xuống quá trình biến dạng và phá hủy san hô được diễn ra liên tục và đồng thời. Dưới tác dụng của lực ép dọc trục và mô men xoay, răng cắt vừa chuyển động tịnh tiến, vừa chuyển động xoay tròn theo quỹ đạo xoắn vít để cắt và phá vỡ lớp san hô tạo ra một hình vành khăn nhằm làm giảm lực cản dọc trục. Coi ống thép với răng cắt dưới dạng dao kẹp ở mặt trước của ống thép, coi răng cắt không bị mòn.



Hình 2.6. Sơ đồ bố trí răng cắt

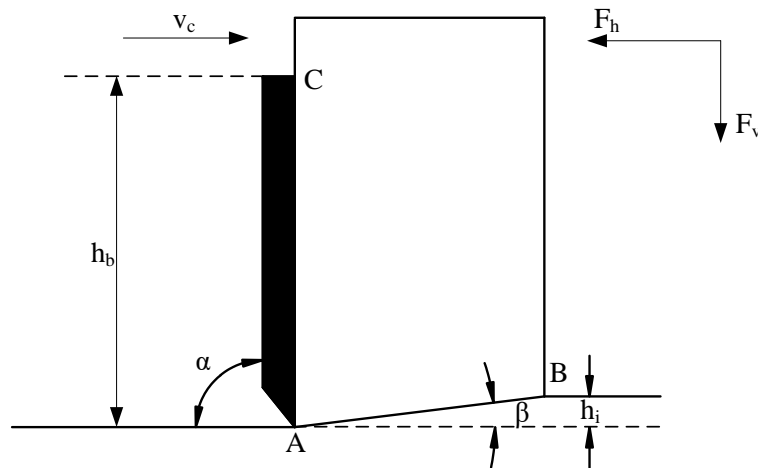


Hình 2.7. Sơ đồ lực cản tác dụng lên răng cắt

Trên hình 2.6 thể hiện bố trí răng cắt trên chu vi đầu cọc ống thép có đường kính ngoài $D = 300$ mm, đường kính trong $d = 287$ mm. Đường kính ngoài ống thép bố trí 8 răng cắt, bước răng 117,75 mm, đường kính trong ống thép bố trí 8 răng cắt, bước răng là 112,6 mm. Đường kính ngoài răng cắt là $D_r = 310$ mm, đường kính trong răng cắt là $d_r = 277$ mm. Lực tác dụng lên răng cắt thể hiện trên hình 2.7.

Theo lý thuyết cắt [28] trong quá trình cắt răng cắt chịu tác dụng của lực cản cắt F_c , lực cản cắt này được phân thành hai lực thành phần: thành phần lực cản cắt theo phương ngang ký hiệu là F_h , lực cản cắt theo phương thẳng đứng F_v . Trong quá trình cắt, răng cắt dịch chuyển với vận tốc v_c , nghiêng với phương ngang một góc α , chiều dày lớp cắt h_i , chiều cao răng cắt h_b , mặt trượt của nền khi bị cắt hợp với phương ngang một góc β phụ thuộc vào đặc tính của nền san hô, tính toán lực cản cắt trong trường hợp san hô bão hòa (do độ cao của đảo san hô với mực nước biển thấp).

Sơ đồ tính toán lực cản cắt cho 1 răng cắt được thể hiện trên hình 2.8 [28].



Hình 2.8. Sơ đồ tính toán lực cản cắt

A: Đầu lưỡi cắt; B: Cuối mặt phẳng cắt; C: Đỉnh lưỡi cắt; A-B: Mặt phẳng cắt; A-C: Bề mặt lưỡi cắt; h_b - Chiều cao răng cắt; h_i - Chiều dày lớp cắt; v_c - Vận tốc cắt; α - Góc lưỡi cắt, β - Góc của mặt phẳng cắt với hướng vận tốc cắt
 - Lực tác dụng lên lớp san hô đã bị cắt nằm ngay trước răng cắt gồm (Hình 2.9):

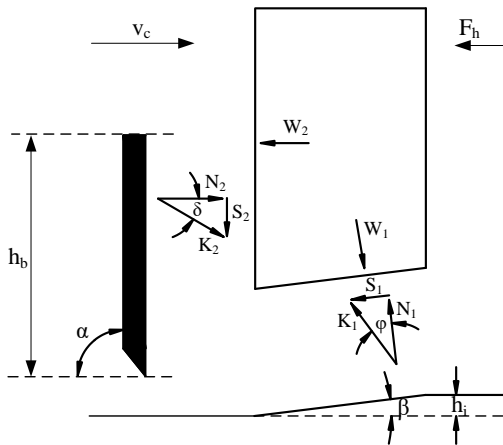
- + Lực tác dụng lên mặt phẳng cắt do áp lực của các hạt san hô N_1 ;
- + Lực trượt S_1 do ma sát trong của nền, có giá trị bằng $N_1 \tan \varphi$;
- + Lực W_1 do áp suất của nước lên vùng trượt;

Lực N_1 và lực trượt S_1 có thể kết hợp thành lực hạt K_1 như sau [28]:

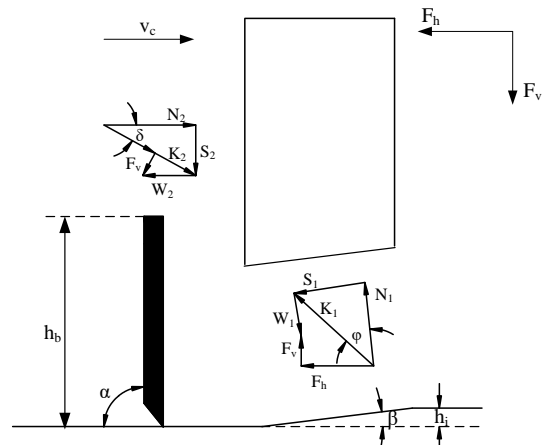
$$K_1 = \sqrt{N_1^2 + S_1^2} \tag{2.21}$$

- Lực tác dụng lên răng cắt khi cắt nền san hô gồm ():

- + Lực tác dụng lên răng cắt N_2 do áp lực hạt;
- + Lực trượt S_2 do ma sát ngoài của nền và được tính bằng $N_2 \tan \delta$;
- + Lực W_2 do áp lực nước tác dụng lên răng cắt.



Hình 2.9. Lực tác dụng lên lớp cắt



Hình 2.10. Các lực tác dụng lên răng cắt

Kết hợp các lực N_2 và S_2 ta được lực K_2 như sau [28]:

$$K_2 = \sqrt{N_2^2 + S_2^2} \tag{2.22}$$

a. Khi cắt lớp cát và cành nhánh san hô

Chiếu tất cả các lực lên phương ngang và phương đứng ta có:

- Hợp lực theo phương ngang [28]:

$$\sum F_h = K_1 \sin(\beta + \varphi) - W_1 \sin \beta + W_2 \sin \alpha - K_2 \sin(\alpha + \beta) = 0 \tag{2.23}$$

trong đó: F_h – Lực cắt theo phương ngang (kN);

K_1 – Lực tác dụng lên mặt phẳng trượt (kN);

K_2 – Lực tác dụng lên răng cắt (kN);

α – Góc cắt của răng cắt (độ);

β – Góc cắt (độ);

W_1 - Áp lực tác dụng lên mặt trượt (kN);

W_2 - Áp lực tác dụng lên mặt răng cắt (kN).

- Hợp lực theo phương đứng [28]:

$$\sum F_v = -K_1 \cos(\beta + \phi) - W_1 \cos \beta + W_2 \cos \alpha - K_2 \cos(\alpha + \beta) = 0 \quad (2.24)$$

trong đó: F_v – Lực cắt theo phương đứng (kN).

- Lực K_1 tác dụng lên mặt phẳng trượt [28]:

$$K_1 = \frac{W_2 \sin \delta + W_1 \sin(\alpha + \beta + \delta)}{\sin(\alpha + \beta + \delta + \phi)} \quad (2.25)$$

- Lực K_2 tác dụng lên răng cắt [28]:

$$K_2 = \frac{W_2 \sin(\alpha + \beta + \delta) + W_1 \sin \phi}{\sin(\alpha + \beta + \delta + \phi)} \quad (2.26)$$

- Từ phương trình (2.26) ta có thể phân tích lực tác dụng lên răng cắt theo hai phương như sau [28]:

$$F_h = -W_2 \sin \alpha + K_2 \sin(\alpha + \delta) \quad (2.27)$$

$$F_v = -W_2 \cos \alpha + K_2 \cos(\alpha + \beta)$$

- Do nền san hô độ rỗng lớn nên có xâm thực thì W_1 và W_2 trở thành [28]:

$$W_1 = \frac{\rho_w g (z + 10) h_i b}{\sin \beta} \quad W_2 = \frac{\rho_w g (z + 10) h_b b}{\sin \alpha} \quad (2.28)$$

trong đó:

ρ_w - Trọng lượng riêng của nước (tấn/m³);

g - Gia tốc trọng trường;

z - Độ sâu của nước;

h_i - Chiều dày của lớp cát;

b - Bề rộng răng cắt (m);

h_b - Chiều cao của răng cắt (m);

- Mô men cản xoay gây ra tại một răng khi cắt lớp cát và cành nhánh san hô [28]:

$$M_h^c = F_h \frac{D+d}{4} = \frac{D+d}{4} (-W_2 \sin \alpha + K_2 \sin(\alpha + \delta)) \quad (2.29)$$

- Mô men cản xoay gây ra tại toàn bộ 16 răng khi cắt lớp cát san hô [28]

$$M_h^c = 4(D+d)(-W_2 \sin \alpha + K_2 \sin(\alpha + \delta)) \quad (2.30)$$

- Từ công thức (2.18), (2.20) và (2.30) ta có tổng mô men cản khi hạ cọc ở lớp cát và cành nhánh san hô:

$$M_{ci} = \frac{\pi}{2\sqrt{1+\tan^2 \alpha_1}} \left[D^2 \left(\sum_{i=1}^n h_i (\sigma_{hi} \tan \delta_{si} + c_{ci}) \right) + d^2 h_p (\sigma_{hp} \tan \delta_{sp} + c_p) \right] + 4(D+d) [-W_2 \sin \alpha + K_2 \sin(\alpha + \delta)] \quad (2.31)$$

b. Khi cắt lớp đá san hô

Chiếu tất cả các lực lên phương ngang và phương đứng ta có:

- Hợp lực theo phương ngang [28]:

$$\sum F_h = K_1 \sin(\beta + \phi) + C \cos \beta - K_2 \sin(\alpha + \delta) = 0 \quad (2.32)$$

trong đó: C – Lực dính trên mặt phẳng trượt (kN). Lực này được tính bằng cách nhân độ bền cắt τ_c với diện tích mặt trượt;

- Hợp lực theo phương đứng [28]:

$$\sum F_v = -K_1 \cos(\beta + \phi) + C \sin \beta - K_2 \cos(\alpha + \delta) = 0 \quad (2.33)$$

- Lực K_1 tác dụng lên mặt phẳng trượt [28]:

$$K_1 = \frac{-C \cos(\alpha + \beta + \delta)}{\sin(\alpha + \beta + \delta + \phi)} \quad (2.34)$$

- Lực K_2 tác dụng lên răng cắt [28]:

$$K_2 = \frac{C \cos \phi}{\sin(\alpha + \beta + \delta + \phi)} \quad (2.35)$$

- Lực dính tính theo công thức sau [28]:

$$C = \frac{\lambda_s \cdot c_c \cdot h_i \cdot b}{\sin \beta} \quad (2.36)$$

trong đó: λ_s - Chỉ số cường độ vận tốc, đối với đá $\lambda_s = 1$;

c_c - Lực dính kết cấu của san hô với thép (kPa)

- Từ phương trình (2.35) ta có thể phân tích lực tác dụng lên răng cắt theo hai phương như sau [28]:

$$\begin{aligned} F_h &= K_2 \sin(\alpha + \delta) \\ F_v &= K_2 \cos(\alpha + \delta) \end{aligned} \quad (2.37)$$

- Từ công thức (2.37) mô men cản xoay gây ra tại một răng khi cắt lớp đá san hô [28]:

$$M_h^c = F_h \frac{D+d}{4} = \frac{D+d}{4} K_2 \cos(\alpha + \delta) \quad (2.38)$$

- Mô men cản xoay gây ra tại toàn bộ 16 răng khi cắt lớp đá san hô [28]

$$M_h^c = 4(D+d) K_2 \cos(\alpha + \delta) \quad (2.39)$$

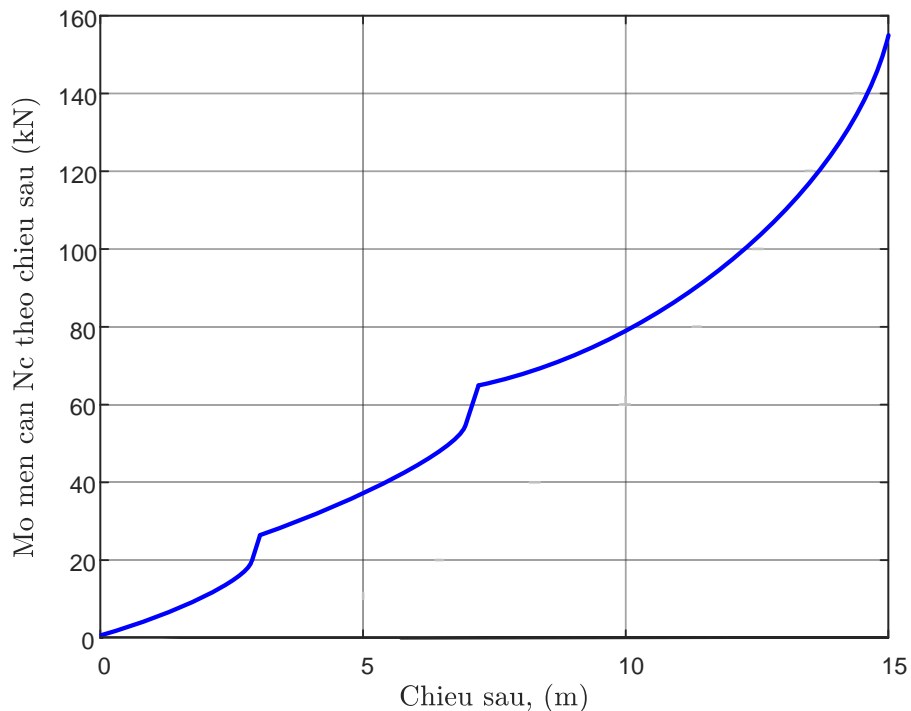
- Từ công thức (2.18), (2.20) và (2.39) ta có tổng mô men cản khi hạ cọc lớp đá san hô

$$\begin{aligned} M_{ci} &= \frac{\pi}{2\sqrt{1+\tan^2\alpha_1}} \left[D^2 \left(\sum_{i=1}^n h_i (\sigma_{hi} \tan\delta_{si} + c_{ci}) \right) + d^2 h_p (\sigma_{hp} \tan\delta_{sp} + c_p) \right] + \\ &\quad + 4(D+d) K_2 \cos(\alpha + \delta) \end{aligned} \quad (2.40)$$

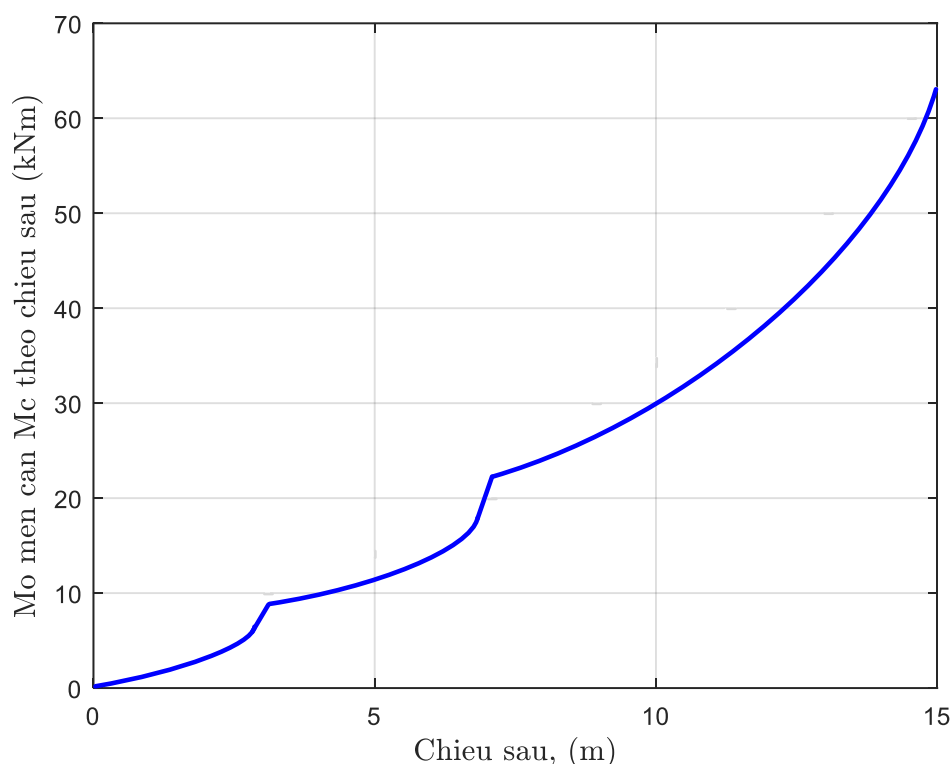
Mô hình tính toán các thành phần lực cản được xây dựng dựa trên cơ sở các công trình nghiên cứu tương tác giữa ống thép với nền đất, đá của các nhà khoa học đã được công bố, kế thừa và phát huy những nghiên cứu của các nhà khoa học áp dụng vào nền đá san hô với các thông số có những thay đổi so với nền đất và đá, cụ thể là: trọng lượng riêng của san hô (γ), góc ma sát trong của san hô (ϕ), lực dính kết cấu của san hô (c_i), hệ số ma sát giữa thép với san hô (μ), áp lực của nền san hô tác dụng vào ống thép (σ_i) được thể hiện ở các công thức (2.9), (2.10), (2.15), (2.31), (2.40).

2.2.3. Khảo sát sự thay đổi lực cản và mô men cản theo chiều sâu

Khảo sát sự thay đổi lực cản N_c và mô men cản M_c thay đổi theo chiều sâu theo biểu thức (2.15) và (2.40) ở tốc độ vòng xoay 20 vòng/phút, ống thép đi qua lớp cát san hô, lớp cành nhánh san hô và đến lớp đá san hô ở độ sâu 15m. Kết quả khảo sát thể hiện trên đồ thị hình 2.11 và hình 2.12.



Hình 2.11. Sự thay đổi lực cản theo chiều sâu



Hình 2.12. Sự thay đổi mô men cản theo chiều sâu

Từ đồ thị hình 2.12 và hình 2.12 ta thấy hình dáng đồ thị thay đổi mô men cản và lực cản tăng theo chiều sâu và từng lớp san hô. Ở lớp cát và cành nhánh san hô hình dáng đồ thị mô men cản và lực cản độ dốc nhỏ hơn, chứng tỏ rằng mô men cản và lực cản tăng chậm. Ở lớp đá san hô mô men cản và lực cản tăng nhanh thể hiện ở độ dốc của đồ thị, khi đạt độ sâu 10 m đến 15 m hình dáng đồ thị mô men cản và lực cản tăng nhanh. Quá trình xoay-ép hạ cọc ống thép, khi chuyển từ lớp này sang lớp khác, mô men cản và lực cản có bước nhảy thể hiện trên đồ thị. Cụ thể ở độ sâu 3,4 m lớp cát san hô sang lớp cành nhánh san hô đồ thị có bước nhảy, mô men cản 0,95 kN.m, lực cản 2,56 kN. Ở độ sâu 6,5 m lớp cành nhánh san hô sang lớp đá san hô đồ thị có bước nhảy, mô men cản 2,29 kN.m, lực cản 5,725 kN. Kết quả khảo sát đến độ sâu 15 m tổng lực cản $N_c = 154,205 \text{ kN}$ và tổng mô men cản $M_c = 63,84 \text{ kN.m}$.

Kết quả tính toán lý thuyết lực cản và mô men cản theo từng điểm thể hiện ở bảng 2.1.

Bảng 2.1. Kết quả tính toán lý thuyết giá trị mô men cản M_c và lực cản N_c

| | | | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|--------|---------|
| Độ sâu Z(m) | 1 | 4 | 8 | 12 | 15 |
| Giá trị M_c (kNm) | 6,20 | 12,87 | 26,20 | 42,87 | 63,84 |
| Giá trị N_c (kN) | 15,11 | 31,17 | 63,30 | 103,45 | 154,205 |

2.2.4. So sánh kết quả tính toán lực cản và mô men cản giữa mô hình lý thuyết với thực nghiệm

So sánh, đánh giá kết quả nghiên cứu lý thuyết và kết quả thực nghiệm, tiến hành đánh giá sai số tương đối theo chiều sâu hạ cọc như sau:

$$\tilde{X} = \frac{X_{LT} - X_{TN}}{X_{LT}} 100\% \quad (2.41)$$

trong đó:

\tilde{X} - Sai số giữa lý thuyết với thực nghiệm;

X_{LT} - Kết quả tính toán lý thuyết;

X_{TN} - Kết quả thực nghiệm.

Luận án trình bày so sánh sai số lấy kết quả trung bình của ba lần đo thực nghiệm để so sánh với kết quả tính toán mô hình lý thuyết (kết quả so sánh giữa lý thuyết với thực nghiệm ở cùng tốc độ vòng xoay 20 vòng/phút).

Bảng 2.2. So sánh kết quả mô men cản giữa lý thuyết và thực nghiệm

| Độ sâu Z(m) | Giá trị mô men cản xoay M_c (kNm) tại các độ sâu của các cọc thí nghiệm | | Sai số (%) |
|--------------------|---|--------------------|-------------------|
| | Lý thuyết | Thực nghiệm | |
| 1 | 6,20 | 5,28 | 14,83 |
| 4 | 12,87 | 11,77 | 8,54 |
| 8 | 26,20 | 23,36 | 10,84 |
| 12 | 42,87 | 38,33 | 10,59 |
| 15 | 63,84 | 56,88 | 10,9 |
| | Sai số trung bình | | 11,14 |

Bảng 2.3. So sánh kết quả lực cản giữa lý thuyết và thực nghiệm

| Độ sâu Z(m) | Giá trị lực cản ma sát N_c (kN) trên thân cọc theo phương thẳng đứng | | Sai số (%) |
|----------------|---|-------------|---------------|
| | Lý thuyết | Thực nghiệm | |
| 1 | 15,11 | 13,11 | 13,24 |
| 4 | 31,17 | 27,58 | 11,52 |
| 8 | 63,30 | 59,38 | 6,19 |
| 12 | 103,45 | 97,51 | 5,74 |
| 15 | 154,205 | 143,47 | 6,96 |
| | Sai số trung bình | | 8,73 |

2.2.5. Quy luật biến thiên và mối quan hệ giữa các thông số đặc trưng cho chế độ làm việc của bộ công tác xoay-ép hạ cọc

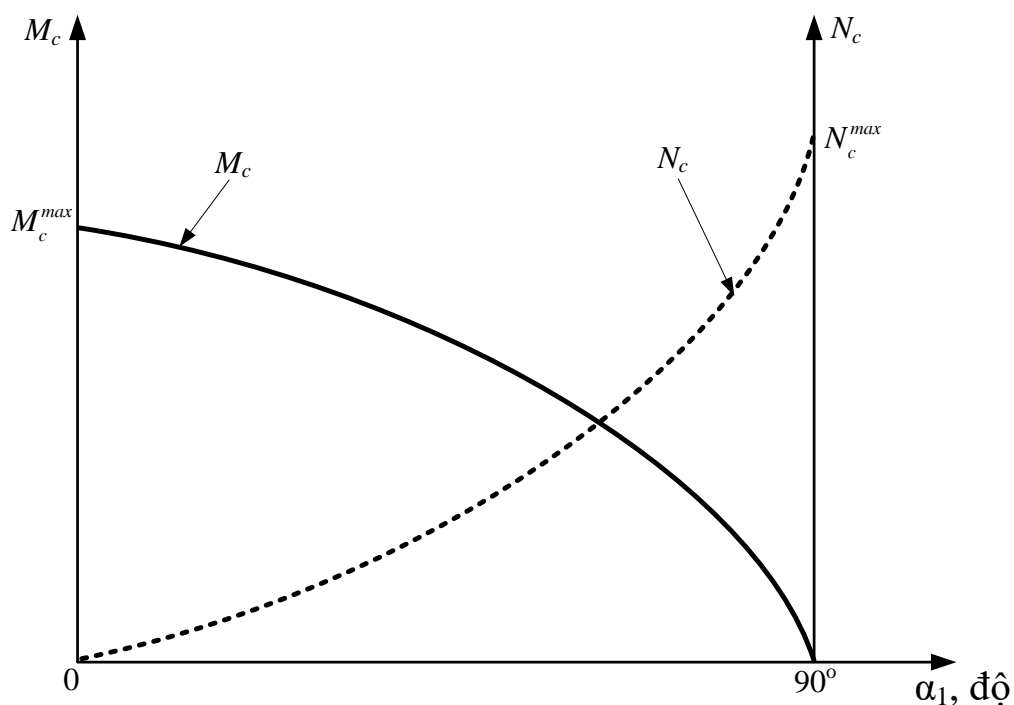
Theo [8], từ các công thức (2.15) và (2.40) ta có quy luật biến thiên của lực cản N_c và mô men cản M_c theo α_l , đồng thời vận tốc dẫn tiến v_l và tốc độ vòng xoay n bị ràng buộc lẫn nhau thông qua biểu thức (2.11). Như vậy, mỗi giá trị α_l chúng ta sẽ nhận được giá trị N_c và M_c tương ứng như đồ thị hình 2.13. Mặt khác tốc độ dẫn tiến và tốc độ xoay ống thép cũng phải tỷ lệ với nhau theo α_l thông qua biểu thức (2.11) mới đảm bảo xoay-ép hạ cọc ống thép vào nền đá san hô.

Với máy cơ sở đủ công suất để dẫn động cơ cấu dẫn tiến và cơ cấu xoay ống thép thì mối liên hệ ràng buộc với N_c , M_c , v_l , n thông qua công thức (2.42) và (2.43) [32]:

$$P_t = \frac{\pi N_c v_l}{30 \eta_t} R_t \quad (2.42)$$

$$P_r = \frac{\pi M_c n}{30 \eta_r} \quad (2.43)$$

trong đó: N_c - Lực cản thẳng đứng của nền san hô tác dụng lên ống thép;
 v_t - Vận tốc dẫn tiến ống thép;
 M_c - Mô men cản xoay của nền san hô tác dụng lên ống thép;
 n - Tốc độ vòng xoay ống thép;



Hình 2.13. Quy luật biến thiên của N_c và M_c theo α_1

Theo hình 2.13, khi α_1 nhỏ thì N_c nhỏ thì M_c lớn và ngược lại, nếu α_1 nhỏ và N_c nhỏ thì theo (2.42) sẽ được v_t lớn và năng suất hạ cọc sẽ cao. Tuy nhiên, khi N_c nhỏ thì mô men cản xoay M_c lớn, đồng thời với v_t lớn thì theo (2.11) tốc độ xoay n cũng lớn làm cho công suất xoay cọc ống thép lớn, công suất của mô tơ xoay cọc và công suất nguồn của máy cơ sở không đáp ứng được. Vì vậy, để xác định được thông số làm việc hợp lý của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép cần phải khảo sát các giá trị (N_c , M_c , v_t , n) theo α_1 phụ thuộc vào tính năng kỹ thuật về tốc độ dẫn tiến và tốc độ xoay của mô tơ dẫn động, thỏa mãn các yêu cầu của quá trình xoay-ép hạ cọc ống thép cũng như

nguồn dẫn động của máy cơ sở. Tính toán sự biến thiên của N_c và M_c theo α_1 khi xoay ép hạ cọc trên nền đá san hô ở độ sâu 10 m với đường kính cọc ống thép $D=300\text{ mm}$, kết quả tính toán thể hiện trong bảng 2.4.

Bảng 2.4. Sự biến thiên N_c và M_c theo α_1

| α_1 (Độ) | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| N_c (kN) | 14,61 | 28,25 | 54,26 | 79,99 | 107,70 | 140,15 | 182,41 | 247,04 | 382,22 | 618,24 |
| M_c (kN.m) | 20,03 | 19,26 | 17,88 | 16,63 | 15,40 | 14,11 | 12,64 | 10,79 | 8,09 | 2,74 |

2.3. Mô hình động lực học bộ công tác kiểu xoay-ép hạ cọc ống thép

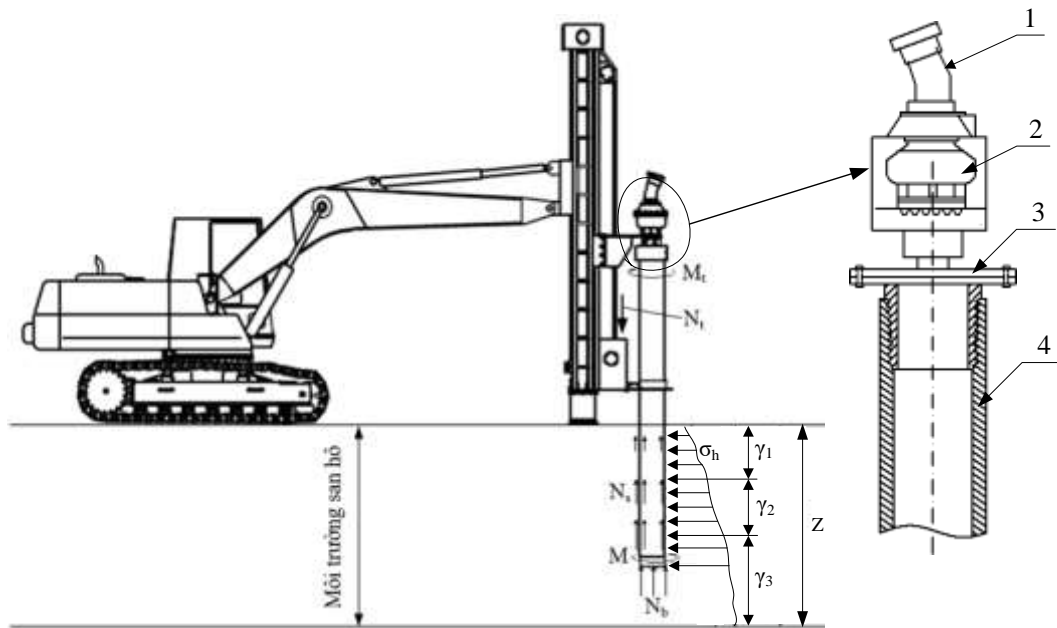
2.3.1. Các giả thiết xây dựng mô hình động lực học

Để nghiên cứu mối quan hệ giữa các thông số: Mô men dẫn động, vận tốc góc ống khoan, lực dẫn tiến, vận tốc dẫn tiến đến khả năng hạ cọc, cần tiến hành xây dựng mô hình vật lý và mô hình động lực học giữa bộ công tác với nền san hô. Xây dựng mô hình dựa trên các giả thiết sau:

- + Máy cơ sở đủ công suất dẫn động, đảm bảo ổn định trong quá trình di chuyển hoặc xoay-ép hạ cọc;
- + Nền san hô phân lớp, trong đó coi mỗi lớp nền là lớp san hô đồng nhất, đẳng hướng, đàn hồi tuyến tính [1], [5];
- + Đầu xoay, ống thép, mũi ống thép là những vật rắn tuyệt đối;
- + Lực dẫn tiến bộ phận công tác đặt đúng tâm ống thép;
- + Bỏ qua ma sát trượt giữa cần với cụm rãnh trượt;
- + Các phoi san hô được thoát hết hoàn toàn trong quá trình xoay hạ cọc vào môi trường san hô;
- + Giả thiết cho phần tính toán quá trình xoay-ép hạ cọc, cọc ống thép thẳng đứng đúng tâm, sử dụng ống thép không bịt đầu, đầu gắn 16 răng cắt.

2.3.2. Mô hình động lực học bộ công tác kiểu xoay-ép

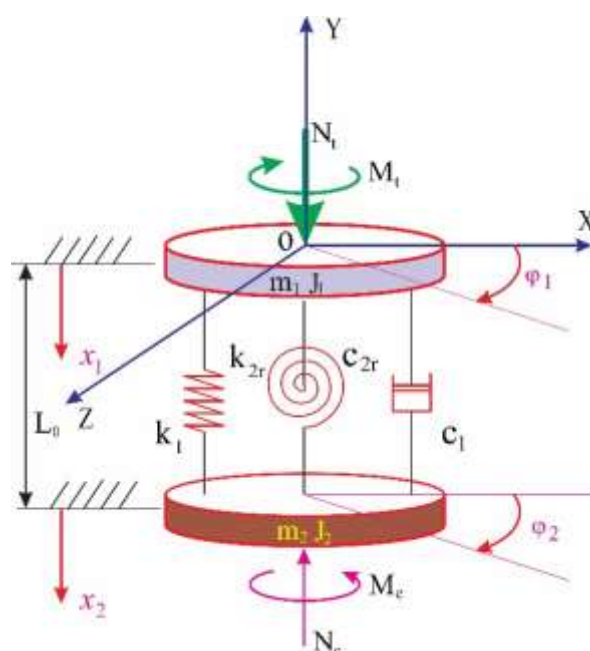
Từ mô hình tương tác, sơ đồ lực cản tác dụng lên răng cắt (Hình 2.6) và các giả thiết trên xây dựng mô hình vật lý (Hình 2.14), ứng dụng lý thuyết cơ học hệ nhiều vật để mô hình hóa bộ công tác xoay hạ cọc ống thép, mô hình động lực học bộ công tác khoan xoay hạ cọc ống thép được thể hiện như hình 2.15 [21], [38], [33], [36].



Hình 2.14. Mô hình vật lý bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép

1- Mô tơ xoay ống thép; 2 - Hộp giảm tốc; 3 - Đầu xoay; 4 - Ống thép

Thiết bị xoay hạ cọc được thay thế bằng mô hình 2 khối lượng với 2 chuyển động của cọc ống thép như hình 2.15 ứng với (m_1, J_1) và (m_2, J_2) . Vật m_1 ứng với phần đầu dẫn động cọc ống thép (khâu 1), vật m_2 ứng với cọc ống thép (khâu 2), J_1 mô men quán tính quy đổi khối lượng phần đầu dẫn động cọc ống thép, J_2 mô men quán tính quy đổi khối lượng cọc ống thép. Để nghiên cứu động lực học của hệ thống mỗi vật được gắn với 2 chuyển động độc lập (x_i và φ_i) với $i = 1, 2$. Khớp nối giữa cọc khoan và cụm đầu dẫn động được đặc trưng bởi độ cứng dọc trục k_1 , xoay k_{2r} , các phần tử giảm chấn dọc trục c_1 , xoay c_{2r} .



Hình 2.15. Mô hình động lực học bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép trong đó:

- + N_t - Lực dẫn tiến (Bằng mô tơ dẫn động xích);
- + N_c - Tổng lực cản tác dụng lên ống thép theo phương thẳng đứng;
- + M_t - Mô men xoay ống thép;
- + M_c - Tổng mô men cản xoay tác dụng lên ống thép;
- + m_1 - Khối lượng của đầu xoay;
- + m_2 - Khối lượng của ống thép;
- + x_1 - Dịch chuyển của đầu xoay theo phương đứng;
- + x_2 - Dịch chuyển của ống thép;
- + k_1 - Hệ số độ cứng của mối ghép ren;
- + k_{2r} - Hệ số độ cứng chống xoắn mối ghép ren cụm đầu xoay, ống thép;
- + c_1 - Hệ số giảm chấn nhớt của mối ghép ren;
- + c_{2r} - Hệ số giảm chấn nhớt của mối ghép ren cụm đầu xoay, ống thép;
- + J_1 - Mô men quán tính của cụm đầu xoay;
- + J_2 - Mô men quán tính của cụm ống thép;

- + φ_1 - Góc xoay của cụm đầu xoay;
- + φ_2 - Góc xoay của cụm ống thép;
- + L_0 - Khoảng cách từ gốc tọa độ của mô hình đến trọng tâm khâu 2;
- + OXYZ – Hệ tọa độ cố định mô hình tính toán.

Áp lực nền, độ cứng và cản nhớt của nền san hô tác dụng lên thành trong và thành ngoài cọc ống thép tạo nên lực cản trượt trên thành ống thép. Tổng hợp lực cản trượt và lực cản đầu ống thép thành tổng lực cản N_c , tổng hợp mô men cản trượt và lực cản cắt gây ra tại răng cắt thành tổng mô men cản M_c thể hiện trên mô hình tính toán hình 2.15.

Khi ống thép xoay, dưới tác dụng của lực dẫn tiến N_f , các răng cắt ăn sâu vào san hô sẽ tạo thành một khoảng trống hình vành khăn để giảm lực cản lên đầu cọc ống thép. Khi răng cắt ăn sâu vào san hô, nó không di chuyển theo phương thẳng đứng mà theo đường xoắn vít. Khi hạ cọc ống thép đến độ sâu thiết kế, ống thép không rút lên, nó để lại trên nền san hô để làm trụ móng công trình. Chính vì vậy, trong quá trình xoay-ép hạ cọc ống thép các răng cắt vừa bào cắt san hô vừa tháo chuyển phoi san hô ra khoảng trống của hình vành khăn, dưới tác dụng của chuyển động xoay (lực ly tâm) của cọc ống thép các phoi san hô bị ép điền vào lỗ rỗng của nền san hô, một phần phoi đi vào trong lòng ống thép, các phoi san hô cùng với nền tạo nên áp lực tác dụng lên thành ống thép.

2.3.3. Thiết lập phương trình vi phân chuyển động

Áp dụng phương trình Lagrange loại II cho cơ hệ gồm đầu xoay, ống thép để viết phương trình vi phân chuyển động [12].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (i = 1 \div 4) \quad (2.44)$$

trong đó:

T - Hàm động năng của hệ;

Π - Hàm thế năng của hệ;

Φ - Hàm hao tán của hệ;

q_i - Các tọa độ suy rộng ($i = 1, 2, 3, \dots$);

Q_i - Các lực suy rộng của hệ.

Trong đó $\mathbf{q} = [q_i] = [x_1 \ \varphi_1 \ x_2 \ \varphi_2]^T$ là véc tơ tọa độ suy rộng độc lập.

Các thành phần trong công thức (2.44) được xác định lần lượt như sau:

Biểu thức động năng của hệ

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (2.45)$$

trong đó:

T_1 - Động năng của đầu xoay khi chịu lực dẫn tiến

$$T_1 = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 \quad (2.46)$$

T_2 - Động năng của đầu xoay khi chịu mô men xoắn

$$T_2 = \frac{1}{2} J_1 \dot{\varphi}_1^2 \quad (2.47)$$

T_3 - Động năng của ống thép khi chịu lực dẫn tiến

$$T_3 = \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 \quad (2.48)$$

T_4 - Động năng của ống thép khi chịu mô men xoắn

$$T_4 = \frac{1}{2} J_2 \dot{\varphi}_2^2 \quad (2.49)$$

Động năng của cơ hệ được tính:

$$T = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} J_1 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\varphi}_2^2 \quad (2.50)$$

Tiến hành đạo hàm ta có:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} = m_1 \dot{x}_1; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) = m_1 \ddot{x}_1; \quad \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0 \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} = J_1 \dot{\varphi}_1; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) = J_1 \ddot{\varphi}_1; \quad \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = 0 \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} = m_2 \dot{x}_2; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) = m_2 \ddot{x}_2; \quad \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0 \quad (2.53)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_2} = J_2 \dot{\phi}_2; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_2} \right) = J_2 \ddot{\phi}_2; \quad \frac{\partial T}{\partial \phi_2} = 0 \quad (2.54)$$

Thế năng của cơ hệ được tính:

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 (x_2 - x_1)^2 + \frac{1}{2} k_{2r} (\phi_2 - \phi_1)^2 \quad (2.55)$$

Các đạo hàm riêng:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = -k_1 (x_2 - x_1) \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_2} = k_1 (x_2 - x_1) \quad (2.57)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \phi_1} = -k_{2r} (\phi_2 - \phi_1) \quad (2.58)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \phi_2} = k_{2r} (\phi_2 - \phi_1) \quad (2.59)$$

Hàm hao tán của cơ hệ được tính:

$$\Phi = \frac{1}{2} c_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2} c_{2r} (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_1)^2 \quad (2.60)$$

Các đạo hàm riêng:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_1} = -c_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (2.61)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_2} = c_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (2.62)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\phi}_1} = -c_{2r} (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_1) \quad (2.63)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\phi}_2} = c_{2r} (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_1) \quad (2.64)$$

Véc tơ lực suy rộng:

$$Q = [N_t \quad M_t \quad -N_c \quad -M_c]^T \quad (2.65)$$

Hệ phương trình vi phân chuyển động:

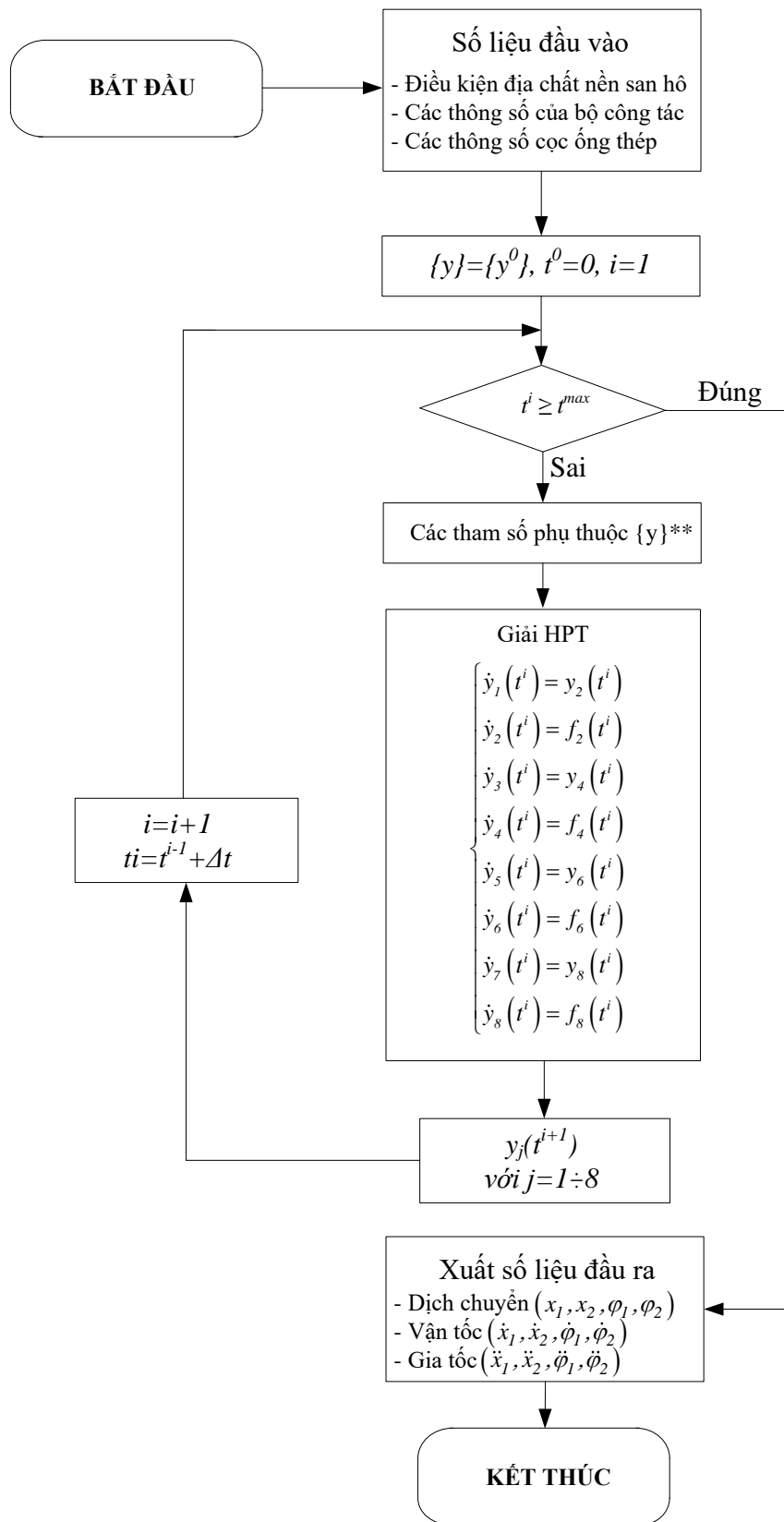
$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_1} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_1} + \frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = N_t \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \phi_1} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\phi}_1} + \frac{\partial \Pi}{\partial \phi_1} = M_t \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_2} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_2} + \frac{\partial \Pi}{\partial x_2} = -N_c \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \phi_2} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\phi}_2} + \frac{\partial \Pi}{\partial \phi_2} = -M_c \end{cases} \quad (2.66)$$

Thay các đạo hàm ta nhận được phương trình chuyển động của bộ công tác xoay-ép hạ cọc:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 - c_1 \dot{x}_2 + k_1 x_1 - k_1 x_2 = N_t \\ J_1 \ddot{\phi}_1 + k_{2r} \dot{\phi}_1 - k_{2r} \dot{\phi}_2 + c_{2r} \phi_1 - c_{2r} \phi_2 = M_t \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_1 \dot{x}_1 + c_1 \dot{x}_2 - k_1 x_1 + k_1 x_2 = -N_{ci} \\ J_2 \ddot{\phi}_2 - k_{2r} \dot{\phi}_1 + k_{2r} \dot{\phi}_2 - c_{2r} \phi_1 + c_{2r} \phi_2 = -M_{ci} \end{cases} \quad (2.67)$$

Đây là hệ phương trình vi phân cấp hai thuần nhất, có hệ số là hằng số. Vế phải của chúng phụ thuộc vào lực dẫn tiến, mô men xoay đầu xoay và đặc tính của nền san hô. Lực dẫn tiến N_t và mô men dẫn động xoay ống thép M_t phụ thuộc vào tổng lực cản theo phương thẳng đứng N_c và tổng mô men cản M_c . Tổng lực cản theo phương thẳng đứng N_c và tổng mô men cản M_c phụ thuộc vào chiều sâu hạ cọc h_i và tính chất cơ lý của từng lớp san hô.

Từ hệ phương trình vi phân thiết lập được ta có thể xác định được dịch chuyển của ống thép, xác định qui luật ảnh hưởng của các thông số động lực học đến quá trình xoay hạ cọc ống thép. Sử dụng phương pháp Runge-Kutta biến đổi 4 phương trình vi phân cấp 2 về 8 phương trình vi phân cấp 1 để giải ta nhận được sơ đồ thuật toán giải hệ phương trình vi phân (2.67) thể hiện trên Hình 2.16.



Hình 2.16. Sơ đồ thuật toán giải hệ phương trình vi phân

2.3.4. Xác định các thông số đầu vào

2.3.4.1. Điều kiện ban đầu

Điều kiện đầu bao gồm các thông số về vị trí, vận tốc, gia tốc ban đầu của các khâu:

Lúc bắt đầu khoan, dịch chuyển ống thép thâm nhập vào nền bằng 0, góc xoay của đầu khoan và ống khoan bằng ωt :

$$\begin{aligned}x_1(0) &= 0; x_2(0) = L_0; \\ \dot{x}_1(0) &= \dot{x}_2(0) = 0; \\ \varphi_1(0) &= \varphi_2(0) = 0; \\ \dot{\varphi}_1(0) &= \dot{\varphi}_2(0) = \omega_0.\end{aligned}\tag{2.68}$$

2.3.4.2. Các tham số của mô hình

- Các khối lượng của đầu xoay (m_1), ống khoan (m_2) được xác định qua các thông số kết cấu;

- Mô men quán tính cụm đầu xoay [12]:

$$J_1 = \frac{1}{2} m_1 R^2 \tag{2.69}$$

- Mô men quán tính cụm ống thép [12]:

$$J_2 = \frac{1}{2} m_2 \left(\frac{D}{2} \right)^2 (1 + \eta^2) \tag{2.70}$$

Trong đó: R - Bán kính của ống thép được xác định qua thông số kết cấu;

- Xác định độ cứng chống xoắn k_{2r} và hệ số cản nhớt c_{2r} :

+ Theo [10], độ cứng của trục làm việc khi xoắn: ống thép có tiết diện hình vành khăn, với đường kính ngoài D , đường kính trong d , có chiều dài l và chịu tác dụng mô men xoắn M_x .

Góc xoắn θ được xác định theo công thức:

$$\theta = \frac{M_x l}{GI_p} \tag{2.71}$$

trong đó: G – Mô đun đàn hồi loại hai của thép;

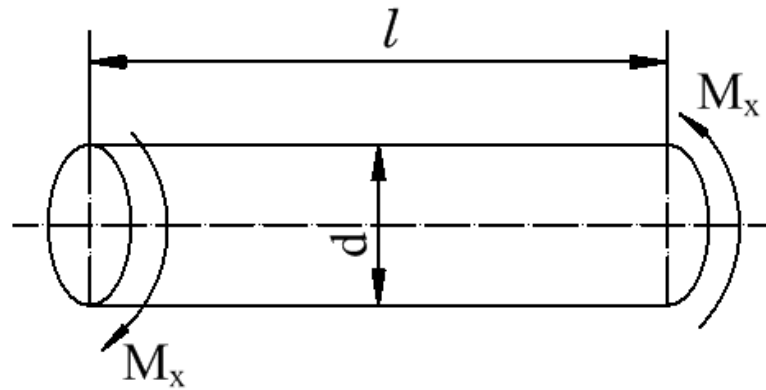
I_p – Mô men quán tính độc cực của tiết diện [12];

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32} (1 - \eta^4) \quad (2.72)$$

Với $\eta = \frac{d}{D}$

trong đó: D - Đường kính ngoài ống thép (m)

d - Đường kính trong ống thép (m)



Hình 2.17. Chi tiết ống.

Độ cứng k theo định nghĩa là mô men xoắn cần thiết để gây lên góc xoắn đơn vị. Vậy:

$$k_{2r} = \frac{M_x}{\theta} = \frac{GI_p}{l} = \frac{G\pi d^4}{32l} (1 - \eta^4) \quad (2.73)$$

+ Theo [10], hệ số cản nhớt c_{2r} khi xoắn được xác định:

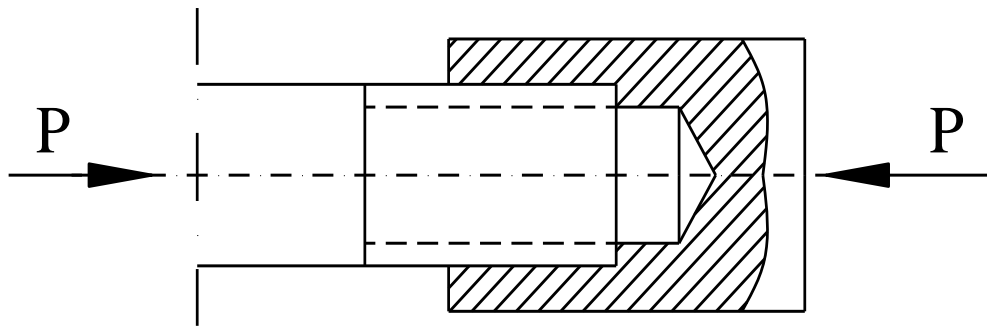
$$c_{2r} = 0,064k_{2r}\omega \quad (2.74)$$

- Xác định độ cứng của mối ghép ren giữa đầu xoay với ống thép k_t :

+ Theo [10], độ cứng của mối nối ren: Tác dụng lực dọc P lên mỗi ghép vít - êcu sẽ làm cho vít biến dạng (Hình 2.18). Do đầu khoan, ống khoan đều bằng thép thì độ cứng của mối ghép này sẽ là:

$$k_t = k_t S \quad (2.75)$$

trong đó: S - diện tích của một vòng vít; $k_t = (1 \div 2)10^6$ N/cm³.



Hình 2.18. Mối ghép ren

2.3.4.3. Các thông số đầu vào

Bảng 2.5. Thông số của bộ công tác xoay – ép

| Thông số | Đơn vị | Giá trị |
|----------------------------|--------------------|---------|
| Khối lượng | kg | 3,500 |
| Đường kính cọc ống thép | mm | 300 |
| Hành trình ép đơn vị | mm | 2000 |
| Tốc độ ép | m/phút | 0,1-0,5 |
| Lực ép tối đa | kN | 12,9 |
| Mô men xoắn tối đa | kNm | 26,5 |
| Bơm chính (theo máy cơ sở) | | |
| Lưu lượng | lít/phút | 326 × 2 |
| Áp suất làm việc | kg/cm ² | 355 |

Bảng 2.6. Bảng thông số đầu vào của nền san hô

| Thông số | Đơn vị | Giá trị |
|--|-------------------|------------------------|
| Góc ma sát giữa nền san hô và thành ống, δ_{sp} | Độ | 5÷25 |
| Hệ số Poisson của nền san hô, ν | - | 0,3 |
| Mô đun trượt của nền san hô, G_i | N/m ² | 754,6.10 ¹⁰ |
| Khối lượng riêng của cát san hô, ρ | kg/m ³ | 15000 |
| Khối lượng riêng của cành nhánh san hô, ρ | kg/m ³ | 18000 |
| Khối lượng riêng của đá san hô, ρ | kg/m ³ | 25000 |
| Hệ số ma sát giữa thép và san hô, μ | - | 0,358 |
| Góc ma sát trong, ϕ | độ | 25÷56 |

Bảng 2.7. Các thông số động của mô hình động lực học

| Thông số | Đơn vị | Giá trị |
|--------------------------------|--------|---------|
| Khối lượng cụm đầu xoay, m_1 | kg | 750 |
| Khối lượng cọc ống thép, m_2 | kg | 145 |

Bảng 2.8. Thông số kết cấu của ống thép

| Thông số | Đơn vị | Giá trị |
|---------------------------------------|--------|---------|
| Chiều dài 1 đơn vị cọc, h_p | mm | 3000 |
| Đường kính trong, d | mm | 287 |
| Đường kính ngoài, D | mm | 300 |
| Chiều dày thành cọc, δ | mm | 6,5 |
| Số răng cắt, n_t | - | 16 |
| Kích thước răng cắt, $b_t \times h_t$ | mm×mm | 20×35 |
| Góc nghiêng răng cắt, a_t | độ | 60 |
| Độ cao răng cắt, h_b | mm | 20 |

Kết luận chương 2

- Đã xây dựng được mô hình tương tác giữa cọc ống thép với nền san hô trong quá trình xoay-ép hạ cọc, có tính đến các yếu tố tính chất cơ lý của nền và các thông số kết cấu của cọc ống thép, tính toán lực cản và mô men cản tác dụng lên ống thép theo chiều sâu. Kết quả khảo sát: ở độ sâu 3,4 m lớp cát san hô sang lớp càn nhánh san hô đồ thị có bước nhảy, mô men cản 0,947 kN.m, lực cản 2,29 kN. Ở độ sâu 6,5 m lớp càn nhánh san hô sang lớp đá san hô đồ thị có bước nhảy, mô men cản 2,37 kN.m, lực cản 5,725 kN. Ở độ sâu 15 m tổng lực cản $N_c = 154,205 \text{ kN}$ và tổng mô men cản $M_c = 63,84 \text{ kN.m}$.

- So sánh kết quả tính toán mô hình lý thuyết với thực nghiệm: lực cản và mô men cản sai số nằm trong khoảng $8,73 \div 11,14$. Có được kết quả trên là do

luận án đã xây dựng được mô hình tương tác, mô hình tính các thành phần lực cản giữa cọc ống thép với nền san hô phù hợp với thực tế, sai số nằm trong giới hạn cho phép có thể chấp nhận được.

- Đã xây dựng được mô hình động lực học của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép với 2 khối lượng và 4 bậc tự do độc lập. Trong mô hình nghiên cứu tác giả đã đề cập:

+ Tính đến độ cứng và hệ số giảm chấn xoay của khớp nối ren liên kết cụm đầu xoay và cọc thép;

+ Đã xét đến các lực cản xoay, lực cản theo phương thẳng đứng bên trong và bên ngoài ống thép, lực cản cắt nền san hô tác dụng lên răng cắt. Đây cũng là tính mới của mô hình nghiên cứu.

- Thiết lập được hệ phương trình vi phân mô tả đặc tính chuyển động của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép khi tương tác với nền san hô trong quá trình xoay-ép hạ cọc vào nền san hô.

Chương 3

KHẢO SÁT CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN KHẢ NĂNG LÀM VIỆC, XÁC ĐỊNH THÔNG SỐ LÀM VIỆC HỢP LÝ VÀ KHẢ NĂNG HẠ CỌC CỦA BỘ CÔNG TÁC KIỂU XOAY-ÉP LẤP TRÊN MÁY ĐÀO THỦY LỰC

3.1. Khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng làm việc của bộ công tác

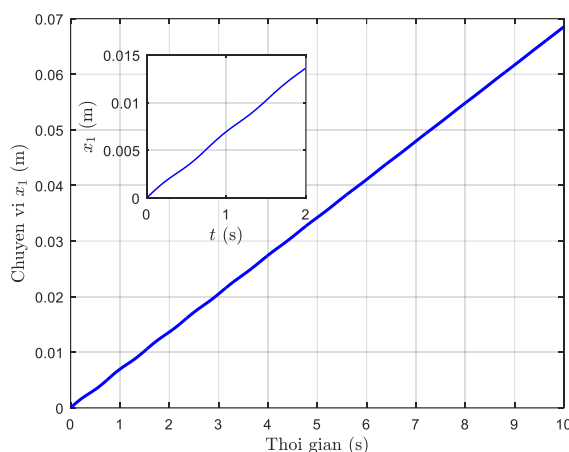
Trong quá trình xoay-ép hạ cọc các thông số ảnh hưởng đến khả năng làm việc của bộ công tác bao gồm: vận tốc dẫn tiến v_t , tốc độ vòng xoay n , trọng riêng của san hô γ , đường kính cọc ống thép D quyết định đến giá trị lực cản N_c và mô men cản M_c tác dụng vào ống thép. Sử dụng mô hình động lực học và hệ phương trình (2.67) đã xây dựng ở chương 2 với các thông số đầu vào như bảng 3.1. Ta tiến hành khảo sát các yếu tố ảnh hưởng bằng phần mềm Matlab, với điều kiện ở môi trường đá san hô bão hòa có $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, khi ống thép bắt đầu thâm nhập vào nền đá san hô, ta nhận được một số kết quả thể hiện trên hình 3.1 đến hình 3.18.

Bảng 3.1. Thông số đầu vào khảo sát các thông số động lực học

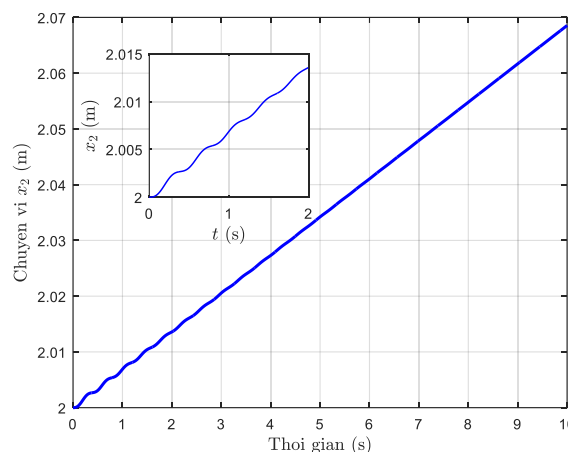
| Thông số | Đơn vị | Giá trị |
|--|-----------------|---------------------|
| Khối lượng khâu 1, m_1 | kg | 750 |
| Khối lượng khâu 2, m_2 | kg | 145 |
| Đường kính ngoài cọc ống thép, D | m | 0,3 |
| Đường kính trong cọc ống thép, d | m | 0,287 |
| Chiều dài mỗi đoạn cọc, l | m | 3 |
| Hệ số độ cứng của mỗi ghép ren, k_1 | Nm ² | $7,7631 \cdot 10^5$ |
| Hệ số độ cứng chống xoắn mỗi ghép ren cụm đầu xoay, ống thép, k_{2r} | Nm ² | $4,3266 \cdot 10^4$ |
| Hệ số giảm chấn nhớt của mỗi ghép ren, c_1 | Nsm | 650 |
| Hệ số giảm chấn nhớt của mỗi ghép ren cụm đầu xoay, ống thép, c_{2r} | Nsm | 1111,5 |

| | | |
|---|-----------|-------------------|
| Lực dính kết cấu của san hô, c_p | kN | 1,5 |
| Trọng lượng riêng đá san hô, γ | kN | 25 |
| Tốc độ vòng xoay, v_r | Vòng/phút | 20 |
| Tốc độ dẫn tiến, v_t | m/s | $8 \cdot 10^{-4}$ |
| Mô men dẫn động xoay cọc ống thép | kN.m | 19,422 |
| Lực dẫn tiến cọc ống thép | kN | 93,44 |
| Góc ma sát giữa nền san hô và thành ống, δ_{sp} | độ | 25 |
| Hệ số ma sát giữa thép và san hô, μ | - | 0,358 |
| Góc ma sát trong, ϕ | độ | 36 |
| Khoảng cách từ gốc tọa độ của mô hình đến trọng tâm khâu 2, L_0 | m | 2 |

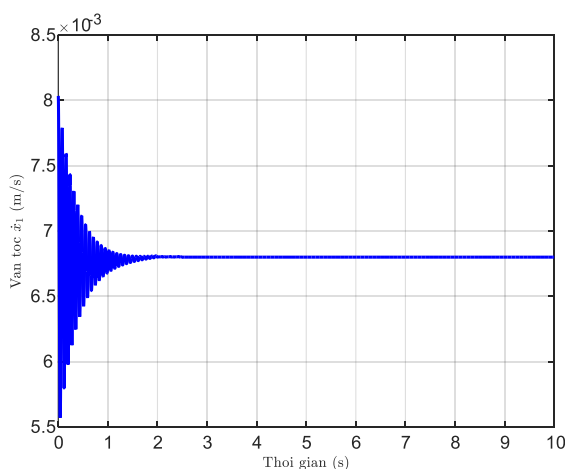
3.1.1. Kết quả khảo sát các thông số động lực học



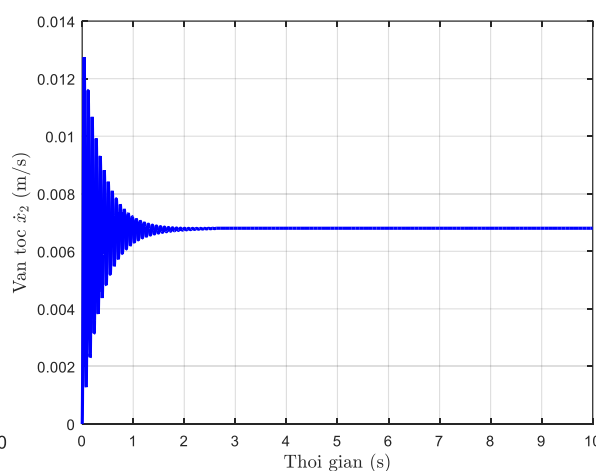
Hình 3.1. Chuyển vị của khâu 1



Hình 3.2. Chuyển vị của khâu 2

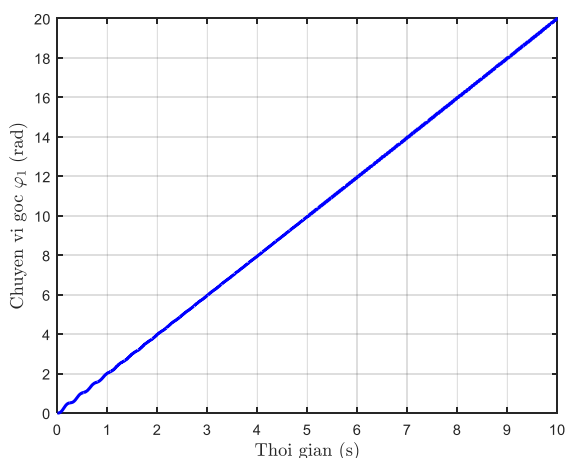


Hình 3.3. Vận tốc chuyển vị của khâu 1

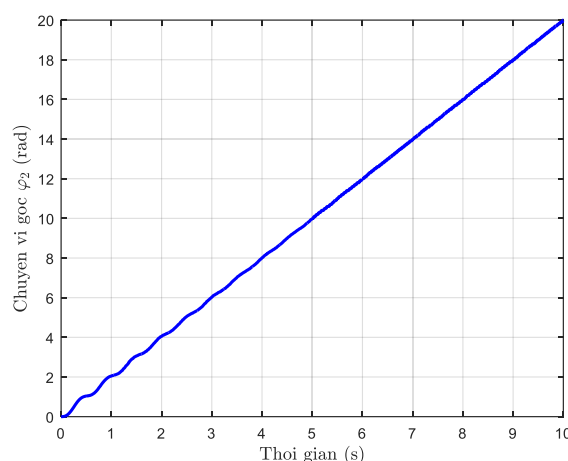


Hình 3.4. Vận tốc chuyển vị của khâu 2

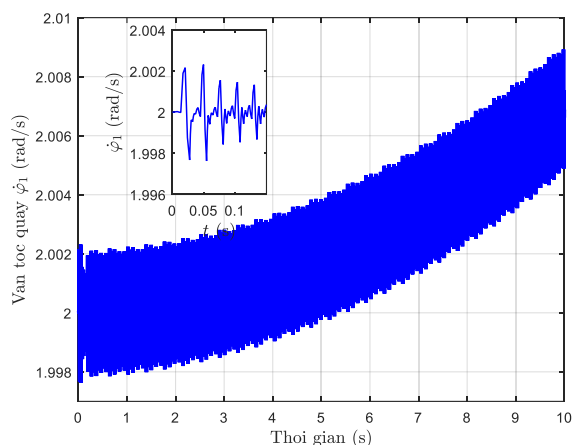
Từ đồ thị hình 3.1 và hình 3.2 cho thấy thời gian đầu cụm đầu xoay (khâu 1) và cọc thép (khâu 2) gần như chuyển vị cùng pha, khảo sát trong thời gian 10 giây chuyển vị của khâu 1 và khâu 2 đạt giá trị là 0,0685 m. Tuy nhiên do lực cản của san hô tác động lên ống thép (khâu 2) nên sự dao động của khâu 2 lớn hơn khâu 1 (hình phụ). Hình 3.3 và hình 3.4 thể hiện cụ thể vận tốc chuyển vị của các khâu, giá trị tốc độ chuyển vị trung bình của 2 khâu là 0,0068 m/s (0,408m/ph).



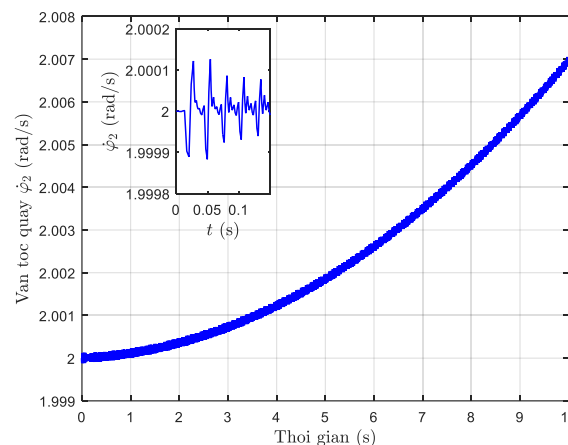
Hình 3.5. Chuyển vị góc của khâu 1



Hình 3.6. Chuyển vị góc của khâu 2



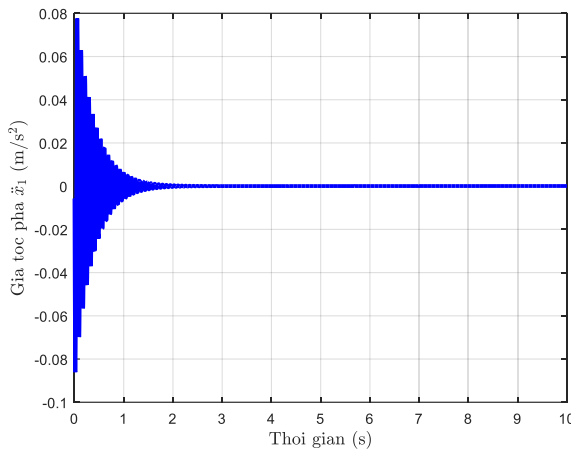
Hình 3.7. Vận tốc xoay của khâu 1



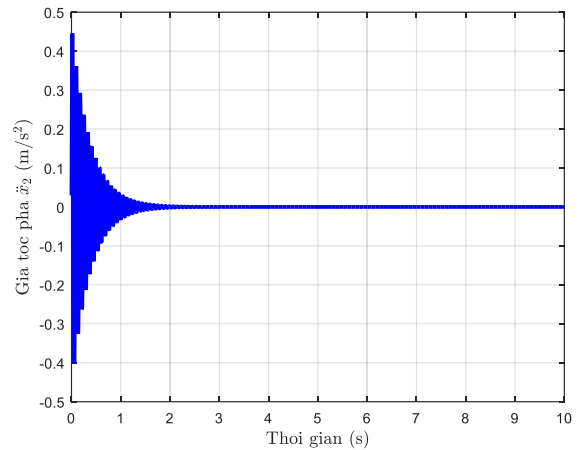
Hình 3.8. Vận tốc xoay của khâu 2

Đặc tính chuyển động xoay của các khâu được thể hiện trên hình 3.5 và hình 3.6. Dễ dàng nhận thấy về xu hướng thay đổi của các đại lượng gần như tương đồng ở cụm đầu xoay (khâu 1) và cọc thép (khâu 2) với chuyển vị góc tăng theo thời gian, khảo sát trong thời gian 10 giây giá trị chuyển vị góc của khâu 1 và khâu 2 đạt giá trị 20 rad. Tuy nhiên dựa trên hình 3.7 và hình 3.8, có

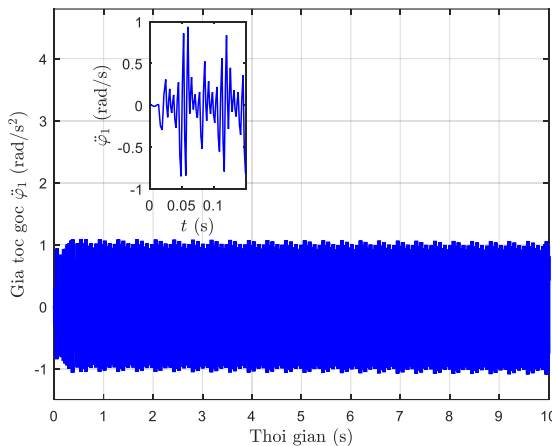
thể thấy tốc độ xoay của khâu 1 và khâu 2 có sự khác biệt, điểm khác biệt cần được kể đến là thời gian chuyển động khác pha của 2 khâu ở giai đoạn đầu là rất ngắn ($t < 0,05$ giây), giá trị vận tốc xoay trung bình của khâu 1 và khâu 2 là 2,0025 (rad/s).



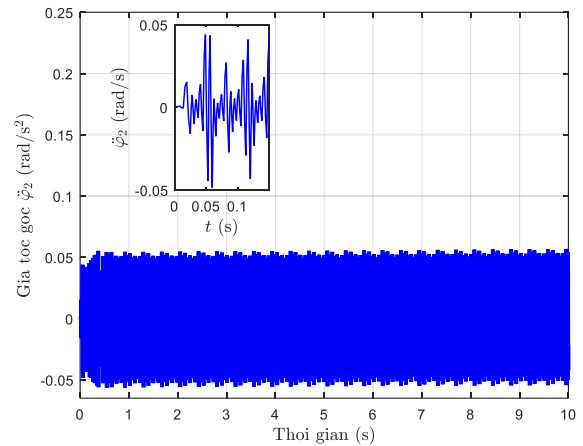
Hình 3.9. Gia tốc dịch chuyển pha của khâu 1 theo thời gian



Hình 3.10. Gia tốc dịch chuyển pha của khâu 2 theo thời gian



Hình 3.11. Gia tốc góc của khâu 1 theo thời gian

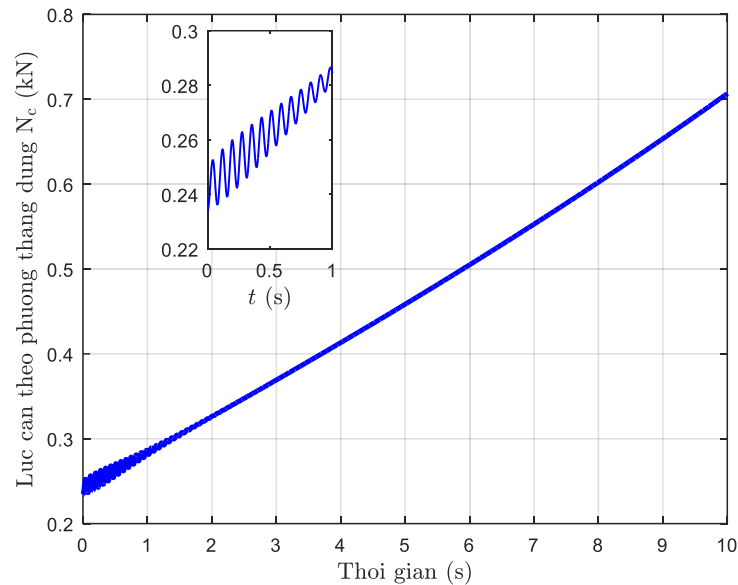


Hình 3.12. Gia tốc góc của khâu 2 theo thời gian

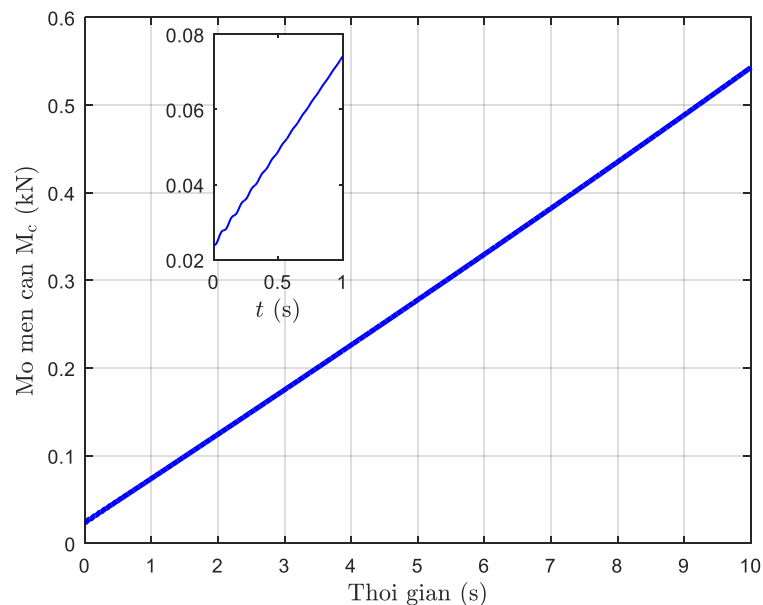
Đồ thị hình 3.9 và hình 3.10 thể hiện gia tốc dịch chuyển pha của 2 khâu, ta thấy rằng khi bắt đầu xoay-ép hạ cọc ống thép sự dao động của 2 khâu rất lớn trong thời gian 0,6 giây, sự dao động của khâu 2 lớn hơn khâu 1 do lực cản của nền san hô tác dụng lên cọc ống thép, giá trị dao động lớn nhất tương ứng là $0,45 \text{ m/s}^2$ (khâu 2) và $0,078 \text{ m/s}^2$ (khâu 1). Hình 3.11 và hình 3.12 thể hiện

dịch chuyển gia tốc góc của các khâu, dao động của các khâu có sự tương đồng, khâu 1 lớn hơn gia tốc dao động của khâu 2, giá trị dao động lớn nhất của chúng tương ứng lần lượt là $1,1 \text{ rad/s}^2$ (khâu 1) và $0,057 \text{ rad/s}^2$ (khâu 2).

3.1.2. Khảo sát lực cản theo phương thẳng đứng và mô men cản tác dụng lên ống thép khi xoay-ép hạ cọc



Hình 3.13. Lực cản theo phương thẳng đứng tác dụng lên ống thép

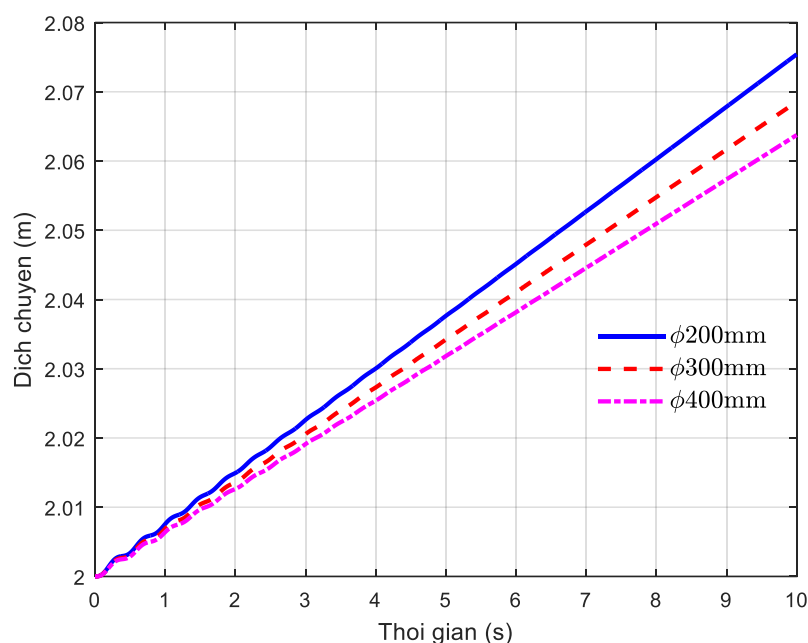


Hình 3.14. Mô men cản tác dụng lên ống thép

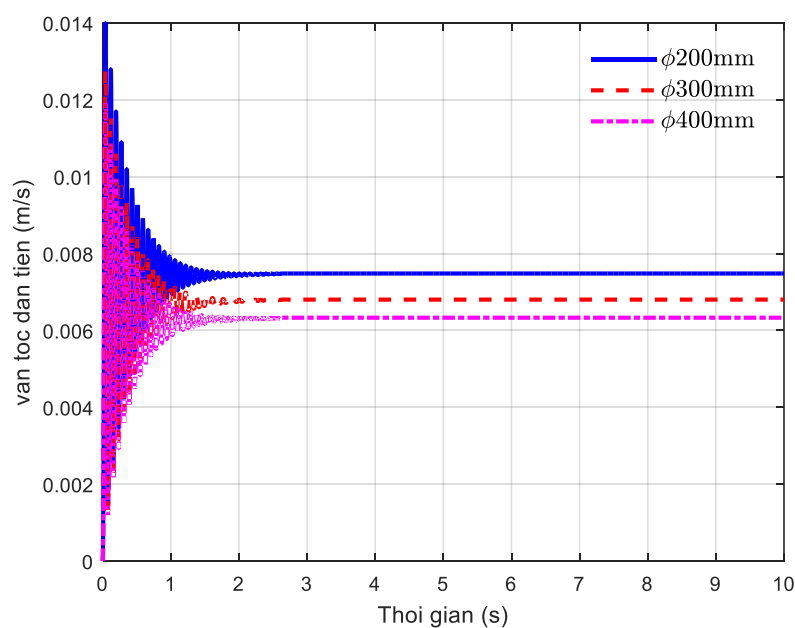
Từ đồ thị hình 3.13 và hình 3.14 thấy rằng lực cản theo phương thẳng đứng và mô men cản xoay tăng theo thời gian, khi chiều sâu hạ cọc tăng lên thì

giá trị thành phần lực cản tăng lên, khảo sát trong thời gian 10 giây lực cản thẳng đứng tăng 0,5274 kN, mô men cản tăng 0,5485 kNm. Kết quả khảo sát lý thuyết lực cản và mô men cản so với thực nghiệm có tính tương đồng, phù hợp với thực tế thí nghiệm.

3.1.3. Khảo sát ảnh hưởng của đường kính cọc đến đặc tính chuyển động tịnh tiến của cọc ống thép



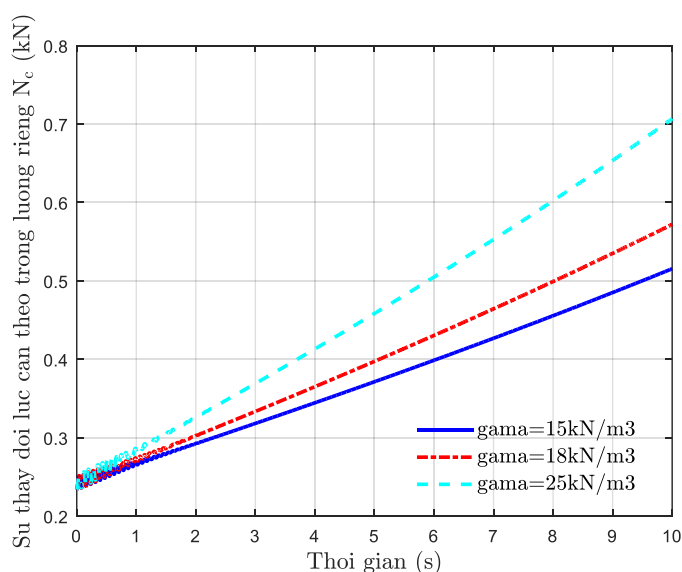
Hình 3.15. Ảnh hưởng của đường kính cọc đến dịch chuyển ống thép



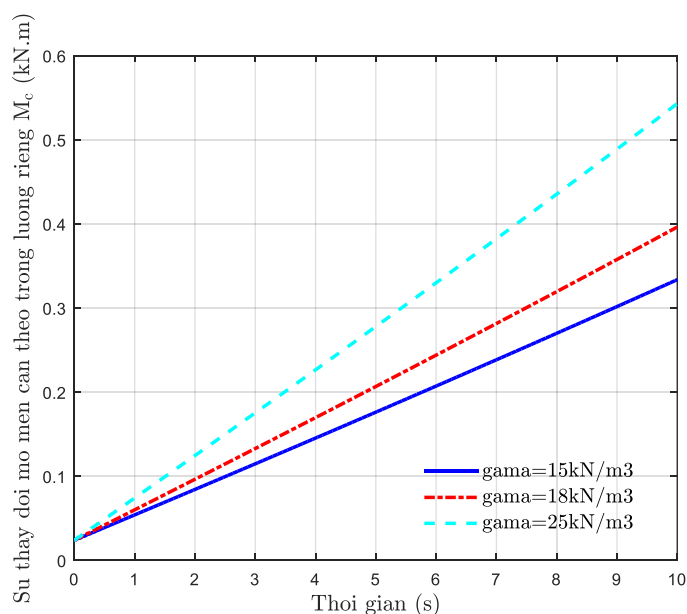
Hình 3.16. Ảnh hưởng của đường kính cọc đến vận tốc dẫn tiến ống thép

Từ đồ thị hình 3.15 và hình 3.16 cho thấy đường kính của cọc thép ảnh hưởng đến dịch chuyển và vận tốc dịch chuyển của cọc ống thép thâm nhập vào nền. Đồ thị Hình 3.15 thể hiện dịch chuyển của khâu 2 với đường kính lần lượt là $\phi 200$ mm, $\phi 300$ mm, $\phi 400$ mm, thấy rằng cùng tốc độ vòng xoay và tốc độ dẫn tiến thì với đường kính cọc thép lớn hơn thì tốc độ dịch chuyển thâm nhập vào nền chậm hơn so với đường kính cọc thép nhỏ hơn, cụ thể khảo sát trong thời gian từ $0 \div 10$ giây cọc ống thép $\phi 200$ mm dịch chuyển đạt giá trị 0,0754m, ống thép $\phi 300$ mm dịch chuyển đạt giá trị 0,0685m, ống thép $\phi 400$ mm dịch chuyển đạt giá trị 0,0637m. Đồ thị hình 3.16 thể hiện vận tốc dịch chuyển của khâu 2 với các đường kính khác nhau, ống thép $\phi 200$ mm tốc độ dịch chuyển đạt giá trị quanh tốc độ ổn định là 0,00748 m/s, ống thép $\phi 300$ mm tốc độ dịch chuyển đạt giá trị quanh tốc độ ổn định là 0,0068 m/s, ống thép $\phi 400$ mm tốc độ dịch chuyển đạt giá trị quanh tốc độ ổn định là 0,00633 m/s. Điều đó khẳng định rằng đường kính cọc ảnh hưởng rất lớn đến lực cản và mô men cản của nền tác dụng lên cọc thép. Kết quả khảo sát lý thuyết phù hợp với thực tế thí nghiệm tại hiện trường.

3.1.4. Khảo sát ảnh hưởng trọng lượng riêng của nền san hô đến lực cản và mô men cản khi xoay-ép hạ cọc



Hình 3.17. Sự thay đổi lực cản khi hạ cọc vào các lớp san hô khác nhau



Hình 3.18. Sự thay đổi mô men cân khi hạ cọc vào các lớp san hô khác nhau

Từ đồ thị hình 3.17, hình 3.18 ta thấy rằng trọng lượng riêng của từng lớp san hô ảnh hưởng lớn đến quá trình xoay-ép hạ cọc, khi trọng lượng riêng tăng thì đồng nghĩa với lực cản và mô men cân tăng theo. Khảo sát trong thời gian 10 giây với từng lớp san hô kết quả cho ta thấy $\gamma = 15000 \text{ N/m}^3$ lực cản tăng 0,2814 kN và mô men cân tăng 0,3098 kNm, $\gamma = 18000 \text{ N/m}^3$ lực cản tăng 0,338 kN và mô men cân tăng 0,3723 kNm, $\gamma = 25000 \text{ N/m}^3$ lực cản tăng 0,4726 kN và mô men cân tăng 0,519 kNm.

3.1.5. So sánh kết quả tính toán vận tốc dẫn tiến ống thép giữa mô hình lý thuyết với thực nghiệm

Để so sánh, đánh giá kết quả nghiên cứu lý thuyết và kết quả thực nghiệm của vận tốc dẫn tiến, tiến hành đánh giá sai số tương đối theo công thức (2.41)

Bảng 3.2. So sánh kết quả vận tốc dẫn tiến giữa lý thuyết và thực nghiệm

| Loại san hô | Vận tốc dẫn tiến ống thép (m/s) | | Sai số (%) |
|---|---------------------------------|-------------|------------|
| | Lý thuyết | Thực nghiệm | |
| Đá san hô $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ | 0,0068 | 0,0058 | 14,7 |

Kết quả vận tốc dẫn tiến tính toán mô hình lý thuyết phù hợp thực nghiệm xoay-ép hạ cọc ở nền đá san hô, sai số vận tốc dẫn tiến là $v_t = 14,7\%$. Luận án cũng khảo sát và so sánh vận tốc dẫn tiến tính toán mô hình lý thuyết và thực nghiệm xoay-ép hạ cọc ở nền cành nhánh san hô $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, sai số sai số vận tốc dẫn tiến là $v_t = 10,67\%$. Đối với nền cát san hô $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$, sai số vận tốc dẫn tiến là $v_t = 8,64\%$.

3.2. Xác định thông số làm việc hợp lý và khả năng hạ cọc của bộ công tác kiểu xoay-ép lắp trên máy đào thủy lực

3.2.1. Phát biểu bài toán

Xác định tốc độ dẫn tiến (v_t) và vận tốc xoay cọc ống thép (n) hợp lý của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép có đường kính khác nhau ở môi trường đá san hô tại Trường Sa với công suất và mô men dẫn động bộ công tác cho trước, sao cho chiều sâu hạ cọc đạt giá trị tối đa tương ứng với từng loại đường kính cọc, thỏa mãn các điều kiện của quá trình xoay-ép hạ cọc theo các biểu thức (2.11), (2.15), (2.40).

3.2.2. Xác định thông số làm việc hợp lý

3.2.2.1. Xây dựng hàm mục tiêu và thuật toán giải

Từ hệ phương trình vi phân (2.67) mô tả chuyển động của cơ hệ, áp dụng nguyên lý cực đại của Pontryagin, xác định hàm mục tiêu của bài toán như sau:

$$x_2(T) \rightarrow \max \text{ (chiều sâu đạt max) với } T \text{ thời gian xoay-ép chưa biết.}$$

- Thông số điều khiển

$$u = \alpha_l \text{ (}\alpha_l \text{ phụ thuộc vào } v_t \text{ và } v_r, \text{ ứng với mỗi } v_{li} \text{ và } v_{ri} \text{ ta có } \alpha_{li} \text{ tương ứng,}$$

u còn gọi là tín hiệu điều khiển).

- Điều kiện biên

$$\text{Tại } t = T \text{ thì } \dot{x}_2(T) = 0$$

- Điều kiện đầu

Tại $t = 0$ thì

$$\begin{aligned}x_1(0) &= 0, x_2(0) = 0 \\ \varphi_1(0) &= 0, \varphi_2(0) = 0 \\ \dot{x}_1(0) &= 0, \dot{x}_2(0) = 0 \\ \dot{\varphi}_1(0) &= 0, \dot{\varphi}_2(0) = \omega_0\end{aligned}\tag{3.1}$$

- Điều kiện ràng buộc

$$\alpha_{1min} \leq \alpha_1 \leq \alpha_{1max}\tag{3.2}$$

- Thuật toán giải

Sử dụng lý thuyết điều khiển tối ưu, áp dụng nguyên lý cực đại Pontryagin tiến hành theo các bước

Bước 1: Biểu diễn hàm mục tiêu dưới dạng phiếm hàm

$$x_2(T) = \int_0^T x_2 dt + x_2(0) \rightarrow \max\tag{3.3}$$

$$J = \int_0^T x_2 dt \rightarrow \max\tag{3.4}$$

Vì thời gian T chưa biết, nên thực hiện phép đổi biến

$$\tau = \frac{t}{T} \Rightarrow 0 \leq \tau \leq 1\tag{3.5}$$

Suy ra $d\tau = \frac{dt}{T}$ hay $dt = Td\tau$

$$J = \int_0^T \dot{x}_2 dt = \int_0^T \dot{x}_2 T d\tau = \int_0^1 (T\dot{x}_2) d\tau\tag{3.6}$$

Bước 2: Lập phương trình trạng thái theo biến τ

$$\dot{x}_1 = \frac{dx_1}{dt} = \frac{dx_1}{Td\tau} = \frac{dx_1}{d\tau} \frac{1}{T}; \dot{\varphi}_1 = \frac{d\varphi_1}{d\tau} \frac{1}{T}\tag{3.7}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{dx_2}{d\tau} \frac{1}{T}; \dot{\varphi}_2 = \frac{d\varphi_2}{d\tau} \frac{1}{T}\tag{3.8}$$

$$\ddot{x}_1 = \frac{1}{T^2} \frac{d^2 x_1}{d\tau^2}; \ddot{\varphi}_1 = \frac{1}{T^2} \frac{d^2 \varphi_1}{d\tau^2}\tag{3.9}$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{1}{T^2} \frac{d^2 x_2}{d\tau^2}; \ddot{\varphi}_2 = \frac{1}{T^2} \frac{d^2 \varphi_2}{d\tau^2} \quad (3.10)$$

$$\text{Đưa vào biến trạng thái } y = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5 \ y_6 \ y_7 \ y_8]^T \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} & y_1 = x_1, y_2 = \varphi_1, y_3 = x_2, y_4 = \varphi_2 \\ \text{Trong đó} \quad & y_5 = \frac{dx_1}{d\tau}, y_6 = \frac{d\varphi_1}{d\tau}, y_7 = \frac{dx_2}{d\tau}, y_8 = \frac{d\varphi_2}{d\tau} \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} y_1' &= \frac{dy_1}{d\tau} = y_5 & &= f_1 \\ y_2' &= \frac{dy_2}{d\tau} = y_6 & &= f_2 \\ y_3' &= \frac{dy_3}{d\tau} = y_7 & &= f_3 \\ y_4' &= \frac{dy_4}{d\tau} = y_8 & &= f_4 \\ y_5' &= \frac{d^2 x_1}{d\tau^2} = T^2 \ddot{x}_1 = \frac{T^2}{m_1} (N_t - c_1 y_5 + c_1 y_7 - k_1 y_1 + k_1 y_3) & &= f_5 \\ y_6' &= \frac{d^2 \varphi_1}{d\tau^2} = T^2 \ddot{\varphi}_1 = \frac{T^2}{J_1} (M_t - k_{2r} y_6 + k_{2r} y_8 - c_{2r} y_2 + c_{2r} y_4) & &= f_6 \\ y_7' &= \frac{d^2 x_2}{d\tau^2} = T^2 \ddot{x}_2 = \frac{T^2}{m_2} (-N_c + c_1 y_5 - c_1 y_7 + k_1 y_1 - k_1 y_3) & &= f_7 \\ y_8' &= \frac{d^2 \varphi_2}{d\tau^2} = T^2 \ddot{\varphi}_2 = \frac{T^2}{J_2} (-M_c + k_{2r} y_6 - k_{2r} y_8 + c_{2r} y_2 - c_{2r} y_4) & &= f_8 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Bước 3: Lập Hàm Hamilton bằng cách đưa vào thêm 8 biến liên hợp

$$\begin{aligned} p &= [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6 \ p_7 \ p_8]^T \\ H &= T\dot{x}_2 + \sum_1^8 p_i f_i = \frac{dx_2}{d\tau} + \sum_1^8 p_i f_i \\ &= y_7 + p_1 f_1 + p_2 f_2 + p_3 f_3 + p_4 f_4 + p_5 f_5 + p_6 f_6 + p_7 f_7 + p_8 f_8 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Bước 4: Xác định biến điều khiển tối ưu $u^* = \alpha_1^*$

Điều kiện cần để hàm Hanilton đạt cực đại theo u là:

$$\frac{\partial H}{\partial \alpha_l} = 0 \quad (3.15)$$

Từ (3.15) ta thu được α_l^* theo y và p

Bước 5: Thay α_l^* là hàm của y và p vào phương trình trạng thái và phương trình liên hợp

$$p'_i = \frac{dp_i}{d\tau} = -\frac{\partial H}{\partial y_i} \quad (i = 1, 2, \dots, 8) \quad (3.16)$$

Bước 6: Giải hệ hỗn hợp $8 + 8 + 1 = 17$ phương trình vi phân

$$\begin{cases} y'_i = f_i(i = \overline{1, 8}) \\ p'_i = -\frac{\partial H}{\partial y_i} \quad (i = \overline{1, 8}) \\ T' = \frac{dT}{d\tau} = 0 \\ 0 \leq \tau \leq 1 \end{cases} \quad (3.17)$$

Với điều kiện đầu: $y_i(0) (i = \overline{1, 7})$ đã biết (chú ý $y_8(0)$ chưa biết do T chưa biết) \Rightarrow 7 điều kiện đầu.

- Bổ sung thêm điều kiện biên: $\dot{x}_2(T) = 0$. Do đó $y_7(1) = 0$
- Điều kiện hoành (xác định điều kiện cuối của biến liên hợp) $p_i(1) = 0$

Giải hệ hỗn hợp 17 phương trình vi phân, ta thu được thông số hợp lý y^* và thời gian T^*

\Rightarrow Tốc độ dẫn tiến và tốc độ xoay cợc hợp lý

$$\begin{cases} v_t^* = \frac{1}{T^*} y_7^* \\ v_r^* = \frac{1}{T^*} y_8^* \end{cases} \quad (3.18)$$

3.2.2.2. Các thông số yêu cầu

- Điều kiện địa chất đó là: mặt cắt cột địa chất (n_i, h_i) , tính chất cơ lý của nền san hô $(q_c, q_b, \sigma_{hi}', \sigma_{hp}, c_i, \delta_{si}, \delta_{sp}, \phi, \mu, \gamma)$;

- Đối với cọc ống thép cần hạ (D, d, l, h_p) .

- Dẫn động xoay cọc ống thép của bộ công tác là loại mô tơ di chuyển Solar 200W-V (Travel Motor 200W-V), dẫn động dẫn tiến cọc ống thép là loại mô tơ di chuyển Solar 130W-V (Travel Motor 130W-V), gồm hai thông số là vận tốc xoay ống thép n thay đổi từ $5 \div 20$ vòng/phút và vận tốc dẫn tiến v_t thay đổi từ $0,1 \div 0,8$ m/phút, còn các thông số khác của bộ công tác và hai mô tơ không thay đổi, các thông số của san hô sử dụng để tính toán dựa trên các số liệu của tài liệu [1], [2], [4], [5].

3.2.2.3. Xác định thông số làm việc hợp lý của bộ công tác kiểu xoay-ép lắp trên máy đào thủy lực

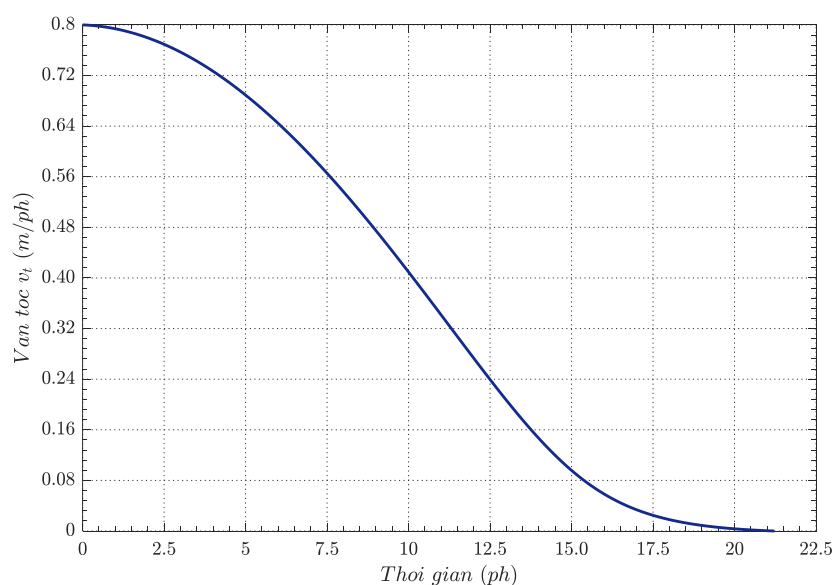
Từ các biểu thức (2.11), (2.15), (2.40) ta thấy rằng các thông số N_c, M_c, v_t, v_r đều phụ thuộc vào góc α_t và có mối quan hệ ràng buộc lẫn nhau, mỗi v_{ti} và v_{ri} ta có góc α_{ti} tương ứng và nhận được các thông số $N_{ci}, M_{ci}, v_{ti}, v_{ri}$ đặc trưng cho thông số làm việc hợp lý của bộ công tác. Vì vậy ta cần khảo sát, xác định các thông số đặc trưng $N_{ci}, M_{ci}, v_{ti}, v_{ri}$ khi công suất của bộ công tác cố định với nền san hô cụ thể để hạ được cọc đạt chiều sâu tối đa.

Để có căn cứ lựa chọn thông số làm việc hợp lý của bộ công tác, trước tiên tiến hành khảo sát cho trường hợp cụ thể là: sự phụ thuộc của các yếu tố cản (lực cản và mô men cản), đặc tính san hô và cả quan hệ tương đối giữa hai vận tốc dẫn tiến v_t và vận tốc xoay cọc n ràng buộc với nhau thông qua biểu thức (2.11). Với vùng khuyến cáo làm việc của bộ công tác xoay-ép hạ cọc, các giá trị vận tốc chuyển động của cọc thép được giới hạn trong khoảng: vận tốc dẫn

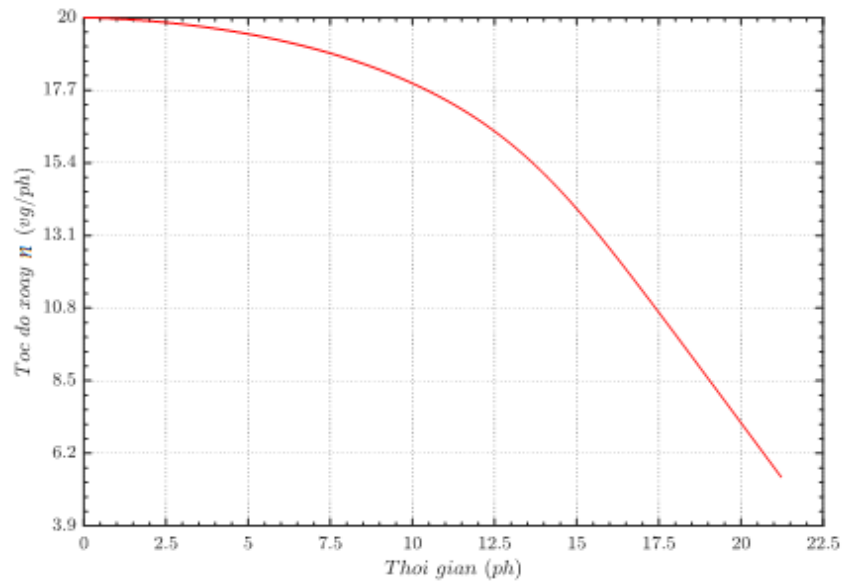
tiến dọc ống thép $v_t = 0,10 \div 0,80$ m/ph ta có vùng thay đổi $v_t = 0,00167 \div 0,1334$ m/s. Tốc độ xoay cọc n từ $5 \div 20$ vòng/phút ta có vùng thay đổi của v_t là $0,0785 \div 0,314$ m/s. Như vậy ta có thể thấy rằng giá trị tỷ số vận tốc $\tan\alpha_l$ có thể thay đổi từ $0,0425 = 0,8/(0,314*60)$ đến $0,0212 = 0,1/(0,0785*60)$. Tính toán các thông số hợp lý với các tham số như sau:

- Vận tốc dẫn tiến nhỏ nhất $v_t = 0,1$ m/phút;
- Tốc độ xoay ống thép nhỏ nhất $n = 5$ vòng/phút;
- Đường kính cọc ống thép $D = 0,3$ m, chiều dài mỗi đoạn cọc $l=3m$;
- Đặc tính kỹ thuật của mô tơ dẫn động theo mục 3.2.2.2;
- Tính chất cơ lý của san hô theo tài liệu [2],[3],[4],[5].

Sử dụng phần mềm Maple giải hệ phương trình hỗn hợp (3.17) xác định các thông số hợp lý của hệ phương trình (3.18), với đường kính cọc $D = 200$ mm, $D = 300$ mm, $D = 400$ mm hạ cọc trên nền đá san hô ta nhận được kết quả theo đồ thị hình 3.19, hình 3.20, hình 3.21, hình 3.22, hình 3.23, hình 3.24, giá trị các thông số làm việc hợp lý của bộ công tác thể hiện trong, bảng 3.3, bảng 3.4, bảng 3.5.



Hình 3.19. Đồ thị vận tốc dẫn tiến biến thiên theo thời gian ($D=200$ mm)



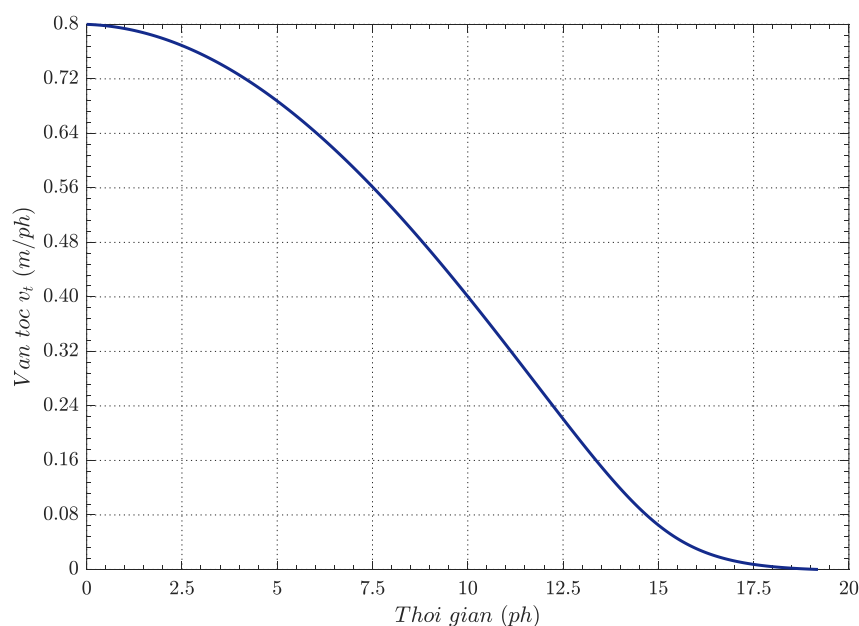
Hình 3.20. Đồ thị tốc độ xoay biến thiên theo thời gian ($D=200\text{ mm}$)

Bảng 3.3. Chế độ làm việc hợp lý của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép trên nền đá san hô ($D=200\text{ mm}$)

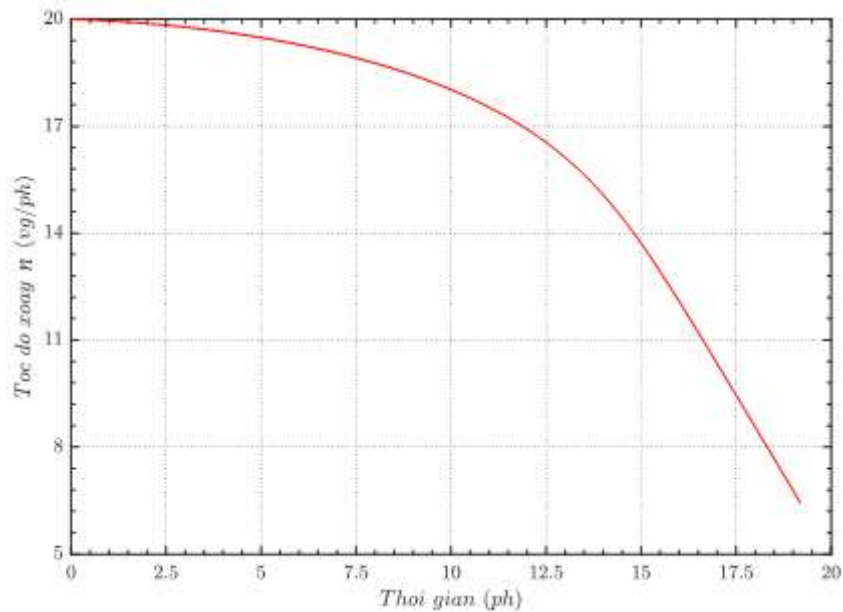
| TT | α_1 (độ) | n (v/ph) | v_t (m/ph) |
|------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| 1. | 21.80140949 | 20 | 0.8 |
| 2. | 21.66001543 | 19.95789 | 0.792608 |
| 3. | 21.34577458 | 19.88289 | 0.777032 |
| 4. | 20.80841677 | 19.82599 | 0.753452 |
| 5. | 20.06216542 | 19.77388 | 0.722141 |
| 6. | 19.12321825 | 19.71157 | 0.683469 |
| 7. | 18.00318015 | 19.62899 | 0.637905 |
| 8. | 16.77109024 | 19.44534 | 0.586019 |
| 9. | 16.17285307 | 19.31116 | 0.560049 |
| 10. | 15.36490432 | 19.23297 | 0.528497 |
| 11. | 14.75498925 | 19.21881 | 0.506168 |
| 12. | 14.6306821 | 18.82599 | 0.491457 |
| 13. | 12.85547812 | 18.50132 | 0.422224 |
| 14. | 9.519002379 | 17.59755 | 0.295082 |
| 15. | 8.073097963 | 16.50547 | 0.234117 |
| 16. | 6.888934118 | 15.25344 | 0.184288 |
| 17. | 6.101264218 | 13.90382 | 0.14862 |
| 18. | 5.744465522 | 12.5098 | 0.125845 |
| 19. | 5.775486258 | 11.09912 | 0.112261 |
| 20. | 7.200776088 | 8.265427 | 0.104428 |
| 21. | 0 | 7.265427 | 0 |

Đồ thị hình 3.19 và hình 3.20 thể hiện dải vận tốc dẫn tiến và dải tốc độ xoay cọc ống thép $D = 200\text{mm}$ theo thời gian, khi lực cản tác dụng lên ống thép lớn hơn công suất định mức của mô tơ dẫn tiến cọc, khi đó chiều sâu hạ cọc đạt tối đa, cọc sẽ dừng lại, thời gian dừng $T = 21,22$ phút. Phần mềm tính toán đã tìm được các giá trị α_1 ứng với từng vận tốc dẫn tiến và tốc độ xoay cọc theo bảng 3.3, thông số làm việc hợp lý phần mềm chọn được là (dòng 12 của bảng 3.3): vận tốc dẫn tiến $v_t = 0,49$ m/ph, tốc độ xoay cọc $n = 18,83$ v/ph ứng với $\alpha_1 = 14,63$ độ.

Đồ thị hình 3.21 và hình 3.22 thể hiện dải vận tốc dẫn tiến và dải tốc độ xoay cọc ống thép $D = 300\text{mm}$ theo thời gian, khi lực cản tác dụng lên ống thép lớn hơn công suất định mức của mô tơ dẫn tiến cọc, khi đó chiều sâu hạ cọc đạt tối đa, cọc sẽ dừng lại, thời gian dừng $T = 19,1892$ phút. Phần mềm tính toán đã tìm được các giá trị α_1 ứng với từng vận tốc dẫn tiến và tốc độ xoay cọc theo bảng 3.4, thông số làm việc hợp lý phần mềm chọn được là (dòng 12 của bảng 3.4): vận tốc dẫn tiến $v_t = 0,36$ m/ph, tốc độ xoay cọc $n = 17,76$ v/ph ứng với $\alpha_1 = 7,73$ độ.



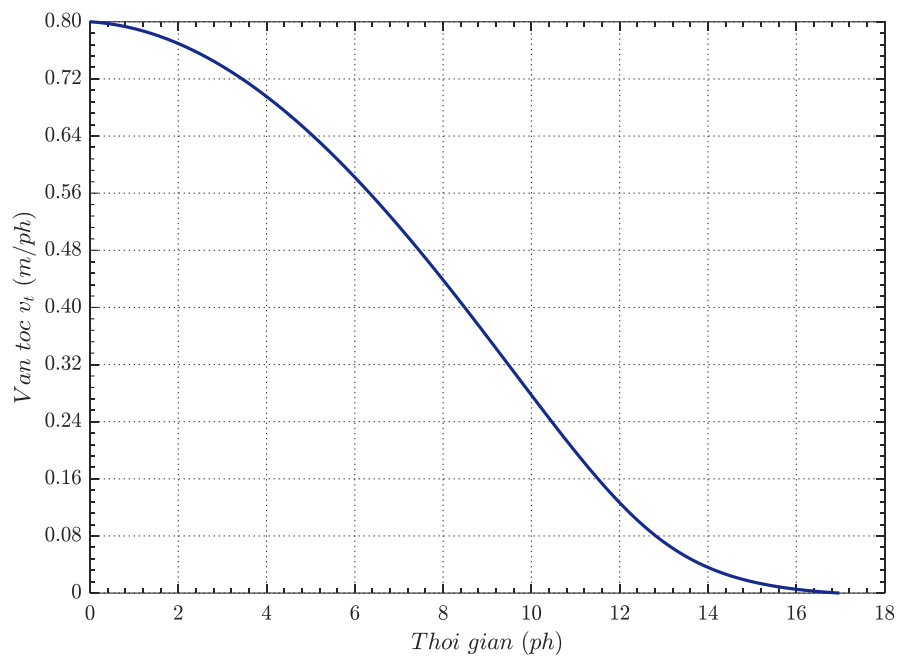
Hình 3.21. Đồ thị vận tốc dẫn tiến biến thiên theo thời gian ($D=300$ mm)



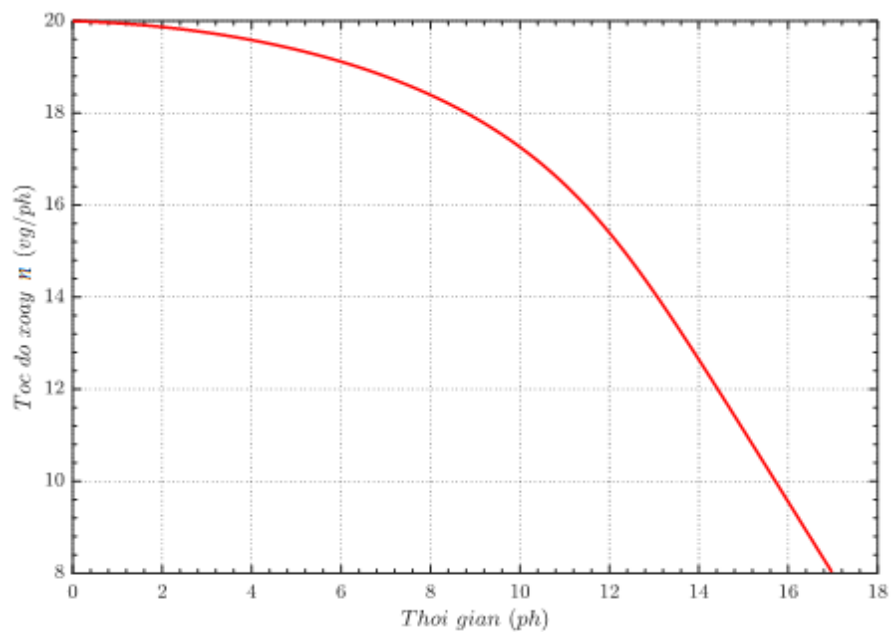
Hình 3.22. Đồ thị tốc độ xoay biến thiên theo thời gian ($D=300$ mm)

Bảng 3.4. Chế độ làm việc hợp lý của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép trên nền đá san hô ($D=300$ mm)

| TT | α_1 (độ) | n (v/ph) | v_t (m/ph) |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1. | 14.93141718 | 20 | 0.8 |
| 2. | 14.86021676 | 19.95562949 | 0.794242206 |
| 3. | 14.66768618 | 19.88637336 | 0.780766002 |
| 4. | 14.35419579 | 19.79152192 | 0.759710628 |
| 5. | 13.92059585 | 19.66984909 | 0.731294978 |
| 6. | 13.36826527 | 19.51951076 | 0.695816989 |
| 7. | 12.69918098 | 19.33788037 | 0.653653364 |
| 8. | 11.91601192 | 19.12129023 | 0.605260371 |
| 9. | 11.02225014 | 18.86462299 | 0.551177171 |
| 10. | 10.02241298 | 18.56065364 | 0.492034625 |
| 11. | 8.922406319 | 18.19895947 | 0.428575939 |
| 12. | 7.730289585 | 17.76405923 | 0.361703763 |
| 13. | 6.458109867 | 17.23217903 | 0.292589626 |
| 14. | 5.126713802 | 16.56583563 | 0.222937051 |
| 15. | 3.778689058 | 15.70706193 | 0.155609114 |
| 16. | 2.507131114 | 14.58296657 | 0.095778684 |
| 17. | 1.469767247 | 13.16720166 | 0.050676423 |
| 18. | 0.774175254 | 11.55388718 | 0.023418683 |
| 19. | 0.367218852 | 9.864574244 | 0.009483702 |
| 20. | 0.137308283 | 8.155830332 | 0.0029318 |
| 21. | 0 | 6.443446232 | 0 |



Hình 3.23. Đồ thị vận tốc dẫn tiến biến thiên theo thời gian ($D=400\text{ mm}$)



Hình 3.24. Đồ thị tốc độ xoay biến thiên theo thời gian ($D=400\text{ mm}$)

Đồ thị hình 3.23 và hình 3.24 thể hiện dải vận tốc dẫn tiến và dải tốc độ xoay cọc ống thép $D=400\text{mm}$ theo thời gian, khi lực cản tác dụng lên ống thép lớn hơn công suất định mức của mô tơ dẫn tiến cọc, khi đó chiều sâu hạ cọc đạt tối đa, cọc sẽ dừng lại, thời gian dừng $T = 17,68$ phút. Phần mềm tính

toán đã tìm được các giá trị ứng với từng vận tốc dẫn tiến và tốc độ xoay cọc theo bảng 3.5, thông số làm việc hợp lý phần mềm chọn được là (dòng 12 của bảng 3.5): vận tốc dẫn tiến $v_t = 0,295$ m/ph, tốc độ xoay cọc $n = 15,7$ v/ph ứng với $\alpha_1 = 5,48$ độ.

Bảng 3.5. Chế độ làm việc hợp lý của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép trên nền đá san hô ($D=400$ mm)

| TT | α_1 (độ) | n (v/ph) | v_t (m/ph) |
|------------|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1. | 11.30993247 | 20 | 0.8 |
| 2. | 11.22800101 | 19.9636031 | 0.79324413 |
| 3. | 11.04673198 | 19.9007489 | 0.777197399 |
| 4. | 10.76703828 | 19.81057624 | 0.752074377 |
| 5. | 10.39046842 | 19.6916297 | 0.718215656 |
| 6. | 9.919252285 | 19.54173704 | 0.67608957 |
| 7. | 9.356372449 | 19.35781362 | 0.626296739 |
| 8. | 8.705677813 | 19.13555902 | 0.569580595 |
| 9. | 7.972076111 | 18.86898882 | 0.506849953 |
| 10. | 7.506900726 | 16.54970942 | 0.439225889 |
| 11. | 6.529328254 | 16.16580218 | 0.368137462 |
| 12. | 5.483843461 | 15.70018014 | 0.295512518 |
| 13. | 4.388858662 | 15.1285628 | 0.22412525 |
| 14. | 3.27635374 | 14.41873036 | 0.158037146 |
| 15. | 2.20222782 | 13.5374849 | 0.102391148 |
| 16. | 1.246460106 | 12.4752956 | 0.061105842 |
| 17. | 0.656874984 | 11.27121648 | 0.033989394 |
| 18. | 0.533981545 | 9.98925698 | 0.017603027 |
| 19. | 0.404859396 | 8.6754341 | 0.00815998 |
| 20. | 0.172575043 | 7.35099854 | 0.002878593 |
| 21. | 0 | 6.02381792 | 0 |

3.2.3. Khảo sát xác định khả năng hạ cọc

3.2.3.1. Bộ số liệu đầu vào

Khả năng làm việc tối đa của bộ công tác xoay-ép được tính thông qua mô men lớn nhất mà mô tơ dẫn động dẫn tiến và mô tơ xoay cọc có thể tạo ra được. Theo thiết kế, mô tơ xoay kéo xích và mô tơ xoay cọc có thể tạo ra mô men lớn

nhất lần lượt là $M_k^{max}=607$ Nm và $M_x^{max}=770$ Nm. Do đó ta có thể tính ra được lực ép và mô men xoay cọc tối đa mà bộ công tác có thể xoay-ép cọc được là:

$$F_t^{max} = \frac{M_k^{max} \cdot i_t \cdot \eta_t}{R_t} \quad (3.19)$$

$$M_t^{max} = M_x^{max} \cdot i_r \cdot \eta_r \quad (3.20)$$

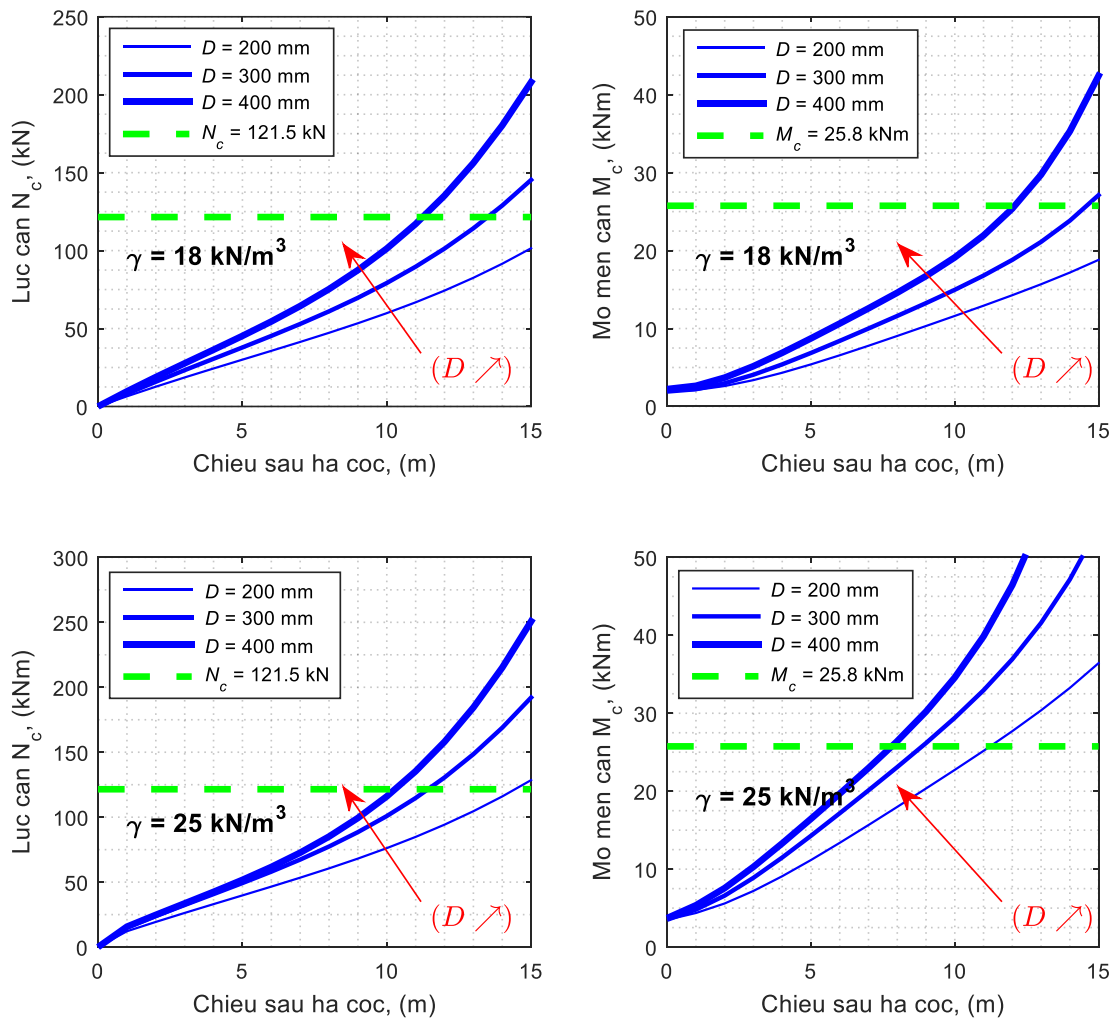
Sử dụng các thông số đầu vào của hệ thống gồm: bán kính bánh sao xoay xích, $R_t = 0,125$ m; tỉ số truyền và hiệu suất truyền động của cơ cấu xoay xích, $i_t = 26,347$; $\eta_t = 0,95$ và cơ cấu xoay cọc $i_r = 34,475$; $\eta_r = 0,97$, chúng ta tìm được các giá trị $F_t^{max} = 121,5$ kN và $M_t^{max} = 25,8$ kNm.

Bảng 3.6. Thông số mô tơ xoay cọc và mô tơ dẫn tiến cọc ống thép

| Mô tơ | Solar 130W-V | Solar 200W-V |
|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Lưu lượng riêng | 45 - 114,7 cm ³ /vòng | 66 - 172 cm ³ /vòng |
| Áp suất lớn nhất | 360 kg/cm ² | 350 kg/cm ² |
| Lưu lượng lớn nhất | 160 lít/phút | 226 lít/phút |
| Tốc độ vòng quay lớn nhất | 3555 vòng/phút | 3343 vòng/phút |
| Mô men xoắn lớn nhất | 60,7 kgm | 77 kgm |

3.2.3.2. Kết quả khảo sát khả năng hạ cọc

Dựa trên đồ thị hình 3.25 với lực ép và mô men xoay của hai mô tơ đã tính ở trên (lực ép lớn nhất 127,9 kN và mô men xoay lớn nhất 26,5 kNm thể hiện đường nét đứt trên đồ thị) khi hạ cọc với vận tốc dẫn tiến và tốc độ vòng xoay hợp lý đã xác định tại mục 3.2.2.3. Nếu hạ cọc ở nền san hô lớp cành nhánh $\gamma=18$ kN/m³ đối với cọc ống thép $D = 400$ mm hạ được cọc đến độ sâu tối đa là 12,5 m, đối với cọc ống thép $D = 300$ mm hạ được cọc đến độ sâu tối đa là 14,5 m, đối với cọc ống thép $D = 200$ mm thì hạ được cọc sâu hơn 15 m. Đối với nền đá san hô $\gamma = 25$ kN/m³ cọc ống thép $D = 400$ mm hạ được cọc đến độ sâu tối đa là 7,75 m, đối với cọc ống thép $D = 300$ mm hạ được cọc đến độ sâu tối đa là 8,8 m, đối với cọc ống thép $D = 200$ mm hạ được cọc 11,3 m.



Hình 3.25. Kết quả tính toán lý thuyết sự phụ thuộc của lực cản (trái) và mô men cản (phải) vào đường kính ống thép ($D=200/300/400 \text{ mm}$) và đặc tính của san hô $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$ (trên) và $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$ (dưới)

Kết luận chương 3

Chương 3 đã đạt được các kết quả sau:

- Khảo sát một số thông số đặc trưng cho chế độ làm việc của bộ công tác thông qua mô hình động lực học đã xây dựng ở chương 2 về: chuyển vị, vận tốc dẫn tiến, gia tốc của khâu 1 và khâu 2 với hai chuyển động dẫn tiến và xoay cọc ống thép (kết quả khảo sát thể hiện ở mục 3.1.1).

- Khảo sát sự thay đổi lực cản và mô men cản khi xoay-ép hạ cọc (kết quả khảo sát thể hiện ở mục 3.1.2), ảnh hưởng của đường kính cọc đến dịch chuyển

và vận tốc dịch chuyển (kết quả khảo sát thể hiện ở mục 3.1.3), sự thay đổi lực cản và mô men cản khi thay đổi trong lượng riêng của từng lớp san hô (kết quả khảo sát thể hiện ở mục 3.1.4).

- So sánh kết quả tính toán mô hình lý thuyết với thực nghiệm: vận tốc dẫn tiến sai số 14,7%. Có được kết quả trên là do luận án đã xây dựng được mô hình động lực học phù hợp với thực tế, sai số nằm trong giới hạn cho phép có thể chấp nhận được.

- Đã xác định được thông số làm việc hợp lý của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép với đường kính cọc ống thép khác nhau : với cọc ống thép $D = 200\text{ mm}$ $n = 18,83$ v/ph và $v_t = 0,49$ m/ph, ứng với góc $\alpha_1 = 14,63$ độ. Với đường kính cọc ống thép $D = 300\text{ mm}$ $n = 17,76$ v/ph và $v_t = 0,36$ m/ph ứng với góc $\alpha_1 = 7,73$ độ. Với đường kính cọc ống thép $D = 400\text{ mm}$ $n = 15,7$ v/ph và $v_t = 0,295$ m/ph ứng với góc $\alpha_1 = 5,48$ độ.

- Khảo sát khả năng hạ cọc của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép với với các đường kính $D = 200 \div 400$ mm khi hạ cọc vào nền san hô khác nhau. Với nền đá san hô cọc ống thép $D = 400$ mm hạ được cọc đến độ sâu tối đa là 7,75 m, đối với cọc ống thép $D = 300$ mm hạ được cọc đến độ sâu tối đa là 8,8 m, đối với cọc ống thép $D = 200$ mm hạ được cọc đến độ sâu tối đa 11,3 m.

Chương 4

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

4.1. Mục tiêu, các thông số làm thực nghiệm và trang thiết bị thực nghiệm

4.1.1. Mục tiêu nghiên cứu thực nghiệm

Mục tiêu của nghiên cứu thực nghiệm là:

- Đo áp suất và lưu lượng mô tơ xoay cọc và mô tơ dẫn tiến cọc để tính gián tiếp thông số đầu vào (lực dẫn tiến của mô tơ hạ cọc, mô men xoay của mô tơ xoay cọc, tốc độ xoay và tốc độ dẫn tiến cọc) phục vụ giải bài toán động lực học ở Chương 2, khảo sát ảnh hưởng của các thông số làm việc đến quá trình khoan ở Chương 3.

- Kiểm tra kết quả tính toán lý thuyết (tổng lực cản và mô men cản), so sánh độ sai lệch giữa kết quả tính toán lý thuyết và thực nghiệm, từ đó đánh giá tính đúng đắn của mô hình nghiên cứu lý thuyết.

- Thực nghiệm sơ bộ trong bờ để kiểm tra sự làm việc của bộ công tác, kiểm tra thiết bị đo lưu lượng và áp suất trước khi đưa ra thực nghiệm trên đảo Trường Sa (Hình 4.1).

- Thực nghiệm tiến hành tại Đảo Trường Sa lớn – Khánh Hòa từ ngày 15/06/2016 – 25/06/2016 (Hình 4.2).

4.1.2. Các thông số làm thực nghiệm

Trong quá trình xoay-ép hạ cọc ống thép tương tác giữa bộ công tác xoay hạ cọc ống thép với san hô phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố. Trong quá trình làm việc của bộ công tác khi xoay-ép hạ cọc xuống nền san hô và khi lực thay đổi cần xác định các thông số đo trực tiếp trong quá trình thực nghiệm là:

- + Áp suất và lưu lượng của mô tơ xoay cọc;
- + Áp suất và lưu lượng của mô tơ dẫn tiến cọc;
- + Tốc độ xoay cọc.

Từ các thông số áp suất và lưu lượng đã đo trực tiếp ở trên cho phép xác định gián tiếp các thông số thực nghiệm là:

- + Tổng mô men cản và lực cản tác động lên trục của mô tơ xoay cọc và mô tơ dẫn tiến cọc;
- + Công suất tức thời của mô tơ xoay cọc và mô tơ dẫn tiến cọc;
- + Tốc độ dẫn tiến cọc thâm nhập vào nền.



Hình 4.1. Nghiên cứu sinh cùng đoàn cán bộ tại vị trí thực nghiệm trong đất liền cầu Mai Lĩnh



Hình 4.2. Nghiên cứu sinh cùng đoàn cán bộ tại vị trí thực nghiệm Đảo Trường Sa lớn

4.1.3. Trang thiết bị làm thực nghiệm

4.1.3.1. Máy cơ sở và bộ công tác



Hình 4.3. Bộ công tác lắp trên máy xúc PC- 450 làm thực nghiệm tại đảo Trường Sa lớn

Máy cơ sở là máy xúc PC - 450. Đây là máy xúc hiện đại được Nhật bản sản xuất có áp suất thủy lực làm việc liên tục khoảng 350 Bar và đang được các đơn vị sử dụng rộng rãi trong xây dựng. Sau khi tháo tay gầu máy xúc, thiết bị công tác được lắp lên cần máy xúc tại vị trí của tay gầu, nguồn thủy lực cung cấp dẫn động cho thiết bị để xoay và dẫn tiến cọc ống thép được nối với nguồn thủy lực dẫn động búa đục và nguồn thủy lực dẫn động xi lanh gầu (Hình 4.3). Các thông số của máy cơ sở và bộ công tác theo bảng 4.1 [27], và bảng 4.2 [4].

Bảng 4.1. Các thông số vận hành của máy xúc PC 450-6

| Thông số | Đơn vị | Giá trị |
|---|-------------------------|-----------|
| Khối lượng | Kg | 41.400 |
| Áp lực xích-nền (Với độ rộng tiêu chuẩn của gối tỳ) | kg/cm ² [mm] | 79[600] |
| Chiều dài vận chuyển | mm | 11.835 |
| Chiều rộng vận chuyển | mm | 3.340 |
| Chiều cao vận chuyển | mm | 3.635 |
| Công suất | kW/tốc độ vòng xoay | 228/2.050 |
| Bơm chính | | |
| Lưu lượng | lít/phút | 326 × 2 |
| Áp suất làm việc | kg/cm ² | 355 |

Bảng 4.2. Tham số làm việc của bộ công tác xoay – ép

| Thông số | Đơn vị | Giá trị |
|----------------------------|--------------------|----------------|
| Khối lượng | kg | 3.500 |
| Kích thước vận chuyển | mm×mm×mm | 2000×1000×5000 |
| Đường kính cọc ép | mm | 200 ÷ 300 |
| Hành trình ép đơn vị | mm | 2000 |
| Tốc độ ép | m/phút | 0,1 ÷ 0,5 |
| Lực ép tối đa | kN | 280 |
| Mô men xoay tối đa | kNm | 250 |
| Bơm chính (theo máy cơ sở) | | |
| Lưu lượng | lít/phút | 326 × 2 |
| Áp suất làm việc | kg/cm ² | 355 |

4.1.3.2. Cọc ống thép



Hình 4.4. Cọc ống thép làm thực nghiệm

Cọc ống thép là loại thông dụng được chế tạo tại Việt Nam (theo tiêu chuẩn Nhật Bản, có $D = 300$ mm) đang được sử dụng trong thi công trên biển đảo ở Việt Nam, đồng thời loại cọc ống thép này phù hợp trong nghiên cứu lý

thuyết và thực nghiệm. Sử dụng cọc ống thép không bịt đầu hình 4.4, trong đó gồm 01 đoạn thứ nhất đầu dưới mũi cọc có bố trí vành răng cắt trên một mặt phẳng, đầu trên có ren để nối với đầu xoay, các đoạn còn lại thân cọc có ren hai đầu để nối cọc, mỗi nối ren của cọc được tính toán, thiết kế gia công tại Trung tâm Công nghệ và Thử nghiệm tại phòng thí nghiệm Cơ học thuộc Học viện Kỹ thuật quân sự để đảm bảo cọc làm việc liên khối như cọc liên tục, vật liệu làm cọc ống thép là thép CT3 hình 1.11 và hình 1.12.

Bảng 4.3. Thông số của cọc ống thép dùng cho thí nghiệm

| Tên gọi | Đơn vị | Giá trị |
|-------------------------------|----------|----------------------|
| Mô đun đàn hồi, E | N/m^2 | 2×10^{11} |
| Mô đun trượt, G | N/m^2 | $7,7 \times 10^{10}$ |
| Hệ số poisson, ν | - | 0,3 |
| Chiều dài cọc thí nghiệm, L | m | $3 \div 15$ |
| Đường kính ngoài, D | m | 0,3 |
| Đường kính trong, d | m | 0,287 |
| Chiều dày thành ống, δ | m | 0,0065 |
| Khối lượng riêng vật liệu cọc | kg/m^3 | 7800 |

4.1.3.3. Các đầu đo trực tiếp

- Để đo áp suất, sử dụng 02 đầu đo OEM-511 do Hãng Huba Control của Thụy Sĩ chế tạo như hình 4.5. Đầu đo này được nối với đường ống dẫn dầu vào mô tơ có áp bằng cút ba chạc, các thông số kỹ thuật cơ bản cho trong bảng 4.4



Hình 4.5. Đầu đo OEM-511

1. Đầu ren đầu dưới; 2. Cặp tiếp xúc tín hiệu đầu vào; 3. Đệm; 4. Lá điện trở; 5. Cặp tiếp xúc tín hiệu đầu ra; 6. Đầu ren đầu trên.

Bảng 4.4. Các thông số cơ bản của đầu đo OEM-511

| STT | Thông số | Đơn vị | Giá trị | Ghi chú |
|-----|-------------------------|--------|-----------|---------|
| 1 | Nhiệt độ môi trường | °C | -40 ÷ 125 | |
| 2 | Điện áp tín hiệu đầu ra | V | 0 ÷ 5 | |
| 3 | Dòng tín hiệu ra | mA | 4 ÷ 20 | |
| 4 | Khoảng làm việc | Bar | 0 ÷ 400 | |

- Để đo lưu lượng, sử dụng 02 đầu đo R4S-7HD-25, R4S-7HD-50, R4S-7HD-100 như hình 4.6. Các thông số kỹ thuật cơ bản cho trong bảng 4.5.



Hình 4.6. Đầu đo lưu lượng R4S-7HD-25

Bảng 4.5. Các thông số cơ bản của đầu đo R4S-7HD-25, R4S-7HD-50, R4S-7HD-100

| STT | Thông số | Đơn vị | Giá trị đầu đo | | | Ghi chú |
|-----|-------------------------|----------|----------------|------------|-------------|---------|
| | | | R4S-7HD-25 | R4S-7HD-50 | R4S-7HD-100 | |
| 1 | Nhiệt độ môi trường | °C | -10÷116 | -10÷116 | -10÷116 | |
| 2 | Điện áp nguồn đầu vào | V | 12 ÷ 35 | 12 ÷ 35 | 12 ÷ 35 | |
| 3 | Điện áp tín hiệu đầu ra | V | 0 ÷ 5 | 0 ÷ 5 | 0 ÷ 5 | |
| 4 | Dòng tín hiệu ra | mA | 4 ÷ 20 | 4 ÷ 20 | 4 ÷ 20 | |
| 5 | Tần số | Hz | 0 ÷ 2000 | 0 ÷ 2000 | 0 ÷ 2000 | |
| 6 | Lưu lượng | Lít/phút | 0.2 ÷ 96 | 0.2 ÷ 192 | 0.2 ÷ 394 | |
| 7 | Khoảng áp suất làm việc | Bar | 0 ÷ 410 | 0 ÷ 410 | 0 ÷ 410 | |

- Để đo tốc độ vòng xoay của ống thép, sử dụng đầu đo tốc độ vòng xoay HHT13, như hình 4.7.



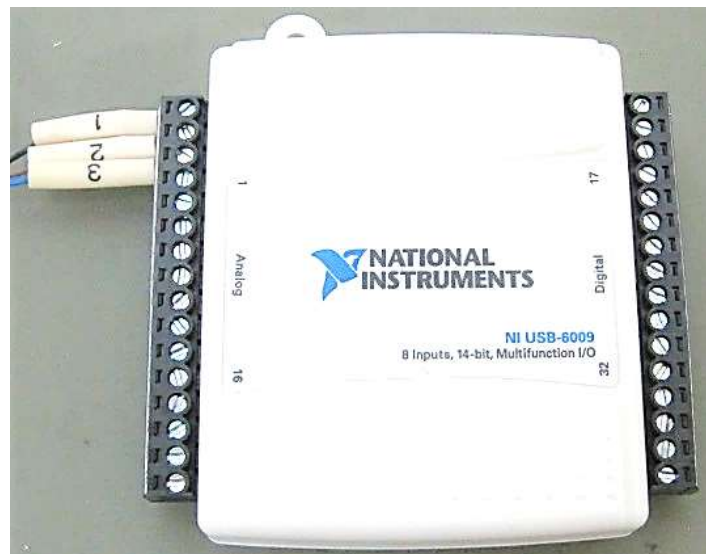
Hình 4.7. Đầu đo tốc độ vòng xoay HHT13

Bảng 4.6. Thông số cơ bản của đầu đo HHT13

| STT | Thông số | Đơn vị | Giá trị |
|-----|-----------------------|-----------|---------------------------|
| 1 | Công suất laze tối đa | mW | 1 |
| 2 | Thời gian xung | - | Liên tục |
| 3 | Dải đo | Vòng/phút | 5 – 200,000 |
| 4 | Độ chính xác | % | 0,01 |
| 5 | Bước sóng laze | nm | 650 |
| 6 | Chùm tia phân kỳ | mrad | <1,5 |
| 7 | Đường kính chùm tia | mm | 4 x 7 điển hình tại 2 mét |
| 8 | Thời gian hoạt động | h | 8000 |

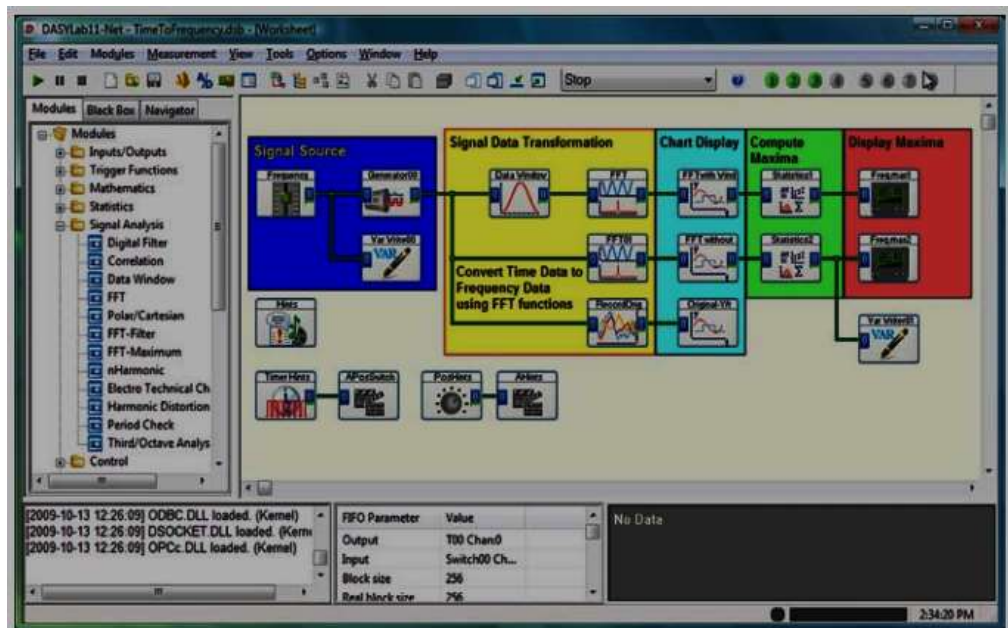
4.1.3.4. Thiết bị ghi và xử lý tín hiệu

- Sử dụng thiết bị NI-6009 do Hãng National Instruments của Mỹ chế tạo, có chức năng nhận tín hiệu từ thiết bị đo và chuyển lên máy tính. Thiết bị NI-6009 thể hiện trên hình 4.8.



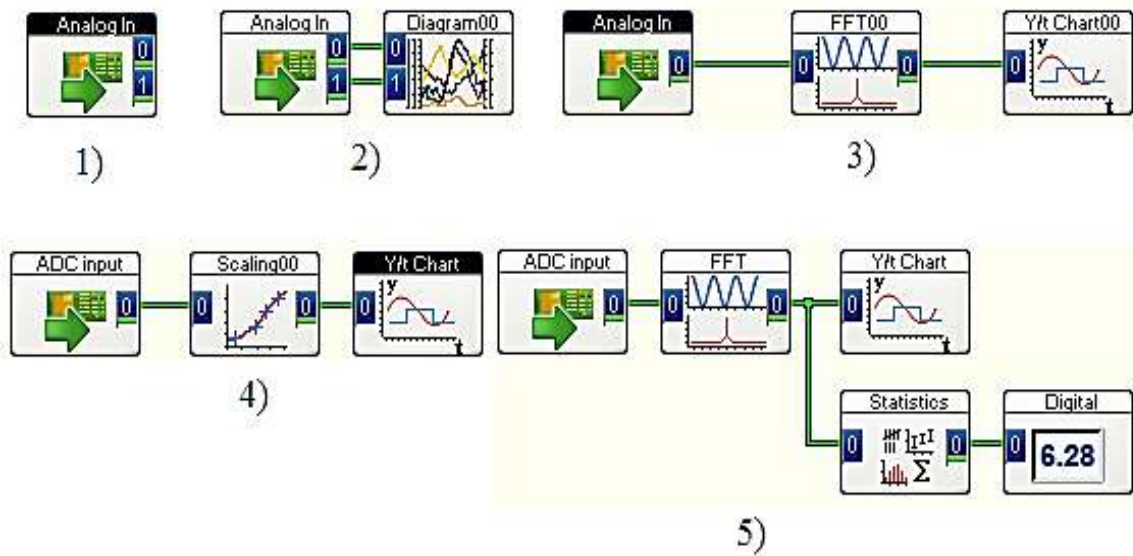
Hình 4.8. Thiết bị ghi và xử lý tín hiệu NI-6009

- Để ghi và xử lý số liệu đo được sử dụng thiết bị là máy tính Lenovo cài đặt phần mềm DasyLab 10, hình 4.9.



Hình 4.9. Máy tính Lenovo cài phần mềm DasyLab 10

- Đường ra của thiết bị NI-6009 nối với máy tính qua cổng USB, tín hiệu vào máy tính được xử lý bằng phần mềm DasyLab10 chạy trên nền NI-DAQmx8.x ở dạng xung điện. Đó là phần mềm bao gồm 5 khối mô đun để thực hiện việc tiếp nhận, phân tích và xử lý tín hiệu đo như trên hình 4.10.



Hình 4.10. Các mô đun xây dựng từ phần mềm DasyLab 10

1) Khối mô đun để tiếp nhận dữ liệu; 2) Khối mô đun vẽ đồ thị; 3) Khối mô đun phân tích; 4) Khối mô đun lưu trữ kết quả; 5) Khối mô đun hiển thị dạng đồ thị và dạng số.

4.2. Các bước tổ chức thực nghiệm và xử lý kết quả thực nghiệm

4.2.1. Chuẩn bị làm thực nghiệm

Lựa chọn vị trí, môi trường thực nghiệm:

Vị trí thực nghiệm được tiến hành tại đảo Trường Sa lớn – Huyện Trường Sa – Tỉnh Khánh Hòa.

Môi trường tiến hành thực nghiệm là môi trường đảo san hô hóa thạch bao gồm các lớp:

Lớp 1 – Cát san hô lẫn ít sạn, sỏi, màu xám trắng;

Lớp 2 – Sạn gồm cành, nhánh lẫn dăm, tảng san hô màu xám trắng;

Lớp 3 – Đá san hô màu xám trắng, xám vàng.

Do không có điều kiện thực hiện đầy đủ các thực nghiệm để xác định các tính chất cơ lý của san hô, nhóm đề tài lấy các tính chất cơ lý của san hô thông qua các tài liệu về san hô [1], [4], [5], Bảng 4.7.

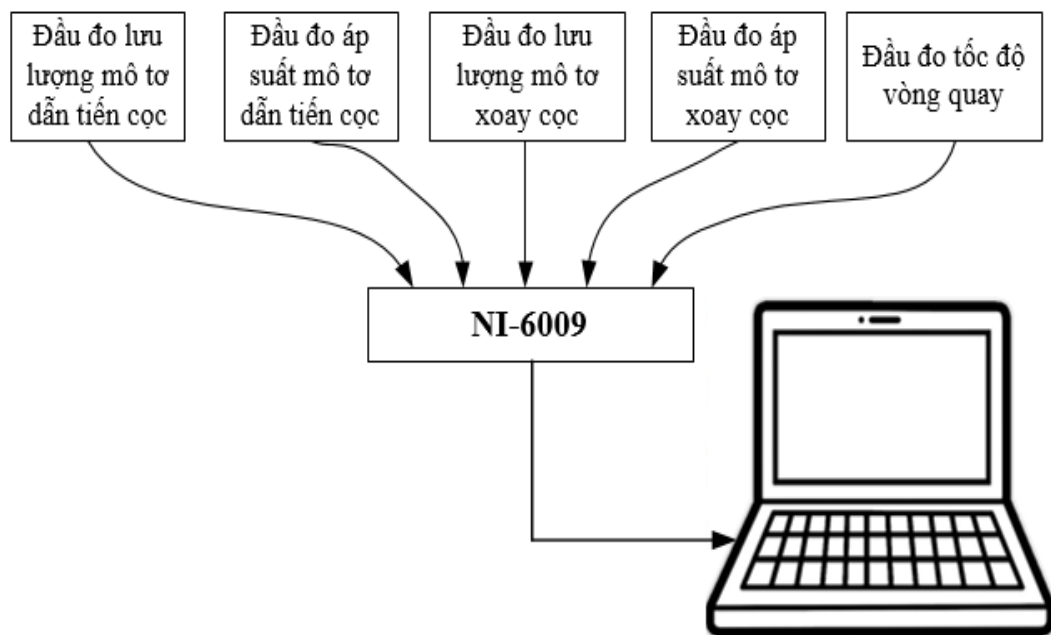
Bảng 4.7. Tính chất cơ lý của san hô chủ yếu ở đảo Trường Sa lớn

| STT | Tên san hô | Trọng lượng riêng | | Khối lượng riêng | Cường độ kháng nén | | Mô đun biến dạng | | Mô đun đàn hồi | |
|-----|------------|-------------------|---------|-------------------|--------------------|---------|----------------------|-----------------------|--------------------|------|
| | | g/cm ³ | | | kg/cm ² | | kg/cm ² | | kg/cm ² | |
| | | Khô | Bão hòa | g/cm ³ | Khô | Bão hòa | Từ | Đến | Từ | Đến |
| 1 | Lớp 1 | 1,41 | 1,65 | | 2,807 | - | - | - | - | - |
| 2 | Lớp 2 | 1,52 | 1,71 | 2,82 | - | - | 267 | 94 | - | - |
| 3 | Lớp 3 | 2,21 | 2,37 | 2,505 | 124,9 | 64,0 | 2,03.10 ⁴ | 0,3 x 10 ⁴ | 2,71 | 0,37 |

4.2.2. Bố trí các đầu đo và thiết bị đo

a. Sơ đồ nhận tín hiệu của các đầu đo

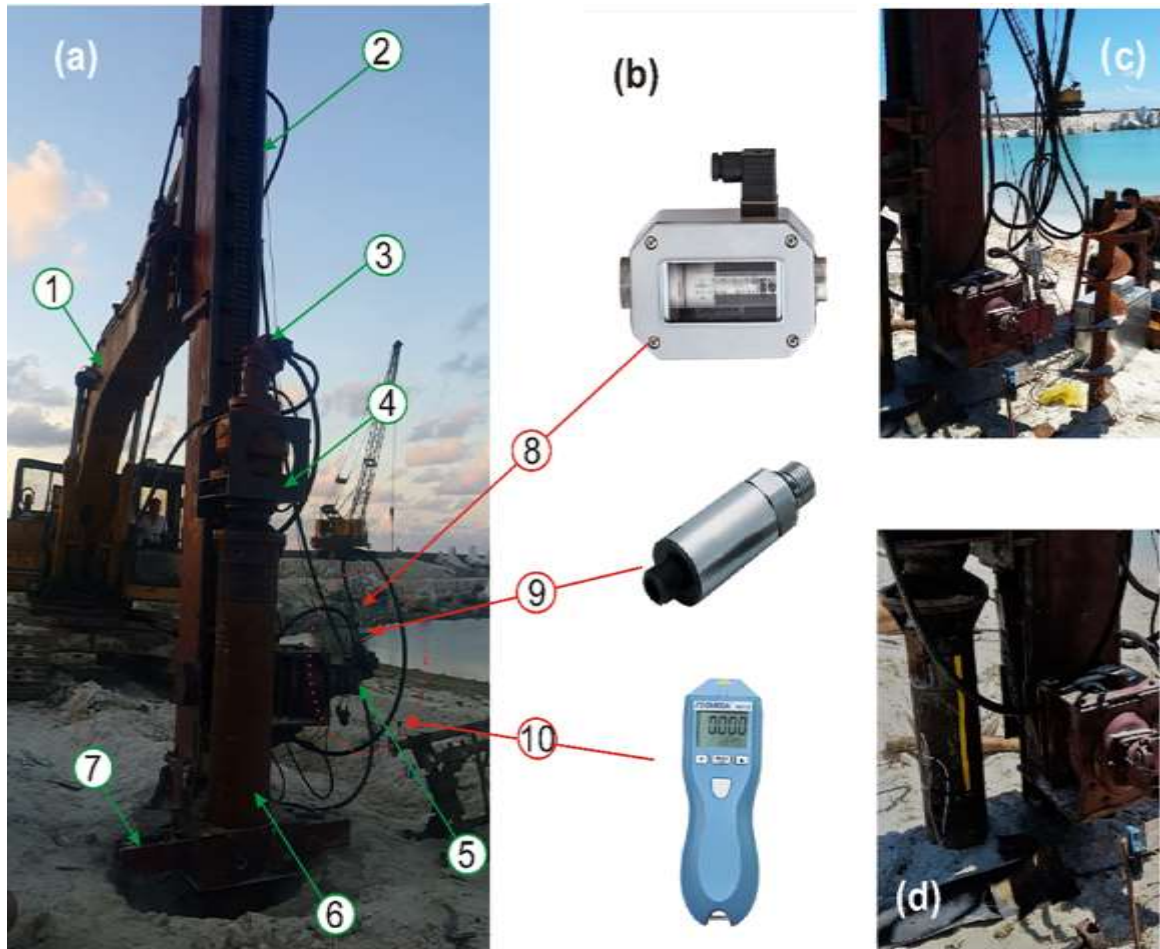
Trong quá trình làm thực nghiệm, các tín hiệu nhận được từ các đầu đo tới thiết bị ghi và xử lý tín hiệu NI-6009 và máy tính như hình 4.11.



Hình 4.11. Sơ đồ đầu nối thiết bị đo vào thiết bị nhận tín hiệu và máy tính

b. Sơ đồ bố trí các đầu đo

- Bố trí các đầu đo, được thể hiện như hình 4.12

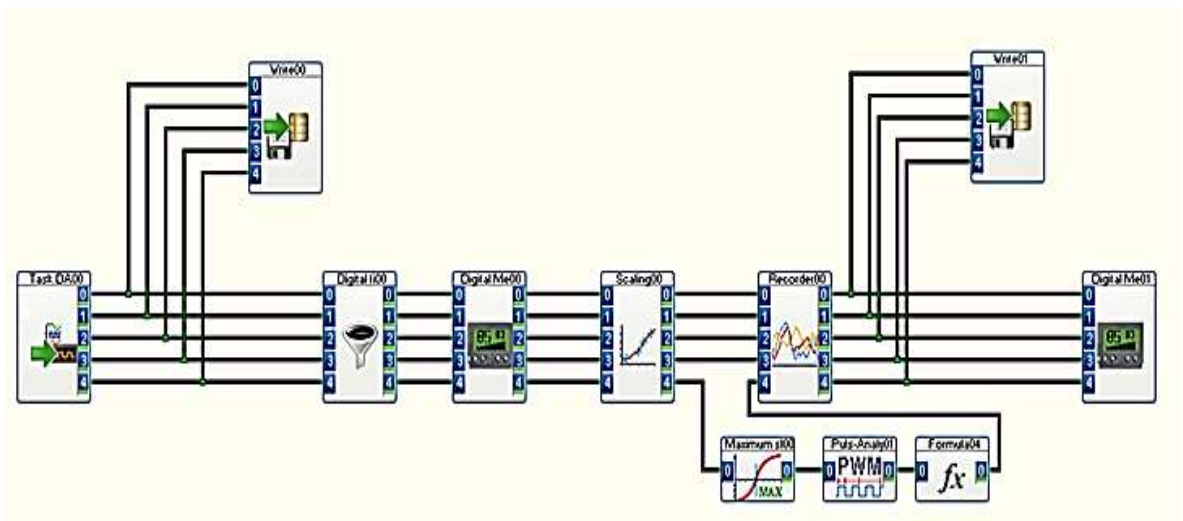


Hình 4.12. Bố trí các đầu đo

(a), mô tả hệ thống làm việc và vị trí lắp đầu đo: (1) Cần máy cơ sở, (2) cần khoan, (3) mô tơ dẫn động xoay; (4) cụm đầu trượt, (5) mô tơ dẫn động ép, (6) ống thép, (7) giá ổn định; (b), (8) đầu đo lưu lượng R4S7HD25, (9) đầu đo áp suất OEM-511, (10) bộ đo tốc độ xoay của cọc HHT13; (c) hình ảnh vị trí lắp đầu đo lưu lượng và áp suất; (d) hình ảnh vị trí đặt bộ đo tốc độ vòng xoay.

c. Thiết lập sơ đồ các kênh đo

Để nhận và quản lý kết quả đo, trước khi tiến hành thực nghiệm, cần thiết lập sơ đồ các kênh đo như hình 4.13



Hình 4.13. Sơ đồ cấu trúc các kênh đo áp suất, lưu lượng và tốc độ vòng xoay

Kết quả đo áp suất và lưu lượng của mô tơ thủy lực dẫn động xoay, dẫn tiến cọc, tốc độ vòng xoay ống thép được ghi thông qua thiết bị ghi và xử lý tín hiệu. Các thông số đo trực tiếp trên bộ công tác xoay hạ cọc và được đo đồng thời.

4.3. Tiến hành thực nghiệm

4.3.1. Trình tự tiến hành thực nghiệm

Quá trình thực nghiệm được thực hiện tuân tự theo các bước sau:

- Bước 1: Tập kết toàn bộ máy móc thiết bị ra hiện trường, tháo tay gầu máy xúc, lắp bộ công tác xoay hạ cọc vào máy cơ sở, lắp cọc ống thép (ống thép thứ nhất có răng cắt san hô) vào thiết bị (Hình 4.14a).

- Bước 2: Lắp đặt các đầu đo lên bộ công tác xoay hạ cọc (Hình 4.14b).

- Bước 3: Nổ máy, vận hành đưa bộ công tác xoay-ép hạ cọc vào vị trí thực nghiệm (Hình 4.14c).

- Bước 4: Định vị máy thực nghiệm hạ cọc, đảm bảo máy ổn định trong quá trình làm việc (Hình 4.14d).

- Bước 5: Vận hành bộ công tác xoay hạ cọc, đo các thông số hoạt động của mô tơ thủy lực (xoay và dẫn tiến cọc) ở chế độ chưa hạ ống thép vào nền san hô.

- Bước 6: Vận hành bộ công tác xoay-ép hạ cọc, đo các thông số hoạt động của mô tơ thủy lực (xoay và dẫn tiến cọc) ở chế độ khoan hạ cọc xuống nền san hô (Hình 4.15)..



a - Tập kết máy ra vị trí thực nghiệm



b – Lắp đặt các đầu đo



c - Di chuyển máy ra vị trí thực nghiệm



d – Định vị máy thực nghiệm hạ cọc

Hình 4.14. Thực nghiệm tại đảo Trường Sa Lớn



a. Vận hành và đo các thông số



b. Kết thúc thực nghiệm

Hình 4.15. Vận hành đo các thông số và kết thúc thực nghiệm

4.3.2. Kết quả đo thực nghiệm

Bảng 4.8. Kết quả đo lần 1

| Thời gian [s] | Áp suất xoay cộc [bar] | Áp suất dẫn tiến [bar] | Tốc độ vòng xoay [V/ph] | Lưu lượng xoay cộc [L/ph] | Lưu lượng dẫn tiến [L/ph] |
|---------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 00,000 | 00,00 | 00,00 | 00,00 | 00,00 | 00,00 |
| 00,100 | 6,38 | 0,61 | 20,00 | 20,97 | 19,65 |
| 00,200 | 6,78 | 0,96 | 20,00 | 21,07 | 19,50 |
| | | | | | |

Bảng 4.9. Kết quả đo lần 2

| Thời gian [s] | Áp suất xoay cộc [bar] | Áp suất dẫn tiến [bar] | Tốc độ vòng xoay [V/ph] | Lưu lượng xoay cộc [L/ph] | Lưu lượng dẫn tiến [L/ph] |
|---------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 00,000 | 5,83 | 1,56 | 20,00 | 23,43 | 18,64 |
| 00,100 | 6,57 | 2,05 | 20,00 | 20,40 | 19,37 |
| 00,200 | 6,94 | 2,20 | 20,00 | 20,39 | 19,46 |
| | | | | | |

Bảng 4.10. Kết quả đo lần 3

| Thời gian [s] | Áp suất xoay cọc [bar] | Áp suất dẫn tiến [bar] | Tốc độ vòng xoay [V/ph] | Lưu lượng xoay cọc [L/ph] | Lưu lượng dẫn tiến [L/ph] |
|------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 00,000 | 101,51 | 4,57 | 20,00 | 31,57 | 2,82 |
| 00,100 | 101,14 | 5,63 | 20,00 | 30,87 | 0,93 |
| 00,200 | 101,18 | 5,80 | 20,00 | 31,55 | 0,79 |
| | | | | | |

Kết quả cụ thể của các lần đo được thể hiện chi tiết trong phụ lục 2, 3, 4.

4.3.3. Xử lý kết quả thực nghiệm

4.3.3.1. Cơ sở xác định giá trị các tham số thực nghiệm

Trên cơ sở dữ liệu đo lưu lượng dầu làm việc qua các mô tơ $Q_{t,r}$ (lít/phút) ta tìm được tốc độ vòng xoay của các mô tơ dẫn động như sau [32]:

$$n_{t,r} = 10^3 \frac{Q_{t,r}}{V_{t,r} \eta_q} \quad (4.1)$$

Công suất dẫn động của các mô tơ có thể xác định được theo công thức sau:

$$P_{t,r} = \frac{n_{t,r} Q_{t,r} \Delta p_{t,r}}{600 \eta_{m,h}} \quad (4.2)$$

trong đó:

$n_{t,r}$ - Tốc độ vòng xoay của trục mô tơ xác định như trên, (vòng/phút);

$V_{t,r}$ - Lưu lượng riêng của các mô tơ, (cm³/vòng);

η_q và $\eta_{m,h}$ - Tương ứng là hệ số hiệu suất lưu lượng và cơ khí/thủy lực;

Δp - Mức độ chênh áp của dầu đi qua mô tơ, (bar).

Ký tự “r” và “t” ở hai công thức trên là tham số tương ứng cho 2 dòng

dầu thủy lực (xoay và dẫn tiến cọc). Theo như tham số thiết kế của bộ công tác xoay hạ cọc, lưu lượng riêng của hai mô tơ xoay và dẫn tiến cọc có giá trị tương ứng là $V_r = 160 \text{ cm}^3/\text{vòng}$ và $V_t = 90 \text{ cm}^3/\text{vòng}$.

Từ đó ta có thể xác định được lực cản F_{re} (kN) và mô men cản M_{re} (kNm) tổng cộng nhờ cân bằng công suất, ta có:

$$F_{re} = \frac{P_t}{v_t}; \quad M_{re} = \frac{P_r}{\omega_r} \quad (4.3)$$

Hai chuyển động của cọc trong công thức (4.3) được tính như sau:

$$v_t = \frac{\pi n_t R_t}{30 i_t}; \quad \omega_r = \frac{\pi n_r}{30 i_r} \quad (4.4)$$

trong đó:

v_t - Vận tốc dẫn tiến;

P_t - Công suất mô tơ dẫn tiến cọc;

P_r - Công suất mô tơ xoay cọc;

$n_{t,r}$ - Tốc độ vòng xoay của trục mô tơ;

ω_r - Vận tốc góc mô tơ xoay cọc;

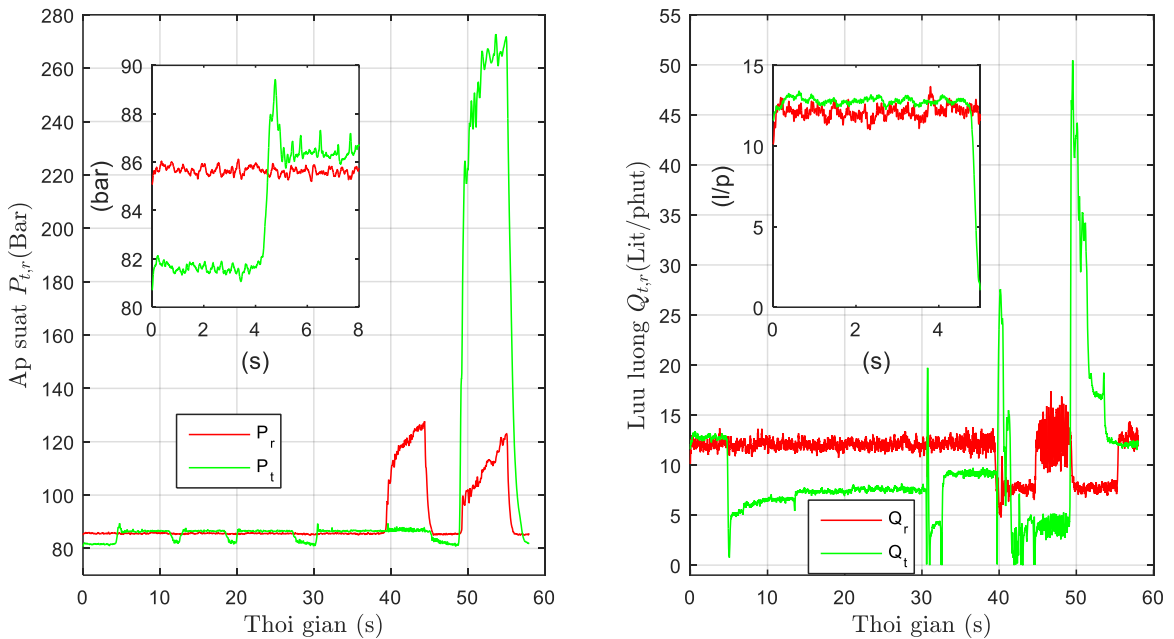
$i_t = 26,347$ và $i_r = 34,475$ là tỷ số truyền tổng cộng của hai hệ thống truyền động;

$R_t = 0,125m$ bán kính bánh sao của hệ dẫn động xích.

Trên cơ sở tốc độ hạ chìm cọc như công thức (4.4), chiều sâu cọc thay đổi theo thời gian được tính bởi công thức (4.5):

$$H(t) = \int_0^t v_t dt \quad (4.5)$$

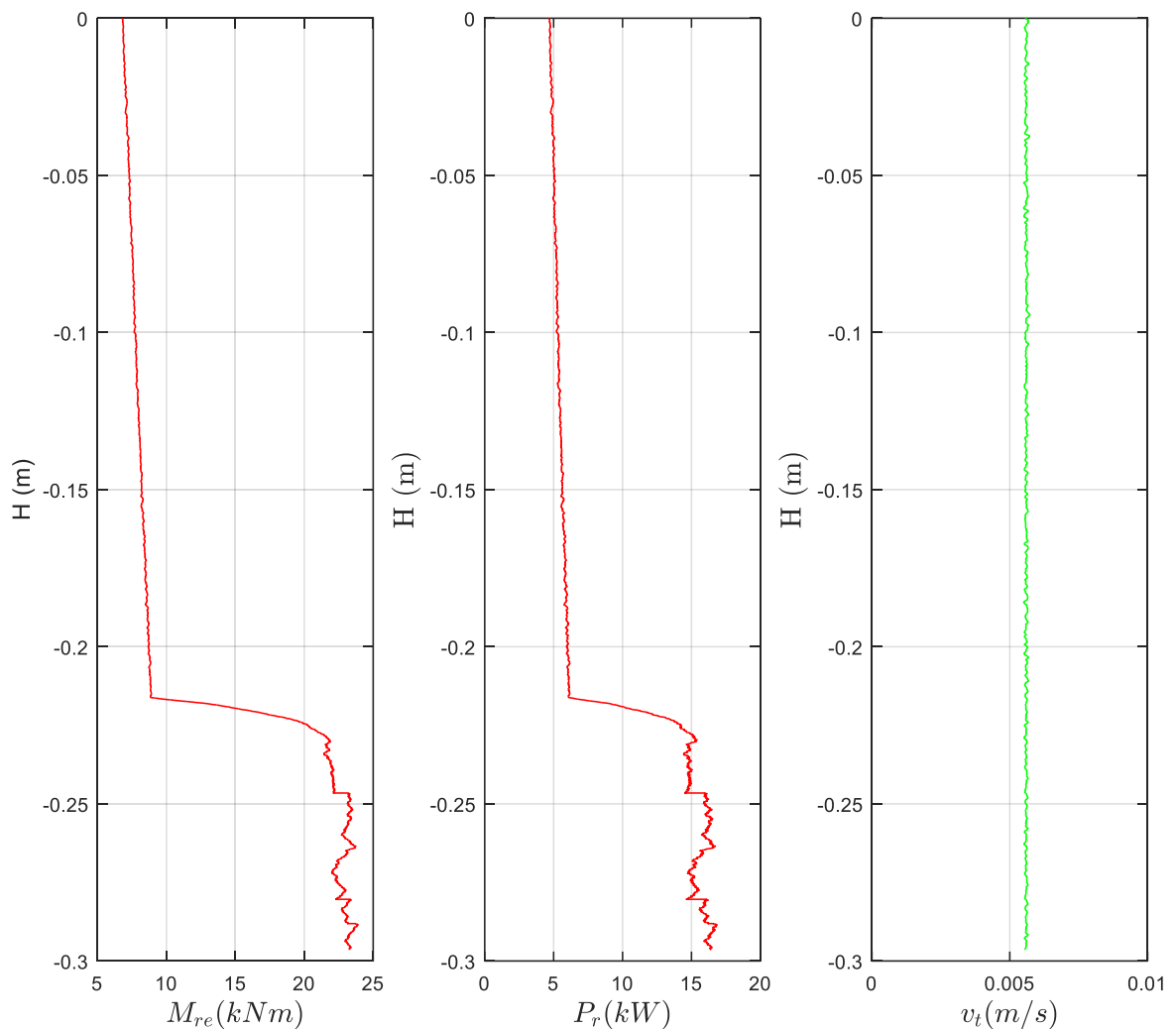
4.3.3.2. Đồ thị và phân tích kết quả thực nghiệm



Hình 4.16. Kết quả thí nghiệm đo áp suất và lưu lượng 2 mô tơ xoay và ép

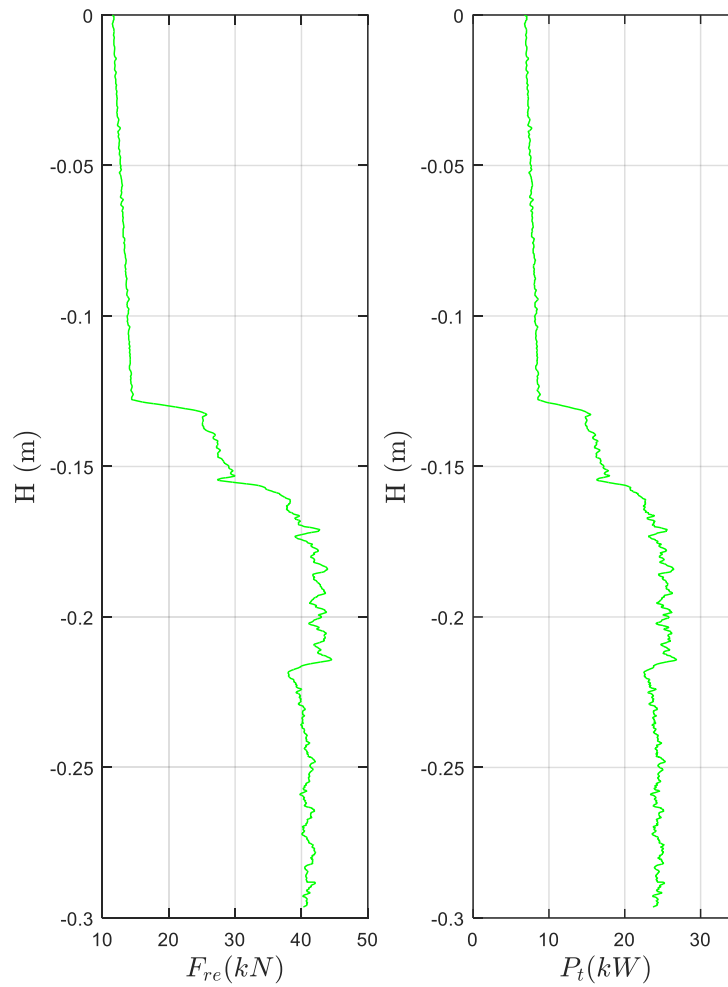
Kết quả đo áp suất và lưu lượng trong thực nghiệm xoay-ép hạ cọc được thể hiện trên hình 4.16 đường kính cọc $\phi = 300 \text{ mm}$. Các thông số làm việc của hệ thống thủy lực: $p \sim 95 \text{ bar}$ và $Q \sim 20 \text{ lít/phút}$ trong hệ thống xoay và ép. Có thể thấy rằng cọc ống thép đi qua nền san hô với 2 lớp có cơ tính khác biệt: ($t = 38 \div 58 \text{ s}$). Từ kết quả đo tại thời điểm đi vào và kết thúc từng lớp cục bộ, ta có thể tìm ra vị trí và chiều dày của từng lớp này bằng việc sử dụng tích phân trình bày trong công thức (4.5), điều đó đồng nghĩa với việc mặt cắt địa chất của các lớp san hô có thể được xác định bởi dữ liệu các tham số đo được trên hệ thống thủy lực.

Cụ thể hơn, nhờ việc xử lý dữ liệu thực nghiệm, các tham số của quá trình xoay cũng như yếu tố cản của nền tác dụng lên cọc trong quá trình ép hạ cọc hoàn toàn có thể xác định được. Bằng việc sử dụng các biểu thức trong công thức (4.2) và (4.3), sự thay đổi các tham số đặc trưng của quá trình xoay-ép hạ cọc được trình bày tương ứng trên hình 4.17, hình 4.18.



Hình 4.17. Sự thay đổi mô men cản, công suất và vận tốc theo chiều sâu

Hình 4.17 cho thấy tốc độ ép cọc ổn định quanh giá trị 0,0058 m/s, rõ ràng rằng để ổn định được tốc độ này cả khi đi qua lớp đá san hô, công suất tiêu hao của hệ thống thủy lực phải được tăng lên tương ứng (đồ thị P_r và P_r , hình 4.16). Ở thí nghiệm này có thể thấy rằng lực và mô men cản lớn nhất ở lớp cành nhánh san hô là 40,39 kN và 23,26 kNm, cho thấy sự tăng lên đáng kể so với giá trị 14,12 kN và 7,06 kNm ở lớp cành nhánh san hô). Điểm tăng cục bộ trên các đồ thị chính là thời điểm bắt đầu cọc ống thép đi vào lớp đá san hô. Kết quả công suất dẫn động thể hiện trên hình 4.16, hình 4.17 và hình 4.18 được tính trực tiếp từ công thức (4.2) dựa trên dữ liệu áp suất và lưu lượng làm việc đo được.



Hình 4.18. Sự thay đổi lực cản và công suất theo chiều sâu

Bảng 4.11. Kết quả thực nghiệm giá trị mô men cản xoay (M_c)

| Độ sâu Z (m) | Giá trị mô men cản xoay M_c (kNm) tại các độ sâu của cốc thí nghiệm | | | |
|-----------------|---|-------|-------|--------------------|
| | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | Giá trị trung bình |
| 1 | 5,00 | 5,39 | 5,46 | 5,28 |
| 4 | 12,22 | 11,75 | 11,33 | 11,77 |
| 8 | 25,00 | 22,51 | 22,56 | 23,36 |
| 12 | 39,99 | 35,84 | 39,16 | 38,33 |
| 15 | 58,70 | 56,01 | 55,94 | 56,88 |

Bảng 4.12. Kết quả thực nghiệm giá trị lực cản (N_c)

| Độ sâu Z (m) | Giá trị lực cản ma sát N_c (kN) trên thân cọc theo phương thẳng đứng tại các độ sâu của cọc thí nghiệm | | | |
|-----------------|--|--------|--------|--------------------|
| | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | Giá trị trung bình |
| 1 | 14,60 | 12,86 | 11,88 | 13,11 |
| 4 | 29,39 | 26,32 | 27,03 | 27,58 |
| 8 | 52,74 | 60,22 | 65,18 | 59,38 |
| 12 | 97,83 | 100,78 | 93,92 | 97,51 |
| 15 | 131,02 | 145,25 | 154,15 | 143,47 |

Kết luận chương 4

- Việc nghiên cứu thực nghiệm đã được tiến hành với các thiết bị đo hiện đại, và được thực hiện theo qui trình tổ chức chặt chẽ. Quá trình nghiên cứu thực nghiệm đã nhận được một số kết quả sau:

- Đã xây dựng được phương pháp thực nghiệm, xác định các thông số đo trong quá trình thực nghiệm của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép tại thực địa trên nền san hô ở đảo Trường Sa;

- Đã đạt được mục tiêu thực nghiệm là: Xác định được các thông số của áp suất, lưu lượng nguồn thủy lực của mô tơ xoay cọc ống thép và mô tơ dẫn tiến cọc ống thép, từ đó gián tiếp tính được các thông số tổng lực cản và tổng mô men cản tác dụng lên ống thép. Một số kết quả được sử dụng làm đầu vào cho việc giải bài toán động lực học. Đồng thời một số thông số được sử dụng để so sánh giữa tính toán lý thuyết và thực nghiệm nhằm rút ra những kết luận về tính sát thực của mô hình động lực học đã xây dựng ở chương 2.

KẾT LUẬN CHUNG

Nội dung các chương đã giải quyết cơ bản được mục tiêu và nội dung đề ra của Luận án. Những kết quả nghiên cứu của Luận án đạt được như sau:

1. Đã thực hiện nghiên cứu, phân tích tổng quan về môi trường đảo đá san hô tại Trường Sa, các nghiên cứu trong và ngoài nước về lĩnh vực nghiên cứu của luận án. Phạm vi sử dụng của thiết bị hạ cọc, từ đó xây dựng nhiệm vụ nghiên cứu của luận án.

2. Xây dựng được mô hình tương tác giữa cọc ống thép với nền san hô có tính đến các yếu tố tính chất cơ lý của nền và các thông số kết cấu của cọc ống thép. Điểm mới của luận án là nền san hô ở đảo Trường Sa.

3. Xây dựng được mô hình động lực học của bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép với 2 khối lượng và 4 bậc tự do độc lập. Điểm mới của mô hình thể hiện ở chỗ: Tính đến độ cứng và hệ số giảm chấn xoay của khớp nối ren liên kết cụm đầu xoay và cọc thép; Xét đến các lực cản xoay, lực cản theo phương thẳng đứng bên trong và bên ngoài ống thép, lực cản cắt nền san hô tác dụng lên răng cắt. Mô hình của luận án có thể áp dụng cho các loại khoan xoay-ép hạ cọc ống thép khi thi công ở các loại nền như đất, đá, san hô... với các đường kính ống thép khác nhau từ $\phi 200\text{ mm}$ ÷ $\phi 400\text{ mm}$.

4. Đã khảo sát các thông số ảnh hưởng đến chế độ làm việc của bộ công tác. Đã xây dựng được hàm mục tiêu và xác định được thông số làm việc hợp lý, cụ thể: Với cọc ống thép $D = 200\text{ mm}$ $n = 18,83$ v/ph và $v_t = 0,49$ m/ph, ứng với góc $\alpha_1 = 14,63$ độ, với đường kính cọc ống thép $D = 300\text{ mm}$ $n = 17,76$ v/ph và $v_t = 0,36$ m/ph ứng với góc $\alpha_1 = 7,73$ độ, với đường kính cọc ống thép $D = 400\text{ mm}$ $n = 15,7$ v/ph và $v_t = 0,295$ m/ph ứng với góc $\alpha_1 = 5,48$ độ.

5. Đã xác định được khả năng hạ cọc ống thép với công suất của mô tơ dẫn động cho trước cụ thể : đối với nền đá san hô $\gamma = 25\text{ kN/m}^3$, với cọc ống thép $D = 400\text{ mm}$ hạ được cọc đến độ sâu tối đa là 7,75 m, đối với cọc ống thép

$D = 300$ mm hạ được cọc đến độ sâu tối đa là 8,8 m, đối với cọc ống thép $D = 200$ mm hạ được cọc đến độ sâu tối đa là 11,3 m.

6. Nghiên cứu thực nghiệm ở hiện trường lần đầu tiên tại đảo Trường Sa lớn, với phương tiện và phương pháp đo hiện đại, từ đó đưa ra bộ số liệu phục vụ tính toán các thông số. Kết quả nghiên cứu tính toán lý thuyết phù hợp với nghiên cứu thực nghiệm với sai số nằm trong khoảng 8,52% ÷ 14,7% có thể chấp nhận được.

Hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án là: Nghiên cứu xây dựng bộ thông số kết cấu và chế độ làm việc hợp lý phục vụ cho việc chế tạo bộ công tác xoay-ép hạ cọc ống thép đặt trên xà lan thi công hạ cọc trên biển chịu tác động của sóng biển.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ

1. Trần Hữu Lý, Phan Thanh Cầu, Trần Văn Hưng (2017), “*Nghiên cứu thực nghiệm xác định mô men cản quay tác dụng lên cọc khi quay hạ cọc ống thép trên nền san hô*”, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số đặc biệt, tr.284-287.
2. Trần Hữu Lý, Phan Thanh Cầu, Nguyễn Văn Hiến (2017), “*Sự phụ thuộc công suất dẫn động của mô tơ quay vào tốc độ hạ cọc ống thép trên nền san hô*”, Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, Tập 11 Số 4, tr.229-234.
3. Tran Huu Ly, Phan Thanh Cau (2017), “*Determine resistance of calcareous soil by experiments on the rotary press-in piler attached on a hydraulic excavator*”, Tạp chí Khoa học & Kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật Quân sự, số 186, tr.43-53.
4. Phan Thanh Cầu (2019), “*Nghiên cứu xây dựng mô hình động lực học thiết bị khoan xoay hạ cọc ống thép vào nền san hô*”, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 8/2019, tr.16-20.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

- [1]. 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.
- [2]. Nguyễn Quý Đạt, Đỗ Minh Toàn (2013), “Đặc điểm địa tầng và tính chất cơ lý của các trầm tích san hô trên một số đảo thuộc Quần đảo Trường Sa. Đề xuất các giải pháp nền móng cho các dạng công trình xây dựng”, *Hội nghị Khoa học kỷ niệm 50 năm ngày thành lập Viện KHCN Xây dựng*.
- [3]. Nguyễn Tương Lai (2012). “Điều tra khảo sát và nghiên cứu về ma sát giữa cọc và nền san hô trên các đảo thuộc quần đảo Trường Sa”. *Báo cáo khoa học chuyên đề dự án nhánh ĐTB 11.3, quyển III.3. 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 an ninh quốc phòng trên biển và thềm lục địa Việt Nam”*. BTL Công Binh.
- [4]. Nguyễn Tương Lai (2018). “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”. Báo cáo tổng hợp kết quả đề tài ĐTDL-CN.17/15
- [5]. Hoàng Xuân Lượng (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 tổng hợp kết quả đề tài KC.09.07/06-10.
- [6]. Trần Hữu Lý, Lương Khánh Tình, Phan Thanh Cầu, Lê Trọng Tuấn (2015), “Ảnh hưởng của đường kính cọc đến lực ép và momen hạ cọc ống thép xuống nền bằng máy khoan xoay”. *Tạp chí cơ khí Việt Nam*, (5): tr. 75-79.
- [7]. Nguyễn Chí Minh (2019). “Nghiên cứu hoàn thiện công nghệ thiết kế và chế tạo thiết bị thi công cọc vít cỡ vừa và nhỏ lắp trên máy cơ sở có sẵn phục vụ xây dựng móng cọc cho các công trình giao thông đô thị ở Việt Nam”. Báo cáo tổng kết Khoa học và Công nghệ đề tài DT183019/19.

- [8]. Phạm Văn Minh, (2019), “*Nghiên cứu phương pháp tính toán thiết kế cơ cấu công tác của thiết bị hạ ống vách thép thi công cọc nhồi trong nền đất yếu*”. Báo cáo tổng kết đề tài khoa học cấp bộ B2017-XDA-13.
- [9]. Nguyễn Doãn Phước (2016), *Tối ưu hóa trong điều khiển và điều khiển tối ưu*, Nhà xuất bản Bách khoa Hà Nội.
- [10]. Đỗ Sanh (2003), *Động lực học máy*. NXB Khoa học và Kỹ thuật. Hà nội.
- [11]. Nguyễn Văn Thơ, Nguyễn Ngọc Phúc, cs. (2003), *Cơ học đất tập 1*, NXB Xây dựng.
- [12]. Nguyễn Trọng (2006). *Cơ học lý thuyết*, tập 2. NXB Khoa học và Kỹ thuật. Hà nội.
- [13]. Nguyễn Văn Vịnh (2008). *Động lực học máy xây dựng*. NXB Giao thông vận tải. Hà nội.

Tiếng Anh:

- [14]. Adachi, J.I., Detournay, E., Drescher, A. (1996). “Determination of rock strength parameters from cutting tests”, in: *Proc. 2nd North American RockMechanics Symposium (NARMS 1996), Balkema, Rotterdam*, pp. 1517– 1523.
- [15]. Allani, M., & Holeyman, A. (2012). “*Flexural behavior of piles in high strain dynamic testing*”. In *Testing and Design Methods for Deep Foundation IS-Kanazawa*.
- [16]. Bazaraa, M. S., Sherali, H. D., & Shetty, C. M. (2013). *Nonlinear programming: theory and algorithms*. John Wiley & Sons.
- [17]. Charue Nicolas (2004). *Loading rate effects on pile load-displacement behaviour derived from back-analysis of two load testing procedures*. Diss. Ph. D. Dissertation, Université Catholique de Louvain, Belgium.
- [18]. Christian Moormann, Johannes Labenski, Johannes Aschrafi, (2015). “Simulation of Soil Plug Effects in Open Steel Pipe Piles Considering the Complex Soil-Structure-Interaction During Installation”, *40th Annual Conference on Deep Foundations, Oakland, California, USA*, pp. 533-546.
- [19]. David J. White, Haramrita. K. Sidhu, Tim C. R. Finlay, Malcolm D. Bolton, Teruo Nagayama (2014). “Press-in piling: the influence of

- plugging on driveability”, *8th International Conference of the Deep Foundations Institute, New York*, pp. 299-310.
- [20]. Detournay, E., Defourny, P. (1992). “A phenomenological model for the drilling action of drag bits”, *Int. J. Rock Mech. Min.* 29 (1), pp. 13-23.
- [21]. Eva M. Navarro-López (2007). “Sliding-mode control of a multi-DOF oilwell drillstring with stick-slip oscillations”, *Proceedings of the 2007 American Control Conference*, pp. 3837-3842.
- [22]. Ewa Hazla (2013), Rotary Press-in Piling in Hard Ground Fourth-year undergraduate project in Group D, 2012/2013.
- [23]. Flynn, K. N., & McCabe, B. A. (2016). “Energy transfer ratio for hydraulic pile driving hammers”. *Proceedings of Civil Engineering Research in Ireland (CERI 2016)*, Galway.
- [24]. Ghaly, A.M. and Hanna, A.M (1991). “Stress Development in Sand Due To Installation and Uplifting of Screw Anchors”, *Proceedings of the 4th International Conference on Piling and Deep Foundations, Vol. 1*, pp. 565-570.
- [25]. Karnopp, D. (1985). “Computer Simulation of Stick-slip Friction in Mechanical Dynamic Systems”, *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, vol. 107, no. 1, pp. 100-103.
- [26]. Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P. (1983). “Optimization by simulated annealing”, *Science, New Series, Vol. 220, No. 4598*, pp. 671-680.
- [27]. Komatsu, *Shop manual HYDRAULIC EXCAVATOR PC 450-6*. KOMAT'SU, 2004.
- [28]. Miedema, S. A. (2014). *The Delft sand, clay and rock cutting model*. Delft University Press.
- [29]. Lehane B.M., Schneider J.A., Xu X (2005), “The UWA-05 method for prediction of axial capacity of driven piles in sand”, *Proceedings of the 1st international Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Perth*, pp. 683-690.
- [30]. Leine, R. I., Van Campen, D. H., De Kraker, A., & Van Den Steen, L. (1998). “Stick-slip Vibrations Induced by Alternate Friction Models”, *Nonlinear Dynamics*, vol. 16, pp. 41-54.

- [31]. Lin Li, Qi-zhi Zhang and Nurzat Rasol (2011). “Time-Varying Sliding Mode Adaptive Control for Rotary Drilling System”, *Journal of computers*, vol. 6, no. 3, pp. 564-570.
- [32]. Parr, A. (2011). *Hydraulics and pneumatics: a technician's and engineer's guide*. Elsevier.
- [33]. Randolph, M. F., and H. A. Simons (1986). “An Improved Soil Model for One-Dimensional Pile Driving Analysis”, *Proceedings of the 3rd International Conference of Numerical Methods in Offshore Piling, Nantes France*, pp.3–17,
- [34]. Salgado, R., & Zhang, Y. (2012). *Use of pile driving analysis for assessment of axial load capacity of piles*.
- [35]. Svetlana Polukoshko, Olga Kononova, Svetlana Sokolova (2010). “Dynamical Effects in Process of Piles Vibrodriving”, *Scientific Journal of Riga Technical University Transport and Engineering. Mechanics*, vol 33, pp. 109-116.
- [36]. Thomas Richard, Christophe Germy, Emmanuel Detournay (2004). “Self-excited stick–slip oscillations of drill bits”, *C. R. Mecanique* 332, pp. 619-626.
- [37]. Xu, X., Schneider, J. A., & Lehane, B. M. (2005, September). “Evaluation of end-bearing capacity of open-ended piles driven in sand from CPT data”. In *Proceedings of the 1st International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Perth, Australia*, pp. 19-21.
- [38]. Zamanian, M., Khadem, S.E., Ghazavi, M.R. (2007). “Stick-slip oscillations of drag bits by considering damping of drilling mud and active damping system”, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 59, pp. 289–299.

Phụ lục 2: Kết quả thí nghiệm đo lần 1

| Thời gian [s] | Áp suất xoay cọc [bar] | Áp suất dẫn tiến [bar] | Tốc độ vòng xoay [V/ph] | Lưu lượng xoay cọc [L/ph] | Lưu lượng dẫn tiến [L/ph] |
|---------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 00,000 | 00,00 | 00,00 | 00,00 | 00,00 | 00,00 |
| 00,100 | 6,38 | 0,61 | 20,00 | 20,97 | 19,65 |
| 00,200 | 6,78 | 0,96 | 20,00 | 21,07 | 19,50 |
| 00,300 | 6,29 | 0,86 | 20,00 | 20,97 | 19,36 |
| 00,400 | 6,41 | 0,81 | 20,00 | 20,97 | 19,54 |
| 00,500 | 6,42 | 0,92 | 20,00 | 20,99 | 19,55 |
| 00,600 | 6,43 | 0,54 | 20,00 | 20,95 | 19,38 |
| 00,700 | 6,38 | 0,93 | 20,00 | 20,96 | 19,54 |
| 00,800 | 6,29 | 0,80 | 20,00 | 21,05 | 19,35 |
| 00,900 | 6,32 | 0,85 | 20,00 | 20,90 | 19,41 |
| 01,000 | 6,30 | 0,81 | 20,00 | 20,90 | 19,58 |
| 01,100 | 6,42 | 1,11 | 20,00 | 20,98 | 19,43 |
| 01,200 | 6,58 | 1,21 | 20,00 | 20,91 | 19,40 |
| 01,300 | 6,42 | 0,48 | 20,00 | 21,10 | 19,79 |
| 01,400 | 6,36 | 0,80 | 20,00 | 20,96 | 19,31 |
| 01,500 | 6,48 | 0,98 | 20,00 | 20,97 | 19,46 |
| 01,600 | 6,25 | 1,13 | 20,00 | 20,94 | 19,25 |
| 01,700 | 6,27 | 0,61 | 20,00 | 21,09 | 19,63 |
| 01,800 | 6,21 | 0,93 | 20,00 | 20,94 | 19,29 |
| 01,900 | 6,21 | 0,67 | 20,00 | 21,07 | 19,41 |
| 02,000 | 6,28 | 0,72 | 20,00 | 21,05 | 19,39 |
| 02,100 | 6,42 | 0,74 | 20,00 | 21,11 | 19,52 |
| 02,200 | 6,62 | 0,84 | 20,00 | 20,93 | 19,33 |
| 02,300 | 6,13 | 0,53 | 20,00 | 21,19 | 19,52 |
| 02,400 | 6,12 | 0,79 | 20,00 | 21,26 | 19,52 |
| 02,500 | 6,18 | 0,76 | 20,00 | 21,09 | 19,51 |
| 02,600 | 6,47 | 1,40 | 20,00 | 20,91 | 19,39 |
| 02,700 | 6,82 | 1,05 | 20,00 | 20,80 | 19,39 |
| 02,800 | 6,02 | 1,03 | 20,00 | 21,09 | 19,42 |
| 02,900 | 6,48 | 1,00 | 20,00 | 21,08 | 19,29 |
| 03,000 | 6,11 | 0,76 | 20,00 | 21,07 | 19,33 |
| 03,100 | 6,60 | 0,84 | 20,00 | 21,07 | 19,67 |
| 03,200 | 6,36 | 0,78 | 20,00 | 21,05 | 19,49 |
| 03,300 | 6,51 | 1,00 | 20,00 | 20,94 | 19,41 |
| 03,400 | 6,22 | 0,84 | 20,00 | 21,28 | 19,75 |
| 03,500 | 6,29 | 1,15 | 20,00 | 21,06 | 19,37 |
| 03,600 | 6,38 | 0,98 | 20,00 | 21,08 | 19,32 |
| 03,700 | 6,32 | 0,76 | 20,00 | 21,23 | 19,58 |
| 03,800 | 6,75 | 1,22 | 20,00 | 20,99 | 19,44 |

| | | | | | |
|--------|------|------|-------|-------|-------|
| 03,900 | 6,21 | 1,14 | 20,00 | 21,13 | 19,37 |
| 04,000 | 6,33 | 1,29 | 20,00 | 20,99 | 19,46 |
| 04,100 | 6,42 | 1,27 | 20,00 | 21,02 | 19,39 |
| 04,200 | 6,33 | 1,57 | 20,00 | 21,01 | 19,59 |
| 04,300 | 6,38 | 1,40 | 20,00 | 21,10 | 19,51 |
| 04,400 | 6,12 | 1,25 | 20,00 | 21,04 | 19,41 |
| 04,500 | 6,22 | 1,19 | 20,00 | 21,10 | 19,59 |
| 04,600 | 6,30 | 0,85 | 20,00 | 21,12 | 19,64 |
| 04,700 | 6,46 | 1,51 | 20,00 | 20,90 | 19,21 |
| 04,800 | 6,31 | 0,79 | 20,00 | 20,97 | 19,51 |
| 04,900 | 6,88 | 0,83 | 20,00 | 21,02 | 19,64 |
| 05,000 | 6,15 | 1,23 | 20,00 | 20,98 | 19,65 |
| 05,100 | 6,60 | 1,16 | 20,00 | 20,80 | 19,58 |
| 05,200 | 6,31 | 1,47 | 20,00 | 20,90 | 19,44 |
| 05,300 | 5,99 | 1,42 | 20,00 | 20,92 | 19,46 |
| 05,400 | 6,36 | 1,34 | 20,00 | 20,85 | 19,15 |
| 05,500 | 6,44 | 1,04 | 20,00 | 20,89 | 19,68 |
| 05,600 | 6,29 | 1,24 | 20,00 | 20,88 | 19,23 |
| 05,700 | 6,39 | 1,24 | 20,00 | 20,94 | 19,61 |
| 05,800 | 6,40 | 0,94 | 20,00 | 20,87 | 19,34 |
| 05,900 | 6,44 | 0,94 | 20,00 | 20,97 | 19,51 |
| 06,000 | 6,31 | 1,64 | 20,00 | 20,99 | 19,50 |
| 06,100 | 6,31 | 1,39 | 20,00 | 20,88 | 19,38 |
| 06,200 | 6,54 | 1,32 | 20,00 | 20,84 | 19,52 |
| 06,300 | 6,16 | 1,18 | 20,00 | 20,95 | 19,60 |
| 06,400 | 6,52 | 1,62 | 20,00 | 20,76 | 19,42 |
| 06,500 | 5,93 | 1,22 | 20,00 | 21,06 | 19,30 |
| 06,600 | 6,47 | 1,34 | 20,00 | 20,92 | 19,38 |
| 06,700 | 6,33 | 1,12 | 20,00 | 20,97 | 19,59 |
| 06,800 | 6,25 | 1,28 | 20,00 | 20,96 | 19,53 |
| 06,900 | 6,31 | 0,82 | 20,00 | 21,03 | 19,59 |
| 07,000 | 6,46 | 1,16 | 20,00 | 20,95 | 19,44 |
| 07,100 | 6,23 | 1,34 | 20,00 | 20,99 | 19,59 |
| 07,200 | 6,40 | 1,55 | 20,00 | 20,86 | 19,59 |
| 07,300 | 6,37 | 1,39 | 20,00 | 21,04 | 19,71 |
| 07,400 | 6,43 | 1,30 | 20,00 | 20,95 | 19,55 |
| 07,500 | 6,34 | 1,12 | 20,00 | 21,12 | 19,39 |
| 07,600 | 6,03 | 1,36 | 20,00 | 20,94 | 19,42 |
| 07,700 | 6,37 | 1,14 | 20,00 | 21,06 | 19,44 |
| 07,800 | 6,18 | 0,76 | 20,00 | 20,95 | 19,62 |
| 07,900 | 6,38 | 1,42 | 20,00 | 20,85 | 19,52 |
| 08,000 | 6,30 | 1,37 | 20,00 | 20,89 | 19,42 |
| 08,100 | 6,42 | 1,53 | 20,00 | 20,97 | 19,44 |
| 08,200 | 6,23 | 0,86 | 20,00 | 20,96 | 19,65 |

| | | | | | |
|--------|------|--------|-------|-------|-------|
| 08,300 | 6,07 | 0,99 | 20,00 | 21,00 | 19,47 |
| 08,400 | 6,44 | 0,99 | 20,00 | 20,88 | 19,84 |
| 08,500 | 6,31 | 1,32 | 20,00 | 21,05 | 19,65 |
| 08,600 | 6,50 | 1,26 | 20,00 | 20,83 | 19,43 |
| 08,700 | 6,35 | 0,99 | 20,00 | 20,90 | 19,68 |
| 08,800 | 6,43 | 1,24 | 20,00 | 20,95 | 19,66 |
| 08,900 | 6,42 | 1,97 | 20,00 | 20,74 | 19,43 |
| 09,000 | 6,13 | 1,18 | 20,00 | 21,05 | 19,38 |
| 09,100 | 6,32 | 1,45 | 20,00 | 20,95 | 19,33 |
| 09,200 | 6,17 | 1,38 | 20,00 | 21,04 | 19,48 |
| 09,300 | 6,34 | 0,91 | 20,00 | 21,06 | 19,65 |
| 09,400 | 6,33 | 1,57 | 20,00 | 20,95 | 19,47 |
| 09,500 | 6,35 | 1,26 | 20,00 | 20,89 | 19,45 |
| 09,600 | 6,26 | 1,15 | 20,00 | 20,98 | 19,40 |
| 09,700 | 6,37 | 1,36 | 20,00 | 20,98 | 19,58 |
| 09,800 | 6,54 | 1,16 | 20,00 | 20,85 | 19,51 |
| 09,900 | 6,48 | 1,09 | 20,00 | 20,89 | 19,48 |
| 10,000 | 6,30 | 1,26 | 20,00 | 21,01 | 19,44 |
| 10,100 | 6,42 | 1,18 | 20,00 | 20,96 | 19,44 |
| 10,200 | 6,54 | 1,45 | 20,00 | 20,91 | 19,50 |
| 10,300 | 6,19 | 1,49 | 20,00 | 20,94 | 19,49 |
| 10,400 | 6,27 | 2,15 | 20,00 | 20,70 | 19,32 |
| 10,500 | 6,28 | 1,92 | 20,00 | 20,78 | 19,25 |
| 10,600 | 6,19 | 1,37 | 20,00 | 21,03 | 19,56 |
| 10,700 | 6,26 | 2,06 | 20,00 | 20,90 | 19,47 |
| 10,800 | 6,29 | 1,83 | 20,00 | 20,93 | 19,46 |
| 10,900 | 6,52 | 2,32 | 20,00 | 20,84 | 19,42 |
| 11,000 | 6,35 | 2,71 | 20,00 | 20,83 | 19,61 |
| 11,100 | 6,05 | 3,49 | 20,00 | 21,00 | 19,47 |
| 11,200 | 6,37 | 5,77 | 20,00 | 20,94 | 19,60 |
| 11,300 | 6,37 | 10,92 | 20,00 | 20,93 | 19,60 |
| 11,400 | 6,62 | 22,79 | 20,00 | 20,88 | 19,37 |
| 11,500 | 8,06 | 40,38 | 20,00 | 20,96 | 19,45 |
| 11,600 | 8,44 | 67,60 | 20,00 | 20,80 | 19,50 |
| 11,700 | 8,70 | 91,20 | 20,00 | 20,91 | 19,56 |
| 11,800 | 9,30 | 107,52 | 20,00 | 20,87 | 19,52 |
| 11,900 | 9,13 | 109,08 | 20,00 | 20,92 | 19,44 |
| 12,000 | 8,72 | 107,87 | 20,00 | 20,91 | 19,45 |
| 12,100 | 8,36 | 108,22 | 20,00 | 20,90 | 19,35 |
| 12,300 | 7,74 | 110,13 | 20,00 | 20,93 | 19,46 |
| 12,400 | 7,78 | 118,95 | 20,00 | 20,87 | 19,50 |
| 12,500 | 7,67 | 121,02 | 20,00 | 20,91 | 19,43 |
| 12,600 | 7,34 | 122,08 | 20,00 | 20,87 | 19,48 |
| 12,700 | 7,22 | 125,07 | 20,00 | 20,92 | 19,43 |

| | | | | | |
|--------|------|--------|-------|-------|-------|
| 12,800 | 7,12 | 126,03 | 20,00 | 20,82 | 19,24 |
| 12,900 | 6,82 | 125,70 | 20,00 | 20,93 | 19,64 |
| 13,000 | 6,82 | 125,66 | 20,00 | 21,00 | 19,43 |
| 13,100 | 6,80 | 126,11 | 20,00 | 20,96 | 19,38 |
| 13,200 | 6,65 | 129,54 | 20,00 | 20,92 | 19,56 |
| 13,300 | 6,67 | 134,96 | 20,00 | 20,90 | 19,32 |
| 13,400 | 6,68 | 139,15 | 20,00 | 20,80 | 19,40 |
| 13,500 | 6,70 | 140,70 | 20,00 | 20,87 | 19,56 |
| 13,600 | 6,41 | 142,00 | 20,00 | 20,76 | 19,31 |
| 13,700 | 6,31 | 141,34 | 20,00 | 21,00 | 19,52 |
| 13,800 | 6,90 | 125,03 | 20,00 | 20,78 | 19,49 |
| 13,900 | 7,06 | 155,25 | 20,00 | 20,72 | 19,46 |
| 14,000 | 6,79 | 175,63 | 20,00 | 20,83 | 19,69 |
| 14,100 | 6,49 | 186,53 | 20,00 | 20,90 | 19,39 |
| 14,200 | 6,73 | 199,00 | 20,00 | 20,93 | 19,40 |
| 14,300 | 6,53 | 204,73 | 20,00 | 21,08 | 19,38 |
| 14,400 | 6,87 | 211,95 | 20,00 | 20,89 | 19,40 |
| 14,500 | 6,89 | 210,11 | 20,00 | 20,91 | 19,43 |
| 14,600 | 6,63 | 205,72 | 20,00 | 21,01 | 19,58 |
| 14,700 | 6,34 | 207,03 | 20,00 | 21,10 | 19,54 |
| 14,800 | 6,58 | 213,46 | 20,00 | 20,99 | 19,52 |
| 14,900 | 6,19 | 219,90 | 20,00 | 21,11 | 19,40 |
| 15,000 | 6,60 | 219,60 | 20,00 | 20,93 | 19,61 |
| 15,100 | 6,31 | 217,70 | 20,00 | 21,03 | 19,66 |
| 15,200 | 5,96 | 234,00 | 20,00 | 21,03 | 19,42 |
| 15,300 | 6,12 | 243,22 | 20,00 | 21,02 | 19,55 |
| 15,400 | 5,95 | 227,20 | 20,00 | 21,18 | 19,48 |
| 15,500 | 6,23 | 217,18 | 20,00 | 21,04 | 19,49 |
| 15,600 | 6,18 | 226,33 | 20,00 | 21,02 | 19,57 |
| 15,700 | 6,42 | 236,52 | 20,00 | 20,99 | 19,49 |
| 15,800 | 6,59 | 238,57 | 20,00 | 21,09 | 19,43 |
| 15,900 | 6,52 | 242,03 | 20,00 | 20,94 | 19,60 |
| 16,000 | 6,55 | 239,69 | 20,00 | 20,90 | 19,45 |
| 16,100 | 6,49 | 235,82 | 20,00 | 21,07 | 19,49 |
| 16,200 | 6,74 | 239,75 | 20,00 | 20,96 | 19,44 |
| 16,300 | 6,30 | 247,37 | 20,00 | 21,08 | 19,40 |
| 16,400 | 6,10 | 251,10 | 20,00 | 21,15 | 19,63 |
| 16,500 | 6,26 | 248,95 | 20,00 | 21,04 | 19,63 |
| 16,600 | 5,94 | 242,98 | 20,00 | 20,98 | 19,15 |
| 16,700 | 6,33 | 237,62 | 20,00 | 20,94 | 19,54 |
| 16,800 | 6,18 | 238,66 | 20,00 | 21,10 | 19,66 |
| 16,900 | 6,30 | 243,71 | 20,00 | 21,16 | 19,60 |
| 17,000 | 6,08 | 249,94 | 20,00 | 21,06 | 19,37 |
| 17,100 | 6,60 | 249,99 | 20,00 | 21,00 | 19,51 |

| | | | | | |
|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 17,200 | 6,21 | 246,34 | 20,00 | 21,22 | 19,53 |
| 17,300 | 6,32 | 239,91 | 20,00 | 20,91 | 19,42 |
| 17,400 | 5,82 | 237,01 | 20,00 | 21,09 | 19,38 |
| 17,500 | 6,57 | 240,66 | 20,00 | 20,93 | 19,42 |
| 17,600 | 6,35 | 247,86 | 20,00 | 21,00 | 19,31 |
| 17,700 | 6,48 | 251,81 | 20,00 | 20,92 | 19,53 |
| 17,800 | 6,14 | 248,31 | 20,00 | 21,04 | 19,24 |
| 17,900 | 6,39 | 242,61 | 20,00 | 20,94 | 19,63 |
| 18,000 | 6,48 | 237,79 | 20,00 | 21,00 | 19,43 |
| 18,100 | 6,40 | 238,02 | 20,00 | 20,97 | 19,36 |
| 18,200 | 6,19 | 241,22 | 20,00 | 21,05 | 19,59 |
| 18,300 | 6,18 | 248,22 | 20,00 | 21,18 | 19,63 |
| 18,400 | 6,31 | 252,76 | 20,00 | 20,93 | 19,36 |
| 18,500 | 6,13 | 252,03 | 20,00 | 20,97 | 19,44 |
| 18,600 | 6,35 | 245,94 | 20,00 | 20,94 | 19,56 |
| 18,700 | 6,52 | 240,51 | 20,00 | 21,00 | 19,39 |
| 18,800 | 6,24 | 241,31 | 20,00 | 20,98 | 19,69 |
| 18,900 | 6,38 | 245,18 | 20,00 | 20,92 | 19,37 |
| 19,000 | 6,22 | 251,19 | 20,00 | 21,02 | 19,37 |
| 19,100 | 6,94 | 256,26 | 20,00 | 20,95 | 19,60 |
| 19,200 | 13,52 | 247,49 | 20,00 | 21,05 | 19,40 |
| 19,300 | 33,22 | 227,18 | 20,00 | 20,94 | 19,41 |
| 19,400 | 63,40 | 215,70 | 20,00 | 21,14 | 19,56 |
| 19,500 | 94,98 | 209,82 | 20,00 | 21,22 | 19,39 |
| 19,600 | 117,61 | 209,50 | 20,00 | 21,08 | 19,42 |
| 19,700 | 135,26 | 211,53 | 20,00 | 21,35 | 19,57 |
| 19,800 | 151,84 | 216,41 | 20,00 | 21,36 | 19,43 |
| 19,900 | 168,09 | 218,45 | 20,00 | 21,47 | 19,49 |
| 20,000 | 181,43 | 220,13 | 20,00 | 21,42 | 19,71 |
| 20,100 | 189,77 | 221,30 | 20,00 | 21,38 | 19,26 |
| 20,200 | 197,42 | 222,26 | 20,00 | 21,16 | 19,52 |
| 20,300 | 201,40 | 222,83 | 20,00 | 21,34 | 19,52 |
| 20,400 | 206,29 | 223,80 | 20,00 | 21,45 | 19,35 |
| 20,500 | 210,14 | 225,33 | 20,00 | 21,40 | 19,45 |
| 20,600 | 215,61 | 226,64 | 20,00 | 20,98 | 19,59 |
| 20,700 | 215,95 | 226,86 | 20,00 | 20,89 | 19,38 |
| 20,800 | 220,02 | 226,67 | 20,00 | 20,78 | 19,52 |
| 20,900 | 217,73 | 225,94 | 20,00 | 20,56 | 19,44 |
| 21,000 | 218,53 | 224,85 | 20,00 | 20,83 | 19,53 |
| 21,100 | 220,86 | 225,51 | 20,00 | 20,79 | 19,46 |
| 21,200 | 225,29 | 227,33 | 20,00 | 20,55 | 19,48 |
| 21,300 | 227,29 | 230,52 | 20,00 | 20,51 | 19,29 |
| 21,400 | 224,99 | 229,01 | 20,00 | 20,67 | 19,55 |
| 21,500 | 227,00 | 228,24 | 20,00 | 20,56 | 19,59 |

| | | | | | |
|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 21,600 | 228,20 | 229,70 | 20,00 | 20,55 | 19,71 |
| 21,700 | 227,18 | 228,72 | 20,00 | 20,56 | 19,54 |
| 21,800 | 229,05 | 228,97 | 20,00 | 20,50 | 19,46 |
| 21,900 | 232,01 | 232,31 | 20,00 | 20,38 | 19,43 |
| 22,000 | 235,16 | 235,25 | 20,00 | 20,13 | 19,27 |
| 22,100 | 236,65 | 236,92 | 20,00 | 19,95 | 19,37 |
| 22,200 | 236,78 | 236,60 | 20,00 | 20,05 | 19,48 |
| 22,300 | 236,46 | 236,40 | 20,00 | 19,80 | 19,53 |
| 22,400 | 235,83 | 235,45 | 20,00 | 19,61 | 19,52 |
| 22,500 | 234,94 | 234,37 | 20,00 | 19,65 | 19,43 |
| 22,600 | 233,89 | 233,71 | 20,00 | 19,42 | 19,31 |
| 22,700 | 233,10 | 232,69 | 20,00 | 19,27 | 19,37 |
| 22,800 | 230,69 | 230,21 | 20,00 | 19,39 | 19,68 |
| 22,900 | 228,29 | 228,06 | 20,00 | 19,37 | 19,48 |
| 23,000 | 227,31 | 226,45 | 20,00 | 18,98 | 19,67 |
| 23,101 | 226,36 | 225,93 | 20,00 | 19,10 | 19,41 |
| 23,200 | 226,91 | 226,29 | 20,00 | 18,93 | 19,54 |
| 23,300 | 228,19 | 227,72 | 20,00 | 18,87 | 19,59 |
| 23,400 | 230,60 | 230,15 | 20,00 | 18,70 | 19,39 |
| 23,500 | 234,97 | 233,83 | 20,00 | 18,75 | 19,59 |
| 23,600 | 237,98 | 237,39 | 20,00 | 18,60 | 19,59 |
| 23,700 | 237,55 | 236,81 | 20,00 | 18,39 | 19,45 |
| 23,800 | 235,91 | 235,40 | 20,00 | 18,12 | 19,46 |
| 23,900 | 233,00 | 232,66 | 20,00 | 17,80 | 19,50 |
| 24,000 | 229,88 | 229,62 | 20,00 | 17,59 | 19,43 |
| 24,100 | 227,61 | 227,20 | 20,00 | 17,33 | 19,40 |
| 24,200 | 227,40 | 227,14 | 20,00 | 17,08 | 19,33 |
| 24,300 | 228,06 | 227,72 | 20,00 | 17,16 | 19,46 |
| 24,400 | 229,15 | 228,95 | 20,00 | 17,08 | 19,53 |
| 24,500 | 230,97 | 230,19 | 20,00 | 16,69 | 19,45 |
| 24,600 | 233,84 | 232,93 | 20,00 | 16,55 | 19,35 |
| 24,700 | 237,11 | 236,62 | 20,00 | 16,59 | 19,57 |
| 24,800 | 240,43 | 239,66 | 20,00 | 16,46 | 19,35 |
| 24,900 | 240,32 | 240,13 | 20,00 | 16,44 | 19,52 |
| 25,000 | 238,81 | 238,74 | 20,00 | 16,39 | 19,52 |
| 25,100 | 236,72 | 236,13 | 20,00 | 16,22 | 19,41 |
| 25,200 | 233,40 | 232,66 | 20,00 | 16,40 | 19,41 |
| 25,300 | 230,66 | 230,33 | 20,00 | 16,19 | 19,30 |
| 25,400 | 229,96 | 229,31 | 20,00 | 16,09 | 19,36 |
| 25,500 | 230,32 | 230,14 | 20,00 | 16,05 | 19,59 |
| 25,600 | 231,39 | 230,35 | 20,00 | 16,06 | 19,46 |
| 25,700 | 230,86 | 230,51 | 20,00 | 16,14 | 19,58 |
| 25,800 | 226,38 | 225,74 | 20,00 | 16,04 | 19,56 |
| 25,900 | 213,22 | 209,16 | 20,00 | 16,01 | 19,46 |

| | | | | | |
|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 26,000 | 198,91 | 191,18 | 20,00 | 15,87 | 19,58 |
| 26,100 | 185,99 | 174,83 | 20,00 | 15,86 | 19,42 |
| 26,200 | 173,87 | 160,16 | 20,00 | 15,84 | 19,39 |
| 26,300 | 162,51 | 147,39 | 20,00 | 15,84 | 19,37 |
| 26,400 | 152,10 | 135,42 | 20,00 | 15,76 | 19,38 |
| 26,500 | 142,47 | 124,54 | 20,00 | 15,81 | 19,57 |
| 26,600 | 133,31 | 114,54 | 20,00 | 15,80 | 19,47 |
| 26,700 | 125,86 | 107,26 | 20,00 | 15,74 | 19,83 |
| 26,800 | 117,94 | 104,29 | 20,00 | 15,90 | 19,74 |
| 26,900 | 111,33 | 102,48 | 20,00 | 15,83 | 19,58 |
| 27,000 | 104,33 | 100,85 | 20,00 | 15,77 | 19,38 |
| 27,100 | 98,65 | 96,69 | 20,00 | 15,92 | 19,60 |
| 27,200 | 92,39 | 93,28 | 20,00 | 15,87 | 19,66 |
| 27,300 | 87,12 | 86,58 | 20,00 | 15,84 | 19,68 |
| 27,400 | 82,14 | 77,27 | 20,00 | 15,90 | 19,56 |
| 27,500 | 77,09 | 71,88 | 20,00 | 15,73 | 19,37 |
| 27,600 | 72,88 | 65,91 | 20,00 | 15,86 | 19,55 |
| 27,700 | 68,73 | 59,09 | 20,00 | 15,80 | 19,70 |
| 27,800 | 65,26 | 53,13 | 20,00 | 15,83 | 19,48 |
| 27,900 | 61,34 | 48,62 | 20,00 | 15,88 | 19,46 |
| 28,000 | 57,90 | 43,62 | 20,00 | 15,78 | 19,44 |
| 28,100 | 54,75 | 40,29 | 20,00 | 15,76 | 19,31 |
| 28,200 | 51,69 | 36,58 | 20,00 | 15,85 | 19,57 |
| 28,300 | 48,88 | 33,51 | 20,00 | 15,77 | 19,28 |
| 28,400 | 46,36 | 30,91 | 20,00 | 15,83 | 19,52 |
| 28,500 | 43,53 | 28,54 | 20,00 | 15,79 | 19,44 |
| 28,600 | 41,16 | 26,24 | 20,00 | 15,88 | 19,41 |
| 28,700 | 38,95 | 24,40 | 20,00 | 15,67 | 19,45 |
| 28,800 | 36,86 | 22,21 | 20,00 | 15,76 | 19,59 |
| 28,900 | 35,36 | 20,42 | 20,00 | 15,85 | 19,32 |

Phụ lục 3: Kết quả thí nghiệm đo lần 2

| Thời gian [s] | Áp suất xoay cọc [bar] | Áp suất dẫn tiến [bar] | Tốc độ vòng xoay [V/ph] | Lưu lượng xoay cọc [L/ph] | Lưu lượng dẫn tiến [L/ph] |
|---------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 00,000 | 5,83 | 1,56 | 20,00 | 23,43 | 18,64 |
| 00,100 | 6,57 | 2,05 | 20,00 | 20,40 | 19,37 |
| 00,200 | 6,94 | 2,20 | 20,00 | 20,39 | 19,46 |
| 00,300 | 6,82 | 2,12 | 20,00 | 20,30 | 19,55 |
| 00,400 | 6,66 | 2,20 | 20,00 | 20,50 | 19,41 |
| 00,500 | 6,71 | 2,18 | 20,00 | 20,44 | 19,40 |
| 00,600 | 6,66 | 1,76 | 20,00 | 20,39 | 19,56 |
| 00,700 | 6,57 | 2,16 | 20,00 | 20,40 | 19,47 |
| 00,800 | 6,57 | 2,36 | 20,00 | 20,25 | 19,45 |
| 00,900 | 6,56 | 2,29 | 20,00 | 20,36 | 19,17 |
| 01,000 | 6,52 | 2,21 | 20,00 | 20,50 | 19,66 |
| 01,100 | 6,53 | 1,90 | 20,00 | 20,41 | 19,51 |
| 01,200 | 6,49 | 2,06 | 20,00 | 20,41 | 19,54 |
| 01,300 | 6,51 | 2,05 | 20,00 | 20,50 | 19,37 |
| 01,400 | 6,46 | 1,94 | 20,00 | 20,42 | 19,34 |
| 01,500 | 6,38 | 1,95 | 20,00 | 20,39 | 19,46 |
| 01,600 | 6,46 | 1,96 | 20,00 | 20,36 | 19,59 |
| 01,700 | 6,54 | 1,99 | 20,00 | 20,40 | 19,49 |
| 01,800 | 6,39 | 1,95 | 20,00 | 20,44 | 19,53 |
| 01,900 | 6,27 | 1,75 | 20,00 | 20,42 | 19,40 |
| 02,000 | 6,41 | 2,13 | 20,00 | 20,45 | 19,32 |
| 02,100 | 6,32 | 1,94 | 20,00 | 20,39 | 19,47 |
| 02,200 | 6,40 | 2,26 | 20,00 | 20,35 | 19,30 |
| 02,300 | 6,27 | 2,26 | 20,00 | 20,44 | 19,50 |
| 02,400 | 6,39 | 2,13 | 20,00 | 20,49 | 19,40 |
| 02,500 | 6,34 | 2,03 | 20,00 | 20,48 | 19,57 |
| 02,600 | 6,22 | 1,92 | 20,00 | 20,48 | 19,38 |
| 02,700 | 6,19 | 2,17 | 20,00 | 20,44 | 19,33 |
| 02,800 | 6,19 | 2,30 | 20,00 | 20,45 | 19,33 |
| 02,900 | 6,15 | 2,08 | 20,00 | 20,42 | 19,42 |
| 03,000 | 6,14 | 2,14 | 20,00 | 20,40 | 19,34 |
| 03,100 | 6,36 | 2,21 | 20,00 | 20,37 | 19,46 |
| 03,200 | 6,47 | 2,24 | 20,00 | 20,49 | 19,31 |
| 03,300 | 6,50 | 2,04 | 20,00 | 20,52 | 19,52 |
| 03,400 | 6,54 | 2,05 | 20,00 | 20,35 | 19,66 |
| 03,500 | 6,49 | 2,08 | 20,00 | 20,56 | 19,39 |
| 03,600 | 6,53 | 2,30 | 20,00 | 20,53 | 19,34 |
| 03,700 | 6,60 | 2,07 | 20,00 | 20,43 | 19,40 |
| 03,800 | 6,58 | 2,19 | 20,00 | 20,43 | 19,49 |

| | | | | | |
|--------|-------|------|-------|-------|-------|
| 03,900 | 6,75 | 2,32 | 20,00 | 20,40 | 19,45 |
| 04,000 | 6,70 | 2,17 | 20,00 | 20,43 | 19,62 |
| 04,100 | 6,64 | 2,05 | 20,00 | 20,50 | 19,46 |
| 04,200 | 6,53 | 2,14 | 20,00 | 20,44 | 19,67 |
| 04,300 | 6,63 | 2,02 | 20,00 | 20,48 | 19,51 |
| 04,400 | 6,63 | 2,16 | 20,00 | 20,50 | 19,39 |
| 04,500 | 6,64 | 1,92 | 20,00 | 20,44 | 19,45 |
| 04,600 | 6,47 | 2,16 | 20,00 | 20,57 | 19,59 |
| 04,700 | 6,61 | 1,94 | 20,00 | 20,37 | 19,49 |
| 04,800 | 6,60 | 2,24 | 20,00 | 20,36 | 19,42 |
| 04,900 | 6,54 | 2,23 | 20,00 | 20,39 | 19,34 |
| 05,000 | 6,64 | 1,75 | 20,00 | 20,34 | 19,50 |
| 05,100 | 6,57 | 2,18 | 20,00 | 20,35 | 19,48 |
| 05,200 | 6,55 | 1,84 | 20,00 | 20,50 | 19,42 |
| 05,300 | 6,49 | 1,96 | 20,00 | 20,45 | 19,36 |
| 05,400 | 6,88 | 1,97 | 20,00 | 20,57 | 19,40 |
| 05,500 | 6,59 | 2,15 | 20,00 | 20,43 | 19,54 |
| 05,600 | 6,64 | 1,95 | 20,00 | 20,39 | 19,27 |
| 05,700 | 6,66 | 2,20 | 20,00 | 20,55 | 19,37 |
| 05,800 | 6,67 | 2,02 | 20,00 | 20,39 | 19,45 |
| 05,900 | 6,53 | 2,07 | 20,00 | 20,37 | 19,37 |
| 06,000 | 6,61 | 2,26 | 20,00 | 20,34 | 19,48 |
| 06,100 | 6,61 | 2,07 | 20,00 | 20,37 | 19,64 |
| 06,200 | 6,56 | 2,04 | 20,00 | 20,34 | 19,40 |
| 06,300 | 6,55 | 2,12 | 20,00 | 20,41 | 19,36 |
| 06,400 | 6,50 | 1,84 | 20,00 | 20,36 | 19,56 |
| 06,500 | 6,55 | 1,93 | 20,00 | 20,38 | 19,53 |
| 06,600 | 6,55 | 2,10 | 20,00 | 20,31 | 19,55 |
| 06,700 | 6,63 | 2,09 | 20,00 | 20,36 | 19,40 |
| 06,800 | 6,45 | 1,91 | 20,00 | 20,34 | 19,47 |
| 06,900 | 6,51 | 1,95 | 20,00 | 20,43 | 19,55 |
| 07,000 | 6,59 | 2,17 | 20,00 | 20,36 | 19,64 |
| 07,100 | 6,48 | 1,86 | 20,00 | 20,47 | 19,59 |
| 07,200 | 6,47 | 1,81 | 20,00 | 20,40 | 19,52 |
| 07,300 | 6,58 | 2,00 | 20,00 | 20,32 | 19,58 |
| 07,400 | 6,54 | 1,95 | 20,00 | 20,32 | 19,39 |
| 07,500 | 6,63 | 2,37 | 20,00 | 20,43 | 19,48 |
| 07,600 | 6,76 | 1,90 | 20,00 | 20,44 | 19,45 |
| 07,700 | 6,45 | 1,81 | 20,00 | 20,38 | 19,34 |
| 07,800 | 6,41 | 1,94 | 20,00 | 20,46 | 19,48 |
| 07,900 | 6,75 | 2,02 | 20,00 | 20,50 | 19,52 |
| 08,000 | 8,13 | 1,78 | 20,00 | 20,41 | 19,33 |
| 08,100 | 11,75 | 2,16 | 20,00 | 20,36 | 19,37 |
| 08,200 | 17,31 | 2,00 | 20,00 | 20,49 | 19,31 |

| | | | | | |
|--------|--------|------|-------|-------|-------|
| 08,300 | 24,07 | 2,11 | 20,00 | 20,43 | 19,40 |
| 08,400 | 29,60 | 2,12 | 20,00 | 20,51 | 19,56 |
| 08,500 | 35,85 | 2,10 | 20,00 | 20,53 | 19,61 |
| 08,600 | 41,77 | 2,18 | 20,00 | 20,51 | 19,39 |
| 08,700 | 46,97 | 2,10 | 20,00 | 20,51 | 19,48 |
| 08,800 | 48,60 | 2,27 | 20,00 | 20,52 | 19,60 |
| 08,900 | 46,52 | 2,13 | 20,00 | 20,59 | 19,42 |
| 09,000 | 44,18 | 2,18 | 20,00 | 20,44 | 19,34 |
| 09,100 | 44,71 | 2,24 | 20,00 | 20,42 | 19,38 |
| 09,200 | 47,92 | 2,26 | 20,00 | 20,47 | 19,48 |
| 09,300 | 52,59 | 2,10 | 20,00 | 20,46 | 19,57 |
| 09,400 | 56,84 | 1,96 | 20,00 | 20,38 | 19,55 |
| 09,500 | 61,89 | 2,41 | 20,00 | 20,41 | 19,48 |
| 09,600 | 67,03 | 1,99 | 20,00 | 20,54 | 19,59 |
| 09,700 | 72,43 | 2,37 | 20,00 | 20,57 | 19,50 |
| 09,800 | 77,58 | 2,07 | 20,00 | 20,62 | 19,47 |
| 09,900 | 82,48 | 1,82 | 20,00 | 20,65 | 19,41 |
| 10,000 | 87,06 | 2,04 | 20,00 | 20,53 | 19,59 |
| 10,100 | 90,65 | 1,86 | 20,00 | 20,62 | 19,37 |
| 10,200 | 94,44 | 2,41 | 20,00 | 20,63 | 19,54 |
| 10,300 | 97,62 | 2,05 | 20,00 | 20,55 | 19,26 |
| 10,400 | 100,33 | 2,20 | 20,00 | 20,66 | 19,61 |
| 10,500 | 102,96 | 2,10 | 20,00 | 20,60 | 19,38 |
| 10,600 | 106,27 | 1,96 | 20,00 | 20,81 | 19,63 |
| 10,700 | 110,10 | 1,81 | 20,00 | 20,82 | 19,46 |
| 10,800 | 112,86 | 1,92 | 20,00 | 20,88 | 19,40 |
| 10,900 | 114,51 | 1,98 | 20,00 | 20,78 | 19,31 |
| 11,000 | 115,26 | 2,13 | 20,00 | 20,78 | 19,44 |
| 11,100 | 115,64 | 2,18 | 20,00 | 20,74 | 19,44 |
| 11,200 | 116,00 | 2,26 | 20,00 | 20,69 | 19,48 |
| 11,300 | 117,31 | 2,23 | 20,00 | 20,65 | 19,54 |
| 11,400 | 120,23 | 1,84 | 20,00 | 20,69 | 19,43 |
| 11,500 | 122,95 | 2,09 | 20,00 | 20,60 | 19,51 |
| 11,600 | 124,25 | 2,05 | 20,00 | 20,51 | 19,53 |
| 11,700 | 124,51 | 2,08 | 20,00 | 20,57 | 19,57 |
| 11,800 | 125,62 | 2,14 | 20,00 | 20,66 | 19,35 |
| 11,900 | 126,96 | 2,15 | 20,00 | 20,60 | 19,48 |
| 12,000 | 127,85 | 2,02 | 20,00 | 20,62 | 19,41 |
| 12,100 | 128,60 | 2,14 | 20,00 | 20,62 | 19,48 |
| 12,200 | 129,07 | 2,06 | 20,00 | 20,58 | 19,72 |
| 12,300 | 129,21 | 1,96 | 20,00 | 20,40 | 19,46 |
| 12,400 | 129,54 | 2,28 | 20,00 | 20,59 | 19,59 |
| 12,500 | 129,65 | 2,26 | 20,00 | 20,69 | 19,40 |
| 12,600 | 130,15 | 2,20 | 20,00 | 20,72 | 19,49 |

| | | | | | |
|--------|--------|------|-------|-------|-------|
| 12,700 | 130,76 | 2,27 | 20,00 | 20,71 | 19,51 |
| 12,800 | 131,31 | 2,15 | 20,00 | 20,54 | 19,56 |
| 12,900 | 131,93 | 2,02 | 20,00 | 20,46 | 19,48 |
| 13,000 | 133,22 | 2,01 | 20,00 | 20,47 | 19,37 |
| 13,100 | 134,58 | 2,05 | 20,00 | 20,51 | 19,55 |
| 13,200 | 135,74 | 2,17 | 20,00 | 20,66 | 19,62 |
| 13,300 | 136,41 | 2,19 | 20,00 | 20,70 | 19,77 |
| 13,400 | 137,43 | 1,99 | 20,00 | 20,80 | 19,49 |
| 13,500 | 137,95 | 2,07 | 20,00 | 20,67 | 19,39 |
| 13,600 | 139,84 | 2,07 | 20,00 | 20,81 | 19,52 |
| 13,700 | 140,60 | 2,00 | 20,00 | 20,71 | 19,49 |
| 13,800 | 140,40 | 2,36 | 20,00 | 20,78 | 19,42 |
| 13,900 | 140,14 | 2,16 | 20,00 | 20,67 | 19,47 |
| 14,000 | 140,73 | 2,26 | 20,00 | 20,72 | 19,63 |
| 14,100 | 142,00 | 2,32 | 20,00 | 20,82 | 19,50 |
| 14,200 | 143,24 | 2,06 | 20,00 | 20,72 | 19,59 |
| 14,300 | 143,59 | 2,05 | 20,00 | 20,77 | 19,41 |
| 14,400 | 143,31 | 2,31 | 20,00 | 20,73 | 19,29 |
| 14,500 | 143,59 | 2,24 | 20,00 | 20,57 | 19,43 |
| 14,600 | 145,43 | 2,22 | 20,00 | 20,85 | 19,51 |
| 14,700 | 150,31 | 2,19 | 20,00 | 20,81 | 19,60 |
| 14,800 | 154,36 | 2,44 | 20,00 | 20,75 | 19,41 |
| 14,900 | 155,79 | 2,51 | 20,00 | 20,89 | 19,52 |
| 15,000 | 155,97 | 2,28 | 20,00 | 20,76 | 19,35 |
| 15,100 | 156,27 | 2,06 | 20,00 | 20,80 | 19,47 |
| 15,200 | 158,27 | 1,97 | 20,00 | 20,79 | 19,34 |
| 15,300 | 160,63 | 2,32 | 20,00 | 20,90 | 19,45 |
| 15,400 | 164,72 | 2,12 | 20,00 | 20,80 | 19,76 |
| 15,500 | 167,96 | 2,08 | 20,00 | 20,88 | 19,42 |
| 15,600 | 169,18 | 2,11 | 20,00 | 20,87 | 19,41 |
| 15,700 | 170,71 | 2,26 | 20,00 | 20,86 | 19,34 |
| 15,800 | 172,65 | 2,29 | 20,00 | 20,82 | 19,46 |
| 15,900 | 174,52 | 2,16 | 20,00 | 20,84 | 19,57 |
| 16,000 | 176,05 | 2,41 | 20,00 | 20,91 | 19,57 |
| 16,100 | 176,61 | 2,17 | 20,00 | 20,87 | 19,39 |
| 16,200 | 176,89 | 2,09 | 20,00 | 20,97 | 19,42 |
| 16,300 | 178,35 | 2,37 | 20,00 | 20,93 | 19,52 |
| 16,400 | 181,65 | 2,12 | 20,00 | 20,97 | 19,57 |
| 16,500 | 191,64 | 2,37 | 20,00 | 20,91 | 19,45 |
| 16,600 | 199,32 | 2,26 | 20,00 | 21,12 | 19,45 |
| 16,700 | 202,84 | 2,35 | 20,00 | 20,84 | 19,49 |
| 16,800 | 203,98 | 2,11 | 20,00 | 19,99 | 19,40 |
| 16,900 | 203,83 | 2,34 | 20,00 | 18,90 | 19,35 |
| 17,000 | 203,53 | 2,33 | 20,00 | 18,29 | 19,40 |

| | | | | | |
|--------|--------|------|-------|-------|-------|
| 17,100 | 204,03 | 2,41 | 20,00 | 18,06 | 19,61 |
| 17,200 | 204,42 | 2,29 | 20,00 | 17,82 | 19,39 |
| 17,300 | 205,52 | 2,16 | 20,00 | 17,86 | 19,39 |
| 17,400 | 207,12 | 2,35 | 20,00 | 17,67 | 19,64 |
| 17,500 | 209,45 | 2,11 | 20,00 | 17,69 | 19,37 |
| 17,600 | 209,63 | 2,18 | 20,00 | 17,80 | 19,59 |
| 17,700 | 209,62 | 2,08 | 20,00 | 17,92 | 19,56 |
| 17,800 | 195,22 | 2,36 | 20,00 | 18,09 | 19,43 |
| 17,900 | 195,26 | 2,30 | 20,00 | 19,63 | 19,49 |
| 18,000 | 202,70 | 2,20 | 20,00 | 21,21 | 19,34 |
| 18,100 | 207,17 | 2,32 | 20,00 | 22,17 | 19,38 |
| 18,200 | 210,18 | 2,10 | 20,00 | 22,53 | 19,53 |
| 18,300 | 211,18 | 1,92 | 20,00 | 22,88 | 19,45 |
| 18,400 | 213,01 | 2,29 | 20,00 | 22,92 | 19,43 |
| 18,500 | 214,97 | 1,98 | 20,00 | 22,90 | 19,49 |
| 18,600 | 216,50 | 2,06 | 20,00 | 22,80 | 19,39 |
| 18,700 | 216,24 | 1,88 | 20,00 | 22,44 | 19,63 |
| 18,800 | 213,47 | 2,21 | 20,00 | 22,13 | 19,45 |
| 18,900 | 208,88 | 2,04 | 20,00 | 21,70 | 19,39 |
| 19,000 | 194,91 | 2,20 | 20,00 | 20,26 | 19,56 |
| 19,100 | 182,61 | 2,16 | 20,00 | 19,07 | 19,51 |
| 19,200 | 171,51 | 2,21 | 20,00 | 18,43 | 19,47 |
| 19,300 | 161,08 | 2,09 | 20,00 | 18,31 | 19,39 |
| 19,400 | 151,80 | 2,08 | 20,00 | 18,27 | 19,39 |
| 19,500 | 143,05 | 2,28 | 20,00 | 18,18 | 19,36 |
| 19,600 | 135,23 | 2,04 | 20,00 | 18,10 | 19,56 |
| 19,700 | 127,74 | 2,07 | 20,00 | 18,15 | 19,41 |
| 19,800 | 120,69 | 2,57 | 20,00 | 18,13 | 19,42 |
| 19,900 | 113,87 | 2,01 | 20,00 | 18,01 | 19,51 |
| 20,000 | 108,13 | 2,37 | 20,00 | 18,07 | 19,60 |

Phụ lục 4: Kết quả thí nghiệm đo lần 3

| Thời gian [s] | Áp suất xoay cọc [bar] | Áp suất dẫn tiến [bar] | Tốc độ vòng xoay [V/ph] | Lưu lượng xoay cọc [L/ph] | Lưu lượng dẫn tiến [L/ph] |
|---------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 00,000 | 101,51 | 4,57 | 20,00 | 31,57 | 2,82 |
| 00,100 | 101,14 | 5,63 | 20,00 | 30,87 | 0,93 |
| 00,200 | 101,18 | 5,80 | 20,00 | 31,55 | 0,79 |
| 00,300 | 101,19 | 5,72 | 20,00 | 32,10 | 0,71 |
| 00,400 | 101,20 | 5,91 | 20,00 | 32,19 | 0,72 |
| 00,500 | 101,21 | 5,96 | 20,00 | 34,24 | 0,83 |
| 00,600 | 101,19 | 5,90 | 20,00 | 35,58 | 0,69 |
| 00,700 | 101,19 | 5,81 | 20,00 | 36,74 | 0,73 |
| 00,800 | 101,22 | 5,65 | 20,00 | 38,71 | 0,93 |
| 00,900 | 101,16 | 5,84 | 20,00 | 39,46 | 0,81 |
| 01,000 | 101,17 | 6,07 | 20,00 | 39,69 | 0,83 |
| 01,100 | 101,25 | 5,71 | 20,00 | 40,55 | 0,86 |
| 01,200 | 101,18 | 6,03 | 20,00 | 41,81 | 1,11 |
| 01,300 | 101,14 | 6,05 | 20,00 | 41,34 | 1,00 |
| 01,400 | 101,22 | 6,34 | 20,00 | 41,06 | 1,03 |
| 01,500 | 101,19 | 5,57 | 20,00 | 43,04 | 1,14 |
| 01,600 | 101,21 | 5,97 | 20,00 | 42,66 | 0,90 |
| 01,700 | 101,21 | 6,27 | 20,00 | 44,41 | 1,01 |
| 01,800 | 101,24 | 6,35 | 20,00 | 44,62 | 1,17 |
| 01,900 | 101,19 | 5,60 | 20,00 | 42,31 | 1,07 |
| 02,000 | 101,23 | 6,46 | 20,00 | 37,63 | 0,98 |
| 02,100 | 101,25 | 5,73 | 20,00 | 32,96 | 1,00 |
| 02,200 | 101,23 | 5,70 | 20,00 | 28,33 | 1,09 |
| 02,300 | 101,23 | 5,50 | 20,00 | 23,46 | 1,18 |
| 02,400 | 101,18 | 4,34 | 20,00 | 16,03 | 1,19 |
| 02,500 | 101,15 | 3,91 | 20,00 | 8,44 | 1,18 |
| 02,600 | 101,22 | 3,88 | 20,00 | 4,50 | 1,04 |
| 02,700 | 101,28 | 3,41 | 20,00 | 3,17 | 1,28 |
| 02,800 | 101,16 | 3,77 | 20,00 | 2,51 | 1,18 |
| 02,900 | 101,18 | 2,86 | 20,00 | 2,22 | 1,09 |
| 03,000 | 101,18 | 3,46 | 20,00 | 2,07 | 1,04 |
| 03,100 | 101,18 | 2,19 | 20,00 | 1,94 | 0,99 |
| 03,200 | 101,22 | 2,59 | 20,00 | 1,95 | 1,09 |
| 03,300 | 101,23 | 2,63 | 20,00 | 1,99 | 1,00 |
| 03,400 | 101,16 | 1,90 | 20,00 | 2,54 | 0,74 |
| 03,500 | 101,16 | 2,11 | 20,00 | 2,57 | 0,84 |
| 03,600 | 101,16 | 2,29 | 20,00 | 2,41 | 0,92 |
| 03,700 | 101,23 | 1,30 | 20,00 | 2,47 | 0,86 |
| 03,800 | 101,20 | 2,27 | 20,00 | 2,41 | 0,95 |

| | | | | | |
|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 03,900 | 101,20 | 1,23 | 20,00 | 2,33 | 1,09 |
| 04,000 | 101,19 | 1,59 | 20,00 | 2,15 | 1,06 |
| 04,100 | 101,17 | 1,59 | 20,00 | 2,15 | 1,09 |
| 04,200 | 101,16 | 1,43 | 20,00 | 1,93 | 1,07 |
| 04,300 | 101,19 | 1,13 | 20,00 | 2,25 | 1,14 |
| 04,400 | 101,22 | 1,17 | 20,00 | 1,81 | 1,04 |
| 04,500 | 101,17 | 0,95 | 20,00 | 1,87 | 1,03 |
| 04,600 | 101,23 | 1,11 | 20,00 | 1,74 | 1,11 |
| 04,700 | 101,20 | 0,68 | 20,00 | 1,77 | 1,14 |
| 04,800 | 101,23 | 0,84 | 20,00 | 1,76 | 1,01 |
| 04,900 | 101,26 | 1,33 | 20,00 | 1,69 | 1,03 |
| 05,000 | 101,14 | 0,79 | 20,00 | 1,71 | 1,04 |
| 05,100 | 101,21 | 1,02 | 20,00 | 0,79 | 0,98 |
| 05,200 | 101,21 | 0,62 | 20,00 | 5,49 | 0,95 |
| 05,300 | 101,19 | 1,18 | 20,00 | 8,95 | 0,98 |
| 05,400 | 101,18 | 1,66 | 20,00 | 9,33 | 1,01 |
| 05,500 | 101,25 | 1,68 | 20,00 | 9,89 | 0,96 |
| 05,600 | 101,25 | 0,93 | 20,00 | 10,15 | 0,89 |
| 05,700 | 101,24 | 0,81 | 20,00 | 10,15 | 1,00 |
| 05,800 | 101,19 | 0,61 | 20,00 | 10,18 | 0,74 |
| 05,900 | 101,24 | 0,40 | 20,00 | 10,23 | 0,78 |
| 06,000 | 101,22 | 0,65 | 20,00 | 10,19 | 0,89 |
| 06,100 | 101,18 | 0,37 | 20,00 | 10,29 | 0,90 |
| 06,200 | 101,22 | 0,61 | 20,00 | 10,17 | 0,86 |
| 06,300 | 101,16 | 1,05 | 20,00 | 10,18 | 0,90 |
| 06,400 | 101,15 | 0,67 | 20,00 | 10,19 | 0,89 |
| 06,500 | 101,23 | 0,40 | 20,00 | 10,14 | 1,03 |
| 06,600 | 101,23 | 1,02 | 20,00 | 10,14 | 1,01 |
| 06,700 | 101,26 | 0,74 | 20,00 | 10,18 | 1,04 |
| 06,800 | 101,20 | 1,01 | 20,00 | 10,19 | 0,87 |
| 06,900 | 101,26 | 0,74 | 20,00 | 10,17 | 1,01 |
| 07,000 | 101,23 | 0,59 | 20,00 | 10,19 | 1,05 |
| 07,100 | 101,14 | 6,01 | 20,00 | 10,14 | 0,84 |
| 07,200 | 101,20 | 31,63 | 20,00 | 10,17 | 2,50 |
| 07,300 | 101,17 | 61,52 | 20,00 | 9,84 | 20,06 |
| 07,400 | 101,26 | 84,47 | 20,00 | 10,13 | 29,49 |
| 07,500 | 101,27 | 84,38 | 20,00 | 10,12 | 37,13 |
| 07,600 | 101,20 | 74,55 | 20,00 | 10,23 | 60,25 |
| 07,700 | 101,19 | 84,21 | 20,00 | 10,16 | 79,35 |
| 07,800 | 101,19 | 102,79 | 20,00 | 10,19 | 78,05 |
| 07,900 | 101,21 | 113,97 | 20,00 | 10,17 | 70,27 |
| 08,000 | 101,19 | 124,53 | 20,00 | 10,16 | 67,97 |
| 08,100 | 101,18 | 131,63 | 20,00 | 10,13 | 64,47 |
| 08,200 | 101,14 | 130,88 | 20,00 | 10,14 | 61,71 |

| | | | | | |
|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 08,300 | 101,26 | 138,36 | 20,00 | 10,12 | 61,68 |
| 08,400 | 101,19 | 168,52 | 20,00 | 10,17 | 57,75 |
| 08,500 | 101,21 | 190,42 | 20,00 | 10,10 | 44,72 |
| 08,600 | 101,17 | 201,94 | 20,00 | 10,15 | 35,56 |
| 08,700 | 101,11 | 213,71 | 20,00 | 10,11 | 29,94 |
| 08,800 | 101,17 | 214,20 | 20,00 | 9,70 | 28,87 |
| 08,900 | 101,18 | 212,39 | 20,00 | 8,78 | 28,65 |
| 09,000 | 101,12 | 212,90 | 20,00 | 8,31 | 27,92 |
| 09,100 | 101,18 | 213,96 | 20,00 | 8,10 | 26,12 |
| 09,200 | 101,20 | 208,69 | 20,00 | 7,89 | 25,58 |
| 09,300 | 101,16 | 198,26 | 20,00 | 7,89 | 28,20 |
| 09,400 | 101,24 | 194,43 | 20,00 | 7,87 | 29,32 |
| 09,500 | 101,17 | 187,66 | 20,00 | 7,76 | 29,19 |
| 09,600 | 101,21 | 187,06 | 20,00 | 7,68 | 29,07 |
| 09,700 | 101,20 | 186,56 | 20,00 | 7,66 | 27,00 |
| 09,800 | 101,14 | 187,24 | 20,00 | 7,76 | 27,05 |
| 09,900 | 101,22 | 193,41 | 20,00 | 7,76 | 27,69 |
| 10,000 | 101,21 | 193,77 | 20,00 | 7,72 | 28,00 |
| 10,100 | 101,14 | 194,79 | 20,00 | 7,74 | 28,16 |
| 10,200 | 101,20 | 202,29 | 20,00 | 7,64 | 28,79 |
| 10,300 | 101,16 | 201,12 | 20,00 | 7,72 | 30,13 |
| 10,400 | 101,19 | 202,95 | 20,00 | 8,05 | 30,17 |
| 10,500 | 101,21 | 202,13 | 20,00 | 7,91 | 28,74 |
| 10,600 | 101,17 | 210,10 | 20,00 | 7,81 | 29,0 |
| 10,700 | 101,20 | 212,54 | 20,00 | 7,80 | 28,62 |
| 10,800 | 101,18 | 200,46 | 20,00 | 7,73 | 28,60 |
| 10,900 | 101,23 | 199,41 | 20,00 | 7,78 | 27,93 |
| 11,000 | 101,20 | 202,26 | 20,00 | 7,85 | 25,47 |
| 11,100 | 101,16 | 206,62 | 20,00 | 7,88 | 25,28 |
| 11,200 | 101,28 | 210,67 | 20,00 | 7,87 | 27,18 |
| 11,300 | 101,25 | 214,93 | 20,00 | 7,72 | 27,50 |
| 11,400 | 101,17 | 206,11 | 20,00 | 7,66 | 31,55 |
| 11,500 | 101,15 | 209,10 | 20,00 | 7,68 | 32,03 |
| 11,600 | 101,15 | 212,86 | 20,00 | 7,71 | 31,38 |
| 11,700 | 101,25 | 212,67 | 20,00 | 7,67 | 29,67 |
| 11,800 | 101,17 | 214,35 | 20,00 | 7,80 | 28,69 |
| 11,900 | 101,16 | 207,56 | 20,00 | 7,58 | 28,78 |
| 12,000 | 101,17 | 199,99 | 20,00 | 7,71 | 32,47 |
| 12,100 | 101,18 | 196,38 | 20,00 | 7,69 | 32,99 |
| 12,200 | 101,20 | 189,61 | 20,00 | 7,60 | 32,58 |
| 12,300 | 101,21 | 192,97 | 20,00 | 7,60 | 32,07 |
| 12,400 | 101,16 | 198,19 | 20,00 | 7,73 | 30,95 |
| 12,500 | 101,09 | 198,62 | 20,00 | 7,59 | 28,49 |
| 12,600 | 101,15 | 196,46 | 20,00 | 7,75 | 27,33 |

| | | | | | |
|--------|--------|--------|-------|------|-------|
| 12,700 | 101,15 | 194,86 | 20,00 | 7,77 | 26,59 |
| 12,800 | 101,15 | 195,89 | 20,00 | 7,77 | 26,58 |
| 12,900 | 101,20 | 205,52 | 20,00 | 7,69 | 25,36 |
| 13,000 | 101,18 | 209,93 | 20,00 | 7,53 | 24,17 |
| 13,100 | 101,20 | 210,69 | 20,00 | 7,57 | 25,15 |
| 13,200 | 101,18 | 209,68 | 20,00 | 7,56 | 24,86 |
| 13,300 | 101,14 | 209,95 | 20,00 | 7,60 | 25,81 |
| 13,400 | 101,16 | 203,96 | 20,00 | 7,62 | 24,69 |
| 13,500 | 101,15 | 200,39 | 20,00 | 7,71 | 23,42 |
| 13,600 | 101,16 | 191,77 | 20,00 | 7,64 | 22,71 |
| 13,700 | 101,19 | 184,29 | 20,00 | 7,64 | 22,56 |
| 13,800 | 101,15 | 175,94 | 20,00 | 7,63 | 22,22 |
| 13,900 | 101,19 | 170,01 | 20,00 | 7,64 | 22,01 |
| 14,000 | 101,16 | 167,14 | 20,00 | 7,88 | 21,98 |
| 14,100 | 101,21 | 168,45 | 20,00 | 7,95 | 21,93 |
| 14,200 | 101,14 | 177,46 | 20,00 | 8,00 | 24,19 |
| 14,300 | 101,18 | 184,60 | 20,00 | 7,95 | 23,50 |
| 14,400 | 101,19 | 180,15 | 20,00 | 7,96 | 23,07 |
| 14,500 | 101,20 | 174,53 | 20,00 | 7,79 | 22,48 |
| 14,600 | 101,18 | 178,99 | 20,00 | 8,01 | 22,68 |
| 14,700 | 101,16 | 184,28 | 20,00 | 7,87 | 23,10 |
| 14,800 | 101,23 | 181,98 | 20,00 | 7,87 | 22,69 |
| 14,900 | 101,19 | 177,33 | 20,00 | 7,73 | 22,71 |
| 15,000 | 101,20 | 169,95 | 20,00 | 7,53 | 21,75 |
| 15,100 | 101,15 | 174,84 | 20,00 | 7,57 | 21,65 |
| 15,200 | 101,15 | 173,52 | 20,00 | 7,65 | 21,75 |
| 15,300 | 101,23 | 168,37 | 20,00 | 7,61 | 21,68 |
| 15,400 | 101,22 | 163,96 | 20,00 | 7,71 | 22,76 |
| 15,500 | 101,19 | 169,97 | 20,00 | 7,73 | 24,97 |
| 15,600 | 101,22 | 173,61 | 20,00 | 7,85 | 26,01 |
| 15,700 | 101,19 | 168,71 | 20,00 | 7,81 | 28,14 |
| 15,800 | 101,22 | 165,81 | 20,00 | 7,89 | 26,98 |
| 15,900 | 101,14 | 164,84 | 20,00 | 7,78 | 26,64 |
| 16,000 | 101,16 | 164,45 | 20,00 | 7,89 | 27,22 |
| 16,100 | 101,14 | 164,74 | 20,00 | 8,14 | 26,16 |
| 16,200 | 101,20 | 163,52 | 20,00 | 8,15 | 26,59 |
| 16,300 | 101,22 | 162,73 | 20,00 | 8,05 | 25,67 |
| 16,400 | 101,23 | 163,03 | 20,00 | 8,20 | 25,17 |
| 16,500 | 101,10 | 163,54 | 20,00 | 8,24 | 24,98 |
| 16,600 | 101,22 | 161,82 | 20,00 | 8,16 | 24,83 |
| 16,700 | 101,15 | 164,70 | 20,00 | 8,16 | 24,84 |
| 16,800 | 101,20 | 169,05 | 20,00 | 8,13 | 25,23 |
| 16,900 | 101,20 | 166,50 | 20,00 | 8,03 | 26,29 |
| 17,000 | 101,14 | 167,01 | 20,00 | 8,03 | 26,01 |

| | | | | | |
|--------|--------|--------|-------|------|-------|
| 17,100 | 101,27 | 168,61 | 20,00 | 8,14 | 25,82 |
| 17,200 | 101,20 | 165,44 | 20,00 | 8,06 | 26,17 |
| 17,300 | 101,22 | 164,24 | 20,00 | 8,05 | 26,02 |
| 17,400 | 101,15 | 164,18 | 20,00 | 8,16 | 25,75 |
| 17,500 | 101,22 | 160,74 | 20,00 | 8,12 | 26,45 |
| 17,600 | 101,20 | 161,30 | 20,00 | 8,20 | 24,89 |
| 17,700 | 101,26 | 162,04 | 20,00 | 8,17 | 23,80 |
| 17,800 | 101,23 | 162,19 | 20,00 | 7,97 | 23,62 |
| 17,900 | 101,19 | 164,77 | 20,00 | 7,80 | 23,42 |
| 18,000 | 101,23 | 169,13 | 20,00 | 7,83 | 23,57 |
| 18,100 | 101,22 | 168,84 | 20,00 | 7,75 | 24,75 |
| 18,200 | 101,20 | 172,76 | 20,00 | 7,80 | 23,71 |
| 18,300 | 101,16 | 178,83 | 20,00 | 7,72 | 23,51 |
| 18,400 | 101,16 | 178,70 | 20,00 | 7,82 | 24,24 |
| 18,500 | 101,21 | 176,16 | 20,00 | 7,88 | 23,78 |
| 18,600 | 101,15 | 172,73 | 20,00 | 7,75 | 23,05 |
| 18,700 | 101,19 | 166,34 | 20,00 | 7,76 | 22,86 |
| 18,800 | 101,22 | 165,87 | 20,00 | 7,87 | 22,73 |
| 18,900 | 101,19 | 166,93 | 20,00 | 7,89 | 22,74 |
| 19,000 | 101,19 | 167,55 | 20,00 | 8,04 | 22,60 |
| 19,100 | 101,19 | 167,81 | 20,00 | 7,80 | 22,54 |
| 19,200 | 101,16 | 169,59 | 20,00 | 7,70 | 22,78 |
| 19,300 | 101,17 | 170,10 | 20,00 | 7,55 | 24,16 |
| 19,400 | 101,21 | 166,76 | 20,00 | 7,48 | 24,23 |
| 19,500 | 101,19 | 166,80 | 20,00 | 7,69 | 23,57 |
| 19,600 | 101,17 | 169,61 | 20,00 | 8,05 | 23,52 |
| 19,700 | 101,21 | 171,03 | 20,00 | 8,10 | 24,15 |
| 19,800 | 101,18 | 171,44 | 20,00 | 8,13 | 23,64 |
| 19,900 | 101,20 | 168,85 | 20,00 | 8,04 | 23,44 |
| 20,000 | 101,18 | 167,18 | 20,00 | 8,05 | 23,11 |
| 20,100 | 101,21 | 167,41 | 20,00 | 8,10 | 22,93 |
| 20,200 | 101,17 | 165,71 | 20,00 | 8,05 | 22,77 |
| 20,300 | 101,18 | 167,40 | 20,00 | 8,16 | 22,90 |
| 20,400 | 101,20 | 170,56 | 20,00 | 8,17 | 22,74 |
| 20,500 | 101,20 | 170,39 | 20,00 | 8,13 | 22,91 |
| 20,600 | 101,16 | 170,64 | 20,00 | 7,98 | 25,59 |
| 20,700 | 101,16 | 170,75 | 20,00 | 7,78 | 24,49 |
| 20,800 | 101,16 | 173,72 | 20,00 | 7,84 | 24,38 |
| 20,900 | 101,14 | 176,64 | 20,00 | 7,90 | 24,36 |
| 21,000 | 101,18 | 181,67 | 20,00 | 7,97 | 24,61 |
| 21,100 | 101,17 | 185,72 | 20,00 | 8,06 | 25,18 |
| 21,200 | 101,24 | 175,40 | 20,00 | 8,06 | 24,75 |
| 21,300 | 101,16 | 171,72 | 20,00 | 7,86 | 24,07 |
| 21,400 | 101,19 | 171,22 | 20,00 | 7,96 | 23,54 |

| | | | | | |
|--------|--------|--------|-------|------|-------|
| 21,500 | 101,12 | 171,39 | 20,00 | 8,02 | 23,26 |
| 21,600 | 101,14 | 173,87 | 20,00 | 8,12 | 23,15 |
| 21,700 | 101,19 | 179,81 | 20,00 | 8,04 | 23,25 |
| 21,800 | 101,12 | 186,30 | 20,00 | 7,76 | 24,35 |
| 21,900 | 101,10 | 208,53 | 20,00 | 7,68 | 24,68 |
| 22,000 | 101,22 | 228,53 | 20,00 | 7,67 | 26,74 |
| 22,100 | 101,19 | 227,95 | 20,00 | 7,63 | 29,67 |
| 22,200 | 101,17 | 227,89 | 20,00 | 7,69 | 27,91 |
| 22,300 | 101,22 | 227,05 | 20,00 | 7,59 | 27,22 |
| 22,400 | 101,18 | 227,02 | 20,00 | 7,52 | 27,13 |
| 22,500 | 101,11 | 226,26 | 20,00 | 7,56 | 27,41 |
| 22,600 | 101,16 | 226,12 | 20,00 | 7,71 | 28,41 |
| 22,700 | 101,20 | 226,47 | 20,00 | 7,68 | 27,26 |
| 22,800 | 101,21 | 226,73 | 20,00 | 7,77 | 27,04 |
| 22,900 | 101,22 | 226,15 | 20,00 | 7,69 | 26,89 |
| 23,000 | 101,19 | 226,01 | 20,00 | 7,75 | 26,71 |
| 23,100 | 101,21 | 225,71 | 20,00 | 7,79 | 26,68 |
| 23,200 | 101,18 | 226,10 | 20,00 | 7,79 | 26,69 |
| 23,300 | 101,21 | 225,80 | 20,00 | 7,63 | 26,80 |
| 23,400 | 101,19 | 225,78 | 20,00 | 7,78 | 26,80 |
| 23,500 | 101,18 | 226,08 | 20,00 | 7,81 | 26,83 |
| 23,600 | 101,16 | 225,41 | 20,00 | 7,71 | 26,87 |
| 23,700 | 101,24 | 226,26 | 20,00 | 7,67 | 27,22 |
| 23,800 | 101,19 | 224,73 | 20,00 | 7,73 | 28,35 |
| 23,900 | 101,18 | 225,42 | 20,00 | 7,54 | 25,87 |
| 24,000 | 101,18 | 225,29 | 20,00 | 7,63 | 25,00 |
| 24,100 | 101,15 | 224,06 | 20,00 | 7,65 | 24,69 |
| 24,200 | 101,16 | 221,31 | 20,00 | 7,58 | 24,58 |
| 24,300 | 101,19 | 205,99 | 20,00 | 7,61 | 24,47 |
| 24,400 | 101,14 | 185,93 | 20,00 | 7,52 | 24,13 |
| 24,500 | 101,19 | 179,47 | 20,00 | 7,61 | 23,18 |
| 24,600 | 101,20 | 171,08 | 20,00 | 7,66 | 22,76 |
| 24,700 | 101,15 | 167,53 | 20,00 | 7,47 | 22,46 |
| 24,800 | 101,19 | 171,97 | 20,00 | 7,60 | 22,22 |
| 24,900 | 101,15 | 179,19 | 20,00 | 7,67 | 22,23 |
| 25,000 | 101,18 | 176,19 | 20,00 | 7,46 | 22,24 |
| 25,100 | 101,20 | 173,05 | 20,00 | 7,56 | 22,30 |
| 25,200 | 101,14 | 176,55 | 20,00 | 7,64 | 22,36 |
| 25,300 | 101,17 | 179,14 | 20,00 | 7,62 | 22,33 |
| 25,400 | 101,21 | 185,87 | 20,00 | 7,70 | 22,57 |
| 25,500 | 101,11 | 193,50 | 20,00 | 7,77 | 22,76 |
| 25,600 | 101,14 | 200,13 | 20,00 | 7,58 | 23,92 |
| 25,700 | 101,21 | 203,92 | 20,00 | 7,64 | 25,45 |
| 25,800 | 101,17 | 212,11 | 20,00 | 7,74 | 25,07 |

| | | | | | |
|--------|--------|--------|-------|------|-------|
| 25,900 | 101,19 | 222,15 | 20,00 | 7,64 | 25,46 |
| 26,000 | 101,15 | 228,19 | 20,00 | 7,64 | 26,41 |
| 26,100 | 101,17 | 229,48 | 20,00 | 7,55 | 27,37 |
| 26,200 | 101,20 | 228,90 | 20,00 | 7,69 | 25,48 |
| 26,300 | 101,16 | 228,63 | 20,00 | 7,65 | 25,23 |
| 26,400 | 101,17 | 227,90 | 20,00 | 7,69 | 25,17 |
| 26,500 | 101,21 | 228,55 | 20,00 | 7,53 | 25,20 |
| 26,600 | 101,15 | 229,26 | 20,00 | 7,53 | 25,11 |
| 26,700 | 101,21 | 227,54 | 20,00 | 7,57 | 25,09 |
| 26,800 | 101,26 | 228,76 | 20,00 | 7,58 | 25,53 |
| 26,900 | 101,18 | 228,84 | 20,00 | 7,54 | 24,83 |
| 27,000 | 101,16 | 229,14 | 20,00 | 7,67 | 24,00 |
| 27,100 | 101,13 | 229,12 | 20,00 | 7,64 | 23,99 |
| 27,200 | 101,22 | 227,96 | 20,00 | 7,64 | 24,04 |
| 27,300 | 101,20 | 229,29 | 20,00 | 7,58 | 24,87 |
| 27,400 | 101,19 | 228,05 | 20,00 | 7,59 | 24,35 |
| 27,500 | 101,18 | 228,45 | 20,00 | 7,60 | 23,90 |
| 27,600 | 101,13 | 229,12 | 20,00 | 7,63 | 23,88 |
| 27,700 | 101,20 | 227,77 | 20,00 | 7,56 | 23,94 |
| 27,800 | 101,18 | 227,63 | 20,00 | 7,42 | 23,90 |
| 27,900 | 101,17 | 227,88 | 20,00 | 7,60 | 23,84 |
| 28,000 | 101,20 | 228,58 | 20,00 | 7,72 | 23,76 |
| 28,100 | 101,21 | 228,78 | 20,00 | 7,73 | 23,80 |
| 28,200 | 101,14 | 227,87 | 20,00 | 7,75 | 23,81 |
| 28,300 | 101,23 | 227,24 | 20,00 | 7,68 | 23,82 |
| 28,400 | 101,14 | 226,28 | 20,00 | 7,63 | 23,81 |
| 28,500 | 101,23 | 226,19 | 20,00 | 7,65 | 23,84 |
| 28,600 | 101,18 | 225,95 | 20,00 | 7,71 | 23,85 |
| 28,700 | 101,21 | 225,96 | 20,00 | 7,72 | 24,37 |
| 28,800 | 101,18 | 225,46 | 20,00 | 7,62 | 25,15 |
| 28,900 | 101,12 | 226,47 | 20,00 | 7,67 | 23,85 |
| 29,000 | 101,23 | 223,78 | 20,00 | 7,68 | 23,71 |
| 29,100 | 101,21 | 215,42 | 20,00 | 7,65 | 23,49 |
| 29,200 | 101,15 | 202,70 | 20,00 | 7,72 | 23,43 |
| 29,300 | 101,19 | 192,35 | 20,00 | 7,70 | 23,01 |
| 29,400 | 101,22 | 188,76 | 20,00 | 7,77 | 22,56 |
| 29,500 | 101,17 | 181,76 | 20,00 | 7,67 | 22,21 |
| 29,600 | 101,19 | 179,46 | 20,00 | 7,75 | 22,03 |
| 29,700 | 101,17 | 177,38 | 20,00 | 7,73 | 21,95 |
| 29,800 | 101,18 | 177,65 | 20,00 | 7,78 | 21,89 |
| 29,900 | 101,22 | 175,54 | 20,00 | 7,69 | 21,84 |
| 30,000 | 101,13 | 174,23 | 20,00 | 7,60 | 21,73 |
| 30,100 | 101,20 | 179,44 | 20,00 | 7,70 | 21,75 |
| 30,200 | 101,22 | 181,15 | 20,00 | 7,70 | 21,84 |

| | | | | | |
|--------|---------|--------|-------|------|-------|
| 30,300 | 101,19 | 186,06 | 20,00 | 7,66 | 21,97 |
| 30,400 | 101,15 | 191,60 | 20,00 | 7,71 | 22,02 |
| 30,500 | 101,19 | 196,71 | 20,00 | 7,75 | 22,19 |
| 30,600 | 101,21 | 201,31 | 20,00 | 7,64 | 22,35 |
| 30,700 | 101,19 | 203,98 | 20,00 | 7,77 | 22,48 |
| 30,800 | 101,14 | 202,82 | 20,00 | 7,72 | 22,78 |
| 30,900 | -101,15 | 204,35 | 20,00 | 7,82 | 22,88 |
| 31,000 | 101,23 | 207,92 | 20,00 | 7,71 | 23,01 |
| 31,100 | 101,14 | 212,02 | 20,00 | 7,75 | 24,27 |
| 31,200 | 101,18 | 215,62 | 20,00 | 7,77 | 25,01 |
| 31,300 | 101,20 | 215,15 | 20,00 | 7,57 | 23,91 |
| 31,400 | 101,14 | 217,38 | 20,00 | 7,65 | 24,08 |
| 31,500 | 101,19 | 215,26 | 20,00 | 7,63 | 24,11 |
| 31,600 | 101,18 | 214,87 | 20,00 | 7,67 | 24,89 |
| 31,700 | 101,13 | 215,81 | 20,00 | 7,68 | 24,80 |
| 31,800 | 101,15 | 215,20 | 20,00 | 7,72 | 24,48 |
| 31,900 | 101,17 | 213,07 | 20,00 | 7,71 | 24,26 |
| 32,000 | 101,20 | 210,45 | 20,00 | 7,64 | 24,04 |
| 32,100 | 101,16 | 211,19 | 20,00 | 7,73 | 23,88 |
| 32,200 | 101,18 | 207,05 | 20,00 | 7,65 | 23,80 |
| 32,300 | 101,19 | 208,61 | 20,00 | 7,73 | 23,78 |
| 32,400 | 101,21 | 210,42 | 20,00 | 7,65 | 23,80 |
| 32,500 | 101,17 | 212,85 | 20,00 | 7,61 | 23,88 |
| 32,600 | 101,16 | 211,80 | 20,00 | 7,77 | 23,84 |
| 32,700 | 101,24 | 210,19 | 20,00 | 7,64 | 23,80 |
| 32,800 | 101,19 | 210,85 | 20,00 | 7,67 | 23,73 |
| 32,900 | 101,19 | 209,21 | 20,00 | 7,68 | 23,75 |
| 33,000 | 101,17 | 208,81 | 20,00 | 7,64 | 23,73 |
| 33,100 | 101,18 | 209,75 | 20,00 | 7,54 | 23,75 |
| 33,200 | 101,17 | 208,46 | 20,00 | 7,63 | 24,03 |
| 33,300 | 101,15 | 214,43 | 20,00 | 7,62 | 25,46 |
| 33,400 | 101,18 | 222,65 | 20,00 | 7,57 | 23,87 |
| 33,500 | 101,28 | 225,88 | 20,00 | 7,77 | 23,71 |
| 33,600 | 101,24 | 227,76 | 20,00 | 7,72 | 23,84 |
| 33,700 | 101,19 | 230,20 | 20,00 | 7,66 | 23,81 |
| 33,800 | 101,17 | 230,32 | 20,00 | 7,82 | 23,83 |
| 33,900 | 101,18 | 230,61 | 20,00 | 7,66 | 23,84 |
| 34,000 | 101,18 | 229,78 | 20,00 | 7,50 | 23,96 |
| 34,100 | 101,18 | 228,96 | 20,00 | 7,76 | 23,97 |
| 34,200 | 101,22 | 228,12 | 20,00 | 7,66 | 24,05 |
| 34,300 | 101,17 | 228,89 | 20,00 | 7,56 | 24,14 |
| 34,400 | 101,21 | 229,64 | 20,00 | 7,75 | 24,12 |
| 34,500 | 101,15 | 228,10 | 20,00 | 7,73 | 24,72 |
| 34,600 | 101,15 | 228,34 | 20,00 | 7,63 | 26,78 |

| | | | | | |
|--------|--------|--------|-------|------|-------|
| 34,700 | 101,14 | 228,62 | 20,00 | 7,69 | 26,15 |
| 34,800 | 101,21 | 228,82 | 20,00 | 7,70 | 26,12 |
| 34,900 | 101,16 | 228,97 | 20,00 | 7,61 | 26,11 |
| 35,000 | 101,16 | 228,26 | 20,00 | 7,77 | 26,09 |
| 35,100 | 101,16 | 228,29 | 20,00 | 7,73 | 26,59 |
| 35,200 | 101,22 | 227,97 | 20,00 | 7,77 | 28,32 |
| 35,300 | 101,20 | 228,72 | 20,00 | 7,65 | 27,81 |
| 35,400 | 101,23 | 229,59 | 20,00 | 7,60 | 27,82 |
| 35,500 | 101,14 | 228,34 | 20,00 | 7,68 | 27,86 |
| 35,600 | 101,20 | 229,01 | 20,00 | 7,67 | 27,63 |
| 35,700 | 101,14 | 229,70 | 20,00 | 7,68 | 27,63 |
| 35,800 | 101,21 | 230,75 | 20,00 | 7,73 | 27,70 |
| 35,900 | 101,21 | 229,16 | 20,00 | 7,88 | 27,63 |
| 36,000 | 101,21 | 229,51 | 20,00 | 7,77 | 27,46 |
| 36,100 | 101,22 | 229,59 | 20,00 | 7,81 | 27,52 |
| 36,200 | 101,20 | 230,45 | 20,00 | 7,78 | 27,59 |
| 36,300 | 101,12 | 223,46 | 20,00 | 7,67 | 27,48 |
| 36,400 | 101,17 | 218,58 | 20,00 | 7,71 | 27,25 |
| 36,500 | 101,13 | 204,16 | 20,00 | 7,70 | 25,46 |
| 36,600 | 101,19 | 185,04 | 20,00 | 7,74 | 23,98 |
| 36,700 | 101,23 | 173,29 | 20,00 | 7,74 | 23,11 |
| 36,800 | 101,19 | 162,87 | 20,00 | 7,76 | 22,59 |
| 36,900 | 101,19 | 159,53 | 20,00 | 7,77 | 22,04 |
| 37,000 | 101,24 | 159,91 | 20,00 | 7,77 | 21,94 |
| 37,100 | 101,14 | 162,21 | 20,00 | 7,85 | 21,96 |
| 37,200 | 101,20 | 159,84 | 20,00 | 7,71 | 21,96 |
| 37,300 | 101,18 | 160,92 | 20,00 | 7,93 | 21,87 |
| 37,400 | 101,21 | 167,02 | 20,00 | 8,02 | 21,92 |
| 37,500 | 101,26 | 169,74 | 20,00 | 7,81 | 21,79 |
| 37,600 | 101,25 | 174,42 | 20,00 | 8,06 | 21,99 |
| 37,700 | 101,17 | 173,33 | 20,00 | 7,89 | 22,16 |
| 37,800 | 101,20 | 169,32 | 20,00 | 7,82 | 22,23 |
| 37,900 | 101,19 | 168,62 | 20,00 | 7,80 | 22,19 |
| 38,000 | 101,20 | 171,89 | 20,00 | 7,72 | 22,25 |
| 38,100 | 101,23 | 169,80 | 20,00 | 7,69 | 22,31 |
| 38,200 | 101,18 | 167,69 | 20,00 | 7,76 | 22,14 |
| 38,300 | 101,21 | 166,87 | 20,00 | 7,88 | 22,24 |
| 38,400 | 101,15 | 160,22 | 20,00 | 7,74 | 22,21 |
| 38,500 | 101,23 | 155,20 | 20,00 | 7,81 | 22,03 |
| 38,600 | 101,22 | 156,68 | 20,00 | 7,74 | 22,20 |
| 38,700 | 101,20 | 156,23 | 20,00 | 7,60 | 21,90 |
| 38,800 | 101,18 | 161,01 | 20,00 | 7,65 | 21,86 |
| 38,900 | 101,17 | 160,76 | 20,00 | 7,81 | 21,77 |
| 39,000 | 101,22 | 156,30 | 20,00 | 7,72 | 21,92 |

| | | | | | |
|--------|--------|--------|-------|------|-------|
| 39,100 | 101,22 | 156,94 | 20,00 | 7,49 | 21,89 |
| 39,200 | 101,20 | 158,00 | 20,00 | 7,60 | 21,75 |
| 39,300 | 101,17 | 157,40 | 20,00 | 7,68 | 21,86 |
| 39,400 | 101,20 | 157,99 | 20,00 | 7,76 | 21,97 |
| 39,500 | 101,19 | 156,58 | 20,00 | 7,53 | 21,90 |
| 39,600 | 101,24 | 152,82 | 20,00 | 7,66 | 22,04 |
| 39,700 | 101,14 | 155,71 | 20,00 | 7,63 | 21,96 |
| 39,800 | 101,16 | 157,33 | 20,00 | 7,62 | 21,81 |
| 39,900 | 101,15 | 159,60 | 20,00 | 7,55 | 21,90 |
| 40,000 | 101,15 | 160,99 | 20,00 | 7,59 | 21,90 |
| 40,100 | 101,18 | 155,38 | 20,00 | 7,65 | 21,91 |
| 40,200 | 101,17 | 155,74 | 20,00 | 7,75 | 21,93 |
| 40,300 | 101,20 | 158,36 | 20,00 | 7,74 | 21,90 |
| 40,400 | 101,14 | 159,08 | 20,00 | 7,58 | 21,84 |
| 40,500 | 101,15 | 158,60 | 20,00 | 7,69 | 21,89 |
| 40,600 | 101,21 | 155,11 | 20,00 | 7,80 | 22,01 |
| 40,700 | 101,17 | 151,36 | 20,00 | 7,66 | 21,97 |
| 40,800 | 101,18 | 154,27 | 20,00 | 7,64 | 21,65 |
| 40,900 | 101,23 | 154,88 | 20,00 | 7,69 | 21,83 |
| 41,000 | 101,20 | 156,05 | 20,00 | 7,69 | 21,80 |
| 41,100 | 101,18 | 159,64 | 20,00 | 7,59 | 21,82 |
| 41,200 | 101,21 | 156,92 | 20,00 | 7,62 | 21,68 |
| 41,300 | 101,20 | 157,00 | 20,00 | 7,62 | 21,64 |
| 41,400 | 101,16 | 156,53 | 20,00 | 7,56 | 21,69 |
| 41,500 | 101,14 | 154,64 | 20,00 | 7,52 | 21,76 |
| 41,600 | 101,20 | 160,58 | 20,00 | 7,62 | 22,67 |
| 41,700 | 101,16 | 168,31 | 20,00 | 7,62 | 23,04 |
| 41,800 | 101,17 | 171,25 | 20,00 | 7,81 | 22,67 |
| 41,900 | 101,16 | 184,34 | 20,00 | 7,94 | 22,84 |
| 42,000 | 101,17 | 202,77 | 20,00 | 7,78 | 23,04 |
| 42,100 | 101,20 | 218,70 | 20,00 | 7,68 | 25,24 |
| 42,200 | 101,20 | 227,24 | 20,00 | 7,87 | 24,45 |
| 42,300 | 101,24 | 225,28 | 20,00 | 7,86 | 25,09 |
| 42,400 | 101,16 | 224,06 | 20,00 | 7,86 | 26,13 |
| 42,500 | 101,18 | 225,10 | 20,00 | 7,82 | 26,22 |
| 42,600 | 101,21 | 226,33 | 20,00 | 7,87 | 25,61 |
| 42,700 | 101,17 | 226,48 | 20,00 | 7,97 | 25,52 |
| 42,800 | 101,19 | 225,34 | 20,00 | 7,90 | 25,48 |
| 43,000 | 101,18 | 226,09 | 20,00 | 7,87 | 25,34 |
| 43,100 | 101,16 | 226,49 | 20,00 | 7,79 | 25,46 |
| 43,200 | 101,09 | 224,77 | 20,00 | 7,87 | 25,46 |
| 43,300 | 101,19 | 226,37 | 20,00 | 7,98 | 25,48 |
| 43,400 | 101,17 | 226,71 | 20,00 | 7,85 | 25,53 |
| 43,500 | 101,16 | 227,63 | 20,00 | 7,86 | 25,43 |

| | | | | | |
|--------|--------|--------|-------|------|-------|
| 43,600 | 101,17 | 227,58 | 20,00 | 7,81 | 25,69 |
| 43,700 | 101,15 | 227,99 | 20,00 | 7,97 | 25,64 |
| 43,800 | 101,21 | 227,67 | 20,00 | 7,97 | 25,54 |
| 43,900 | 101,18 | 227,92 | 20,00 | 7,98 | 25,55 |
| 44,000 | 101,14 | 228,59 | 20,00 | 7,81 | 25,57 |
| 44,100 | 101,19 | 228,13 | 20,00 | 7,86 | 25,69 |
| 44,200 | 101,17 | 226,70 | 20,00 | 7,64 | 25,76 |
| 44,300 | 101,21 | 222,60 | 20,00 | 7,82 | 25,80 |
| 44,400 | 101,21 | 223,30 | 20,00 | 7,96 | 25,60 |
| 44,500 | 101,15 | 223,48 | 20,00 | 7,87 | 25,41 |
| 44,600 | 101,20 | 216,66 | 20,00 | 7,84 | 25,42 |
| 44,700 | 101,19 | 206,21 | 20,00 | 7,81 | 25,33 |
| 44,800 | 101,22 | 194,09 | 20,00 | 7,95 | 25,06 |
| 44,900 | 101,16 | 182,97 | 20,00 | 7,88 | 24,45 |
| 45,000 | 101,20 | 170,84 | 20,00 | 7,86 | 23,81 |
| 45,100 | 101,15 | 161,51 | 20,00 | 7,85 | 23,24 |
| 45,200 | 101,13 | 162,30 | 20,00 | 7,82 | 22,99 |
| 45,300 | 101,18 | 159,53 | 20,00 | 7,93 | 22,79 |
| 45,400 | 101,23 | 158,53 | 20,00 | 7,93 | 22,82 |
| 45,500 | 101,19 | 160,77 | 20,00 | 8,06 | 22,72 |
| 45,600 | 101,22 | 159,13 | 20,00 | 7,85 | 22,72 |
| 45,700 | 101,17 | 159,26 | 20,00 | 7,68 | 22,72 |
| 45,800 | 101,20 | 161,81 | 20,00 | 7,62 | 22,73 |
| 45,900 | 101,18 | 160,57 | 20,00 | 7,69 | 22,74 |
| 46,000 | 101,19 | 156,25 | 20,00 | 7,59 | 22,75 |
| 46,100 | 101,18 | 155,10 | 20,00 | 7,69 | 22,82 |
| 46,200 | 101,15 | 151,80 | 20,00 | 7,60 | 22,66 |
| 46,300 | 101,23 | 150,42 | 20,00 | 7,55 | 22,74 |
| 46,400 | 101,17 | 153,70 | 20,00 | 7,54 | 22,76 |
| 46,500 | 101,16 | 151,65 | 20,00 | 7,57 | 22,62 |
| 46,600 | 101,17 | 155,80 | 20,00 | 7,40 | 22,54 |
| 46,700 | 101,27 | 159,73 | 20,00 | 7,38 | 22,48 |
| 46,800 | 101,19 | 155,31 | 20,00 | 7,38 | 22,40 |
| 46,900 | 101,13 | 155,06 | 20,00 | 7,41 | 22,51 |
| 47,000 | 101,18 | 156,60 | 20,00 | 7,46 | 22,41 |
| 47,100 | 101,14 | 155,50 | 20,00 | 7,57 | 22,37 |
| 47,200 | 101,23 | 155,13 | 20,00 | 7,51 | 22,32 |
| 47,300 | 101,23 | 152,49 | 20,00 | 7,65 | 22,38 |
| 47,400 | 101,16 | 148,46 | 20,00 | 7,68 | 22,31 |
| 47,500 | 101,17 | 148,75 | 20,00 | 7,62 | 22,33 |
| 47,600 | 101,21 | 152,09 | 20,00 | 7,59 | 22,26 |
| 47,700 | 101,20 | 153,50 | 20,00 | 7,53 | 22,21 |
| 47,800 | 101,27 | 157,93 | 20,00 | 7,56 | 22,28 |
| 47,900 | 101,22 | 155,21 | 20,00 | 7,54 | 22,33 |

| | | | | | |
|--------|--------|--------|-------|------|-------|
| 48,000 | 101,21 | 152,71 | 20,00 | 7,54 | 22,31 |
| 48,100 | 101,24 | 154,26 | 20,00 | 7,62 | 22,40 |
| 48,200 | 101,27 | 155,29 | 20,00 | 7,55 | 22,35 |
| 48,300 | 101,20 | 152,91 | 20,00 | 7,51 | 22,29 |
| 48,400 | 101,20 | 151,67 | 20,00 | 7,53 | 22,32 |
| 48,500 | 101,21 | 148,58 | 20,00 | 7,58 | 22,33 |
| 48,600 | 101,12 | 145,51 | 20,00 | 7,52 | 22,27 |
| 48,700 | 101,16 | 147,33 | 20,00 | 7,52 | 22,22 |
| 48,800 | 101,22 | 147,48 | 20,00 | 7,52 | 22,21 |
| 48,900 | 101,20 | 150,41 | 20,00 | 7,43 | 22,19 |
| 49,000 | 101,17 | 155,89 | 20,00 | 7,36 | 22,22 |
| 49,100 | 101,14 | 153,35 | 20,00 | 7,42 | 22,23 |
| 49,200 | 101,24 | 155,29 | 20,00 | 7,53 | 22,29 |
| 49,300 | 101,23 | 155,11 | 20,00 | 7,56 | 22,49 |
| 49,400 | 101,19 | 154,83 | 20,00 | 7,56 | 22,32 |
| 49,500 | 101,20 | 154,43 | 20,00 | 7,54 | 22,27 |
| 49,600 | 101,15 | 152,49 | 20,00 | 7,60 | 22,28 |
| 49,700 | 101,22 | 147,28 | 20,00 | 7,47 | 22,33 |
| 49,800 | 101,16 | 146,51 | 20,00 | 7,54 | 22,40 |
| 49,900 | 101,19 | 155,67 | 20,00 | 7,52 | 22,29 |
| 50,000 | 101,19 | 163,57 | 20,00 | 7,36 | 22,48 |
| 50,100 | 101,15 | 180,06 | 20,00 | 7,37 | 22,60 |
| 50,200 | 101,12 | 198,15 | 20,00 | 7,31 | 23,77 |
| 50,300 | 101,14 | 217,04 | 20,00 | 7,34 | 27,43 |
| 50,400 | 101,17 | 227,40 | 20,00 | 7,39 | 26,43 |
| 50,500 | 101,18 | 225,46 | 20,00 | 7,34 | 30,13 |
| 50,600 | 101,21 | 225,97 | 20,00 | 7,36 | 34,00 |
| 50,700 | 101,15 | 226,49 | 20,00 | 7,21 | 38,98 |
| 50,800 | 101,20 | 226,63 | 20,00 | 7,19 | 41,34 |
| 50,900 | 101,15 | 228,56 | 20,00 | 7,24 | 40,84 |
| 51,000 | 101,12 | 234,61 | 20,00 | 7,34 | 36,49 |
| 51,100 | 101,13 | 247,53 | 20,00 | 7,20 | 31,18 |
| 51,200 | 101,19 | 243,16 | 20,00 | 6,92 | 29,51 |
| 51,300 | 101,17 | 234,59 | 20,00 | 2,44 | 28,90 |
| 51,400 | 101,19 | 230,43 | 20,00 | 0,38 | 27,98 |
| 51,500 | 101,14 | 200,50 | 20,00 | 0,07 | 27,31 |
| 51,600 | 101,23 | 154,26 | 20,00 | 0,35 | 25,53 |
| 51,700 | 101,19 | 147,94 | 20,00 | 0,48 | 21,69 |
| 51,800 | 101,19 | 142,74 | 20,00 | 0,57 | 20,77 |
| 51,999 | 101,15 | 131,96 | 20,00 | 0,73 | 20,26 |