

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

**NGUYỄN VIỆT HÀ**

**NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN ỐNG TRỤ COMPOSITE  
CHỊU TÁC DỤNG CỦA ÁP SUẤT DI ĐỘNG**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT**

**HÀ NỘI – 2020**

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

**NGUYỄN VIỆT HÀ**

**NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN ỚNG TRỤ COMPOSITE  
CHỊU TÁC DỤNG CỦA ẤP SUẤT DI ĐỘNG**

Chuyên ngành: Cơ kỹ thuật

Mã số: 9.52.01.01

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT**

**Người hướng dẫn khoa học:**

**1. PGS.TS Phạm Tiến Đạt**

**2. TS Lê Trường Sơn**

HÀ NỘI - 2020

## **LỜI CAM ĐOAN**

Tôi xin cam đoan luận án này là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Những nội dung, số liệu và kết quả trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa có tác giả nào công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tác giả

**Nguyễn Việt Hà**

## LỜI CẢM ƠN

Tôi xin bày tỏ lòng biết ơn chân thành và sâu sắc đến tập thể thầy hướng dẫn: PGS.TS Phạm Tiến Đạt và TS Lê Trường Sơn đã tận tình hướng dẫn, giúp đỡ và cho nhiều chỉ dẫn khoa học có giá trị, nhiều lời khuyên bổ ích, giúp cho tôi hoàn thành luận án này.

Tôi cũng xin bày tỏ lòng biết ơn chân thành nhất đến các thầy, các Nhà khoa học đã cho nhiều ý kiến đóng góp quý báu, các kiến thức khoa học hiện đại, giúp tôi nhìn nhận các vấn đề một cách thấu đáo.

Tôi xin chân thành cảm ơn tập thể các thầy Bộ môn Cơ học vật rắn - Khoa Cơ khí, Phòng Sau đại học, Phòng thí nghiệm Sức bền vật liệu, phòng thí nghiệm Cơ học máy – Học viện Kỹ thuật quân sự, Phòng vật liệu – Viện công nghệ, đã tạo mọi điều kiện thuận lợi giúp đỡ tôi trong quá trình thực hiện luận án.

Tôi xin chân thành cảm ơn Đảng ủy - BGH Trường Sĩ quan Kỹ thuật quân sự, các cơ quan chức năng của Nhà trường, lãnh đạo và chỉ huy Khoa Kỹ thuật cơ sở cùng toàn thể giáo viên trong khoa đã tạo mọi điều kiện, giúp đỡ đồng viên tôi hoàn thành được công trình nghiên cứu của mình.

Tôi cũng xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới gia đình, người thân và bạn bè, đồng nghiệp đã luôn đồng viên, khích lệ, chia sẻ, giúp đỡ tôi trong suốt quá trình thực hiện luận án.

**Tác giả luận án**

## MỤC LỤC

.....	Trang
Lời cam đoan.....	i
Lời cảm ơn .....	ii
Mục lục.....	iii
Danh mục các ký hiệu và các chữ viết tắt.....	vi
Danh mục các bảng .....	x
Danh mục các hình vẽ và đồ thị .....	xi
Mở đầu .....	1
<b>CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU.....</b>	<b>4</b>
1.1. Vật liệu composite, các ứng dụng và phương pháp tính toán .....	4
1.1.1. Tổng quan về vật liệu composite, các ứng dụng.....	4
1.1.2. Phương pháp tính toán kết cấu ống composite.....	7
1.2. Tổng quan về tải trọng di động và các mô hình ống trụ chịu tải trọng dạng áp suất di động.....	8
1.3. Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước.....	13
1.4. Kết quả nghiên cứu đạt được từ các công trình đã công bố.....	20
1.5. Các vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu.....	21
Kết luận chương 1 .....	22
<b>CHƯƠNG 2. PHÂN TÍCH PHI TUYẾN ĐỘNG LỰC HỌC ỐNG TRỤ COMPOSITE CHỊU TÁC DỤNG CỦA ÁP SUẤT DI ĐỘNG.....</b>	<b>23</b>
2.1. Đặt vấn đề.....	23
2.2. Đặt bài toán, các giả thiết.....	23
2.3. Quan hệ ứng xử cơ học của phần tử vỏ cong mô phỏng ống composite lớp.....	24
2.3.1. Quan hệ biến dạng và chuyển vị .....	25
2.3.2. Quan hệ ứng suất và biến dạng .....	30
2.3.3. Các thành phần nội lực.....	31
2.4. Thiết lập phương trình vi phân dao động phi tuyến của phần tử vỏ trong nền đàn hồi chịu áp suất di động.....	35
2.4.1. Phương trình vi phân dao động phi tuyến của phần tử vỏ .....	35
2.4.2. Phần tử vỏ trong nền đàn hồi chịu tác dụng của áp suất di động.....	46
2.5. Thuật toán giải phương trình vi phân dao động phi tuyến của ống trụ trong nền đàn hồi chịu áp suất di động .....	48

2.5.1. Phương trình vi phân dao động phi tuyến của ống trụ trong nền đàn hồi chịu áp suất di động.....	48
2.5.2. Điều kiện biên và phương trình dao động của hệ sau khi khử biên.....	52
2.5.3. Thuật toán PTHH giải phương trình dao động của hệ.....	53
2.6. Giới thiệu và kiểm tra độ tin cậy của chương trình tính .....	58
2.6.1. Giới thiệu chương trình tính.....	58
2.6.2. Kiểm tra độ tin cậy của chương trình.....	58
Kết luận chương 2 .....	61
<b>CHƯƠNG 3. KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ YẾU TỐ ĐẾN ĐÁP ỨNG PHI TUYẾN ĐỘNG LỰC HỌC CỦA ỐNG TRỤ COMPOSITE CHỊU TÁC DỤNG CỦA ÁP SUẤT DI ĐỘNG .....</b>	<b>62</b>
3.1. Đặt vấn đề.....	62
3.2. Ống composite trong nền đàn hồi chịu áp suất di động.....	62
3.2.1. Bài toán xuất phát.....	62
3.2.2. Khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố đến tần số dao động riêng của ống trụ composite.....	70
3.2.2.1. Ảnh hưởng của số lớp ống composite.....	70
3.2.2.2. Ảnh hưởng của chiều dài ống composite .....	70
3.2.2.3. Ảnh hưởng của góc đặt cốt .....	71
3.2.2.4. Ảnh hưởng của chiều dày ống composite .....	71
3.2.2.5. Ảnh hưởng của độ cứng nền đàn hồi .....	72
3.2.3. Khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố đến đáp ứng động lực học của ống trụ composite .....	73
3.2.3.1. Ảnh hưởng của số lớp ống composite.....	73
3.2.3.2. Ảnh hưởng của chiều dài ống .....	75
3.2.3.3. Ảnh hưởng của góc đặt cốt .....	78
3.2.3.4. Ảnh hưởng của độ cứng nền đàn hồi .....	80
3.2.3.5. Ảnh hưởng tốc độ di chuyển của tải trọng.....	83
3.2.3.6. Ảnh hưởng của tải trọng .....	85
3.3. Ống composite trên gối cứng chịu áp suất di động.....	90
3.3.1. Ảnh hưởng của số lớp ống composite.....	90
3.3.2. Ảnh hưởng của chiều dài ống .....	93
3.3.3. Ảnh hưởng của góc đặt cốt .....	94
3.3.4. Ảnh hưởng số lượng gối cứng .....	97

3.3.5. Ảnh hưởng của tốc độ di chuyển của tải trọng .....	99
3.3.6. Ảnh hưởng của tải trọng .....	101
Kết luận chương 3 .....	105
CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM .....	106
4.1. Đặt vấn đề.....	106
4.2. Mục đích thí nghiệm .....	107
4.3. Nội dung thí nghiệm.....	107
4.4. Thiết bị và sơ đồ thí nghiệm.....	107
4.4.1. Mô hình và mẫu thí nghiệm .....	107
4.4.1.1. Mô hình thí nghiệm.....	107
4.4.1.2. Mẫu thí nghiệm xác định độ cứng lò xo đàn hồi .....	108
4.4.1.3. Mẫu thí nghiệm xác định cơ tính vật liệu.....	109
4.4.2. Thiết bị thí nghiệm .....	110
4.4.2.1. Thiết bị gây tải .....	110
4.4.2.2. Cảm biến gia tốc, đầu đo biến dạng .....	110
4.4.2.3. Máy đo dao động đa kênh.....	111
4.5. Phân tích và xử lý số liệu thí nghiệm.....	111
4.6. Trình tự xác định gia tốc, biến dạng của kết cấu ống trụ composite .....	113
4.7. Thí nghiệm và kết quả đạt được.....	113
4.7.1. Nội dung thí nghiệm.....	113
4.7.2. Kết quả thí nghiệm đạt được.....	117
4.7.2.1. Thử nghiệm trên kết cấu ống composite đặt trên gối cứng chịu tải trọng di động .....	117
4.7.2.2. Thử nghiệm trên kết cấu ống composite đặt trên gối đàn hồi chịu tải trọng di động .....	118
Kết luận chương 4 .....	121
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	122
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ.....	124
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	125

## DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CÁC CHỮ VIẾT TẮT

### 1. Danh mục các ký hiệu

#### 1.1. Các ký hiệu bằng chữ La tinh

[A] - Ma trận độ cứng màng

$A_e$  - Diện tích phần tử

$A_1$  - Diện tích phần tử có áp suất phân bố tác dụng

$A_2$  - Diện tích phần tử không có áp suất phân bố tác dụng

[B] - Ma trận tương tác màng – uốn – xoắn

$\left[ \tilde{C} \right]$  - Ma trận cản của hệ

$c_{ij}$  - Cosin của góc hợp bởi trục tọa độ tự nhiên  $\xi_i$  và trục tọa độ tổng thể  $x_j$

D – Đường kính ống trụ composite

[D] - Ma trận độ cứng uốn

$E_i$  - Mô đun kỹ thuật vật liệu

$\left\{ f_b^e \right\}$  - Vectơ lực khối phần tử

$\left\{ f_s^e \right\}$  - Vectơ lực bề mặt phần tử

$\left\{ f_c^e \right\}$  - Vectơ lực tập trung phần tử

$\left\{ f^e \right\}$  - Vectơ lực nút của phần tử

$\left\{ f^e \right\}_E$  - Vectơ lực nút của phần tử trong hệ tọa độ cục bộ

$\left\{ \tilde{f}_m \right\}_G^e$  - Vectơ lực nút của phần tử trong hệ tọa độ tổng thể

$\left\{ \tilde{f}_m \right\}$  - Vectơ lực nút tổng thể của hệ

$\left\{ f_m \right\}_{t+\Delta t}^{(i)}$  - Vectơ lực nút quy đổi

$\left\{ f_m^* \right\}_{t+\Delta t}^{(i)}$  - Vectơ tải trọng hiệu quả

G - Mô đun đàn hồi trượt của vật liệu



[H] - Ma trận độ cứng cắt

$H_e$  - Hàm tác dụng Hamilton

$h$  - Chiều dày ống composite

[I] - Ma trận đơn vị

[J] - Ma trận Jacobi

$[\tilde{K}]$  - Ma trận độ cứng tổng thể của hệ

$[K^e]$  - Ma trận độ cứng của phần tử

$[\tilde{K}]_G^e$  - Ma trận độ cứng của phần tử trong hệ tọa độ tổng thể

$k_0$  - Hệ số nền

$k_s$  - hệ số hiệu chỉnh ứng suất cắt

$k_N$  - Hệ số phi tuyến

$[K_L^u]_E^e$  - Ma trận độ cứng tuyến tính uốn trong hệ tọa độ cục bộ

$[K^Q]_E^e$  - Ma trận độ cứng cắt trong hệ tọa độ cục bộ

$[K_N^u]_E^e$  - Ma trận độ cứng phi tuyến uốn trong hệ tọa độ cục bộ

$[K_{r\xi}]$  - Ma trận độ cứng chống xoắn quanh trục  $\xi$

$[K^L]$  - Ma trận độ cứng tuyến tính của hệ ống - nền.

$[K_{t+\Delta t}^*]^{(i)}$  - Ma trận độ cứng tiếp tuyến hiệu quả

$[K_{t+\Delta t}]^{(i)}$  - Ma trận độ cứng tiếp tuyến

$L$  - Chiều dài ống trụ composite

$\{M\}$  - Ma trận mô men uốn và xoắn

$[M^e]$  - Ma trận khối lượng của phần tử

$[M^e]_E$  - Ma trận khối lượng của phần tử trong hệ tọa độ cục bộ

$[\tilde{M}]_G^e$  - Ma trận khối lượng của phần tử trong hệ tọa độ tổng thể

$[\tilde{M}]$  - Ma trận khối lượng tổng thể của hệ

$[N_u]$  - Ma trận hàm dạng uốn

$n_e$  - Số phần tử vỏ mô phỏng ống

$n_{em}$  - Số phần tử vỏ chịu áp suất di động tác dụng

$N_i$  - Hàm dạng tương ứng nút thứ  $i$

$\{N\}$  - Ma trận lực màng

$p(t)$  - Áp suất di động tác dụng lên ống trụ

$p_f$  - Phản lực nền

$[\bar{Q}]^k$  - Ma trận hệ số độ cứng của lớp  $k$

$[\bar{Q}_b]^k$  - Ma trận hệ số độ cứng màng của lớp  $k$

$[\bar{Q}_s]^k$  - Ma trận hệ số độ cứng cắt của lớp thứ  $k$

$\{Q\}$  - Vectơ lực cắt

$\{q\}$  - Vectơ chuyển vị nút phần tử

$\{\dot{q}\}$  - Vectơ vận tốc nút phần tử

$\{\ddot{q}\}$  - Vectơ gia tốc nút phần tử

$\{q^e\}$  - Vectơ chuyển vị của phần tử

$\{\dot{q}^e\}$  - Vectơ vận tốc phần tử

$\{\ddot{q}^e\}$  - Vectơ gia tốc phần tử

$R$  - Bán kính ống trụ composite

$T^e$  - Động năng của phần tử

$[T]^e$  - Ma trận chuyển của phần tử

$\{u\}$  - Vectơ chuyển vị của 1 điểm bất kỳ trong phần tử

$\{\hat{u}\}$  - Vectơ chuyển vị và góc xoay tại điểm bất kỳ trên mặt trung bình

$U^e$  - Thế năng biến dạng của phần tử

$V_e$  - Thể tích phần tử

$v$  - Vận tốc áp suất di động

$W^e$  - Công ngoại lực tác động lên phần tử

$w(t)$  - Chuyển vị hướng kính

$(r, s)$  - Các tọa độ tự nhiên

$(x, y, z)$  - Các trục tọa độ trong hệ tọa độ tổng thể

## **1.2. Các ký hiệu bằng chữ Hy Lạp**

$u, v$  và  $w$  - Chuyển vị dài dọc theo các trục  $\xi_1, \xi_2$  và  $\xi$ ;

$\alpha_R, \beta_R$  - Các hằng số cản Rayleigh

$\{\varepsilon_b^L\}$  - Vectơ biến dạng tuyến tính

$\{\varepsilon^N\}$  - Vectơ biến dạng phi tuyến

$\{\varepsilon_b\}$  - Vectơ biến dạng màng

$\{\varepsilon_s\}$  - Vectơ biến dạng cắt của mặt trung bình

$\{\kappa\}$  - Vectơ độ cong của vỏ chịu uốn

$\omega_i, \omega_j$  - Các tần số dao động riêng của hệ

$\zeta_i, \zeta_j$  - Các tỷ số cản

$\theta_{\xi_1}, \theta_{\xi_2}, \theta_{\xi}$  - Góc xoay của pháp tuyến mặt cắt vỏ theo các trục  $\xi_1, \xi_2$  và  $\xi$ .

$\nu$  - Hệ số Poátxông

$\{\sigma\}$  - Vectơ ứng suất tại một điểm

$\rho$  - khối lượng riêng của chất điểm

$\psi$  - Góc lệch phương cốt và trục  $\xi_1$

$\Delta t$  - Bước thời gian

## **2. Danh mục các chữ viết tắt**

CPMP\_2019 - COMPOSITE\_PIPE\_MOVING\_PRESSURE\_2019

PTHH – Phần tử hữu hạn

## DANH MỤC CÁC BẢNG

	Trang
Bảng 2.1. Các đại lượng tính.....	59
Bảng 2.2. Tóm tắt giá trị lớn nhất .....	60
Bảng 3.1. Giá trị lớn nhất của các đại lượng được khảo sát .....	69
Bảng 3.2. Các tần số dao động riêng đầu tiên và số lớp .....	70
Bảng 3.3. Các tần số dao động riêng đầu tiên và chiều dài ống .....	70
Bảng 3.4. Các tần số dao động riêng đầu tiên và góc đặt cốt .....	71
Bảng 3.5. Các tần số dao động riêng đầu tiên và chiều dày ống .....	72
Bảng 3.6. Các tần số dao động riêng đầu tiên và độ cứng nền .....	72
Bảng 3.7. Đáp ứng động lực học lớn nhất và số lớp ống composite.....	73
Bảng 3.8. Đáp ứng động lực học lớn nhất và chiều dài ống composite .....	77
Bảng 3.9. Đáp ứng động lực học lớn nhất theo phương án đặt cốt .....	77
Bảng 3.10. Đáp ứng động lực học lớn nhất và độ cứng nền.....	81
Bảng 3.11. Đáp ứng động lực học lớn nhất và sự thay đổi vận tốc tải trọng .	84
Bảng 3.12. Đáp ứng động lực học lớn nhất và tải trọng điều hòa .....	84
Bảng 3.13. Đáp ứng động lực học lớn nhất và sự thay đổi tải trọng .....	88
Bảng 3.14. Đáp ứng động lực học lớn nhất và số lớp ống composite.....	91
Bảng 3.15. Đáp ứng động lực học lớn nhất và chiều dài ống composit.....	91
Bảng 3.16. Đáp ứng động lực học lớn nhất theo phương án đặt cốt .....	95
Bảng 3.17. Đáp ứng động lực học lớn nhất và gối cứng .....	96
Bảng 3.18. Đáp ứng động lực học lớn nhất và sự thay đổi vận tốc tải trọng .	98
Bảng 3.19. Đáp ứng động lực học lớn nhất và tải trọng điều hòa .....	100
Bảng 3.20. Đáp ứng động lực học lớn nhất và sự thay đổi tải trọng .....	103
Bảng 4.1. Thành phần cơ tính của lớp vật liệu composite.....	110
Bảng 4.2. Giá trị lưu lượng dòng chảy Q và vận tốc dòng chảy v.....	115
Bảng 4.3. Đáp ứng động lực học lớn nhất của kết cấu đặt trên gối cứng.....	117
Bảng 4.4. Đáp ứng động lực học lớn nhất của kết cấu đặt trên gối đàn hồi. .	118

## DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ

	Trang
Hình 1.1. Ống phóng Igla và phôi ống phóng.....	7
Hình 1.2. Mô hình biến dạng và hệ trục tọa độ của vỏ trụ dưới tác dụng áp suất động .....	10
Hình 1.3. Mô hình áp suất di động bên trong .....	11
Hình 1.4. Mô hình ống trụ chịu áp suất di động .....	12
Hình 1.5. Phân loại phương pháp tính kết cấu chịu tải trọng di động.....	13
Hình 1.6. Ống composite lớp .....	14
Hình 1.7. Ống chịu tải trọng di động và mô hình PTHH .....	15
Hình 2.1. Mô hình ống trụ composite lớp đặt trong nền đàn hồi chịu áp suất di động.....	24
Hình 2.2. Mô hình PTHH của ống trụ composite và phần tử vỏ cong .....	24
Hình 2.3. Sơ đồ phần tử vỏ composite lớp .....	31
Hình 2.4. Mô hình phần tử vỏ cong trong nền đàn hồi chịu áp suất di động	42
Hình 2.5. Áp suất tác dụng vào ống tại thời điểm $t$ .....	48
Hình 2.6. Sơ đồ thuật toán.....	53
Hình 2.7. Mô hình bài toán .....	55
Hình 2.8. Chuyển vị của các điểm dọc theo chiều dài ống.....	56
Hình 3.1. Mô hình bài toán .....	59
Hình 3.2. Mô hình quy luật áp suất.....	59
Hình 3.3. Mô hình phần tử hữu hạn của bài toán .....	60
Hình 3.4. Năm dạng dao động riêng đầu tiên của ống composite .....	62

Hình 3.5. Đáp ứng chuyển vị hướng kính $w$ theo thời gian.....	63
Hình 3.6. Đáp ứng gia tốc hướng kính $\ddot{w}$ theo thời gian .....	63
Hình 3.7. Đáp ứng biến dạng dọc trục $\varepsilon_x$ theo thời gian.....	64
Hình 3.8. Đáp ứng ứng suất pháp $\sigma_y$ theo thời gian.....	64
Hình 3.9. Đáp ứng ứng suất pháp $\sigma_x$ theo thời gian .....	65
Hình 3.10. Quan hệ chuyển vị hướng kính $w_{Max}$ và số lớp.....	66
Hình 3.11. Quan hệ ứng suất pháp $\sigma_y^{Max}$ và số lớp.....	67
Hình 3.12. Quan hệ ứng suất pháp $\sigma_x^{Max}$ và số lớp.....	67
Hình 3.13. Quan hệ $w_{Max}$ và chiều dài ống composite .....	68
Hình 3.14. Quan hệ $\sigma_y^{Max}$ và chiều dài ống composite .....	69
Hình 3.15. Quan hệ $\sigma_x^{Max}$ và chiều dài ống composite .....	69
Hình 3.16. Đáp ứng chuyển vị hướng kính $w$ với 3 phương án đặt cốt .....	70
Hình 3.17. Đáp ứng ứng suất pháp $\sigma_y$ với 3 phương án đặt cốt .....	71
Hình 3.18. Đáp ứng ứng suất pháp $\sigma_x$ với 3 phương án đặt cốt .....	71
Hình 3.19. Quan hệ $w_{Max}$ và độ cứng nền đàn hồi.....	72
Hình 3.20. Quan hệ $\sigma_y^{Max}$ và độ cứng nền đàn hồi.....	73
Hình 3.21. Quan hệ $\sigma_x^{Max}$ và độ cứng nền đàn hồi.....	74
Hình 3.22. Đáp ứng chuyển vị hướng kính $w$ theo thời gian.....	75
Hình 3.23. Đáp ứng ứng suất pháp $\sigma_y$ theo thời gian .....	75
Hình 3.24. Đáp ứng ứng suất pháp $\sigma_x$ theo thời gian .....	76

Hình 3.25. Đáp ứng chuyển vị hướng kính $w$ theo thời gian.....	77
Hình 3.26. Đáp ứng ứng suất pháp $\sigma_y$ theo thời gian .....	77
Hình 3.27. Đáp ứng ứng suất pháp $\sigma_x$ theo thời gian .....	78
Hình 3.28. Quan hệ $w_{Max}$ và tải trọng .....	79
Hình 3.29. Quan hệ $\sigma_y^{Max}$ và tải trọng.....	80
Hình 3.30. Quan hệ $\sigma_x^{Max}$ và tải trọng .....	80
Hình 3.31. Quan hệ $w_{Max}$ và số lớp.....	81
Hình 3.32. Quan hệ $\sigma_y^{Max}$ và số lớp.....	82
Hình 3.33. Quan hệ $\sigma_x^{Max}$ và số lớp.....	82
Hình 3.34. Quan hệ $w_{Max}$ và chiều dài ống composite .....	83
Hình 3.35. Quan hệ $\sigma_y^{Max}$ và chiều dài ống composite .....	84
Hình 3.36. Quan hệ $\sigma_x^{Max}$ và chiều dài ống composite .....	84
Hình 3.37. Đáp ứng chuyển vị hướng kính $w$ với 3 phương án đặt cốt .....	85
Hình 3.38. Đáp ứng ứng suất pháp $\sigma_y$ với 3 phương án đặt cốt.....	86
Hình 3.39. Đáp ứng ứng suất pháp $\sigma_x$ với 3 phương án đặt cốt.....	86
Hình 3.40. Quan hệ $w_{Max}$ và gối cứng.....	90
Hình 3.41. Quan hệ $\sigma_y^{Max}$ và gối cứng .....	91
Hình 3.42. Quan hệ $\sigma_x^{Max}$ và gối cứng.....	91
Hình 3.43. Đáp ứng chuyển vị hướng kính $w$ với sự thay đổi của vận tốc ....	92
Hình 3.44. Đáp ứng ứng suất pháp $\sigma_y$ với sự thay đổi của vận tốc .....	93

Hình 3.45. Đáp ứng ứng suất pháp $\sigma_x$ với sự thay đổi của vận tốc .....	93
Hình 3.46. Đáp ứng chuyển vị hướng kính $w$ theo thời gian.....	95
Hình 3.47. Đáp ứng ứng suất pháp $\sigma_y$ theo thời gian.....	95
Hình 3.48. Đáp ứng ứng suất pháp $\sigma_x$ theo thời gian.....	96
Hình 3.49. Quan hệ $w_{Max}$ và tải trọng .....	97
Hình 3.50. Quan hệ $\sigma_y^{Max}$ và tải trọng .....	98
Hình 3.51. Quan hệ $\sigma_x^{Max}$ và tải trọng .....	98
Hình 4.1. Mô hình thí nghiệm ống composite đặt trên gối cứng và gối đàn hồi	
Hình 4.2. Mẫu xác định độ cứng lò xo đàn hồi.....	102
Hình 4.3. Thí nghiệm xác định độ cứng lò xo đàn hồi.....	105
Hình 4.4. Thiết bị gây tải (a), cảm biến gia tốc (b), đầu đo biến dạng(c).....	106
Hình 4.5. Hệ thống đo động 16 kênh LMS và màn hình làm việc của máy.	107
Hình 4.6. Gắn cảm biến đo.....	108
Hình 4.7. Tiến hành đo đạc và lưu kết quả .....	112
Hình 4.8. Kết quả đo thu được từ thiết bị đo .....	112
Hình 4.9. Đáp ứng chuyển vị – thời gian tại điểm F của ống composite .....	114
Hình 4.10. Đáp ứng gia tốc – thời gian tại điểm F của ống composite .....	114
Hình 4.11. Đáp ứng biến dạng – thời gian tại điểm E của ống composite ...	115



## MỞ ĐẦU

### **Lý do chọn đề tài:**

Cùng với sự phát triển của nền kinh tế - xã hội, kết cấu dạng ống ngày càng được sử dụng nhiều trong các lĩnh vực kỹ thuật, trong đó các ống dẫn chịu tác dụng của tải trọng di động như: áp suất di động, khối lượng di động, hệ dao động di động, ... đã và sẽ ứng dụng nhiều trong thực tế. Một trong những minh chứng rõ nhất của loại kết cấu ống chịu tác dụng của tải trọng dạng áp suất di động là ống dẫn khí (chất lỏng) với nhu cầu sử dụng ngày càng cao. Để tăng hiệu quả sử dụng khai thác và tuổi thọ của kết cấu, một trong những vấn đề cần phải đề cập đến là giải pháp thiết kế và thi công, trong đó việc nghiên cứu, tính toán ống với những ảnh hưởng của các thông số như: tải trọng, kết cấu, vật liệu và điều kiện làm việc khác nhau là vấn đề quan trọng, cần quan tâm nghiên cứu. Thực tế cho thấy, trong các sự cố về đường ống gây thiệt hại lớn về kinh tế, làm giảm lòng tin của người sử dụng gần đây, các sai sót trong tính toán (hoặc chưa được tính toán đầy đủ), vật liệu sử dụng và địa chất nền là những nguyên nhân chính. Trước tình hình đó, tác giả luận án mong muốn vận dụng kiến thức đã được trang bị để đi sâu nghiên cứu lĩnh vực này, góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng cho các loại kết cấu ống trụ chịu tác dụng của áp suất di động. Đây là lý do của việc lựa chọn vấn đề ***“Nghiên cứu tính toán ống trụ composite chịu tác dụng của áp suất di động”*** làm chủ đề nghiên cứu của luận án.

### **Mục đích của luận án:**

- Xây dựng thuật toán phần tử hữu hạn (PTHH) và chương trình máy tính nhằm phân tích phi tuyến động lực học ống trụ composite trong nền đàn hồi chịu tác dụng của áp suất di động mô phỏng tác dụng của chất khí

(lông) di động trong ống khi hệ làm việc, đặc biệt là quá trình bơm vào ống bắt đầu – đây là giai đoạn dễ gây nguy hiểm cho ống dẫn.

- Đề xuất, kiến nghị các giải pháp hợp lý cho ống trên cơ sở kết quả khảo sát số với các lớp bài toán khác nhau, trong đó thông số về kết cấu, tải trọng, vật liệu, điều kiện liên kết, điều kiện nền thay đổi.

### **Đối tượng nghiên cứu của luận án:**

*Về kết cấu:* Ống trụ bằng vật liệu composite lớp đặt trong nền đàn hồi 1 hệ số theo mô hình nền Winkler và đặt trên các liên kết thông thường;

*Về tải trọng:* Tải trọng là áp suất di động dọc trong ống composite với vận tốc không đổi hoặc thay đổi;

### **Phương pháp nghiên cứu:**

Nghiên cứu lý thuyết kết hợp với tính toán khảo sát số và thực nghiệm. Về lý thuyết, áp dụng lý thuyết thuần nhất hóa kết cấu composite lớp và phương pháp PTHH để xây dựng phương trình vi phân phi tuyến động lực học của ống composite; Xây dựng thuật toán và chương trình máy tính để khảo sát số với các lớp bài toán khác nhau. Về thực nghiệm, thiết kế chế tạo mô hình, thiết lập và triển khai thí nghiệm trên mô hình tại phòng thí nghiệm với các thiết bị đo đạc hiện đại.

### **Cấu trúc của luận án:**

Luận án bao gồm phần mở đầu, 4 chương, phần kết luận - kiến nghị, tài liệu tham khảo.

**Mở đầu:** Trình bày lý do lựa chọn đề tài luận án và đề xuất bố cục luận án

#### **Chương 1:** Tổng quan vấn đề nghiên cứu của luận án

Trình bày tổng quan về vật liệu composite, tải trọng dạng áp suất di động, các kết quả nghiên cứu của kết cấu chịu tải trọng di động ở trong nước và nước ngoài, rút ra những kết quả đạt được và các vấn đề cần tiếp

tục nghiên cứu. Trên cơ sở những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu, đề xuất mục tiêu, nội dung và phương pháp nghiên cứu của luận án.

**Chương 2:** Phân tích phi tuyến động lực học ống trụ composite trong nền đàn hồi chịu áp suất di động

Xây dựng các quan hệ ứng xử cơ học của phần tử vỏ cong bằng vật liệu composite trong nền đàn hồi, chịu tác dụng của áp suất di động, làm cơ sở xây dựng thuật toán PTHH và chương trình máy tính phân tích phi tuyến động lực học ống trụ composite chịu tác dụng của áp suất di động với hai loại liên kết: ống trong nền đàn hồi và trên các liên kết thông thường.

**Chương 3:** Khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố đến đáp ứng phi tuyến động lực học của ống trụ composite chịu áp suất di động

Tiến hành khảo sát số xem xét ảnh hưởng của các thông số: tải trọng, hình học, vật liệu, liên kết, ... đến đáp ứng phi tuyến động lực học của ống trụ composite trong nền đàn hồi và trên các liên kết thông thường, đưa ra các nhận xét, khuyến cáo kỹ thuật định hướng ứng dụng trong thực tiễn.

**Chương 4:** Nghiên cứu thực nghiệm

Trên cơ sở nghiên cứu lý thuyết thực nghiệm, thiết kế, chế tạo mô hình thí nghiệm, sử dụng các thiết bị đo động đa kênh hiện đại, tiến hành nghiên cứu thực nghiệm xác định đáp ứng biến dạng, chuyển vị của ống trụ composite đặt trên các liên kết đàn hồi và gôi cứng tuyệt đối chịu tác dụng của áp suất di động theo phương pháp bơm chất lỏng. Từ đó kiểm chứng độ tin cậy của chương trình tính.

**Kết luận chung:** Trình bày các kết quả chính, những đóng góp mới của luận án và các kiến nghị.

**Tài liệu tham khảo**

## CHƯƠNG 1

### TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

#### **1.1. Vật liệu composite, các ứng dụng và phương pháp tính toán**

##### ***1.1.1. Tổng quan về vật liệu composite, các ứng dụng***

Vật liệu composite là loại vật liệu được tạo thành từ hai hoặc nhiều thành phần vật liệu có tính chất cơ lý khác nhau và có đặc tính cơ học nổi trội hơn đặc tính cơ học của từng vật liệu thành phần. Vật liệu composite thường gồm một hoặc nhiều pha gián đoạn phân bố trong một pha liên tục. Pha gián đoạn được gọi là cốt, còn pha liên tục được gọi là nền. Về mặt cơ học, vật liệu cốt và vật liệu nền được coi là những vật liệu đồng chất đẳng hướng. Vật liệu cốt giúp cho vật liệu composite có khả năng chịu uốn kéo cao hơn, vật liệu nền đóng vai trò liên kết vật liệu cốt với nhau và truyền lực cơ học tới chúng, cũng như bảo vệ vật liệu cốt trước tác động của nền xung quanh. Một trong những ưu điểm nổi bật của vật liệu composite là có độ bền riêng và mô đun đàn hồi riêng cao, khả năng chống mài mòn tốt, dễ dàng đáp ứng các yêu cầu của người sử dụng bằng cách thiết kế và điều chỉnh công nghệ sản xuất, bố trí và liên kết vật liệu cốt và nền để tạo ra vật liệu có chất lượng mong muốn, phù hợp với yêu cầu sử dụng và có hiệu quả kinh tế cao. Tuy nhiên, quá trình sử dụng cho thấy vật liệu này cũng tồn tại một số nhược điểm, như độ bền của vật liệu phụ thuộc vào công nghệ chế tạo, nhạy cảm với độ ẩm và nhiệt độ của nền nhiều hơn các loại vật liệu khác.

Vật liệu composite được phân loại theo hình dạng của vật liệu tăng cường (sợi, hạt hay mảnh) hoặc theo tính chất của vật liệu nền (polimer, kim loại, gốm, cacbon).

Composite cốt hạt chứa các hạt nhỏ do đó được xem như đẳng hướng vì hạt được phân bố ngẫu nhiên trong vật liệu nền, phổ biến như hợp kim, gốm nhằm tăng cường độ bền, tăng khả năng chịu nhiệt và chịu oxi hóa,...

Composite cốt mảnh chứa các mảnh nhỏ của vật liệu tăng cường phân bố trong vật liệu nền. Vật liệu mảnh nhỏ thường là thủy tinh, mica, nhôm, bạc... Composite cốt mảnh có độ bền, độ cứng uốn cao, giá thành hạ, tuy nhiên các mảnh nhỏ khó sắp xếp và chỉ có số lượng hạn chế các vật liệu được sử dụng.

Composite cốt sợi có vật liệu tăng cường là các sợi ngắn hoặc sợi dài, như sợi thủy tinh, các bon, aramid. Vật liệu nền có thể là nhựa (epoxy, polimer), kim loại, gốm. Do đó, vật liệu composite cốt sợi là vật liệu dị hướng.

Đa số vật liệu composite là vật liệu nền polimer (epoxy, polyester, urethane) vì chúng có giá thành hạ, độ bền cao và dễ gia công.

Do nhiều ưu điểm nổi trội nên hiện tại và trong tương lai vật liệu composite được ứng dụng ngày càng rộng rãi trong hầu hết các lĩnh vực như: xây dựng, giao thông, thủy lợi, chế tạo máy, đóng tàu, hàng không vũ trụ,...

Với các kết cấu ống composite được sử dụng nhiều trong các lĩnh vực thủy nông, chuyên tải nước, nhiên liệu,... Đặc biệt trong lĩnh vực quân sự, vật liệu composite cũng được ứng dụng rất nhiều trong các chi tiết vũ khí, ống phóng tên lửa,... Dưới đây là các ví dụ về ứng dụng của composite trong lĩnh vực này.

*Vũ khí chống tăng:*

- Norinco type 70-162mm của Trung Quốc và Tiệp khắc là vũ khí chống tăng mà ống phóng của nó làm bằng vật liệu composite sợi thủy tinh.

- Giat Industries Apilas: Vũ khí chống tăng của Pháp - Đức có loa phụt bằng composite polimer sợi aramid, còn ống phóng là ống nhôm tăng bền bằng sợi.

- Ấn Độ cũng phát triển loại vũ khí chống tăng loại nhẹ RPG -22 NETO, lớp ngoài ống phóng làm bằng composite, bên trong bằng nhôm.

- Tên lửa vắc vai kolomna ( SA -18 Grouse), là loại tên lửa đất đối không tầm thấp, ống phóng làm bằng vật liệu composite có độ dài 1,708m.

#### *Loa phụt tên lửa:*

Hai cường quốc Nga, Mỹ đã ứng dụng vật liệu composite để chế tạo loa phụt của các tên lửa đạn đạo, tên lửa chiến lược mang đầu đạn hạt nhân. Nga đã chế tạo động cơ tên lửa 160 mã lực, nặng 160 kg bằng vật liệu cacbon có tầm bắn 2000 km, động cơ này có thể làm việc liên tục ở nhiệt độ 1.700<sup>0</sup>C trong 20 giờ mà không cần làm nguội. Cơ quan hàng không vũ trụ NASA đã sản xuất các loại loa phụt tên lửa chiến lược hoàn toàn bằng vật liệu composite cacbon.

*Buồng đốt động cơ tên lửa:* Với công nghệ composite polimer sợi cuốn tiên tiến đã được ứng dụng thành công vào việc chế tạo các vỏ động cơ rocket bằng sợi thủy tinh. Hiện nay composite sợi các bon hứa hẹn có những ưu việt hơn nữa, được ứng dụng trong các lĩnh vực kỹ thuật công nghệ cao. Phòng thí nghiệm phản lực của Trường đại học tổng hợp Caliphonia đã nghiên cứu chế tạo một số vỏ động cơ rocket bằng vật liệu composite polimer sợi cacbon/epoxy. Chương trình nghiên cứu này đã khẳng định khả năng thực tế của việc sử dụng vật liệu composite trong lĩnh vực công nghệ tên lửa.

Hiện nay ở nước ta bước đầu cũng đã ứng dụng vật liệu composite trong việc sản xuất thử nghiệm loạt nhỏ các phôi ống phóng Igla, các nòng súng bắn pháo hoa, ống phóng loạt lựu đạn, ống phóng rải mìn sát thương và các loại ống dẫn nước,...



**Hình 1.1.** Ống phóng Igla và phôi ống phóng

### ***1.1.2. Phương pháp tính toán kết cấu ống composite***

Để tính toán các kết cấu ống làm bằng vật liệu composite, phương pháp thuần nhất hóa được sử dụng phổ biến, nội dung của phương pháp này là các kết cấu không thuần nhất được mô hình hóa thành một kết cấu có vật liệu thuần nhất tương đương và các kết cấu được tính toán trên nền thuần nhất tương đương này.

Phương pháp thuần nhất hóa có thể được thực hiện theo hai loại mô hình: Mô hình cơ học vi mô và mô hình cơ học vĩ mô.

- Mô hình cơ học vi mô: với ý tưởng là thuần nhất hóa đối với các pha của vật liệu, tức là các đặc trưng cơ học của phân tử trong lớp sẽ được xác định thông qua các đặc trưng cơ học của các pha vật liệu thành phần. Hiện đã có một số công trình nghiên cứu về vấn đề này và đã đưa ra các phương

pháp tính toán đối với các vật liệu composite hai pha, nhờ đó các hằng số đàn hồi lớp và độ bền giới hạn có thể được dự đoán qua các đặc tính cơ bản của vật liệu và yếu tố hình học của pha (sự sắp xếp sợi trong nền cũng như thể tích của vật liệu cốt).

- Mô hình cơ học vĩ mô: việc tính toán được thực hiện cho các loại kết cấu composite lớp, quá trình thuần nhất được tiến hành đối với các lớp của kết cấu. Các đặc trưng cơ học của kết cấu tương đương được xác định thông qua các đặc trưng cơ học của các lớp trong kết cấu đó. Việc xây dựng và giải một số lượng lớn các hệ phương trình đối với từng lớp được thay bằng giải một hệ phương trình của kết cấu thuần nhất tương đương. Hướng tiếp cận này cho phép tính toán các kết cấu composite có cấu trúc phức tạp.

## **1.2. Tổng quan về tải trọng di động và các mô hình ống trụ chịu tải trọng dạng áp suất di động**

Từ lâu tải trọng di động đã được quan tâm trong việc tính toán, thiết kế các công trình giao thông, xây dựng, v.v. Do tính phức tạp của nó trong ứng xử cơ học và tính toán, nên tải trọng di động đưa vào mô hình tính thường được mô tả là dạng tải trọng động có chu kỳ, với điểm đặt không đổi. Đây là mô hình tải trọng phản ánh không thật chính xác sự làm việc thực của hệ, song do tính đơn giản trong tính toán, nên ngày nay mô hình này vẫn được sử dụng trong một số trường hợp. Thực tế đã chỉ ra rằng, ảnh hưởng của sự di chuyển tải trọng tới phản ứng động của kết cấu là rất đáng kể, có thể phát sinh những hiện tượng không mong muốn, như làm tăng các



giá trị chuyển vị, nội lực và có thể làm kết cấu bị phá huỷ. Do có ý nghĩa thực tiễn và quan trọng nên hơn 150 năm trước, vấn đề nghiên cứu dao động của kết cấu chịu tải trọng di động đã thu hút sự chú ý của nhiều nhà khoa học trên thế giới. Ngày nay, với sự phát triển của phương pháp và công cụ tính toán, nên các nhà khoa học trong nước và nước ngoài đã và đang xem xét kết cấu chịu tải trọng di động với việc xét đến cả quá trình và tính chất di chuyển của tải trọng, điều đó đã tiếp cận dần sát với sự làm việc thực tế của hệ hơn. Theo hướng này, tải trọng di động được xét có thể là một trong ba dạng như sau:

*Dạng thứ nhất:* Lực có điểm đặt di chuyển trên kết cấu;

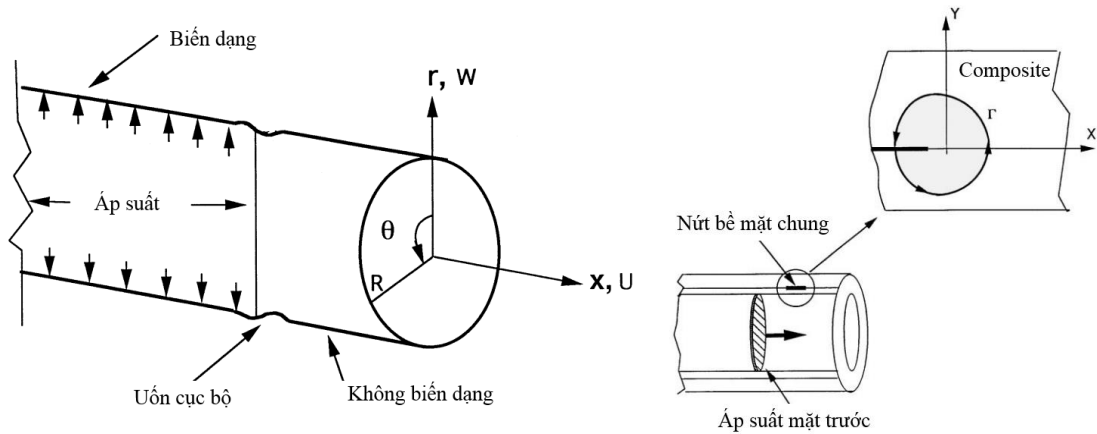
*Dạng thứ hai:* Tải trọng mang khối lượng cùng với lực tác dụng vào nó di chuyển trên kết cấu;

*Dạng thứ ba:* Hệ dao động di chuyển trên kết cấu, giữa hệ di động và kết cấu có các liên kết đàn hồi hoặc liên kết đàn hồi và cản nhớt.

Theo hướng nghiên cứu của luận án, tải trọng di động là tải trọng có điểm đặt di chuyển trong kết cấu ống. Tải trọng tác dụng lên kết cấu là tải trọng dạng áp suất di động di chuyển bên trong kết cấu ống composite với vận tốc  $v$  nào đấy. Tải trọng dạng áp suất di động hay gặp trong thực tế là tải trọng dạng áp suất của chất lỏng hoặc chất khí trong các đường ống dẫn, trong xy lanh thủy lực; trong các bình nén khí và trong các nòng súng pháo,...

Theo các nghiên cứu trên thế giới thì mô hình tải trọng dạng áp suất di động có các dạng sau:

Mô hình thứ nhất là mô hình vỏ trụ composite chịu áp suất di động của J T Tzeng [43] như trên hình 1.2. Phương trình chuyển động của mô hình này với mặt áp suất di động ( moving internal pressure front) được biểu thị dưới dạng hàm bước Heaviside:



**Hình 1.2.** Mô hình biến dạng và hệ trục tọa độ của vỏ trụ dưới tác dụng áp suất di động

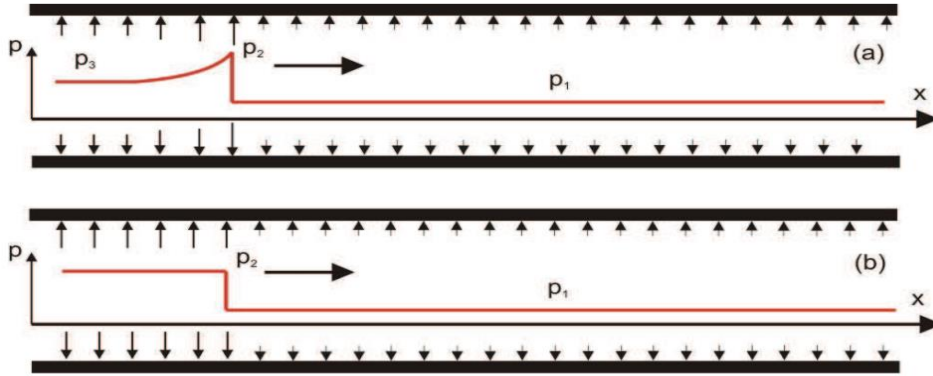
$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^2} + \frac{12(1 - \nu_{\theta x} \nu_{x\theta})}{h^2 R^2} D_\theta w = p(1 - H(x - vt)) \quad (1.1)$$

trong đó:  $w$  là chuyển vị hướng kính, phụ thuộc thời gian  $t$  và tọa độ  $x$ ;  $m$  là khối lượng, với  $m = \rho h$ ,  $\rho$  là mật độ vật liệu vỏ trụ,  $h$  là chiều dày vỏ trụ,  $p$  là áp suất bên trong,  $v$  là tốc độ mặt trước áp suất, có giá trị hằng số,  $D_x$  và  $D_\theta$  tương ứng là độ cứng uốn hướng trục và độ cứng uốn hướng kính.

Hàm tải  $p(1 - H(x - vt))$  trong phương trình (1.2) thể hiện mặt áp suất di động dọc trục với vận tốc  $v$ .  $H(x - vt)$  là hàm bước Heaviside, theo đó:

$$p(1 - H(x - vt)) = \begin{cases} 0, & x > vt \\ 1, & x \leq vt \end{cases} \quad (1.2)$$

Mô hình thứ hai là mô hình của Majid Mirzaei [52] được thể hiện trên hình 1.3, trong đó áp suất di động bên trong dạng nổ khí ga và xung nổ.



**Hình 1.3.** Mô hình áp suất di động bên trong (a) Nổ khí ga, (b) Xung nổ.

Hàm áp suất do nổ khí ga được cho bởi biểu thức sau:

$$p(t) = \begin{cases} p_1, & 0 < t < t_{cj} \\ p_3 + (p_2 - p_3) \exp\left(\frac{-(t - t_{cj})}{T}\right), & t_{cj} \leq t \leq \infty \end{cases} \quad (1.3)$$

trong đó:  $p_1$  là áp suất ban đầu của hỗn hợp khí,  $p_2$  là áp suất cực đại,  $p_3$  là áp suất cuối cùng,  $t$  là thời gian,  $T$  là hệ số phân rã theo cấp số nhân và  $t_{cj} = x/v_{cj}$  ( $v_{cj}$  là vận tốc Chapman- Jouguet) là thời gian cần thiết cho việc mặt nổ phía trước di chuyển tới vị trí  $x$ .

Hàm áp suất do nổ xung được cho bởi biểu thức sau:

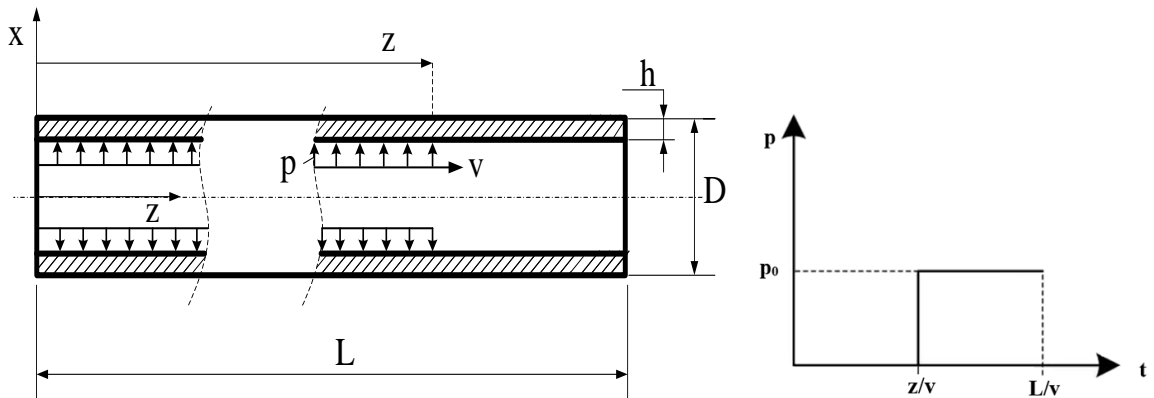
$$p(t) = \begin{cases} p_1, & 0 < t < t_{sh}, \\ p_2, & t_{sh} \leq t \leq \infty, \end{cases} \quad (1.4)$$

trong đó:  $t_{sh}$  là thời gian sóng xung kích đến vị trí cố định  $x$ .

Mô hình thứ ba là mô hình ống trụ chịu áp suất di động của Saranjam, B., Bakhshandeh, K., & Kadivar, M. H. [25] và Bakhshandeh, K., & Saranjam, B. [45]. Mô hình được thể hiện trên hình 1.4, tải trọng dạng áp suất di động dọc trong ống với vận tốc không đổi  $v$ . Áp suất phân bố tại mỗi điểm trên mặt cắt vuông góc trục ống được cho bởi:

$$p(z,t) = p_0 u(t - z/v) \quad (1.5)$$

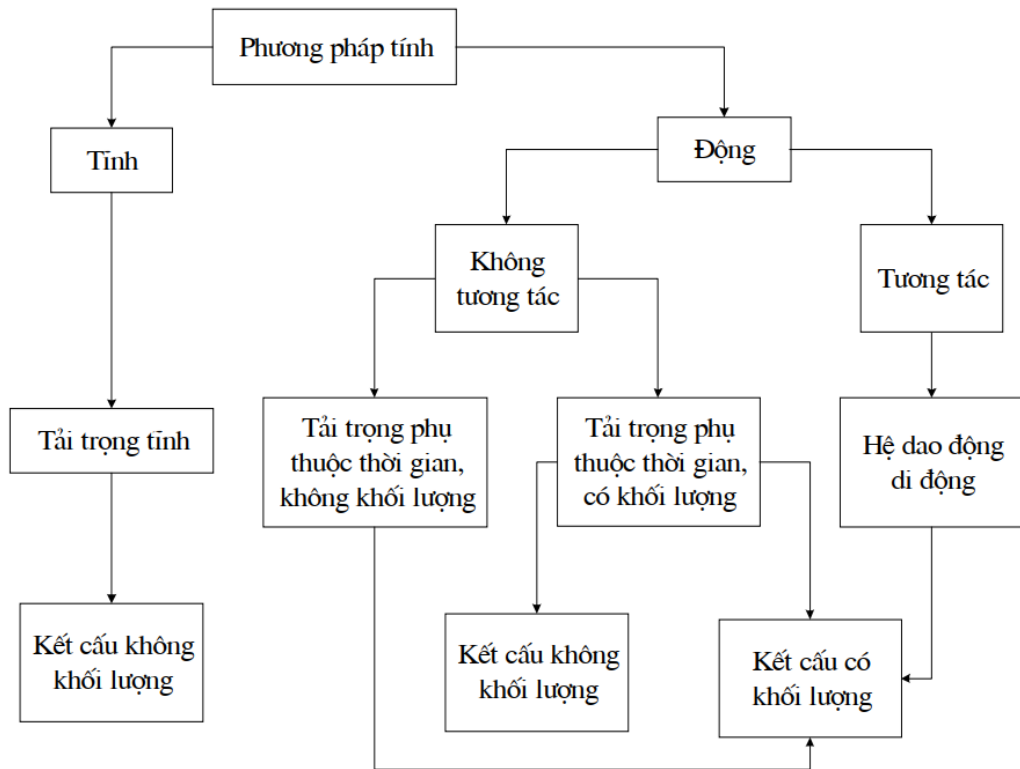
trong đó:  $p_0$  là biên độ áp suất,  $u$  là hàm bước,  $v$  là vận tốc di động dọc ống của áp suất.



**Hình 1.4.** Mô hình ống trụ tròn chịu áp suất di động

Đây là mô hình tác giả chọn để nghiên cứu trong luận án, khi ống trụ được thay bằng ống trụ composite được đặt trong nền đàn hồi hoặc trên các gối cứng chịu tác dụng của tải trọng dạng áp suất di động.

Phương pháp tính áp dụng cho kết cấu ống trụ composite chịu tác dụng của áp suất di động là phương pháp động không tương tác, trong đó tải trọng phụ thuộc thời gian, tải trọng không có khối lượng và kết cấu có khối lượng.



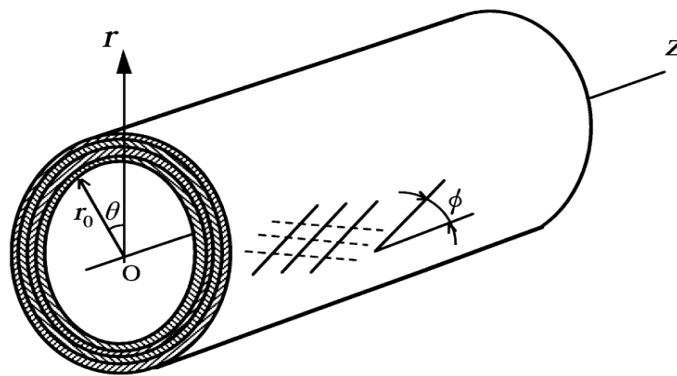
**Hình 1.5.** Phân loại phương pháp tính kết cấu ống chịu tải trọng di động

### 1.3. Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước.

Với các kết cấu composite dạng dầm, tầm chịu tác dụng của tải trọng di động đến nay cũng đã thu hút sự quan tâm nghiên cứu của nhiều nhà khoa học trong nước cũng như nước ngoài, kết quả đã đạt được những kết quả khả quan và có nhiều ứng dụng trong kỹ thuật và đời sống.

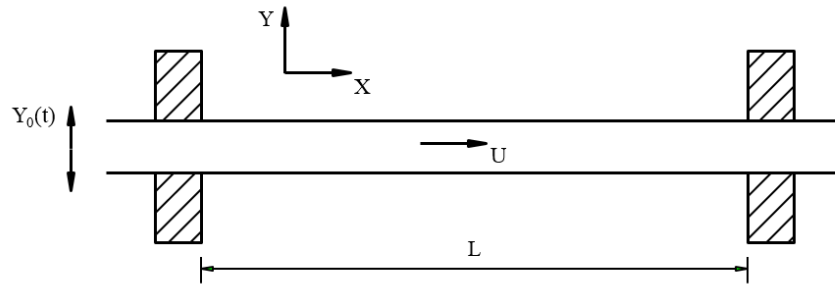
Với kết cấu vỏ hay ống chịu tải trọng di động nói chung là vấn đề khá phức tạp, đến nay vẫn còn ít công bố. Eldalil, K. M. S., Baz, A. M., & Tawfik, M. [47] tập trung phân tích dao động và ổn định của kết cấu vỏ trụ chịu tải trọng di động làm cơ sở cho việc điều khiển dao động của hệ bằng phương pháp tăng cứng vật liệu bởi hoá chất, bước đầu đã đạt được một số kết quả đáng kể. Nghiên cứu động lực học của ống dẫn bằng vật

liệu đẳng hướng chịu tải trọng dạng áp suất di động đã được các tác giả Saranjam, B., Bakhshandeh, K., & Kadivar, M. H. [25], Bakhshandeh, K., & Saranjam, B. [45], Pecinka, L. and Krasny, I. [50] tập trung giải quyết. Các tác giả đã phân tích ảnh hưởng của các tham số chiều dài, chiều dày và đường kính đến đáp ứng động lực học của ống. Sülü, İ. Y. [36] tính toán số và có được một số kết quả về trường ứng suất, biến dạng tại mặt cắt bất kỳ khi nghiên cứu ứng xử của ống composite chịu áp suất tĩnh tác dụng đều lên mặt trong ống.

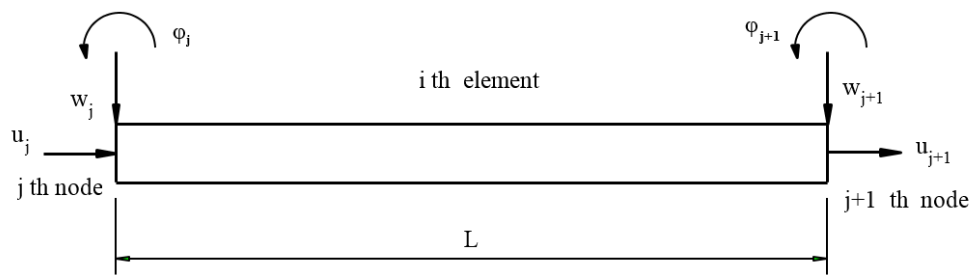


**Hình 1.6.** Ống composite lớp

Casamichele, P., Maugeri, M. and Motta, E. [61] sử dụng phương pháp giải tích thiết lập các quan hệ ứng xử phi tuyến của ống dẫn trong nền đàn hồi chịu áp lực tĩnh phân bố phía ngoài ống, trong đó nền được thay thế bởi hệ lò xo. Zhang, Y. L., Gorman, D. G., & Reese, J. M. [73] nghiên cứu dao động của ống chịu tác dụng của áp suất di động, trong đó sử dụng mô hình phần tử dầm mặt cắt vành khăn, mỗi nút 2 bậc tự do để thiết lập các quan hệ ứng xử của ống.



a) Mô hình ống chịu tải trọng di động và liên kết



b) Mô hình phần tử dầm mô phỏng ống

**Hình 1.7.** Ống chịu tải trọng di động và mô hình PTHH

Acharya, S. [67] sử dụng phương pháp PTHH tính toán và mô phỏng số quá trình chảy của chất lỏng trong ống. Trong nghiên cứu, tác giả đã xem xét ảnh hưởng của tốc độ dòng chảy, kích thước ống, tính chất cản, ... đến ứng xử cơ học của ống. Lee, H. [35] nghiên cứu ứng xử của ống dẫn trong nền chịu tác dụng của tải trọng trên bề mặt nền, trong đó các quan hệ ứng xử được thiết lập trên mô hình 3D và tính số với các kích thước ống dẫn khác nhau bằng phần mềm ABAQUS. Cũng sử dụng mô hình tính 3D và phần mềm ABAQUS, nhóm tác giả Neya, B.N., Ardeshir, M.A., Delavar, A.A., Bakhsh, M.Z.R. [24] đã mô phỏng thành công bài toán ống dẫn trong nền đàn hồi chịu tác dụng của tải trọng di động trên bề mặt nền mô tả phương tiện giao thông di

chuyển. Trong nghiên cứu, các tác giả đã có được một số kết quả số thể hiện sự phụ thuộc của các giá trị ứng suất lớn nhất trong ống với hướng di chuyển và tốc độ của tải trọng di động. Sử dụng phương pháp bán giải tích với mô hình chuyển vị bậc nhất, Ghannad, M., & Nejad, M. Z. [55] phân tích ứng xử đàn hồi cho bài toán ống chịu áp lực trong và ngoài, trong các tính toán số các tác giả đã so sánh kết quả giữa phương pháp giải tích với phương pháp PTHH để đánh giá ưu điểm của từng phương pháp áp dụng. Azarpazhoo, S. A., & Kazemi, S. R. [68] sử dụng lý thuyết chuyển vị bậc 3 và phương pháp PTHH để thiết lập các phương trình nhằm phân tích động lực học ống dẫn vật liệu dị hướng, chịu tác dụng của áp suất tĩnh di động trong ống. Kết quả có được các đáp ứng chuyển vị hướng kính của ống theo thời gian và chúng được so sánh giữa các phương pháp PTHH, phương pháp giải tích với các mô hình chuyển vị: bậc nhất và bậc ba.

M.Xia , H. Takayanagi ,K. Kemmochi [58] phân tích động học của ống composite nhiều lớp dưới tác dụng áp suất bên trong. A.H.Sofiyev [19] dựa trên lý thuyết vỏ trụ, phân tích đáp ứng động lực học của vỏ trụ FGM dưới tác dụng của tải trọng di động, trong nghiên cứu đã xét ảnh hưởng của hệ số động học, tỉ số bán kính và chiều dày vỏ trụ và vận tốc tới hạn đến đáp ứng động vỏ trụ dưới tác dụng tải trọng di động. A.R. de Faria [22] sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn phân tích đáp ứng động lực học của panel trụ dưới tác dụng tải trọng di động, các tác giả đã khảo sát ảnh hưởng



của độ cong panel trụ, vận tốc di chuyển và khối lượng của tải trọng đến đáp ứng động của vỏ.

G.G. Sheng, X. Wang [33] dựa trên lý thuyết biến dạng cắt bậc ba, nghiên cứu ứng xử động lực học của vỏ trụ FGM với các lớp PZT dưới tác dụng tải trọng di động. Nghiên cứu đã có được phương trình xấp xỉ thể hiện quan hệ giữa vận tốc tới hạn và tần số dao động riêng, quan hệ giữa chuyển vị và đáp ứng cảm biến của vỏ trụ, từ đó giúp ích trong việc ứng dụng và thiết kế các cấu trúc cảm biến thông minh (smart sensory structures).

M. Bouhafis, Z. Sereir, A. Chateauneuf [54] phân tích xác suất của đáp ứng động lực học của ống trụ dày dưới tác dụng áp suất bên trong. Trong đó phương pháp Monte Carlo đã được sử dụng để phân tích bài toán, kết quả nghiên cứu cho thấy độ dày và sự thay đổi áp suất bên trong ống là các yếu tố chính làm ảnh hưởng đến trường ứng suất và biến dạng của ống.

Đối với các công trình trong nước, việc nghiên cứu về tải trọng di động và tính toán kết cấu chịu tải trọng di động được bắt đầu chậm hơn. Từ những năm 1980 trở lại đây, đặc biệt từ khi công nghệ máy tính điện tử phát triển, các nhà khoa học Việt Nam đã chú ý đến vấn đề này. Theo hướng nghiên cứu này, tác giả Đỗ Xuân Thọ [11] đã nghiên cứu, tính toán kết cấu dầm chịu tải trọng di động, với quan niệm vật thể di động là vật rắn tuyệt đối, liên kết với dầm thông qua phần tử đàn hồi và phần tử cản nhớt mắc song song, tác giả đưa ra 2 mô hình, mô hình thứ nhất cũng gồm một

dầm liên tục tựa trên các gối đỡ đàn hồi tuyến tính, mô hình thứ 2 là dầm tựa trên các gối đỡ phi tuyến dạng Duffing.

Việc ứng dụng phương pháp PTHH đối với kết cấu hệ thanh chịu tác dụng của một số dạng tải trọng di động khác nhau được các tác giả ở Học viện Kỹ thuật quân sự: Hoàng Xuân Lượng, Đỗ Anh Cường, Nguyễn Thái Chung và Tạ Hữu Vinh [4], [5], [17] tập trung nghiên cứu, trong đó đã xây dựng thuật toán PTHH và các chương trình mô phỏng dao động của hệ thanh dầm chịu tác dụng của các dạng tải trọng di động, như: khối lượng di động, hệ dao động di động, tác dụng đồng thời của tải trọng di động và lực khí động, tải trọng di động và động đất.

Lê Ngọc Lý [8] đã xây dựng thuật toán PTHH và chương trình máy tính phân tích động lực học kết cấu tấm mỏng trên các liên kết cứng tuyệt đối và liên kết đàn hồi tuyến tính chịu tác dụng của hai mô hình tải trọng di động: khối lượng di động và hệ dao động di động. Khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố như: vật liệu kết cấu, tính chất của tải trọng, thông số hình học của kết cấu, tính chất của liên kết, v.v đến đặc trưng dao động của tấm.

Bùi Tiến Cường [6] đã xây dựng bài toán ổn định của tấm, vỏ trụ composite lớp có tính đến yếu tố phi tuyến hình học dưới tác dụng của tải trọng động được mô tả bằng phương trình vi phân chuyển động phi tuyến phụ thuộc thời gian. Tác giả đã ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn để xây dựng các ma trận phần tử tấm phẳng composite sử dụng tính cho vỏ trụ thoải, thiết lập thuật toán và chương trình giải bài toán ổn định tĩnh, ổn định động

của vỏ trụ thoải composite lớp với các dạng tải trọng khác nhau. Khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố hình học và vật liệu của vỏ composite lớp, ảnh hưởng của biên độ tải trọng, tần số tải trọng, hệ số cản và lỗ khoét đến khả năng ổn định của vỏ trụ composite lớp.

Nguyễn Chiến Hạm [7] đã nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng xung nhiệt đến độ bền của ống phóng composite cốt sợi sử dụng trong các tổ hợp phóng loạt, tác giả đã giải quyết được bài toán nhiệt đàn hồi tuyến tính ứng dụng cho kết cấu đặc trưng dạng ống trụ bằng vật liệu không thuần nhất, bất đẳng hướng và chịu tải xung, nhiệt đồng thời.

Lê Tân [9] đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để nghiên cứu sự tương tác giữa kết cấu ống dẫn và nền san hô dưới tác dụng đồng thời của các dạng áp lực trong ống và sóng xung kích do nổ gây ra. Tác giả khảo sát các yếu tố hình học, tải trọng, vật lý của ống dẫn và nền đến sự làm việc của ống dẫn trong nền san hô.

Nhìn chung, bài toán ống dẫn chịu tác dụng của tải trọng dạng áp suất di động là khá phổ biến và kết quả nghiên cứu về nó đến nay còn hạn chế, một số nghiên cứu chủ yếu tập trung vào 2 dạng bài toán: áp suất tĩnh và áp suất có giá trị không đổi di chuyển dọc ống hoặc di chuyển trên bề mặt nền bao quanh ống. Bên cạnh đó, mô hình tính đơn giản hoặc sử dụng phần mềm để mô phỏng đang được sử dụng phổ biến, cho nên kết quả nghiên cứu có được hoặc là chưa thật chính xác (do mô hình tính đơn giản) hoặc là có kết quả đa dạng nhưng không có thuật toán tường minh và cũng khó làm

chủ phương pháp tính (sử dụng phần mềm để mô phỏng số). Do đó, nghiên cứu bài toán ống dẫn chịu tác dụng của tải trọng dạng áp suất di động với các điều kiện tải trọng, liên kết, vật liệu khác nhau là vấn đề rất có ý nghĩa hiện nay nó phục vụ cho cả phát triển kinh tế xã hội và quốc phòng - an ninh.

#### **1.4. Kết quả nghiên cứu đạt được từ các công trình đã công bố**

Qua nghiên cứu, phân tích các công trình đã công bố của các tác giả trong nước và nước ngoài, có thể nhận thấy các kết quả chính mà các công trình nghiên cứu trên đã đạt được là:

- Bài toán tĩnh và động lực học của ống dẫn chịu tác dụng của tải trọng không thay đổi vị trí đã được một số tác giả trong nước và nước ngoài tập trung nghiên cứu, phương pháp sử dụng chủ yếu là phương pháp PTHH, điều kiện liên kết là liên kết cứng và ống nằm trong nền đàn hồi.

- Các kết cấu vỏ trụ kín, đường ống chịu tác dụng của áp suất di động bước đầu đã được chú ý nghiên cứu, song mô hình tính, điều kiện liên kết còn đơn giản, vật liệu chủ yếu là đẳng hướng và kết quả đạt được chưa nhiều, thuật toán và chương trình tính vẫn là những ẩn số. Đối với ống dẫn làm bằng vật liệu composite nằm trong nền đàn hồi chịu tác dụng của áp suất di động, trong đó sử dụng mô hình phần tử vỏ cong để mô phỏng hình học của ống và cường độ áp suất thay đổi theo thời gian là những vấn đề đến nay còn rất ít nghiên cứu. Ngoài ra, kết quả nghiên cứu thực nghiệm đối với bài toán dạng này còn rất hạn chế, chủ yếu là một số kết quả thí

nghiệm tĩnh đối với ống chịu áp suất trong hoặc áp suất phân bố trên thành ống.

### **1.5. Các vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu**

- Nghiên cứu xây dựng mô hình, phương pháp tính toán để phân tích động lực học kết cấu ống trụ làm bằng các loại vật liệu khác nhau (đăng hướng, dị hướng, FGM, composite áp điện) trong các điều kiện liên kết khác nhau (tựa cứng, tựa đàn hồi, nằm trong nền biến dạng) chịu tác dụng của tải trọng di động như khối lượng di động, hệ dao động di động, áp suất di động tác dụng trực tiếp lên ống hoặc trên bề mặt nền bao quanh ống.

- Tính toán ống trụ trong nền đàn hồi phi tuyến, đàn nhớt chịu tác dụng của áp suất di động theo mô hình 3D, trong đó có xét đến tính tương tác giữa ống và nền.

- Nghiên cứu thực nghiệm trên kết cấu ống trụ làm bằng vật liệu đăng hướng, composite, cơ tính biến thiên với các điều kiện liên kết khác nhau (liên kết cứng, đàn hồi, trong môi trường đàn hồi, trong môi trường nước, vv) chịu tác dụng của tải trọng như: khối lượng, áp suất di động.

## **Kết luận chương 1**

Tính toán kết cấu ống trụ chịu tác dụng của áp suất di động có nhu cầu cao và ngày càng được ứng dụng nhiều trong các lĩnh vực kỹ thuật, song kết quả đạt được vẫn còn hạn chế, việc nghiên cứu thực nghiệm đối với các kết cấu ống chịu tác dụng của áp suất di động còn ít kết quả.

Vì vậy, vấn đề **“Nghiên cứu tính toán ống trụ composite chịu tác dụng của áp suất di động”** được tác giả chọn làm nội dung nghiên cứu của luận án, trong đó tập trung giải quyết các nội dung chính sau:

- Trình bày tổng quan về vật liệu composite, ứng dụng của nó trong thực tiễn. Tổng quan về áp suất di động, các mô hình tải trọng dạng áp suất di động, làm cơ sở cho việc lựa chọn nội dung, phương pháp giải quyết vấn đề của luận án đặt ra.

- Xây dựng thuật toán PTHH và chương trình máy tính phân tích phi tuyến động lực học ống trụ composite đặt trong nền đàn hồi một hệ số theo mô hình nền Winkler chịu tác dụng của áp suất di động, trong đó cường độ của áp suất không đổi hoặc thay đổi theo thời gian.

- Nghiên cứu mô phỏng số xem xét ảnh hưởng của các yếu tố: vật liệu kết cấu, tính chất của tải trọng, thông số hình học của kết cấu, tính chất của liên kết,... đến đáp ứng động lực học phi tuyến của ống trụ composite.

- Nghiên cứu thực nghiệm xác định đáp ứng biến dạng, gia tốc của kết cấu ống trụ composite đặt trên các liên kết đàn hồi và liên kết cứng chịu tác dụng của áp suất di động. Kết quả thí nghiệm là một trong các cơ sở cho việc kiểm tra độ tin cậy của chương trình tính do tác giả xây dựng trong chương 2 của luận án.

## CHƯƠNG 2

### PHÂN TÍCH PHI TUYẾN ĐỘNG LỰC HỌC ỐNG TRỤ COMPOSITE CHỊU TÁC DỤNG CỦA ÁP SUẤT DI ĐỘNG

#### 2.1. Đặt vấn đề

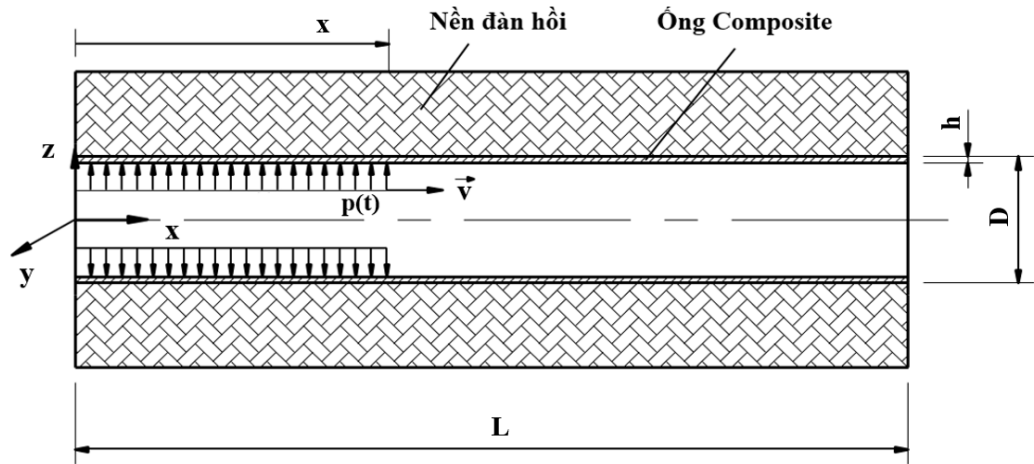
Từ các nội dung và mục tiêu đặt ra trong chương 1, ở chương này tác giả xây dựng thuật toán phần tử hữu hạn (PTHH), chương trình máy tính nhằm phân tích phi tuyến động lực học ống trụ composite lớp đặt trong nền đàn hồi một hệ số, chịu tác dụng của áp suất di động dọc theo trục ống. Với thuật toán, chương trình tính lập được có thể giải bài toán với các loại liên kết khác (cứng, đàn hồi) một cách thuận lợi và đảm bảo độ tin cậy.

#### 2.2. Đặt bài toán, các giả thiết

Ống trụ composite chiều dài  $L$ , đường kính ngoài  $D$ , chiều dày  $h$ . Tỉ số  $L/D > 3$  thì ống được xem là ống dài [ 25], [45]. Ống đặt trong nền đàn hồi với mô hình Winkler có hệ số nền  $k_0$ , chịu áp suất  $p(t)$  phân bố đều theo chu vi ở bên trong ống và di chuyển dọc trục ống với vận tốc  $v$  (Hình 2.1). Ống trụ được mô hình hoá bởi các phần tử vỏ cong.

Mô hình bài toán được xây dựng trên cơ sở các giả thiết:

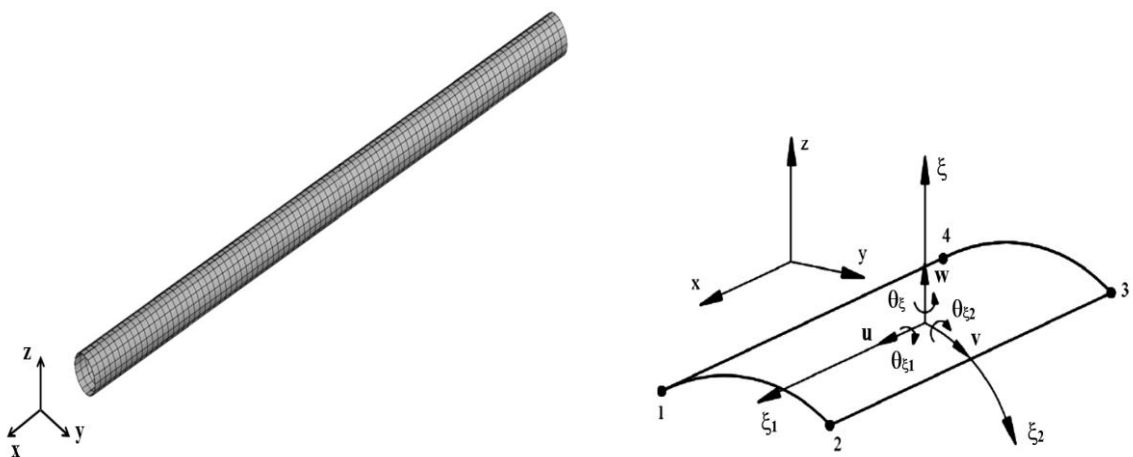
- Ống trụ composite lớp với vật liệu các lớp đàn hồi tuyến tính, các lớp đồng phương và bám dính lý tưởng với nhau;
- Tại mỗi thời điểm, áp suất  $p(t)$  phân bố đều và liên tục đến một mặt cắt ngang trong ống;
- Kích thước chiều dày ống thỏa mãn lý thuyết Reissner - Mindlin.



**Hình 2.1.** Mô hình ống trụ composite lớp đặt trong nền đàn hồi chịu tác dụng áp suất di động

### 2.3. Quan hệ ứng xử cơ học của phần tử vỏ cong mô phỏng ống composite lớp

Xét ống trụ composite gồm  $n$  lớp, các lớp composite đồng phương, đặt trong hệ trục tọa độ tổng thể  $(x, y, z)$ , được rời rạc hóa bởi hữu hạn các phần tử vỏ cong 4 điểm nút, mỗi nút có 6 bậc tự do  $(u_i, v_i, w_i, \theta_{\xi_{1i}}, \theta_{\xi_{2i}}, \theta_{\xi_i})$  nằm trong hệ tọa độ cục bộ  $(\xi_1, \xi_2, \xi)$ , trong đó mặt  $(\xi_1, \xi_2)$  trùng với mặt trung bình của phần tử - Hình 2.2.



**Hình 2.2.** Mô hình phần tử hữu hạn của ống trụ composite và phần tử vỏ cong



### 2.3.1. Quan hệ biến dạng và chuyển vị

Sử dụng lý thuyết biến dạng trượt bậc nhất, chuyển vị tại một điểm có tọa độ  $(\xi_1, \xi_2, \xi)$  thuộc phần tử vỏ, ở thời điểm  $t$  được biểu diễn như sau [12], [63]:

$$\begin{aligned} u(\xi_1, \xi_2, \xi, t) &= u_0(\xi_1, \xi_2, t) + \xi \theta_{\xi_2}(\xi_1, \xi_2, t), \\ v(\xi_1, \xi_2, \xi, t) &= v_0(\xi_1, \xi_2, t) - \xi \theta_{\xi_1}(\xi_1, \xi_2, t), \\ w(\xi_1, \xi_2, \xi, t) &= w_0(\xi_1, \xi_2, t), \end{aligned} \quad (2.1)$$

trong đó:  $u, v$  và  $w$  tương ứng là chuyển vị dài dọc theo các trục  $\xi_1, \xi_2$  và  $\xi$ ;  $u_0, v_0$  và  $w_0$  tương ứng là chuyển vị dài dọc theo các trục  $\xi_1, \xi_2, \xi$  của điểm trên mặt trung bình ( $\xi = 0$ );  $\theta_{\xi_1}, \theta_{\xi_2}$  lần lượt là góc xoay của pháp tuyến mặt cắt của vỏ theo các trục  $\xi_1$  và  $\xi_2$ .

Quan hệ giữa các thành phần vector biến dạng với các thành phần chuyển vị (2.1) tuân theo biểu thức [12], [26], [64]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\xi_1} &= \frac{\partial u}{\partial \xi_1} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial \xi_1} \right)^2 = \frac{\partial u_0}{\partial \xi_1} + \xi \frac{\partial \theta_{\xi_2}}{\partial \xi_1} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial \xi_1} \right)^2 = \frac{\partial u_0}{\partial \xi_1} + \xi \kappa_{\xi_1} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial \xi_1} \right)^2, \\ \varepsilon_{\xi_2} &= \frac{\partial v}{\partial \xi_2} + \frac{w}{R} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial \xi_2} \right)^2 = \frac{\partial v_0}{\partial \xi_2} + \xi \frac{\partial \theta_{\xi_1}}{\partial \xi_2} + \frac{w_0}{R} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial \xi_2} \right)^2 \\ &= \frac{\partial v_0}{\partial \xi_2} + \xi \kappa_{\xi_2} + \frac{w_0}{R} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial \xi_2} \right)^2, \\ \gamma_{\xi_1 \xi_2} &= \left( \frac{\partial u}{\partial \xi_2} + \frac{\partial v}{\partial \xi_1} \right) + \frac{\partial w}{\partial \xi_1} \cdot \frac{\partial w}{\partial \xi_2} = \left( \frac{\partial u_0}{\partial \xi_2} + \frac{\partial v_0}{\partial \xi_1} \right) + \xi \left( \frac{\partial \theta_{\xi_2}}{\partial \xi_2} - \frac{\partial \theta_{\xi_1}}{\partial \xi_1} \right) + \frac{\partial w_0}{\partial \xi_1} \cdot \frac{\partial w_0}{\partial \xi_2} \\ &= \left( \frac{\partial u_0}{\partial \xi_2} + \frac{\partial v_0}{\partial \xi_1} \right) + \xi \kappa_{\xi_1 \xi_2} + \frac{\partial w_0}{\partial \xi_1} \cdot \frac{\partial w_0}{\partial \xi_2}, \end{aligned} \quad (2.2a)$$

$$\begin{aligned}\gamma_{\xi_1\xi} &= \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \xi} + \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial \xi_1} = \frac{\partial \mathbf{w}_0}{\partial \xi_1} + \theta_{\xi_2}, \\ \gamma_{\xi_2\xi} &= \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \xi} + \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial \xi_2} = \frac{\partial \mathbf{w}_0}{\partial \xi_2} - \theta_{\xi_1}.\end{aligned}\tag{2.2b}$$

với:  $d\xi_1 = dx$ ,  $d\xi_2 = dy/\cos\alpha_2$ ,  $d\xi = dz$ ,  $\alpha_2$  - góc hợp bởi tiếp tuyến trục  $\xi_2$  và trục  $y$ .

Hoặc viết lại (2.2a) dưới dạng ma trận:

$$\begin{aligned}\begin{Bmatrix} \varepsilon_{\xi_1} \\ \varepsilon_{\xi_2} \\ \gamma_{\xi_1\xi_2} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial}{\partial \xi_2} & \frac{\partial}{\partial \xi_1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_0 \\ \mathbf{v}_0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{w}_0 \end{Bmatrix} + \xi \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial}{\partial \xi_1} \\ -\frac{\partial}{\partial \xi_2} & 0 \\ -\frac{\partial}{\partial \xi_2} & \frac{\partial}{\partial \xi_1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_{\xi_1} \\ \theta_{\xi_2} \end{Bmatrix} + \\ &+ \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{w}_0}{\partial \xi_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial \mathbf{w}_0}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial \mathbf{w}_0}{\partial \xi_2} & \frac{\partial \mathbf{w}_0}{\partial \xi_1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial}{\partial \xi_2} \end{Bmatrix} \mathbf{w}_0,\end{aligned}\tag{2.3}$$

Hay:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{\xi_1} \\ \varepsilon_{\xi_2} \\ \gamma_{\xi_1\xi_2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{\xi_1}^o \\ \varepsilon_{\xi_2}^o \\ \gamma_{\xi_1\xi_2}^o \end{Bmatrix} + \xi \begin{Bmatrix} \mathbf{K}_{\xi_1} \\ \mathbf{K}_{\xi_2} \\ \mathbf{K}_{\xi_1\xi_2} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_{\xi_1}^N \\ \varepsilon_{\xi_2}^N \\ \gamma_{\xi_1\xi_2}^N \end{Bmatrix},\tag{2.4}$$

với:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{\xi_1}^0 \\ \varepsilon_{\xi_2}^0 \\ \gamma_{\xi_1\xi_2}^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial}{\partial \xi_2} & \frac{\partial}{\partial \xi_1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_0 \\ \mathbf{v}_0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\mathbf{R}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{w}_0 \end{Bmatrix} = \{\varepsilon^0\},$$

$$\{\mathbf{k}\} = \left\{ \mathbf{k}_{\xi_1} \quad \mathbf{k}_{\xi_2} \quad \mathbf{k}_{\xi_1\xi_2} \right\}^T = \left\{ \frac{\partial \theta_{\xi_2}}{\partial \xi_1} \quad -\frac{\partial \theta_{\xi_1}}{\partial \xi_2} \quad \left( -\frac{\partial \theta_{\xi_1}}{\partial \xi_2} + \frac{\partial \theta_{\xi_2}}{\partial \xi_1} \right) \right\}^T,$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{\xi_1}^N \\ \varepsilon_{\xi_2}^N \\ \gamma_{\xi_1\xi_2}^N \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{\partial w_0}{\partial \xi_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial w_0}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial w_0}{\partial \xi_2} & \frac{\partial w_0}{\partial \xi_1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial}{\partial \xi_2} \end{Bmatrix} w_0 = \{\varepsilon^N\}.$$

Đặt:

$$[\mathbf{D}_\varepsilon] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial}{\partial \xi_2} & \frac{\partial}{\partial \xi_1} \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{D}_\kappa] = \xi \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial}{\partial \xi_1} \\ -\frac{\partial}{\partial \xi_2} & 0 \\ -\frac{\partial}{\partial \xi_1} & \frac{\partial}{\partial \xi_2} \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{D}_R] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\mathbf{R}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[\mathbf{A}(\mathbf{w})] = \begin{bmatrix} \frac{\partial w_0}{\partial \xi_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial w_0}{\partial \xi_2} \\ \frac{\partial w_0}{\partial \xi_2} & \frac{\partial w_0}{\partial \xi_1} \end{bmatrix}, \quad \{\mathbf{D}_N\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial}{\partial \xi_2} \end{Bmatrix}.$$

Do đó, công thức (2.3) được viết lại:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_{\xi_1} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\xi_2} \\ \gamma_{\xi_1\xi_2} \end{cases} = [\mathbf{D}_\varepsilon] \begin{cases} \mathbf{u}_0 \\ \mathbf{v}_0 \end{cases} + [\mathbf{D}_R] \begin{cases} 0 \\ 0 \\ \mathbf{w}_0 \end{cases} + [\mathbf{D}_\kappa] \begin{cases} \boldsymbol{\theta}_{\xi_1} \\ \boldsymbol{\theta}_{\xi_2} \end{cases} + \frac{1}{2} [\mathbf{A}(\mathbf{w})] \{\mathbf{D}_N\} \mathbf{w}_0 = \quad (2.5)$$

$$= \{\boldsymbol{\varepsilon}^0\} + \xi \{\boldsymbol{\kappa}\} + \{\boldsymbol{\varepsilon}^N\} = \{\boldsymbol{\varepsilon}_b^L\} + \{\boldsymbol{\varepsilon}^N\} = \{\boldsymbol{\varepsilon}_b\}.$$

Và công thức (2.2b) cũng được viết lại:

$$\begin{cases} \gamma_{\xi_1\xi} \\ \gamma_{\xi_2\xi} \end{cases} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi_1} & 0 & 1 \\ \frac{\partial}{\partial \xi_2} & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} \mathbf{w}_0 \\ \boldsymbol{\theta}_{\xi_1} \\ \boldsymbol{\theta}_{\xi_2} \end{cases} = [\{\mathbf{D}_N\} \quad -[\mathbf{I}_s]] \begin{cases} \mathbf{w}_0 \\ \boldsymbol{\theta}_{\xi_1} \\ \boldsymbol{\theta}_{\xi_2} \end{cases} = \{\boldsymbol{\varepsilon}_s\}, \quad (2.6)$$

trong đó:

$$\{\mathbf{D}_N\} = \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi_1} \quad \frac{\partial}{\partial \xi_2} \right\}^T, \quad [\mathbf{I}_s] = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Từ (2.5) và (2.6) ta có quan hệ biến dạng - chuyển vị:

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}_b\} = \{\boldsymbol{\varepsilon}_b^L\} + \{\boldsymbol{\varepsilon}^N\} = \left( [\mathbf{D}_b^L] + \frac{1}{2} [\mathbf{D}^N(\mathbf{w})] \right) \{\hat{\mathbf{u}}\}, \quad (2.7)$$

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}_s\} = [\mathbf{D}_s] \{\hat{\mathbf{u}}\}, \quad (2.8)$$

trong đó:  $\{\boldsymbol{\varepsilon}_b^L\} = \{\boldsymbol{\varepsilon}^0\} + \xi \{\boldsymbol{\kappa}\}$  là vectơ biến dạng tuyến tính,

$\{\boldsymbol{\varepsilon}^N\}$  là vectơ biến dạng phi tuyến,

$$[\mathbf{D}_b^L] = [\mathbf{D}_\varepsilon] \quad \{\mathbf{D}_R\} \quad [\mathbf{D}_\kappa], \quad [\mathbf{D}^N(\mathbf{w})] = \begin{bmatrix} [0] & [\mathbf{A}(\mathbf{w})] \{\mathbf{D}_N\} & [0] \\ 3 \times 2 & & 3 \times 2 \end{bmatrix},$$

$$\{\mathbf{D}_R\} = \left\{ 0 \quad \frac{1}{R} \quad 0 \right\}^T, \quad [\mathbf{D}_s] = \begin{bmatrix} [0] & \{\mathbf{D}_N\} & -[\mathbf{I}_s] \\ 2 \times 2 & & \end{bmatrix},$$

$$\{\hat{\mathbf{u}}\} = \left\{ \mathbf{u}_0 \quad \mathbf{v}_0 \quad \mathbf{w}_0 \quad \boldsymbol{\theta}_{\xi_1} \quad \boldsymbol{\theta}_{\xi_2} \right\}^T.$$

Hệ thức (2.2) được viết lại như sau:

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\xi_1} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\xi_2} \\ \gamma_{\xi_1\xi_2} \\ \gamma_{\xi_2\xi} \\ \gamma_{\xi_1\xi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\boldsymbol{\varepsilon}_b\} \\ \{\boldsymbol{\varepsilon}_s\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\boldsymbol{\varepsilon}_b^L\} + \{\boldsymbol{\varepsilon}^N\} \\ \{\boldsymbol{\varepsilon}_s\} \end{Bmatrix}. \quad (2.9)$$

### 2.3.2. Quan hệ ứng suất và biến dạng

Theo định luật Hook, giả thiết bỏ qua ứng suất pháp theo phương trục  $\xi$  ( $\sigma_\xi = 0$ ). Quan hệ ứng suất - biến dạng của lớp thứ  $k$  trong hệ tọa độ cục bộ được xác định như sau [6], [14], [15]:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{\xi_1} \\ \sigma_{\xi_2} \\ \tau_{\xi_1\xi_2} \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\xi_1} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\xi_2} \\ \gamma_{\xi_1\xi_2} \end{Bmatrix}^{(k)}, \quad (2.10a)$$

$$\begin{Bmatrix} \tau_{\xi_2\xi} \\ \tau_{\xi_1\xi} \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{44} & \bar{Q}_{45} \\ \bar{Q}_{45} & \bar{Q}_{55} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \gamma_{\xi_2\xi} \\ \gamma_{\xi_1\xi} \end{Bmatrix}^{(k)}, \quad (2.10b)$$

Biểu thức (2.10) có thể viết lại:

$$\{\boldsymbol{\sigma}\}^{(k)} = [\bar{\mathbf{Q}}]^{(k)} \{\boldsymbol{\varepsilon}\}^{(k)}, \quad (2.11)$$

trong đó:

$$[\bar{\mathbf{Q}}]^k = \begin{bmatrix} [\bar{\mathbf{Q}}_b]^{(k)} & [0] \\ [0] & [\bar{\mathbf{Q}}_s]^{(k)} \end{bmatrix} : \text{ma trận hệ số độ cứng uốn của lớp } k.$$

$$[\bar{Q}_b]^{(k)} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^{(k)} : \text{ma trận hệ số độ cứng màng của lớp } k;$$

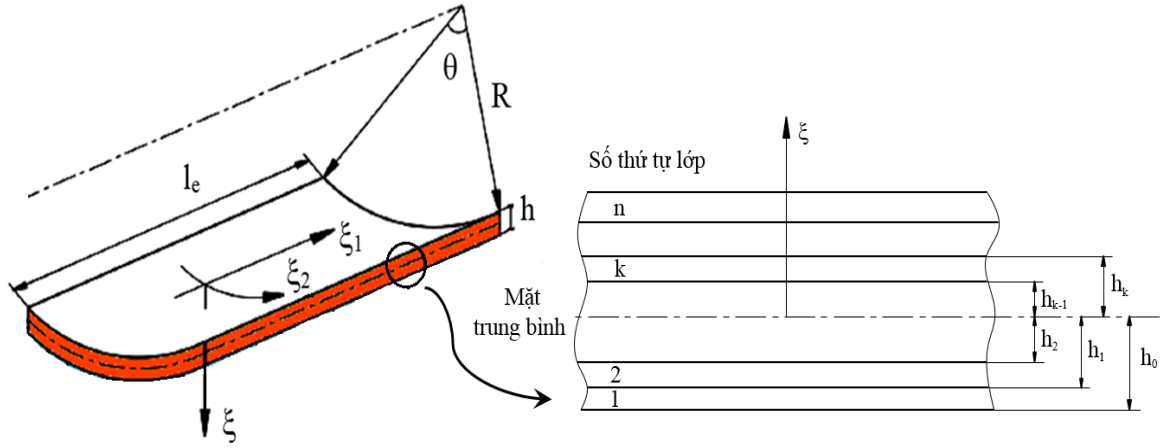
$$[\bar{Q}_s]^{(k)} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{44} & \bar{Q}_{45} \\ \bar{Q}_{45} & \bar{Q}_{55} \end{bmatrix}^{(k)} : \text{ma trận hệ số độ cứng cắt của lớp thứ } k.$$

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \psi + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \psi \cos^2 \psi + Q_{22} \sin^4 \psi, \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - Q_{66}) \sin^2 \psi \cos^2 \psi + Q_{12} (\sin^4 \psi + \cos^4 \psi), \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \psi + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \psi \cos^2 \psi + Q_{22} \cos^4 \psi, \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \psi \cos^3 \psi + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3 \psi \cos \psi, \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \psi \cos \psi + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \psi \cos^3 \psi, \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \psi \cos^2 \psi + Q_{66} (\sin^4 \psi + \cos^4 \psi), \\ \bar{Q}_{44} &= \frac{1}{2} (C_{22} - C_{23}) \cos^2 \psi + C_{44} \sin^2 \psi; \bar{Q}_{45} = (C_{44} - \frac{1}{2} (C_{22} - C_{23})) \sin \psi \cos \psi; \\ \bar{Q}_{55} &= \frac{1}{2} (C_{22} - C_{23}) \sin^2 \psi + C_{55} \cos^2 \psi; \end{aligned} \tag{2.12}$$

với:  $Q_{ij}$  và  $C_{ij}$  là các hằng số độ cứng của vật liệu composite lớp sợi đồng phương, được xác định từ mô đun kỹ thuật theo các biểu thức sau:

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{66} = G_{12}, \\ C_{22} &= \frac{1 - \nu_{13}\nu_{23}}{E_1 E_2 \Delta}; \quad C_{23} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{E_1 E_2 \Delta}; \quad C_{44} = G_{23}; \quad C_{55} = G_{13}; \\ \Delta &= \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{13}\nu_{31} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3} \end{aligned} \tag{2.13}$$

ở đây:  $\psi$  - góc lệch phương cốt và trục  $\xi_1$ ;  $E_i$ ,  $G_{ij}$  và  $\nu_{ij}$  là các mô đun kỹ thuật vật liệu.



**Hình 2.3.** Sơ đồ phân tử vỏ composite lớp

### 2.3.3. Các thành phần nội lực

Trên mặt cắt phân tử tồn tại lực màng, lực cắt, mô men uốn và xoắn, chúng được xác định như sau [14],[15], [63]:

a. Lực màng:

Lực màng được xác định theo công thức sau:

$$\begin{aligned} \{N\} &= \begin{Bmatrix} N_{\xi_1} \\ N_{\xi_2} \\ N_{\xi_1\xi_2} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \sigma_{\xi_1} \\ \sigma_{\xi_2} \\ \tau_{\xi_1\xi_2} \end{Bmatrix}^{(k)} d\xi \\ &= \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{\xi_1} \\ \varepsilon_{\xi_2} \\ \gamma_{\xi_1\xi_2} \end{Bmatrix}^{(k)} d\xi, \end{aligned} \quad (2.14)$$

với:  $N_{\xi_1}, N_{\xi_2}, N_{\xi_1\xi_2}$  lần lượt là các thành phần lực màng phân bố theo phương  $\xi_1, \xi_2$  và mặt phẳng  $\xi_1\xi_2$ .

*b. Mô men uốn và xoắn:*

Mô men uốn và xoắn được xác định theo công thức:

$$\begin{aligned} \{M\} &= \begin{Bmatrix} M_{\xi_1} \\ M_{\xi_2} \\ M_{\xi_1\xi_2} \end{Bmatrix}^{(k)} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \sigma_{\xi_1} \\ \sigma_{\xi_2} \\ \tau_{\xi_1\xi_2} \end{Bmatrix}^{(k)} \xi d\xi \\ &= \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{\xi_1} \\ \varepsilon_{\xi_2} \\ \gamma_{\xi_1\xi_2} \end{Bmatrix}^{(k)} \xi d\xi, \end{aligned} \quad (2.15)$$

với:  $M_{\xi_1}, M_{\xi_2}$  và  $M_{\xi_1\xi_2}$  tương ứng là các thành phần mô men uốn và mô men xoắn phân bố theo chiều dài.

*c. Lực cắt:*

Lực cắt được xác định theo công thức:

$$\begin{aligned} \{Q\} &= \begin{Bmatrix} Q_{\xi_2} \\ Q_{\xi_1} \end{Bmatrix}^{(k)} = \sum_{k=1}^n k_s \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \tau_{\xi_2\xi} \\ \tau_{\xi_1\xi} \end{Bmatrix}^{(k)} d\xi \\ &= \sum_{k=1}^n k_s \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \bar{Q}_{44} & \bar{Q}_{45} \\ \bar{Q}_{45} & \bar{Q}_{55} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{\xi_2\xi} \\ \gamma_{\xi_1\xi} \end{Bmatrix}^{(k)} d\xi \end{aligned} \quad (2.16)$$

với:  $k_s$  là hệ số hiệu chỉnh ứng suất cắt;  $Q_{\xi_1}, Q_{\xi_2}$  là các thành phần lực cắt phân bố theo chiều dài.

Trong tính toán, để có các thành phần ứng suất cắt đạt độ chính xác cao so với lời giải của lý thuyết đàn hồi, người ta phải sử dụng thêm hệ số



hiệu chỉnh ứng suất cắt  $k_s$ , chúng phụ thuộc vào từng loại vật liệu và từng quan điểm, trong luận án tác giả chọn  $k_s = 5/6$  để tính toán [14], [59].

Trường nội lực trong vỏ composite được xác định bởi công thức [14]:

$$\begin{Bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] & [0] \\ [B] & [D] & [0] \\ [0] & [0] & [H] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\varepsilon_b\} \\ \{\kappa\} \\ \{\varepsilon_s\} \end{Bmatrix} \quad (2.17)$$

trong đó:

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix}; [B] = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix}; \quad (2.18)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}; [H] = \begin{bmatrix} H_{44} & H_{45} \\ H_{45} & H_{55} \end{bmatrix}; \quad (2.19)$$

ở đây:  $\{N\}$  là vectơ lực màng;  $\{M\}$  là vectơ mô men uốn – xoắn;  $\{Q\}$  là vectơ lực cắt;  $[A]$  là ma trận độ cứng màng;  $[D]$  là ma trận độ cứng uốn;  $[B]$  là ma trận tương tác màng – uốn – xoắn;  $[H]$  là ma trận độ cứng cắt. Các phần tử của chúng được xác định như sau:

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_b]^k (h_k - h_{k-1}); i, j = 1, 2, 6 \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_b]^k (h_k^2 - h_{k-1}^2); i, j = 1, 2, 6 \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_b]^k (h_k^3 - h_{k-1}^3); i, j = 1, 2, 6 \\ H_{ij} &= \frac{5}{6} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_s]^k (h_k - h_{k-1}); i, j = 4, 5 \end{aligned} \quad (2.20)$$

$\{\varepsilon_b\} = \{\varepsilon_{\xi_1} \quad \varepsilon_{\xi_2} \quad \varepsilon_{\xi_1\xi_2}\}^T$  là vectơ biến dạng màng.

$\{\kappa\} = \left\{ \kappa_{\xi_1} \quad \kappa_{\xi_2} \quad \kappa_{\xi_1\xi_2} \right\}^T$  là vector độ cong của vỏ chịu uốn.

$\{\varepsilon_s\} = \left\{ \varepsilon_{\xi\xi_1} \quad \varepsilon_{\xi\xi_2} \right\}^T$  là vector biến dạng cắt của mặt trung bình.

## 2.4. Thiết lập phương trình vi phân dao động phi tuyến của phần tử vỏ trong nền đàn hồi chịu áp suất di động

Để thiết lập phương trình dao động của phần tử vỏ trong nền đàn hồi chịu áp suất di động, trước hết ta thiết lập phương trình dao động của phần tử vỏ chịu tác dụng của tải trọng động, tiếp đó xây dựng vector tải trọng nút của phần tử vỏ trong nền đàn hồi chịu áp suất di động. Các yếu tố của nền đàn hồi, áp suất di động sẽ tham gia vào phương trình chung của phần tử từ đại lượng này.

### 2.4.1. Phương trình vi phân dao động phi tuyến của phần tử vỏ

Xét kết cấu ống trụ composite được mô hình hóa bởi hữu hạn các phần tử vỏ cong tứ giác đồng tham số 4 điểm nút, mỗi nút có 6 bậc tự do  $(u_i, v_i, w_i, \theta_{\xi_{1i}}, \theta_{\xi_{2i}}, \theta_{\xi_i})$  như hình 2.2. Phần tử này do Kanok- Nukulchai đề xuất, được xây dựng từ phần tử khối có sử dụng lý thuyết Kirchhoff-Love và giả thiết Mindlin. Tính chất cong của phần tử được thể hiện qua tham số bán kính vỏ cong  $R$ , góc mở phần tử  $\theta$  và ma trận cosin chỉ phương của các phần tử.

Ký hiệu  $(xyz)$  là hệ tọa độ tổng thể với các vector đơn vị  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ , còn  $(\xi_1, \xi_2, \xi)$  là hệ tọa độ cục bộ với các vector đơn vị  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ .

#### 2.4.1.1. Hàm dạng $N_i$

Hàm dạng  $N_i$  của phần tử vỏ cong tứ giác đồng tham số 4 nút trong hệ tọa độ tự nhiên  $(r, s)$  có dạng [1]:

$$N_i = \frac{1}{4}(1+r.r_i)(1+s.s_i) \quad (2.21)$$

trong đó:  $(r_i, s_i)$  là giá trị tọa độ tự nhiên tại nút  $i$ ,  $i = 1 \div 4$ : nút 1 là  $(-1, -1)$ ; nút 2 là  $(1, -1)$ ; nút 3 là  $(1, 1)$ ; nút 4 là  $(-1, 1)$ .

Thay các giá trị tọa độ nút  $(r_i, s_i)$  tại các nút  $i$  trong hệ tọa độ tự nhiên vào (2.21) ta được Hàm dạng  $N_i$  có dạng:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1-r)(1-s), & N_2 &= \frac{1}{4}(1+r)(1-s), \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1+r)(1+s), & N_4 &= \frac{1}{4}(1-r)(1+s), \end{aligned} \quad (2.22)$$

Đạo hàm của các hàm dạng theo các biến tự nhiên  $(r, s)$  được biểu diễn thông qua các đạo hàm theo các biến  $\xi_1, \xi_2$  như sau:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial s} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial r} & \frac{\partial \xi_2}{\partial r} \\ \frac{\partial \xi_1}{\partial s} & \frac{\partial \xi_2}{\partial s} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \xi_2} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \xi_2} \end{Bmatrix} \quad (2.23)$$

với:  $[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial r} & \frac{\partial \xi_2}{\partial r} \\ \frac{\partial \xi_1}{\partial s} & \frac{\partial \xi_2}{\partial s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix}$  - ma trận Jacobi

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial s} \end{Bmatrix} - \text{đạo hàm riêng hàm dạng theo } (r, s).$$

Từ đây ta nhận được:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi_1} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \xi_2} \end{Bmatrix} = [\mathbf{J}]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial s} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{11}^* & \mathbf{J}_{12}^* \\ \mathbf{J}_{21}^* & \mathbf{J}_{22}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

#### 2.4.1.2. Chuyển vị của 1 điểm trong phần tử:

Vectơ chuyển vị của 1 điểm bất kỳ trong phần tử:

$$\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{u} \quad \mathbf{v} \quad \mathbf{w}\}^T \quad (2.25)$$

Vectơ chuyển vị và góc xoay tại điểm bất kỳ trên mặt trung bình:

$$\{\widehat{\mathbf{u}}\} = \{\mathbf{u}_0 \quad \mathbf{v}_0 \quad \mathbf{w}_0 \quad \theta_{\xi_1} \quad \theta_{\xi_2}\}^T \quad (2.26)$$

Từ (2.1) ta có quan hệ 2 vectơ chuyển vị  $\{\mathbf{u}\}$  và  $\{\widehat{\mathbf{u}}\}$ :

$$\{\mathbf{u}\} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \xi \\ 0 & 1 & 0 & -\xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \{\widehat{\mathbf{u}}\} = [\mathbf{L}_\xi] \{\widehat{\mathbf{u}}\} \quad (2.27)$$

với:  $\mathbf{L}_\xi$  là ma trận cỡ (3x6) trong (2.27).

Khi chưa kể đến bậc tự do xoắn  $\theta_{\xi_1}$ , vectơ chuyển vị tại nút thứ  $i$  của phần tử là:

$$\{\mathbf{q}\}_i = \{\mathbf{u}_{0i} \quad \mathbf{v}_{0i} \quad \mathbf{w}_{0i} \quad \theta_{\xi_{1i}} \quad \theta_{\xi_{2i}}\}^T \quad \text{với } i = 1 \div 4 \quad (2.28)$$

Vectơ chuyển vị của phần tử có kích thước  $20 \times 1$ :

$$\{\mathbf{q}^e\} = \{\{\mathbf{q}_1\} \quad \{\mathbf{q}_2\} \quad \{\mathbf{q}_3\} \quad \{\mathbf{q}_4\}\}^T \quad (2.29)$$

Suy ra chuyển vị của một điểm bất kỳ trên mặt trung bình thuộc phần tử được biểu diễn theo hàm dạng và vectơ chuyển vị nút như sau:

$$\{\hat{\mathbf{u}}\} = [\mathbf{N}_u] \{\mathbf{q}^e\}, \quad (2.30)$$

trong đó:  $[\mathbf{N}_u]$  là các ma trận hàm dạng và có cấu trúc như sau:

$$[\mathbf{N}_u] = [\mathbf{N}_1[\mathbf{I}_5] \quad \mathbf{N}_2[\mathbf{I}_5] \quad \mathbf{N}_3[\mathbf{I}_5] \quad \mathbf{N}_4[\mathbf{I}_5]], \quad (2.31)$$

với:  $[\mathbf{I}_5]$  là ma trận đơn vị kích thước  $5 \times 5$ .

#### 2.4.1.3. Tọa độ của điểm bất kỳ trong phần tử:

Trong hệ tọa độ cục bộ, tọa độ  $(\xi_1, \xi_2, \xi)$  tại điểm bất kỳ trong phần tử có thể biểu diễn thông qua hàm dạng  $N_i$ , tọa độ các nút của phần tử trong hệ tọa độ  $(\xi_{1i}, \xi_{2i}, \xi_i)$  và chiều dày vỏ tại các nút  $i$ , với  $i = 1 \div 4$  [1], [38]:

$$\begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^4 N_i \left\{ \begin{Bmatrix} \xi_{1i} \\ \xi_{2i} \\ \xi_i \end{Bmatrix} + \frac{1}{2} t \cdot h_i \begin{Bmatrix} l_{3i} \\ m_{3i} \\ n_{3i} \end{Bmatrix} \right\} \quad (2.32)$$

trong đó:  $h_i$  là chiều dày phần tử tại nút  $i$ ;  $l_{3i}, m_{3i}, n_{3i}$  là cosin chỉ phương của vectơ pháp tuyến đơn vị  $\vec{k}$  tại nút  $i$  trong hệ tọa độ cục bộ.

#### 2.4.1.4. Ma trận ma trận cosin chỉ phương của phần tử:

Ma trận cosin chỉ phương giữa hệ tọa độ tổng thể  $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$  và hệ tọa độ cục bộ  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  có dạng:

$$[\mathbf{L}] = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\vec{e}_1, \vec{i}) & \cos(\vec{e}_2, \vec{i}) & \cos(\vec{e}_3, \vec{i}) \\ \cos(\vec{e}_1, \vec{j}) & \cos(\vec{e}_2, \vec{j}) & \cos(\vec{e}_3, \vec{j}) \\ \cos(\vec{e}_1, \vec{k}) & \cos(\vec{e}_2, \vec{k}) & \cos(\vec{e}_3, \vec{k}) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Các cosin chỉ phương tại điểm bất kỳ trên mặt trung bình của phần tử theo các biến trong hệ tọa độ tự nhiên  $(r, s)$  được xác định như sau:

Cosin chỉ phương của vectơ pháp tuyến  $\vec{e}_3$  tại điểm bất kỳ có tọa độ  $(r,s)$  được xác định bằng công thức:

$$\vec{e}_3 = \begin{Bmatrix} l_3 \\ m_3 \\ n_3 \end{Bmatrix}_{(r,s)} = \frac{\begin{Bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial r} \\ \frac{\partial \xi_2}{\partial r} \\ \frac{\partial \xi}{\partial r} \end{Bmatrix}_{(r,s)} \times \begin{Bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial s} \\ \frac{\partial \xi_2}{\partial s} \\ \frac{\partial \xi}{\partial s} \end{Bmatrix}_{(r,s)}}{\begin{Bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial r} \\ \frac{\partial \xi_2}{\partial r} \\ \frac{\partial \xi}{\partial r} \end{Bmatrix}_{(r,s)} \times \begin{Bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial s} \\ \frac{\partial \xi_2}{\partial s} \\ \frac{\partial \xi}{\partial s} \end{Bmatrix}_{(r,s)}} \quad (2.34)$$

Viết dưới dạng định thức ma trận với các vectơ đơn vị  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  trong hệ tọa độ cục bộ:

$$\begin{aligned} \vec{e}_3 &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial \xi_1}{\partial r} & \frac{\partial \xi_2}{\partial r} & \frac{\partial \xi}{\partial r} \\ \frac{\partial \xi_1}{\partial s} & \frac{\partial \xi_2}{\partial s} & \frac{\partial \xi}{\partial s} \end{vmatrix} = \left( \frac{\partial \xi_2}{\partial r} \frac{\partial \xi}{\partial s} - \frac{\partial \xi}{\partial r} \frac{\partial \xi_2}{\partial s} \right) \vec{i} + \left( \frac{\partial \xi}{\partial r} \frac{\partial \xi_1}{\partial s} - \frac{\partial \xi_1}{\partial r} \frac{\partial \xi}{\partial s} \right) \vec{j} + \left( \frac{\partial \xi_1}{\partial r} \frac{\partial \xi_2}{\partial s} - \frac{\partial \xi_2}{\partial r} \frac{\partial \xi_1}{\partial s} \right) \vec{k} \\ &= a_3 \vec{i} + b_3 \vec{j} + c_3 \vec{k} \end{aligned} \quad (2.35)$$

Các thành phần của vectơ  $\vec{e}_3$  hay các cosin chỉ phương của nó trong hệ tọa độ cục bộ được xác định bằng công thức:

$$l_3 = \frac{a_3}{\sqrt{a_3^2 + b_3^2 + c_3^2}}; \quad m_3 = \frac{b_3}{\sqrt{a_3^2 + b_3^2 + c_3^2}}; \quad n_3 = \frac{c_3}{\sqrt{a_3^2 + b_3^2 + c_3^2}} \quad (2.36)$$

Cosin chỉ phương của vectơ pháp tuyến  $\vec{e}_2$  được xác định bằng tích có hướng của vectơ  $\vec{e}_3$  và vectơ đạo hàm theo biến  $r$  tại tâm phân tử ( $r = s = 0$ ):

$$\vec{e}_2 = \begin{Bmatrix} l_2 \\ m_2 \\ n_2 \end{Bmatrix}_{(r,s)} = \frac{1}{\begin{vmatrix} \begin{Bmatrix} l_3 \\ m_3 \\ n_3 \end{Bmatrix}_{(r,s)} \times \begin{Bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial r} \\ \frac{\partial \xi_2}{\partial r} \\ \frac{\partial \xi}{\partial r} \end{Bmatrix}_{(r,s)} \end{vmatrix}} \begin{Bmatrix} l_3 \\ m_3 \\ n_3 \end{Bmatrix}_{(r,s)} \times \begin{Bmatrix} \frac{\partial \xi_1}{\partial r} \\ \frac{\partial \xi_2}{\partial r} \\ \frac{\partial \xi}{\partial r} \end{Bmatrix}_{(r,s)} \quad (2.37)$$

Viết dưới dạng định thức ma trận với các vectơ đơn vị  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  trong hệ tọa độ cục bộ:

$$\vec{e}_2 = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ l_3 & m_3 & n_3 \\ \frac{\partial \xi_1}{\partial r} & \frac{\partial \xi_2}{\partial r} & \frac{\partial \xi}{\partial r} \end{vmatrix} = (m_3 \frac{\partial \xi}{\partial r} - n_3 \frac{\partial \xi_2}{\partial r}) \vec{i} + (n_3 \frac{\partial \xi_1}{\partial r} - l_3 \frac{\partial \xi}{\partial r}) \vec{j} + (l_3 \frac{\partial \xi_2}{\partial r} - m_3 \frac{\partial \xi_1}{\partial r}) \vec{k} \\ = a_2 \vec{i} + b_2 \vec{j} + c_2 \vec{k} \quad (2.38)$$

Các thành phần của vectơ  $\vec{e}_2$  hay các cosin chỉ phương của nó trong hệ tọa độ cục bộ được xác định bằng công thức:

$$l_2 = \frac{a_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}}; \quad m_2 = \frac{b_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}}; \quad n_2 = \frac{c_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}} \quad (2.39)$$

Cosin chỉ phương của vectơ pháp tuyến  $\vec{e}_1$  được xác định bằng tích có hướng của vectơ  $\vec{e}_2$  và vectơ  $\vec{e}_3$ :

$$\vec{e}_1 = \begin{Bmatrix} l_1 \\ m_1 \\ n_1 \end{Bmatrix}_{(r,s)} = \begin{Bmatrix} l_2 \\ m_2 \\ n_2 \end{Bmatrix}_{(r,s)} \times \begin{Bmatrix} l_3 \\ m_3 \\ n_3 \end{Bmatrix}_{(r,s)} \quad (2.40)$$

Viết dưới dạng định thức ma trận với các vec tơ đơn vị  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  trong hệ tọa độ cục bộ:

$$\begin{aligned} \vec{e}_1 &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{vmatrix} = (m_2 n_3 - n_2 m_3) \vec{i} + (n_2 l_3 - l_2 n_3) \vec{j} + (l_2 m_3 - m_2 l_3) \vec{k} \\ &= a_1 \vec{i} + b_1 \vec{j} + c_1 \vec{k} \end{aligned} \quad (2.41)$$

Các thành phần của vectơ  $\vec{e}_1$  hay các cosin chỉ phương của nó trong hệ tọa độ cục bộ được xác định bằng công thức:

$$l_1 = \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}}; \quad m_1 = \frac{b_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}}; \quad n_1 = \frac{c_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}} \quad (2.42)$$

Các cosin chỉ phương (2.36), (2.39), (2.42) phụ thuộc biến  $r$  và  $s$  trong hệ tọa độ tự nhiên. Khi tính cosin chỉ phương tại nút  $i$  lấy giá trị  $r_i$  và  $s_i$  tại nút  $i$  của phần tử.

#### 2.4.1.5. Phương trình vi phân dao động phi tuyến của phần tử vỏ:

Áp dụng nguyên lý Hamilton cho phần tử [26] ta có:

$$\delta \int_{t_0}^{t_1} (T^e - U^e + W^e) dt = 0 \quad (2.43)$$



trong đó:  $T^e - U^e + W^e = H_e(\{q^e\}, \{\dot{q}^e\}, t)$  là hàm tác dụng Hamilton,  $T^e$  và  $U^e$  là động năng và thế năng biến dạng của phần tử,  $W^e$  là công ngoại lực tác động lên phần tử,  $\{\dot{q}^e\}$  là vectơ vận tốc nút phần tử.

Trường hợp không kể đến lực cản, phương trình (2.43) dẫn đến:

$$-\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial H_e}{\partial \{\dot{q}^e\}} \right\} + \frac{\partial H_e}{\partial \{q^e\}} = \{0\}, \quad (2.44)$$

Động năng của phần tử được xác định theo biểu thức [1], [12]:

$$T^e = \frac{1}{2} \int_{V_e} \{\dot{u}\}^T \rho \{\dot{u}\} dV \quad (2.45)$$

trong đó:

$$\{\dot{u}\} = \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{u}_0 + \xi \dot{\theta}_{\xi_2} \\ \dot{v}_0 - \xi \dot{\theta}_{\xi_1} \\ \dot{w}_0 \end{Bmatrix} = [L_\xi] \{\hat{u}\} : \text{vận tốc của chất điểm};$$

$\rho$  - khối lượng riêng vật liệu tại vị trí của chất điểm.

Vậy động năng của phần tử vỏ có thể biểu diễn như sau:

$$T^e = \frac{1}{2} \{\dot{q}^e\}^T \left( \int_{V_e} \rho [N_u]^T [L_\xi]^T [N_u] [L_\xi] dV_e \right) \{\dot{q}^e\} \quad (2.46)$$

Thế năng biến dạng toàn phần của phần tử [12],[26]:

$$\begin{aligned}
U^e &= \frac{1}{2} \int_{V_e} \{\varepsilon_b\}^T \{\sigma_b\} dV + \frac{1}{2} \int_{V_e} \{\varepsilon_s\}^T \{\sigma_s\} dV \\
&= \frac{1}{2} \int_{V_e} \{\varepsilon_b\}^T [\bar{Q}_b] \{\varepsilon_b\} dV + \frac{1}{2} \int_{V_e} \{\varepsilon_s\}^T [\bar{Q}_s] \{\varepsilon_s\} dV
\end{aligned} \tag{2.47}$$

Thay  $\{\varepsilon_b\}, \{\varepsilon_s\}$  từ (2.7) và (2.8) vào (2.47) ta có:

$$\begin{aligned}
U^e &= \frac{1}{2} \int_{V_e} \left\{ \left( [D_b^L] + \frac{1}{2} [D^N] \right) \{\hat{u}\} \right\}^T [\bar{Q}_b] \left\{ \left( [D_b^L] + \frac{1}{2} [D^N] \right) \{\hat{u}\} \right\} dV + \\
&\quad + \frac{1}{2} \int_{V_e} \left\{ [D_s] \{\hat{u}\} \right\}^T [\bar{Q}_s] \left\{ [D_s] \{\hat{u}\} \right\} dV
\end{aligned} \tag{2.48}$$

Thay biểu thức (2.30) vào (2.48) dẫn đến:

$$\begin{aligned}
U^e &= \{q^e\}^T \left[ \frac{1}{2} \int_{V_e} \left\{ [B_b^L] + \frac{1}{2} [B^N] \right\}^T [\bar{Q}_b] \left\{ [B_b^L] + \frac{1}{2} [B^N] \right\} dV_e \right] \{q^e\} + \\
&\quad + \{q^e\}^T \left[ \int_{V_e} [B_s]^T [\bar{Q}_s] [B_s] dV_e \right] \{q^e\},
\end{aligned} \tag{2.49}$$

trong đó:

$$[B_b^L] = [D_b^L] [N_u] = \left[ [B_{b1}^L] \quad [B_{b2}^L] \quad [B_{b3}^L] \quad [B_{b4}^L] \right], \tag{2.50}$$

$$[B_{bi}^L] = [B_{ei}] \quad \{B_{Ri}\} \quad [B_{ki}], \tag{2.51}$$

$$\begin{aligned}
[B_{ei}] &= [D_{ei}] [I_{Ni}], \quad \{B_{Ri}\} = \{D_{Ri}\} [I_{Ni}], \\
[B_{ki}] &= [D_{ki}] [I_{Ni}], \quad [I_{Ni}] = \begin{bmatrix} N_i & 0 \\ 0 & N_i \end{bmatrix},
\end{aligned} \tag{2.52}$$

$$[B_s] = [D_s] [N_u] = \left[ [B_{s1}] \quad [B_{s2}] \quad [B_{s3}] \quad [B_{s4}] \right], \tag{2.53}$$

$$[B_{si}] = \left[ [0] \quad \{^w B_i\} \quad -N_i [I_s] \right], \quad \{^w B_i\} = \{D_N\} N_i, \tag{2.54}$$

$$[\mathbf{B}^N] = [\mathbf{D}^N][\mathbf{N}_u] = \left[ \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1^N \\ \mathbf{B}_2^N \\ \mathbf{B}_3^N \\ \mathbf{B}_4^N \end{bmatrix} \right], \quad (2.55)$$

Công ngoại lực do tải trọng ngoài tác động [26]:

$$\mathbf{W}^e = \int_{V_e} \{\mathbf{q}^e\}^T \{\mathbf{f}_b^e\} dV_e + \int_{A_e} \{\mathbf{q}^e\}^T \{\mathbf{f}_s^e\} dA_e + \{\mathbf{q}^e\}^T \{\mathbf{f}_c^e\}, \quad (2.56)$$

trong đó:  $A_e$ ,  $V_e$  tương ứng là diện tích và thể tích phần tử,  $\{\mathbf{f}_b^e\}$  - vectơ lực khối,  $\{\mathbf{f}_s^e\}$  - vectơ lực bề mặt phần tử,  $\{\mathbf{f}_c^e\}$  - vectơ lực tập trung phần tử.

Thay (2.46), (2.49), (2.56) vào (2.44) dẫn đến phương trình vi phân mô tả dao động không cản của phần tử vỏ trong hệ tọa độ cục bộ:

$$[\mathbf{M}^e]_E \{\ddot{\mathbf{q}}^e\} + [\mathbf{K}^e]_E \{\mathbf{q}^e\} = \{\mathbf{f}^e\}_E, \quad (2.57)$$

trong đó:  $\{\ddot{\mathbf{q}}^e\}$  là vectơ gia tốc nút phần tử,  $[\mathbf{M}^e]_E$  là ma trận khối lượng của phần tử,  $[\mathbf{K}^e]_E$  là ma trận độ cứng của phần tử;  $\{\mathbf{f}^e\}_E$  là vectơ lực nút của phần tử trong hệ tọa độ cục bộ do tải trọng động gây ra, chúng được xác định như sau:

- Ma trận khối lượng của phần tử:

$$[\mathbf{M}^e]_E = \int_{V_e} \rho [\mathbf{N}_u]^T [\mathbf{L}_\xi]^T [\mathbf{N}_u] [\mathbf{L}_\xi] dV_e, \quad (2.58)$$

$$\text{Đặt: } [\mathbf{I}]_0 = \rho \int_h [\mathbf{L}_\xi]^T [\mathbf{L}_\xi] d\xi$$

$$\text{Khi đó: } [\mathbf{M}^e]_E = \int_{A_e} [\mathbf{N}_u]^T [\mathbf{I}_0] [\mathbf{N}_u] dA$$

$$\text{Hay: } \left[ \mathbf{M}^e \right]_E = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left[ \mathbf{N}_u \right]^T \left[ \mathbf{I}_0 \right] \left[ \mathbf{N}_u \right] \|\mathbf{J}\| dr ds$$

trong đó:  $\|\mathbf{J}\|$  là định thức của ma trận Jacobi được xác định theo (2.24).

- Ma trận độ cứng của phần tử:

$$\left[ \mathbf{K}^e \right]_E = \left( \left[ \mathbf{K}_L^u \right]_E^e + \left[ \mathbf{K}^Q \right]_E^e \right) + \left[ \mathbf{K}_N^u \right]_E^e, \quad (2.59)$$

- Vector lực nút của phần tử:

$$\left\{ \mathbf{f}^e \right\}_E = \int_{V_e} \left\{ \mathbf{f}_b^e \right\} dV + \int_{A_e} \left\{ \mathbf{f}_s^e \right\} dA + \left\{ \mathbf{f}_c^e \right\}, \quad (2.60)$$

với:

+ Ma trận độ cứng uốn tuyến tính:

$$\left[ \mathbf{K}_L^u \right]_E^e = \int_{V_e} \left[ \mathbf{B}_b^L \right]^T \left[ \bar{\mathbf{Q}}_b \right] \left[ \mathbf{B}_b^L \right] dV = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left[ \mathbf{B}_b^L \right]^T \left[ \mathbf{A} \right] \left[ \mathbf{B}_b^L \right] \|\mathbf{J}\| dr ds \quad (2.61)$$

+ Ma trận độ cứng cắt:

$$\left[ \mathbf{K}^Q \right]_E^e = \int_{V_e} \left[ \mathbf{B}_s \right] \left[ \mathbf{H} \right] \left[ \mathbf{B}_s \right]^T dV = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left[ \mathbf{B}_s \right] \left[ \mathbf{H} \right] \left[ \mathbf{B}_s \right]^T \|\mathbf{J}\| dr ds \quad (2.62)$$

+ Ma trận độ cứng uốn phi tuyến:

$$\begin{aligned} \left[ \mathbf{K}_N^u \right]_E^e &= \int_{V_e} \left\{ \left( \left[ \mathbf{B}_b^L \right] \left[ \mathbf{B} \right] \left[ \mathbf{B}^N \right] + \left[ \mathbf{B}^N \right]^T \left[ \mathbf{B} \right] \left[ \mathbf{B}_b^L \right] + \right) \right. \\ &\quad \left. \left[ \mathbf{B}^N \right]^T \left[ \mathbf{D} \right] \left[ \mathbf{B}^N \right] \right\} dV \\ &= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left\{ \left( \left[ \mathbf{B}_b^L \right] \left[ \mathbf{B} \right] \left[ \mathbf{B}^N \right] + \left[ \mathbf{B}^N \right]^T \left[ \mathbf{B} \right] \left[ \mathbf{B}_b^L \right] + \right) \right. \\ &\quad \left. \left[ \mathbf{B}^N \right]^T \left[ \mathbf{D} \right] \left[ \mathbf{B}^N \right] \right\} \|\mathbf{J}\| dr ds \end{aligned} \quad (2.63)$$

Khi kể đến bậc tự do xoắn  $\theta_{\xi_i}$  ( $i = 1 \div 4$ ), vector chuyển vị nút của phần tử có dạng:

$$\{\bar{\mathbf{q}}^e\} = \{u_1 \quad v_1 \quad w_1 \quad \theta_{\xi_{11}} \quad \theta_{\xi_{21}} \quad \cdots \quad u_4 \quad v_4 \quad w_4 \quad \theta_{\xi_{14}} \quad \theta_{\xi_{24}} \quad \theta_{\xi_1} \quad \theta_{\xi_2} \quad \theta_{\xi_3} \quad \theta_{\xi_4}\}^T$$

Lúc này, ma trận khối lượng, ma trận độ cứng và vector tải trọng nút của phần tử vỏ cong mỗi nút có 6 bậc tự do như sau:

$$[\bar{\mathbf{K}}]_{24 \times 24E}^e = \begin{bmatrix} \left( [\mathbf{K}_L^u] + [\mathbf{K}^Q] \right) + k_N [\mathbf{K}_N^u] & [0] \\ [0] & [\mathbf{K}_{r\xi}]_E \end{bmatrix}^e, \quad (2.64)$$

$$[\bar{\mathbf{M}}]_{24 \times 24E}^e = \begin{bmatrix} [\mathbf{M}] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix}^e, \quad \{\bar{\mathbf{f}}\}_E^e = \left\{ \begin{matrix} \{\mathbf{f}\}^e & \{0\} \\ 1 \times 20 & 1 \times 4 \end{matrix} \right\}_E^{eT}, \quad (2.65)$$

trong đó:  $k_N$  - hệ số phi tuyến, nhận giá trị 1 khi tiến hành giải bài toán phi tuyến và nhận giá trị 0 khi giải bài toán tuyến tính. Các thành phần độ cứng xoắn quanh trục  $\xi$  của ma trận  $[\mathbf{K}_{r\xi}]$  nhận giá trị rất nhỏ, khi xét trong tổng thể của ma trận  $\left( \left( [\mathbf{K}_L^u] + [\mathbf{K}^Q] \right) + k_N [\mathbf{K}_N^u] \right)_E$ , chúng nhận giá trị vào khoảng 1/1000 so với giá trị phần tử lớn nhất trong ma trận trên. Điều này có nghĩa là  $k_{r\xi u}(i,j) = 10^{-3} \times \max(k_{(m,n)})$ , với  $k_{(m,n)}$  là các phần tử của ma trận

$$\left( \left( [\mathbf{K}_L^u] + [\mathbf{K}^Q] \right) + k_N [\mathbf{K}_N^u] \right)_E.$$

Lúc này phương trình dao động của phần tử vỏ:

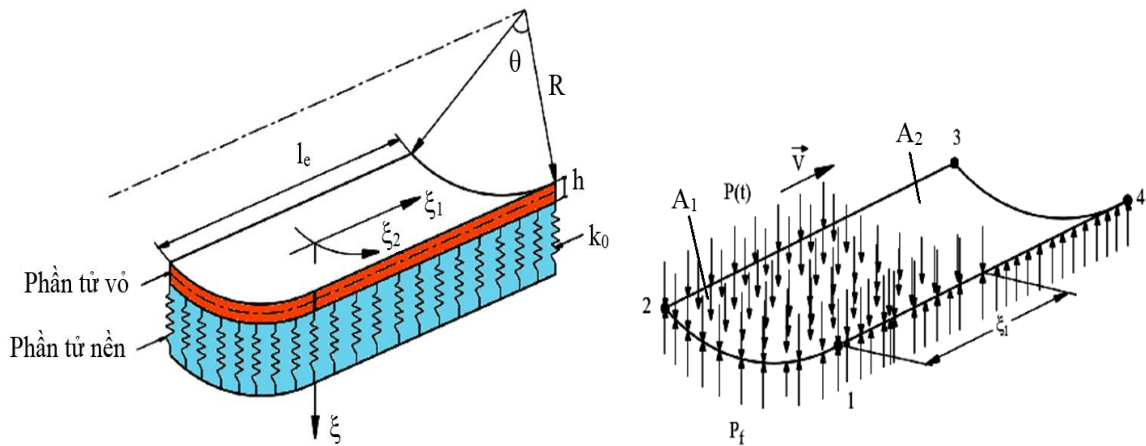
$$[\bar{\mathbf{M}}]_E^e \{\ddot{\bar{\mathbf{q}}}\}^e + [\bar{\mathbf{K}}]_E^e \{\bar{\mathbf{q}}\}^e = \{\bar{\mathbf{f}}\}_E^e, \quad (2.66)$$

Do ma trận độ cứng của phần tử  $[\bar{\mathbf{K}}]_E^e$  trong phương trình (2.66) chứa vectơ chuyển vị nút  $[\bar{\mathbf{K}}]_E^e = [\bar{\mathbf{K}}(\{\bar{\mathbf{q}}\}^e)]_E^e$ , nên (2.66) là phương trình vi phân mô tả dao động phi tuyến của phần tử.

#### 2.4.2. Phần tử vỏ trong nền đàn hồi chịu tác dụng của áp suất di động

Do ống trụ composite được bao bọc bởi nền đàn hồi, nên xét trên phương diện phần tử thì mỗi phần tử được xem là đặt trong nền đàn hồi.

Xét phần tử vỏ nằm trong nền đàn hồi với mô hình nền Winkler, chịu tác dụng của áp suất phân bố đều di chuyển trên phần tử với vận tốc đều  $v$ , theo chiều trục  $\xi_1$  (Hình 2.4).



**Hình 2.4.** Mô hình phần tử vỏ cong trong nền đàn hồi chịu áp suất di động

Xét phần tử bất kỳ tại thời điểm  $t$ . Trong trường hợp tổng quát, trên phần tử tồn tại hai vùng diện tích  $A_1$  và  $A_2$ , với  $A_1$  là diện tích chịu áp suất phân bố đều theo cường độ  $p(t)$ , còn  $A_2$  là diện tích mà trên đó áp suất bằng 0 (do môi chất chưa di chuyển đến). Các diện tích  $A_1, A_2$  xác định bởi:

$$A_1 = R \int_0^\theta \int_0^{\xi_1} \xi_1 d\theta d\xi_1; \quad A_2 = R \int_0^\theta \int_{\xi_1}^{l_e} \xi_1 d\theta d\xi_1 \quad (2.67)$$

Nếu phần tử hoàn toàn nằm trong vùng chịu áp suất thì  $A_2 = 0$ . Còn nếu phần tử hoàn toàn nằm trong vùng không chịu áp suất thì  $A_1 = 0$ .

Từ đó ta tính vector lực nút [12]:

$$\begin{aligned} \{f^e\}_E &= \int_{A_1} [N_u]^T p(t) dA - \int_{A_e} [N_u]^T p_f dA \\ &= \int_{A_1} [N_u]^T p(t) dA - \int_{A_e} [N_u]^T k_0 w(t) dA \\ &= R \int_0^\theta \int_0^{\xi_1} [N_u]^T p(t) d\theta d\xi_1 - \left( R \int_0^\theta \int_0^{l_e} [N_u]^T k_0 [N_u] d\theta d\xi_1 \right) \{\bar{q}\}^e, \end{aligned} \quad (2.68)$$

trong đó:

$p_f = k_0 w(t)$  - phản lực nền;  $k_0$  - hệ số nền;  $w(t)$  - chuyển vị hướng kính;  $\theta$  - góc mở của phần tử;  $R$  - bán kính ống trụ composite.

Ta đặt:

$$\{\bar{f}_m\}_E^e = R \int_0^\theta \int_0^{\xi_1} [N_u]^T p(t) d\theta d\xi_1, \quad [\bar{K}_f]_E^e = R \int_0^\theta \int_0^{l_e} [N_u]^T k_0 [N_u] d\theta d\xi_1$$

và thay (2.68) vào (2.66) ta có phương trình mô tả dao động phi tuyến của phần tử vỏ trong nền đàn hồi chịu tác dụng của áp suất di động:

$$[\bar{M}]_E^e \{\ddot{\bar{q}}\}^e + \left( [\bar{K}]_E^e + [\bar{K}_f]_E^e \right) \{\bar{q}\}^e = \{\bar{f}_m\}_E^e. \quad (2.69)$$

Các ma trận khối lượng, ma trận độ cứng và vector tải trọng phần tử trong (2.69) được chuyển về hệ tọa độ tổng thể Oxyz thông qua ma trận

chuyển hệ tọa độ  $[T^e]$ , thông qua các công thức sau [1], [12], [14]:

$$\begin{aligned} [\tilde{\mathbf{M}}]_G^e &= [T^e]^T [\bar{\mathbf{M}}]_E^e [T^e], \quad [\tilde{\mathbf{K}}]_G^e = [T^e]^T [\bar{\mathbf{K}}]_E^e [T^e], \\ \{\tilde{\mathbf{f}}_m\}_G^e &= [T^e]^T \{\bar{\mathbf{f}}_m\}_E^e. \end{aligned} \quad (2.70)$$

trong đó  $[\tilde{\mathbf{M}}]_G^e$ ,  $[\tilde{\mathbf{K}}]_G^e$ ,  $\{\tilde{\mathbf{f}}_m\}_G^e$  tương ứng là ma trận khối lượng, ma trận độ cứng và vectơ tải trọng nút của phần tử trong hệ tọa độ tổng thể.

Ma trận chuyển hệ tọa độ  $[T^e]$  được xác định:

$$[T]^e = \begin{bmatrix} [L] & & \cdot & [0] \\ & [L] & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ [0] & & \cdot & [L] \end{bmatrix}_{(6 \times 6)} \quad (2.71)$$

với:  $[L]$  là ma trận cosin chỉ phương giữa các trục tọa độ của hệ trục tọa độ cục bộ của phần tử và hệ tọa độ tổng thể, được xác định bởi (2.33).

Do đó, phương trình vi phân mô tả dao động của phần tử vỏ trong nền đàn hồi chịu áp suất di động (2.69) viết trong hệ tọa độ tổng thể như sau:

$$[\tilde{\mathbf{M}}]_G^e \{\ddot{\mathbf{q}}\}_G^e + \left( [\tilde{\mathbf{K}}]_G^e + [\tilde{\mathbf{K}}_f]_G^e \right) \{\mathbf{q}\}_G^e = \{\tilde{\mathbf{f}}_m\}_G^e \quad (2.72)$$

## 2.5. Thuật toán giải phương trình vi phân dao động phi tuyến của ống trụ trong nền đàn hồi chịu áp suất di động

### 2.5.1. Phương trình vi phân dao động phi tuyến của ống trụ trong nền đàn hồi chịu áp suất di động

Phương trình tổng thể mô tả dao động của hệ được xuất phát từ phương trình mô tả dao động của phần tử (2.72) bằng cách tập hợp các ma



trận và vectơ tải trọng phân tử theo phương pháp độ cứng trực tiếp, trong đó áp dụng nguyên tắc ma trận chỉ số và sơ đồ Skyline, đây là phương pháp phổ biến trong lý thuyết PTHH. Theo phương pháp này, ma trận độ cứng và ma trận khối lượng của hệ được hình thành theo các bước sau:

- Tạo ma trận rỗng kích thước  $m_n \times n_d$ ;
- Khởi tạo ma trận chỉ số, xác định vị trí nút của phần tử, tương ứng với chỉ số bậc tự do;
- Tại vị trí nút chung, theo tính chất bậc tự do của các phần tử chung nút, phần tử có chung tác dụng của cùng một loại bậc tự do được gộp vào ma trận chung của hệ bằng phương pháp cộng trực tiếp, ngược lại chúng được cộng giá trị 0.

Tập hợp ma trận, vectơ tổng thể từ ma trận, vectơ phần tử:

$$\begin{aligned} [\tilde{\mathbf{M}}] &= \sum_{e=1}^{n_e} [\tilde{\mathbf{M}}]_G^e, \\ [\tilde{\mathbf{K}}] &= \sum_{e=1}^{n_e} [\tilde{\mathbf{K}}]_G^e + \sum_{e=1}^{n_e} [\tilde{\mathbf{K}}_f]_G^e, \\ \left\{ \tilde{\mathbf{f}}_m \right\} &= \sum_{e=1}^{n_{em}} [\tilde{\mathbf{f}}_m]_G^e, \end{aligned} \quad (2.73)$$

trong đó:  $n_e$  – số phần tử vỏ mô phỏng ống,  $n_{em}$  – số phần tử vỏ chịu áp suất di động tác dụng.

Sơ đồ phương pháp mô tả các công thức (2.73) được thể hiện như sau:

$$[\mathbf{K}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{K}]^1 & & & [\mathbf{K}]^j \\ & & & \\ & & [\mathbf{K}]^i & \\ & & & \\ & & & \\ [\mathbf{K}]^k & & & [\mathbf{K}]^n \end{bmatrix}$$

Sau khi tập hợp các ma trận và vectơ tải trọng tổng thể, ta có phương trình vi phân dao động phi tuyến không cản của ống trụ composite trong nền đàn hồi chịu tác dụng của áp suất di động:

$$\left[ \tilde{\mathbf{M}} \right] \left\{ \ddot{\tilde{\mathbf{q}}} \right\} + \left[ \tilde{\mathbf{K}} \right] \left\{ \tilde{\mathbf{q}} \right\} = \left\{ \tilde{\mathbf{f}}_m \right\} \quad (2.74)$$

Khi xét đến cản, giả thiết lực cản của hệ tỷ lệ với vận tốc chuyển vị:

$$\left\{ \mathbf{f}_d \right\} = - \left[ \tilde{\mathbf{C}} \right] \left\{ \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \right\}, \text{ thay vào (2.74) ta có phương trình vi phân dao động của}$$

hệ như sau:

$$\left[ \tilde{\mathbf{M}} \right] \left\{ \ddot{\tilde{\mathbf{q}}} \right\} + \left[ \tilde{\mathbf{C}} \right] \left\{ \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \right\} + \left[ \tilde{\mathbf{K}} \right] \left\{ \tilde{\mathbf{q}} \right\} = \left\{ \tilde{\mathbf{f}}_m \right\}, \quad (2.75)$$

với:  $\left[ \tilde{\mathbf{C}} \right]$  - ma trận cản của hệ.

Thông thường, đối với hệ nhiều bậc tự do, việc xác định ma trận cản tổng thể của hệ theo ma trận cản phần tử là không thể, do khó xác định được tỉ số cản phần tử. Lúc này, phương pháp cản Rayleigh thường được sử dụng. Theo đó, ma trận cản  $\left[ \tilde{\mathbf{C}} \right]$  được tính thông qua ma trận khối lượng  $\left[ \tilde{\mathbf{M}} \right]$  và ma trận độ cứng  $\left[ \tilde{\mathbf{K}} \right]$ :

$$\left[ \tilde{\mathbf{C}} \right] = \alpha_R \left[ \tilde{\mathbf{M}} \right] + \beta_R \left[ \tilde{\mathbf{K}} \right] \quad (2.76)$$

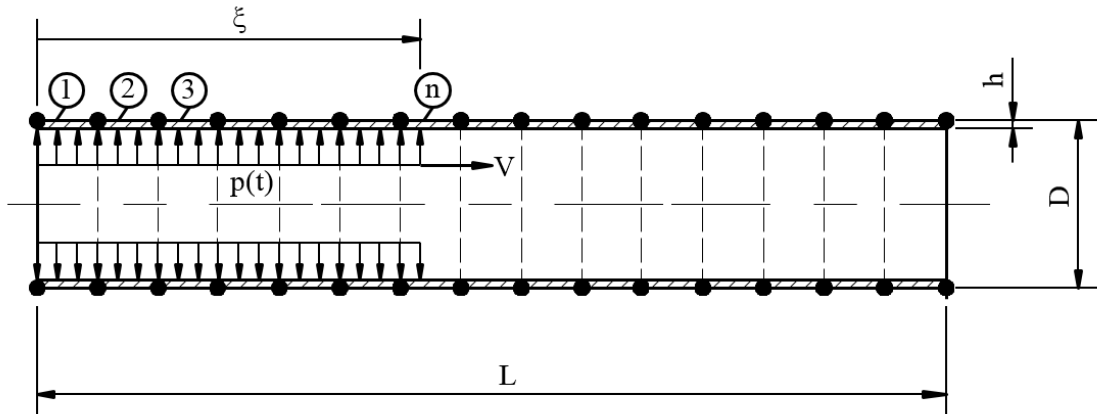
trong đó  $\alpha_R$ ,  $\beta_R$  là các hằng số cản Rayleigh được xác định thông qua tỷ số cản  $\xi_R$  và hai tần số dao động riêng đầu tiên  $\omega_1, \omega_2$  của hệ:

$$\beta_R = \frac{2\xi_R}{\omega_1 + \omega_2}; \alpha_R = \frac{2\xi_R}{\omega_1 + \omega_2} \omega_1 \omega_2 = \beta_R \omega_1 \omega_2. \quad (2.77)$$

Trường hợp ống chịu áp suất di động, điểm khác biệt so với ống chịu tải trọng thông thường có điểm đặt lực không đổi là:

- Tại mỗi thời điểm chỉ có một số phần tử cùng với một phần của các phần tử chịu tác dụng của áp suất, các phần tử còn lại và một phần của các phần tử trước đó không chịu áp suất tác dụng. Hình 2.5 thể hiện ống có chiều dài  $L$  được chia ra thành  $n$  phần tử hữu hạn.

- Trong tính toán, tại mỗi thời điểm cần phải xác định phần tử chịu áp suất tác dụng và phân diện tích của phần tử chịu áp suất để xác định vector tải trọng vế phải của phương trình (2.75). Quá trình này được lặp theo bước thời gian cho đến khi toàn bộ ống đều chịu áp suất tác dụng, do giải lặp theo bước thời gian nên cho phép giải bài toán với các trường hợp áp suất  $p(t)$  là hằng số hoặc là hàm phụ thuộc thời gian.



**Hình 2.5.** Áp suất tác dụng vào ống tại thời điểm  $t$

### 2.5.2. Điều kiện biên và phương trình dao động của hệ sau khi khử biên

Với bài toán ống trụ composite đặt trong nền đàn hồi tựa hai đầu chịu áp suất di động như trong luận án, điều kiện biên được xác định:

$$\begin{aligned} w(0, t) = w(L, t) &= 0, \\ M(0, t) = M(L, t) &= 0. \end{aligned} \quad (2.78)$$

trong đó:  $w(x, t)$  - chuyển vị hướng kính tại điểm  $x$  và thời gian  $t$ ,

$M(x, t)$  - mô men uốn tại điểm  $x$  và thời gian  $t$ .

Với ống trụ composite đặt trên gối cứng (liên kết tựa): chuyển vị hướng kính tại các nút chứa liên kết tựa bằng 0.

Điều kiện biên được cụ thể hóa trong phương pháp PTHH theo phương pháp khử biên, nội dung cụ thể được thực hiện với tính chất của bậc tự do trên biên. Theo đó, tùy theo các loại liên kết sẽ biết được tính chất của các bậc tự do tại biên (ví dụ: tại ngàm, tất cả các bậc tự do  $\tilde{q}_i = 0$  và theo đó hàng thứ  $i$ , cột thứ  $i$  trong hệ phương trình (2.75) bị xóa và do đó số phương trình và số ẩn số trong hệ phương trình (2.75) sau khi khử

biên sẽ bé hơn khi chưa khử biên. Giả sử trước khi khử biên, hệ (2.75) có  $m_n \times n_d$  phương trình và  $m_n \times n_d$  ẩn số, hệ có biên ngầm chứa tất cả  $m$  nút, mỗi nút có  $n$  bậc tự do, dẫn đến có  $m \times n$  bậc tự do bằng 0, vì vậy hệ (2.75) sau khi khử biên còn  $(m_n \times n_d - m \times n)$  phương trình và  $(m_n \times n_d - m \times n)$  ẩn số.

Sau khi khử biên như trên, ta có phương trình vi phân dao động của ống trụ composite trong nền đàn hồi chịu áp suất di động được biểu diễn bằng phương trình:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{f_m\}. \quad (2.79)$$

### 2.5.3. Thuật toán PTHH giải phương trình dao động của hệ

a) Bài toán dao động riêng tuyến tính, được mô tả bởi phương trình:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K^L]\{q\} = \{0\}, \quad (2.80)$$

trong đó:  $[K^L]$  - ma trận độ cứng tuyến tính của hệ ống - nền.

Từ phương trình (2.80) các tần số riêng của hệ được xác định bởi phương trình:

$$\left| [K^L] - \omega^2 [M] \right| = 0 \quad (2.81)$$

với:  $\omega$  là tần số riêng của hệ.

Các dao động riêng  $\{q_i\}$  của hệ được xác định theo các vectơ riêng  $\{Q_i\}$  bởi phương trình:

$$\left( [K^L] - \omega_i^2 [M] \right) \{Q_i\} = \{0\} \quad (2.82)$$

b) Bài toán dao động cưỡng bức phi tuyến:

Nhiệm vụ ở đây là xác định đáp ứng phi tuyến động lực học của hệ, bằng cách giải hệ phương trình phi tuyến (2.7). Trong trường hợp này phương pháp tích phân trực tiếp Newmark kết hợp với phương pháp lặp Newton-Raphson được tác giả áp dụng. Theo đó, nghiệm của phương trình (2.79) tại bước lặp thứ  $i$ , ở thời điểm tính  $t + \Delta t$  được xác định bởi phương trình [1]:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t}\}^{(i)} + [\mathbf{C}_{t+\Delta t}]^{(i)}\{\dot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t}\}^{(i)} + [\mathbf{K}_{t+\Delta t}]^{(i)}\{\mathbf{q}_{t+\Delta t}\}^{(i)} = \{\mathbf{f}_m\}_{t+\Delta t}^{(i)} \quad (2.83)$$

Điều kiện ban đầu cho mỗi cấp tải trọng được xác định như sau:

$$\mathbf{v}(0) = \mathbf{v}_0, \mathbf{p}(0) = \mathbf{p}_0.$$

$$\{\mathbf{q}_{t+\Delta t}(0)\} = \{\mathbf{q}_t\}; \{\mathbf{f}_m(0)\}_{t+\Delta t} = \{\mathbf{f}_t\}; \{\mathbf{K}_{t+\Delta t}(0)\} = \{\mathbf{K}_t\}. \quad (2.84)$$

Ma trận độ cứng tiếp tuyến hiệu quả được xác định:

$$[\mathbf{K}_{t+\Delta t}^*]^{(i)} = [\mathbf{K}_{t+\Delta t}]^{(i)} + a_0[\mathbf{M}] + a_1[\mathbf{C}_{t+\Delta t}]^{(i)} \quad (2.85)$$

Ma trận vector tải trọng hiệu quả được tính theo công thức sau:

$$\begin{aligned} \{\mathbf{f}_m^*\}_{t+\Delta t}^{(i)} = & \{\mathbf{f}_m\}_{t+\Delta t}^{(i-1)} + [\mathbf{M}]\left(a_0\{\mathbf{q}_{t+\Delta t}\}^{(i-1)} + a_2\{\dot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t}\}^{(i-1)} + a_3\{\ddot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t}\}^{(i-1)}\right) + \\ & + [\mathbf{C}_{t+\Delta t}]\left[a_1\{\mathbf{q}_{t+\Delta t}\}^{(i-1)} + a_4\{\dot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t}\}^{(i-1)} + a_5\{\ddot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t}\}^{(i-1)}\right] \end{aligned} \quad (2.86)$$

trong đó:  $[\mathbf{K}_{t+\Delta t}]^{(i)}$  - ma trận độ cứng tiếp tuyến,

$\{\mathbf{f}_m\}_{t+\Delta t}^{(i)}$  - Vector lực nút quy đổi.

Chuyển vị, vận tốc và gia tốc nút tại thời điểm  $t + \Delta t$  của bước lặp thứ  $i$  là:

$$[\mathbf{K}_{t+\Delta t}^*]^{(i)}\{\mathbf{q}_{t+\Delta t}\}^{(i)} = \{\mathbf{f}_m^*\}_{t+\Delta t}^{(i)}, \quad (2.87)$$

$$\{\dot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t}\}^{(i)} = \{\dot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t}\}^{(i-1)} + a_6 \{\ddot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t}\}^{(i-1)} + a_7 \{\ddot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t}\}^{(i)} \quad (2.88)$$

$$\{\ddot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t}\}^{(i)} = a_0 \left( \{\mathbf{q}_{t+\Delta t}\}^{(i)} - \{\mathbf{q}_{t+\Delta t}\}^{(i-1)} \right) - a_2 \{\dot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t}\}^{(i-1)} - a_3 \{\ddot{\mathbf{q}}_{t+\Delta t}\}^{(i-1)}$$

với:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\alpha \Delta t^2}; & a_1 &= \frac{\delta}{\alpha \Delta t}; & a_2 &= \frac{1}{\alpha \Delta t}; & a_3 &= \frac{1}{2\alpha} - 1; \\ a_4 &= \frac{\delta}{\alpha} - 1; & a_5 &= \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\delta}{\alpha} - 2 \right); & a_6 &= \Delta t (1 - \delta); & a_7 &= \delta \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (2.89)$$

các tham số  $\delta$  và  $\alpha$  được chọn theo [1].

với  $\delta = 0,5$ ;  $\alpha = 0,25$ , điều kiện ổn định nghiệm có dạng:  $\frac{\Delta t}{T_n} < \infty$ . Như vậy

điều kiện ổn định nghiệm luôn thỏa mãn với mọi giá trị của  $\Delta t$ . Tuy nhiên để đảm bảo độ chính xác, giá trị  $\Delta t$  phải đủ nhỏ, thông thường

$\Delta t = \left( \frac{1}{10} \div \frac{1}{8} \right) T_1$ , với  $T_1$  là chu kỳ dao động đầu tiên của hệ.

Tiêu chuẩn dừng của phép lặp là sự hội tụ của chuyển vị nút, được xác định bởi điều kiện:  $\varepsilon_q \leq \varepsilon_c$ ,

$$\text{Hay: } \varepsilon_q = \frac{\|\{\Delta \mathbf{q}\}^{(i)}\|}{\|\{\mathbf{q}_{t+\Delta t}\}^{(i)} - \{\mathbf{q}_t\}\|} \leq \varepsilon_c, \quad (2.90)$$

với:  $\varepsilon_c$  - độ chính xác theo chuyển vị, thường được chọn  $10^{-4} \div 10^{-3}$ .

Tóm tắt thứ tự các bước của thuật toán như sau:

1. Khai báo các thông số ban đầu của bài toán. Tính các ma trận  $[M]$ ,  $[K]$ , giải bài toán dao động riêng, xác định ma trận cản  $[C]$ .

2. Cho tổng thời gian tính  $t$ , chọn bước thời gian  $\Delta t$ , các tham số  $\alpha, \delta$ ; tính các hệ số  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ . Gán giá trị đầu tại thời điểm  $t = 0$  cho chuyển vị và vận tốc.

3. Thực hiện vòng lặp tích phân theo thời gian:  $j = 1, 2, \dots, n$  tương ứng với các thời điểm  $\Delta t, 2\Delta t, \dots, n\Delta t$  với  $n = t / \Delta t$ . Tại mỗi thời điểm  $t + \Delta t$  xác định vị trí của áp suất (các phần tử chịu áp suất và phần diện tích các phần tử còn lại chịu áp suất tác dụng), tính vector tải trọng nút.

4. Gán điều kiện đầu cho mỗi cấp tải trọng, thực hiện bước lặp thứ  $i$ .

5. Cập nhật ma trận độ cứng, ma trận khối lượng, ma trận cản và vector tải trọng tại bước lặp  $(i-1)$ , xác định ma trận độ cứng hiệu quả tại bước lặp  $(i-1)$ , vector tải trọng hiệu quả tại bước lặp thứ  $(i-1)$ .

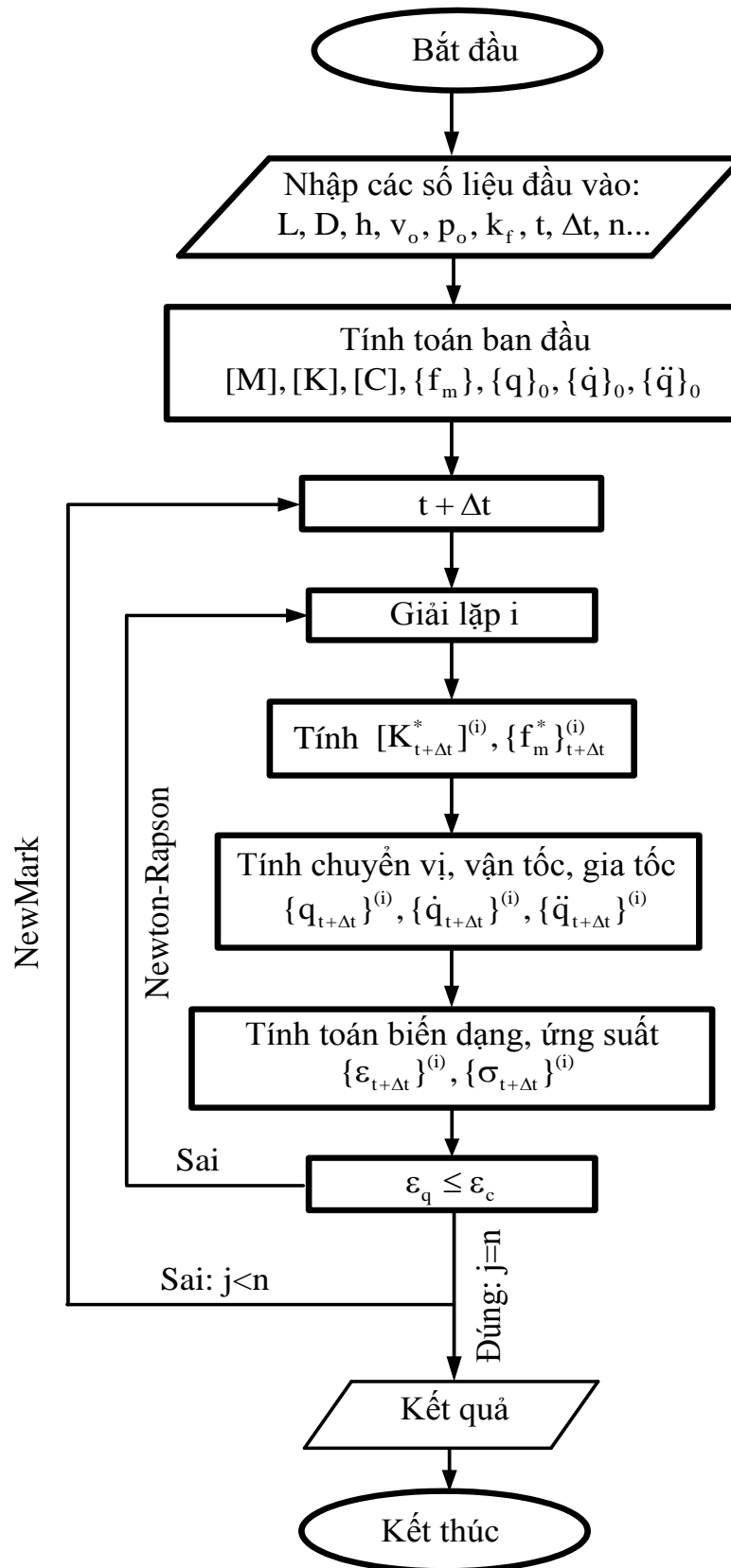
6. Xác định vector chuyển vị, vector vận tốc và gia tốc nút tại bước lặp thứ  $i$ .

7. Kiểm tra điều kiện (2.90):

Nếu đúng, xuất kết quả; Nếu sai, lặp lại từ bước 5.

Sơ đồ thuật toán thể hiện trên hình 2.6 sau đây.





Hình 2.6. Sơ đồ thuật toán

## 2.6. Giới thiệu và kiểm tra độ tin cậy của chương trình tính

### 2.6.1. Giới thiệu chương trình tính

Chương trình tính của tác giả thiết lập có tên CPMP\_2019 được viết trong nền Matlab và sử dụng phần mềm Ansys để chia lưới phần tử của ống composite. Chương trình có khả năng phân tích các lớp bài toán khác nhau như: bài toán phi tuyến tĩnh, bài toán phi tuyến động lực học ống trụ composite trong nền đàn hồi hoặc trên liên kết cứng chịu tác dụng của áp suất di động, trong đó cường độ áp suất không đổi hoặc thay đổi theo thời gian.

Chương trình tính CPMP\_2019 bao gồm 4 mô đun chính sau:

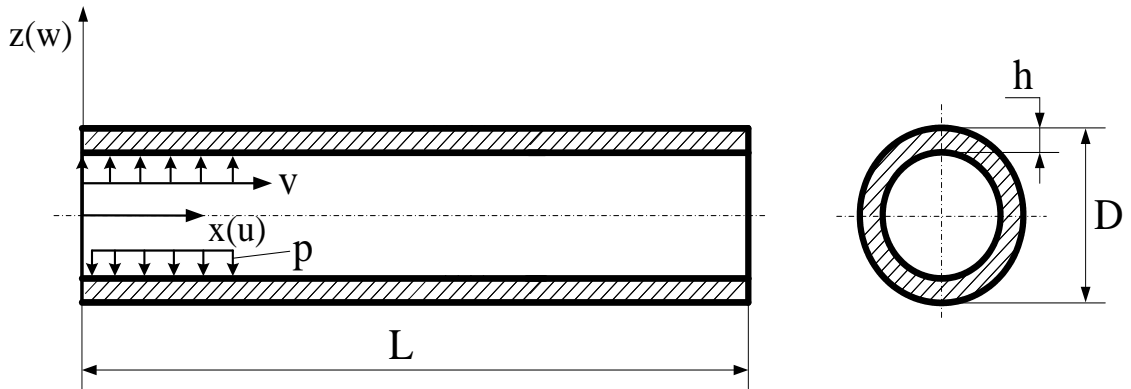
- Mô đun nhập số liệu.
- Mô đun phân tích dao động riêng.
- Mô đun phân tích phi tuyến động lực học.
- Mô đun xuất số liệu.

### 2.6.2. Kiểm tra độ tin cậy của chương trình

Để kiểm tra độ tin cậy của chương trình tính CPMP\_2019, tác giả sử dụng chương trình đã lập, tiến hành tính toán, so sánh đáp ứng chuyển vị hướng kính của ống bằng vật liệu đẳng hướng, chịu áp suất di động với vận tốc  $v$  như trong công trình công bố của Sayyed Ali Azarpazhoo, Sayyed Roohollah Kazemi [68], trong đó mô hình bài toán như hình 2.7 và đặc trưng vật liệu, thông số tải trọng như bảng 2.1.

$$\text{Quy luật áp suất: } p(x, t) = \begin{cases} p_1 + (p_0 - p_1)e^{-(x-vt)}, & x - vt \leq 0 \\ 0 & , \quad x - vt > 0 \end{cases}$$

Ống được ngàm 1 đầu và 1 đầu còn lại tự do.



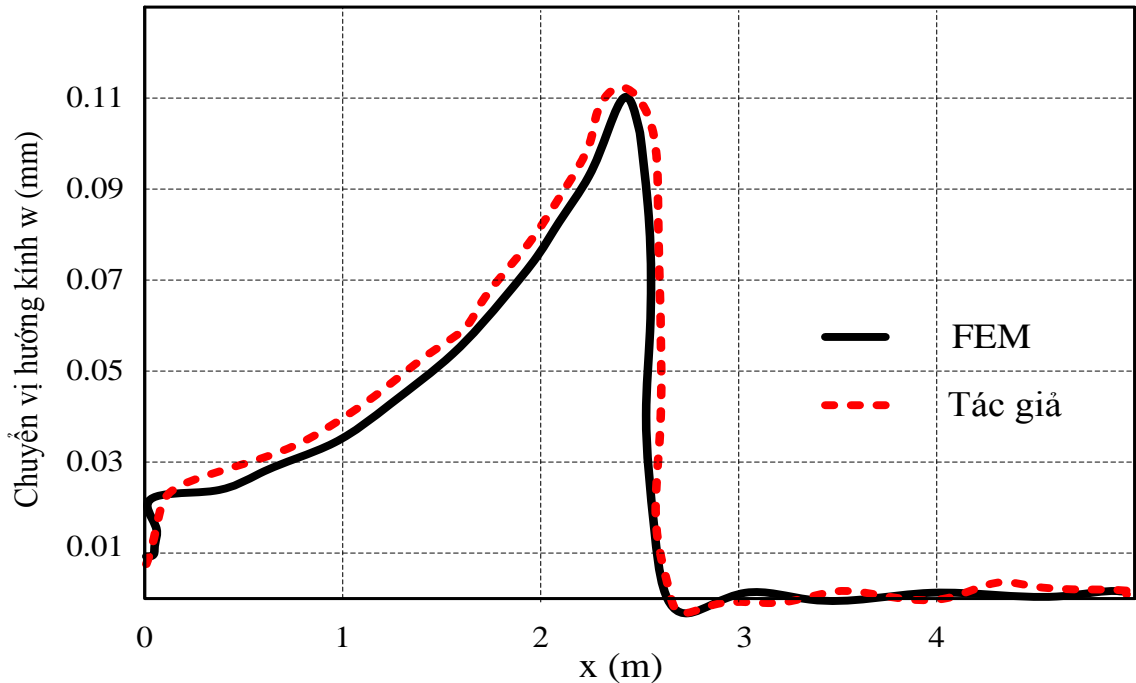
**Hình 2.7.** Mô hình bài toán

**Bảng 2.1.** Các đại lượng tính

Đại lượng	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
Chiều dài	L	m	4,76
Đường kính	D	m	0,2
Chiều dày	h	m	0,001
Khối lượng riêng	$\rho$	$\text{kg/m}^3$	7861
Mô đun đàn hồi	E	GPa	209
Hệ số Poisson	$\nu$	-	0,3
Vận tốc	v	m/s	405,45
Áp suất	$p_0$	MPa	334
	$p_1$	MPa	31,72

Các tác giả trong [68] giải bài toán tuyến tính bằng phương pháp PTHH với lý thuyết chuyển vị bậc nhất (FSDT) và bậc cao (HSDT). Kết quả so sánh về chuyển vị hướng kính tại các điểm thuộc lớp giữa, dọc theo

chiều dài ống tại thời điểm  $t = 0.006s$  đối với trường hợp sử dụng lý thuyết chuyển vị bậc nhất được thể hiện như bảng 2.2 và đồ thị hình 2.8.



**Hình 2.8.** Chuyển vị của các điểm dọc theo chiều dài ống  
(tại thời điểm  $t = 0,006s$ )

**Bảng 2.2.** Tóm tắt giá trị lớn nhất

TT	Phương pháp	Giá trị $w_{\max}$ [mm]	Sai khác [%]
1	Sayyed Ali Azarpazhoo [68]	0,112	3,57
2	Tác giả Luận án (CPMP_2019)	0,116	

**Nhận xét:** Kết quả chuyển vị hướng kính được tính bằng chương trình CPMP\_2019 do tác giả lập đồng dạng với kết quả tính của các tác giả trong công trình [68]. Sai số 3,57% trong trường hợp này theo tác giả là chấp nhận được. Do vậy, đây là một tín hiệu cho thấy thuật toán và chương trình tính đã lập trong chương này là có thể tin cậy.

## **Kết luận chương 2**

Một số kết quả chính đạt được trong chương này, đó là:

- Xây dựng hệ phương trình vi phân dao động phi tuyến của phần tử vỏ cong trong nền đàn hồi, chịu tác dụng của áp suất di động, trong đó áp suất phân bố trên diện tích phần tử vỏ thay đổi theo thời gian. Áp dụng thuật toán PTHH tập hợp ma trận, vectơ tải tổng thể từ các ma trận và vectơ tải trọng phần tử, thiết lập được phương trình vi phân dao động phi tuyến của ống trụ composite trong nền đàn hồi chịu tác dụng của áp suất di động dọc trong ống.

- Thiết lập được thuật toán và chương trình tính CPMP\_2019 cho phép giải bài toán phi tuyến động lực học ống trụ composite chịu áp suất di động, với các điều kiện liên kết khác nhau: ống đặt trong nền đàn hồi 1 hệ số theo mô hình nền Winkler và ống đặt trên liên kết cứng. Chương trình tính đã được kiểm chứng và có cơ sở để tin cậy.

- Bộ chương trình tính CPMP\_2019 là công cụ để tính toán, khảo sát số, xem xét ảnh hưởng của các thông số, từ đó cho phép lựa chọn được các phương án hợp lý cho kết cấu và tải trọng sử dụng, định hướng tham khảo đối với các công trình ống dẫn áp dụng trong thực tế.

## CHƯƠNG 3

### KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ YẾU TỐ ĐẾN ĐÁP ỨNG PHI TUYẾN ĐỘNG LỰC HỌC CỦA ỐNG TRỤ COMPOSITE CHỊU TÁC DỤNG CỦA ÁP SUẤT DI ĐỘNG

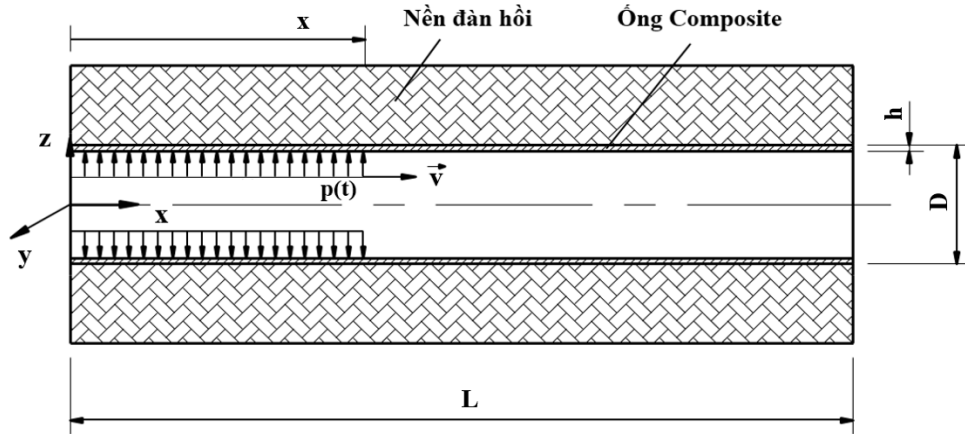
#### 3.1. Đặt vấn đề

Trên cơ sở thuật toán và chương trình tính đã lập ở chương 2, trong chương này tác giả tiến hành tính toán số, xem xét ảnh hưởng của các yếu tố như: chiều dày, chiều dài, góc đặt cốt, đường kính ống composite, độ cứng nền đàn hồi, vận tốc tải trọng di động, ... đến đáp ứng phi tuyến động lực học của ống trụ composite đặt trong nền đàn hồi và trên liên kết cứng chịu áp suất di động. Với kết quả khảo sát số và các nhận xét, khuyến cáo kỹ thuật trong chương này sẽ góp phần vào định hướng tham khảo tính toán, lựa chọn các giải pháp hợp lý cho các công trình dạng ống composite chịu tác dụng của áp suất di động, như: ống dẫn nước, dẫn chất đốt, dẫn nhiên liệu,... phục vụ quốc phòng và phát triển kinh tế - xã hội.

#### 3.2. Ống composite trong nền đàn hồi chịu áp suất di động

##### 3.2.1. Bài toán xuất phát

Xét ống trụ composite gồm 10 lớp bố trí theo quy luật góc đặt cốt:  $[45^0/-45^0]_{10}$ , mỗi lớp là vật liệu composite đồng phương, chiều dày các lớp như nhau. Ống có chiều dài  $L = 18$  m, bán kính trong  $R = 0,2$  m, tổng chiều dày thành ống  $h = 0,01$  m. Ống đặt trong nền đàn hồi và liên kết tựa 2 đầu, hệ số nền  $k_0 = 9 \cdot 10^6 \text{ N/m}^3$ , phía trong ống chịu tác dụng của áp suất  $p = 6 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  di chuyển dọc theo chiều dài ống với vận tốc  $v = 12 \text{ m/s}$  (Hình 3.1). Tính chất cơ lý của mỗi lớp vật liệu gồm: Mô đun đàn hồi  $E_1 = 145 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ ,  $E_2 = 9,77 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ ,  $E_3 = 9,77 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ , mô đun đàn hồi trượt  $G_{12} = 4 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ ,  $G_{23} = 3,5 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ ,  $G_{31} = 4 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ , hệ số poisson  $\nu_{12} = 0,25$ ,  $\nu_{23} = 0,02$ ,  $\nu_{31} = 0,25$ .

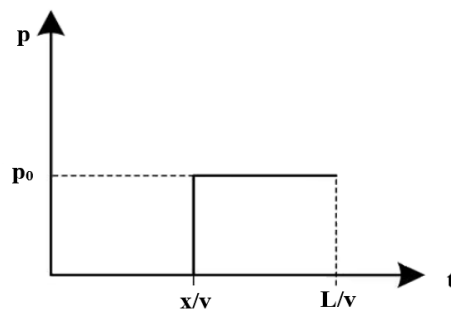


**Hình 3.1.** Mô hình bài toán

Áp suất tại mỗi điểm thuộc ống cho bởi quy luật [25], [45]:

$$p(t) = p_0 u(t - x/v) = \begin{cases} 0 & \text{khi } t < \frac{x}{v}, \quad t > \frac{L}{v} \\ p_0 & \text{khi } \frac{x}{v} \leq t \leq \frac{L}{v} \end{cases} \quad (3.2)$$

Biểu đồ quy luật áp suất tại mỗi điểm thuộc ống được biểu diễn như trên hình 3.2. Theo đó áp suất di động dọc trong ống với biên độ không đổi  $p$  và mặt di chuyển của khối chất mang áp suất đi đến đâu sẽ choán hết những vùng đã đi qua đến đó. Khi khối chất chưa vào ống ( $t < x/v$ ) hoặc vượt ra khỏi ống ( $t > L/v$ ) thì áp suất bằng 0.

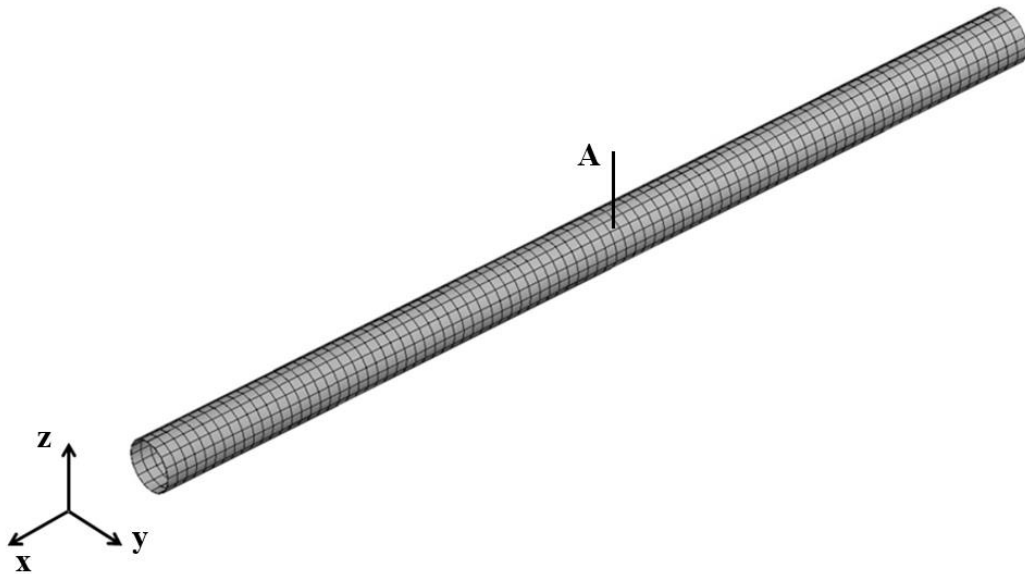


**Hình 3.2.** Mô hình quy luật áp suất

Tác giả tiến hành khảo sát số với các trường hợp chia lưới khác nhau, cho đến khi chênh lệch giữa các kết quả liên tiếp nhỏ hơn 0.5%, khi đó chương

trình tính đạt tới hội tụ. Hình 3.3 thể hiện mô hình PTHH ống composite được sử dụng trong nghiên cứu này, với 1800 phần tử, 1909 nút.

Điểm xuất kết quả: Điểm A là điểm thuộc mặt cắt ngang giữa ống và nằm ở mặt trung bình.



**Hình 3.3.** Mô hình phần tử hữu hạn của bài toán

Điều kiện ban đầu:  $w(x, 0) = \dot{w}(x, 0) = 0$

Điều kiện biên khi ống trụ composite đặt trong nền đàn hồi tựa hai đầu:

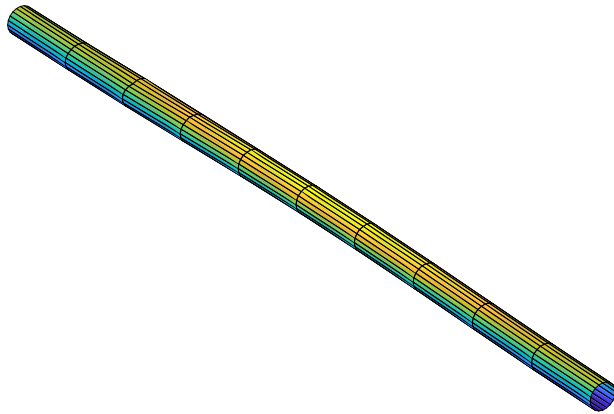
$$\begin{aligned} w(0, t) = w(L, t) &= 0, \\ M(0, t) = M(L, t) &= 0. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Sử dụng chương trình tính Composite\_pipe\_moving\_pressure\_2019 (CPMP\_2019) đã lập, tiến hành tính toán đối với bài toán dao động riêng và dao động cưỡng bức của hệ, kết quả:

**Bài toán dao động riêng:** Hình 3.4 là 5 dạng dao động riêng tương ứng với 5 tần số riêng đầu tiên của ống composite.

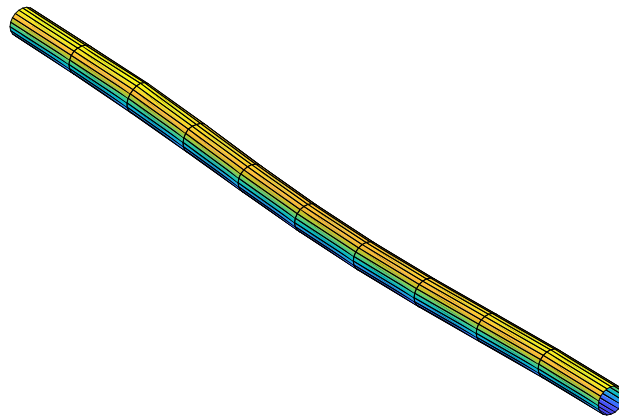


Mode 1



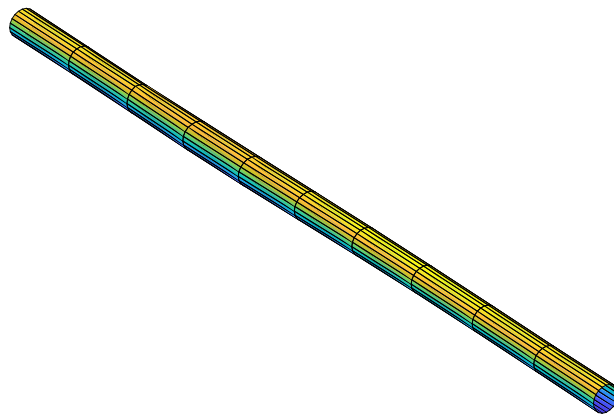
*a, Dạng dao động riêng thứ nhất ( $f_1 = 11.6541 \text{ Hz}$ )*

Mode 2



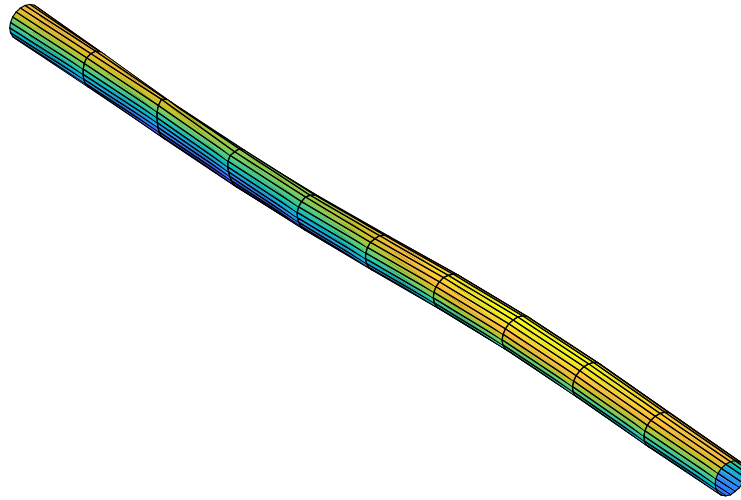
*b, Dạng dao động riêng thứ hai ( $f_2 = 13.0037 \text{ Hz}$ )*

Mode 3



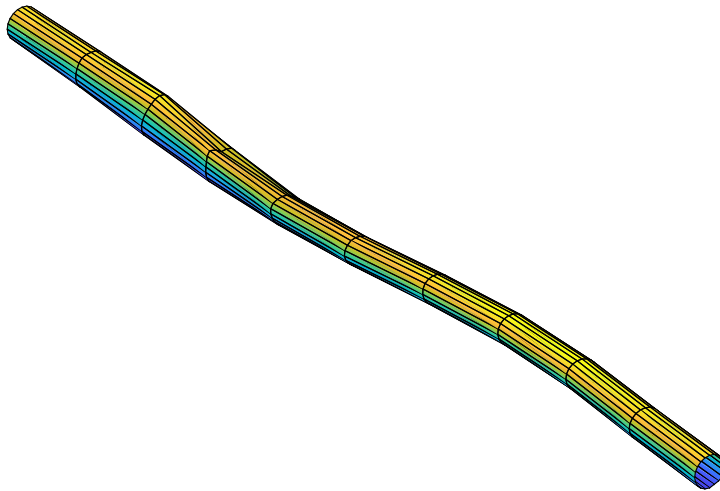
*c, Dạng dao động riêng thứ ba ( $f_3 = 26.3889 \text{ Hz}$ )*

Mode 4



*d, Dạng dao động riêng thứ tư ( $f_4= 31.6088 \text{ Hz}$ )*

Mode 5

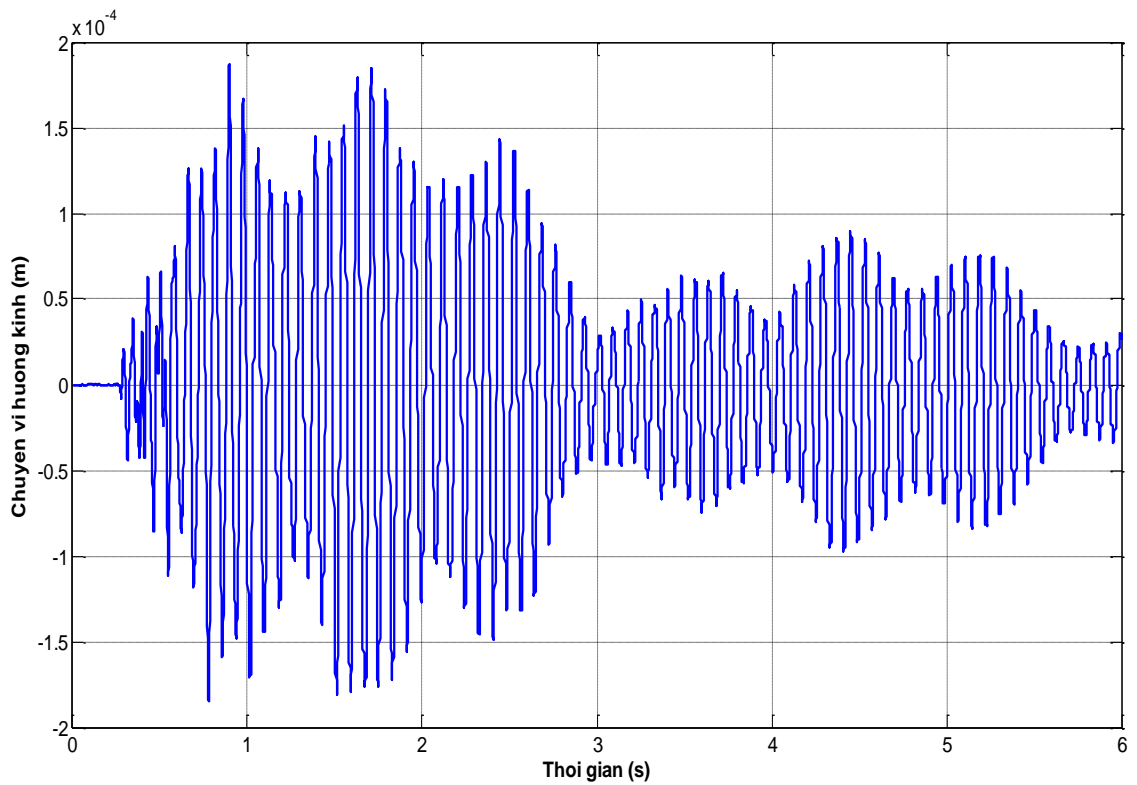


*e, Dạng dao động riêng thứ năm ( $f_5= 36.3466 \text{ Hz}$ )*

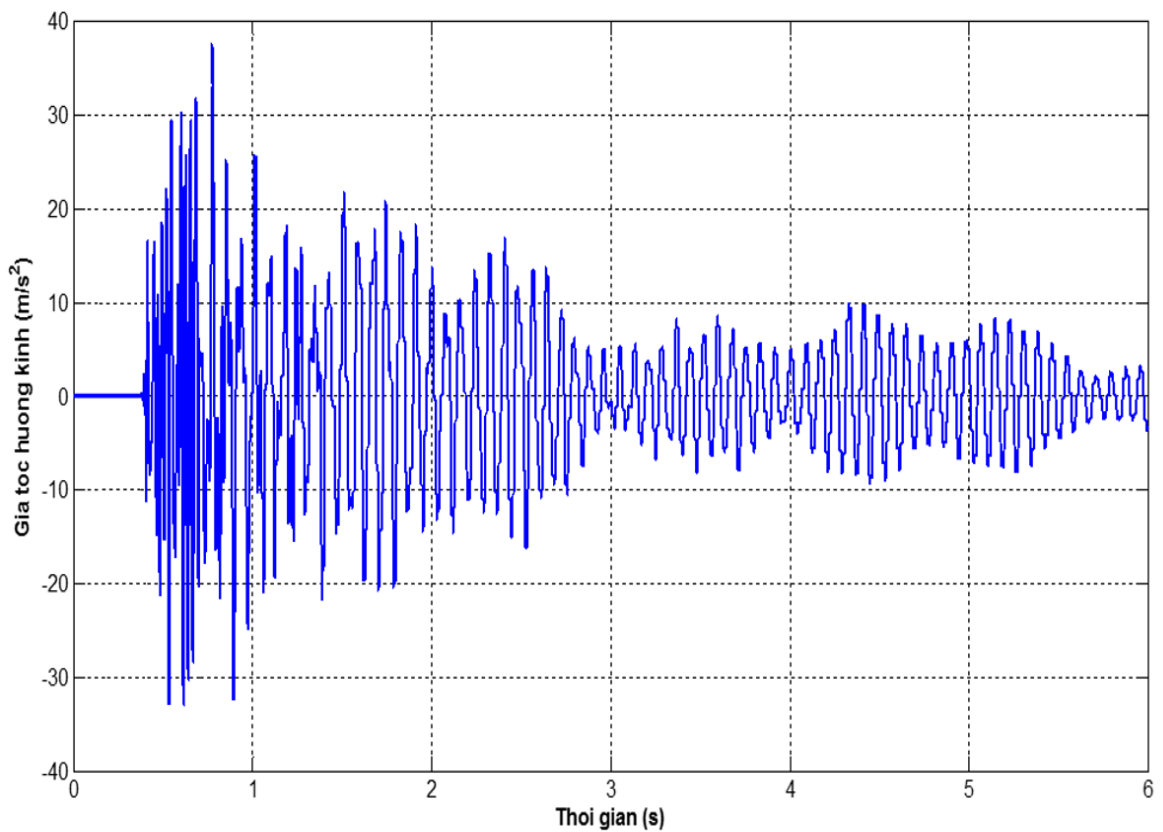
**Hình 3.4.** Năm dạng dao động riêng đầu tiên của ống composite

***Bài toán dao động cưỡng bức:***

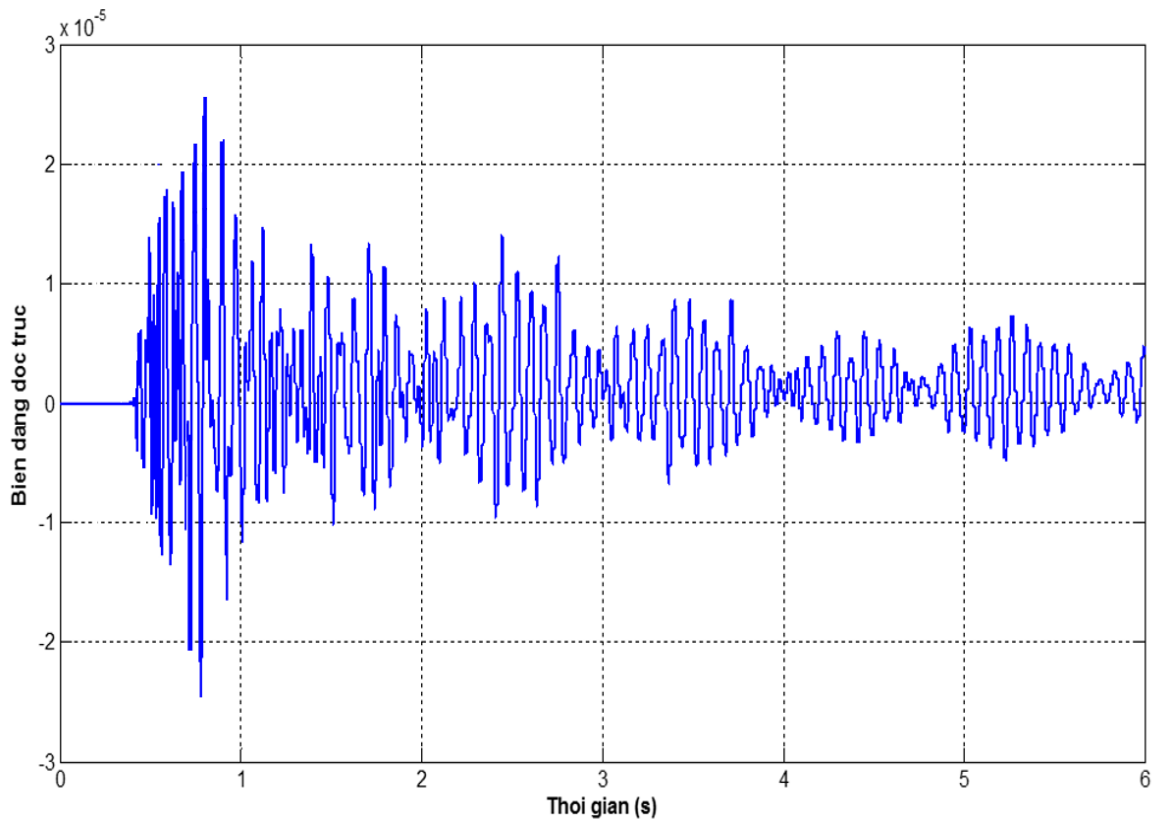
Giải bài toán với thông số đã cho ở trên, kết quả ta nhận được đáp ứng các chuyển vị, gia tốc hướng kính, biến dạng dọc trục và ứng suất pháp tại điểm giữa thuộc ống composite như đồ thị hình 3.5 đến 3.9 và bảng 3.1.



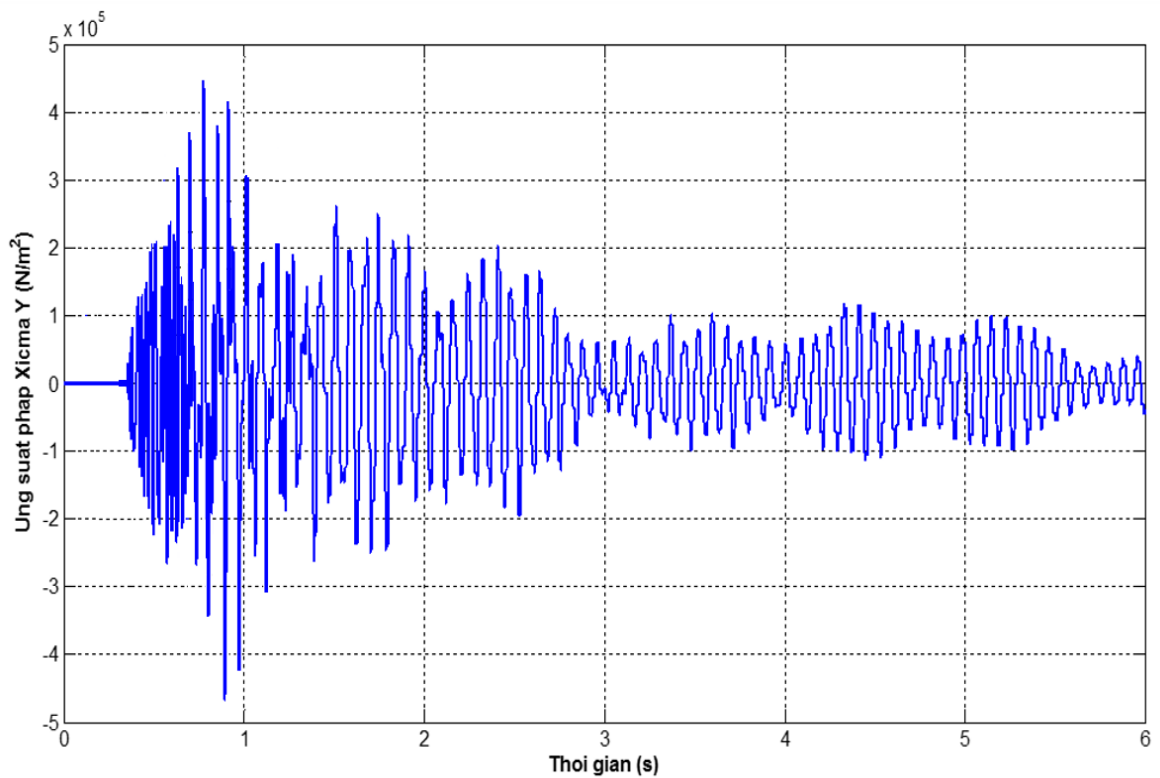
**Hình 3.5.** Đáp ứng chuyển vị hướng kính  $w$  tại điểm A theo thời gian



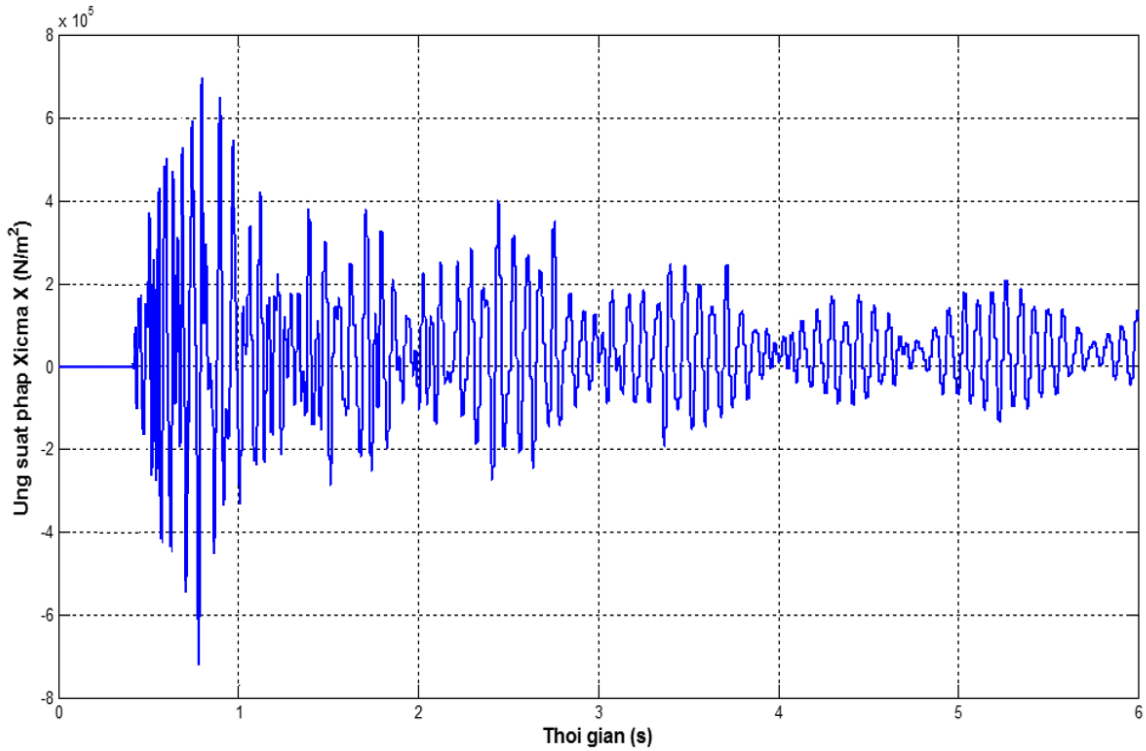
**Hình 3.6.** Đáp ứng gia tốc hướng kính  $\dot{w}$  tại điểm A theo thời gian



**Hình 3.7.** Đáp ứng biến dạng dọc trục  $\varepsilon_x$  tại điểm A theo thời gian



**Hình 3.8.** Đáp ứng ứng suất pháp  $\sigma_y$  tại điểm A theo thời gian



**Hình 3.9.** Đáp ứng ứng suất pháp  $\sigma_x$  tại điểm A theo thời gian

Giá trị lớn nhất của các đại lượng này được cho trong bảng 3.1.

**Bảng 3.1.** Giá trị lớn nhất của các đại lượng được khảo sát

Tham số	$w_{Max}$ (m)	$\epsilon_x^{Max}$	$\ddot{w}_{Max}$ (m/s <sup>2</sup> )	$\sigma_y^{Max}$ (N/m <sup>2</sup> )	$\sigma_x^{Max}$ (N/m <sup>2</sup> )
Giá trị	$1,86 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	38	$4,7 \cdot 10^5$	$7,1 \cdot 10^5$

**Nhận xét:** Với kết quả ở trên, ta thấy các đáp ứng chuyển vị, gia tốc, biến dạng và ứng suất tại điểm A (điểm giữa của ống composite) có hình dạng quy luật tương đồng, giá trị lớn nhất trong khoảng thời gian từ 0,75 đến 0,8s, đây cũng là thời điểm mặt di chuyển của khối chất mang áp suất vừa đi qua mặt cắt giữa ống. Sau thời điểm đó các khối chất ở ngay phía sau tiếp tục di chuyển qua mặt cắt giữa ống và gây ra các đáp ứng động học cho ống, tuy nhiên tác dụng của nó lên kết cấu ống có xu hướng giảm dần, nên có thể thấy

trên các đồ thị là các đáp ứng có biên độ giảm dần về thời gian cuối. Đây là điểm khác biệt so với các dạng tải trọng khác, ở đó biên độ giảm nhanh về giá trị 0 khi đi qua điểm tính.

### 3.2.2. *Khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố đến tần số dao động riêng của ống trụ composite*

#### 3.2.2.1. *Ảnh hưởng của số lớp ống composite:*

Khảo sát ảnh hưởng của số lớp thay đổi từ 5 lớp đến 25 lớp, các thông số khác vẫn như bài toán xuất phát. Các kết quả thể hiện trong bảng 3.2.

**Bảng 3.2.** Các tần số dao động riêng đầu tiên và số lớp

Số lớp	5	10	15	20	25
$f_1$ (Hz)	11.5119	11.6128	11.6605	11.6581	11.6668
$f_2$ (Hz)	12.9755	12.9936	12.9944	13.0044	13.0004
$f_3$ (Hz)	26.3242	26.3289	26.3903	26.3909	26.3927
$f_4$ (Hz)	31.1085	31.4886	31.6218	31.6242	31.6507
$f_5$ (Hz)	36.2236	36.2714	36.3184	36.3482	36.3368

**Nhận xét:** Khi số lớp tăng thì tần số dao động riêng tăng, tuy nhiên sự chênh lệch là không đáng kể.

#### 3.2.2.2. *Ảnh hưởng của chiều dài ống composite:*

Khảo sát bài toán với chiều dài ống L thay đổi từ 6m đến 21m. Các tham số khác vẫn giữ nguyên như đầu đề bài toán. Kết quả được thể hiện trong bảng 3.3.

**Bảng 3.3.** Các tần số dao động riêng đầu tiên và chiều dài ống

L (m)	6	9	12	15	18	21
$f_1$ (Hz)	34.4022	22.2964	16.8801	13.7421	11.6541	10.1448
$f_2$ (Hz)	41.1517	26.5244	19.6439	15.6338	13.0037	11.1444
$f_3$ (Hz)	74.1437	51.3260	39.0368	31.4978	26.3889	22.6977
$f_4$ (Hz)	75.7835	60.2993	45.5583	37.1157	31.6088	27.6779
$f_5$ (Hz)	75.9449	72.8718	54.8997	43.6878	36.3466	31.1712

**Nhận xét:** Khi chiều dài ống composite tăng thì tần số dao động riêng giảm và sự thay đổi là đáng kể. Khi chiều dài ống thay đổi từ 6m đến 21m, thì tần số riêng tần số riêng đầu tiên  $f_1$  giảm 3,39 lần; tần số riêng  $f_2$  giảm 3,69 ; tần số riêng  $f_5$  giảm 2,43 . Do vậy chiều dài ống composite ảnh hưởng lớn đến tần số dao động riêng của ống composite.

### 3.2.2.3. Ảnh hưởng của góc đặt cốt:

Giải bài toán với các phương án đặt cốt khác nhau, khi các tham số khác của bài toán không đổi. Kết quả thể hiện trong bảng 3.4.

Phương án 1:  $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$

Phương án 2:  $45^0/0^0/-45^0/90^0/45^0/0^0/-45^0/90^0/45^0/0^0$

Phương án 3:  $30^0/60^0/30^0/60^0/30^0/60^0/30^0/60^0/30^0/60^0$

**Bảng 3.4.** Các tần số dao động riêng đầu tiên và góc đặt cốt

Tần số DDR (Hz)	Phương án 1	Phương án 2	Phương án 3
$f_1$	11.5119	10.1099	10.2443
$f_2$	12.9755	10.6975	11.0523
$f_3$	26.3242	26.7603	26.9773
$f_4$	31.1085	29.1660	28.3115
$f_5$	36.2236	45.0217	32.4590

**Nhận xét:** Với các phương án được khảo sát, ta thấy tần số dao động riêng thay đổi với giá trị không đáng kể.

### 3.2.2.4. Ảnh hưởng của chiều dày ống composite:

Khảo sát ảnh hưởng của chiều dày ống composite, các thông số vật liệu như bài toán xuất phát. Các kết quả thể hiện trong bảng 3.5.

**Bảng 3.5.** Các tần số dao động riêng đầu tiên và chiều dày ống

Chiều dày h (m)	0.005	0.01	0.015	0.02	0.025
$f_1$ (Hz)	10.9036	11.6541	11.9880	12.1515	12.2407
$f_2$ (Hz)	12.8357	13.0037	13.0750	13.1358	13.1908
$f_3$ (Hz)	26.3533	26.3889	26.4004	26.4059	26.4090
$f_4$ (Hz)	28.9986	31.6088	32.9721	33.6915	34.0961
$f_5$ (Hz)	35.8843	36.3466	36.5942	36.8951	37.2071

**Nhận xét:** Khi chiều dày ống composite tăng thì tần số dao động riêng cũng tăng. Khi chiều dày ống thay đổi từ 0,005m đến 0,025m thì tần số riêng  $f_1$  tăng 1,12 lần; tần số riêng  $f_2$  tăng 1,027; tần số riêng  $f_5$  tăng 1,037.

#### 3.2.2.5. Ảnh hưởng của độ cứng nền đàn hồi:

Khảo sát ảnh hưởng của độ cứng nền đàn hồi với hệ số nền  $k_0$  biến thiên từ  $9.10^6$  N/m<sup>3</sup> đến  $21.10^6$  N/m<sup>3</sup>. Các tham số khác trong bài toán giữ nguyên. Kết quả thể hiện như trong bảng 3.6.

**Bảng 3.6.** Các tần số dao động riêng đầu tiên và độ cứng nền

Hệ số nền (N/m <sup>3</sup> )	$9.10^6$	$12.10^6$	$15.10^6$	$18.10^6$	$21.10^6$
$f_1$ (Hz)	11.6541	15.9926	19.2531	21.9543	24.3006
$f_2$ (Hz)	13.0037	18.1502	22.0937	25.4042	28.3067
$f_3$ (Hz)	26.3889	32.2763	37.1833	41.5005	45.4037
$f_4$ (Hz)	31.6088	43.2505	52.0277	59.3124	65.6525
$f_5$ (Hz)	36.3466	50.6494	61.5541	70.6622	78.6071

**Nhận xét:** Khi độ cứng nền đàn hồi tăng thì tần số dao động riêng cũng tăng. Khi hệ số nền thay đổi từ  $9.10^6$  N/m<sup>3</sup> đến  $21.10^6$  N/m<sup>3</sup> thì tần số riêng  $f_1$  tăng 2,085 lần; tần số riêng  $f_2$  tăng 2,17; tần số riêng  $f_5$  tăng 2,16. Vậy độ cứng nền đàn hồi có ảnh hưởng lớn đến tần số dao động riêng của ống composite.



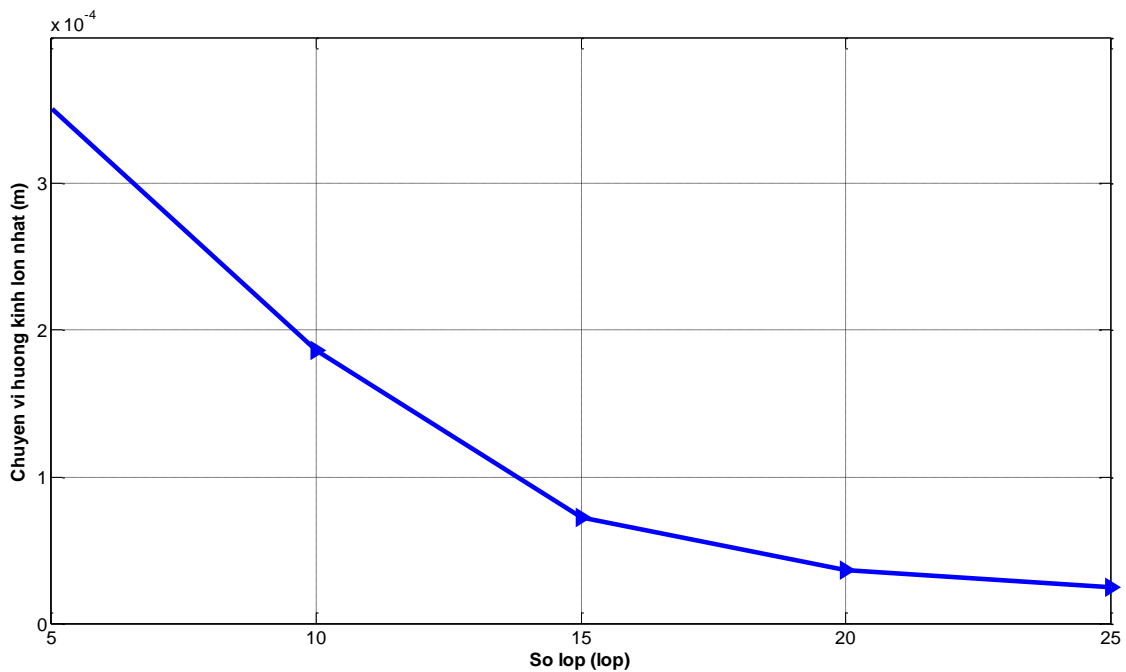
### 3.2.3. Khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố đến đáp ứng động lực học của ống trụ composite

#### 3.2.3.1. Ảnh hưởng của số lớp ống composite:

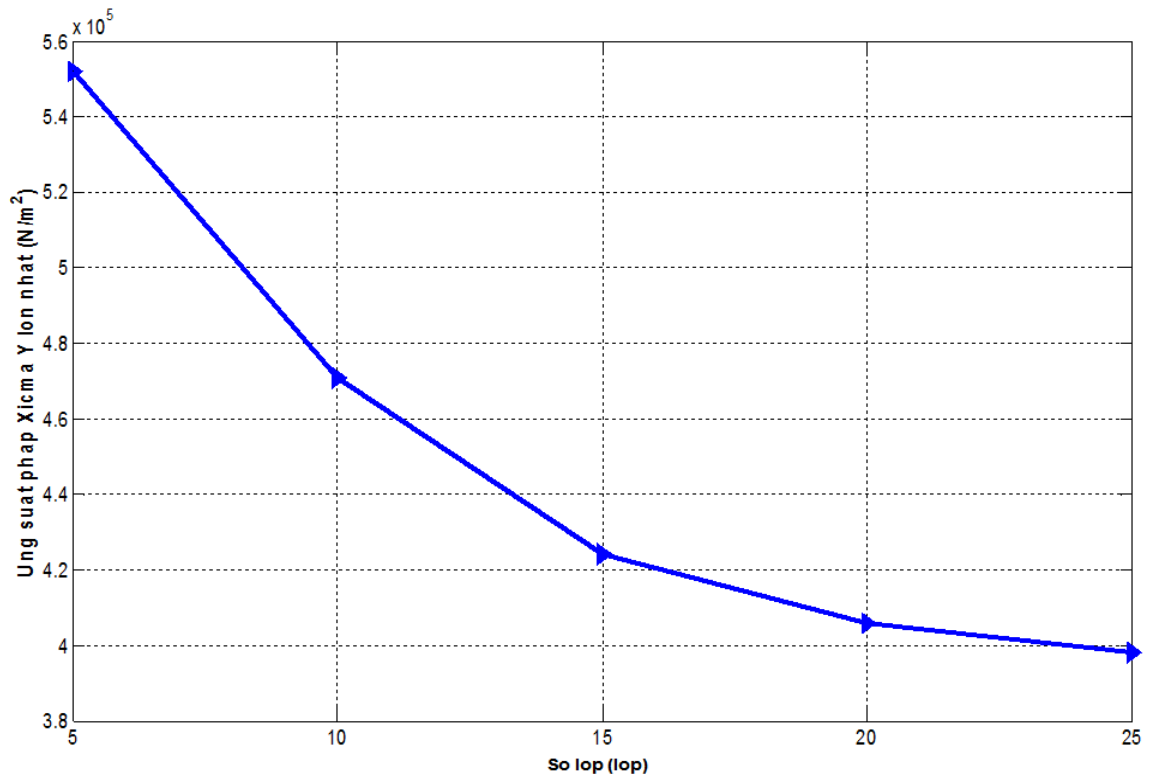
Giải bài toán với số lớp thay đổi từ 5 lớp đến 25 lớp. Các tham số khác vẫn giữ nguyên như đầu đề bài toán. Kết quả quan hệ giữa số lớp ống composite với chuyển vị hướng kính lớn nhất  $w_{Max}$  và ứng suất pháp lớn nhất  $\sigma_y^{Max}$ ,  $\sigma_x^{Max}$  tại điểm giữa thuộc ống composite được thể hiện trong bảng 3.7 và đồ thị hình 3.10, 3.11, 3.12.

**Bảng 3.7.** Đáp ứng động lực học lớn nhất và số lớp ống composite

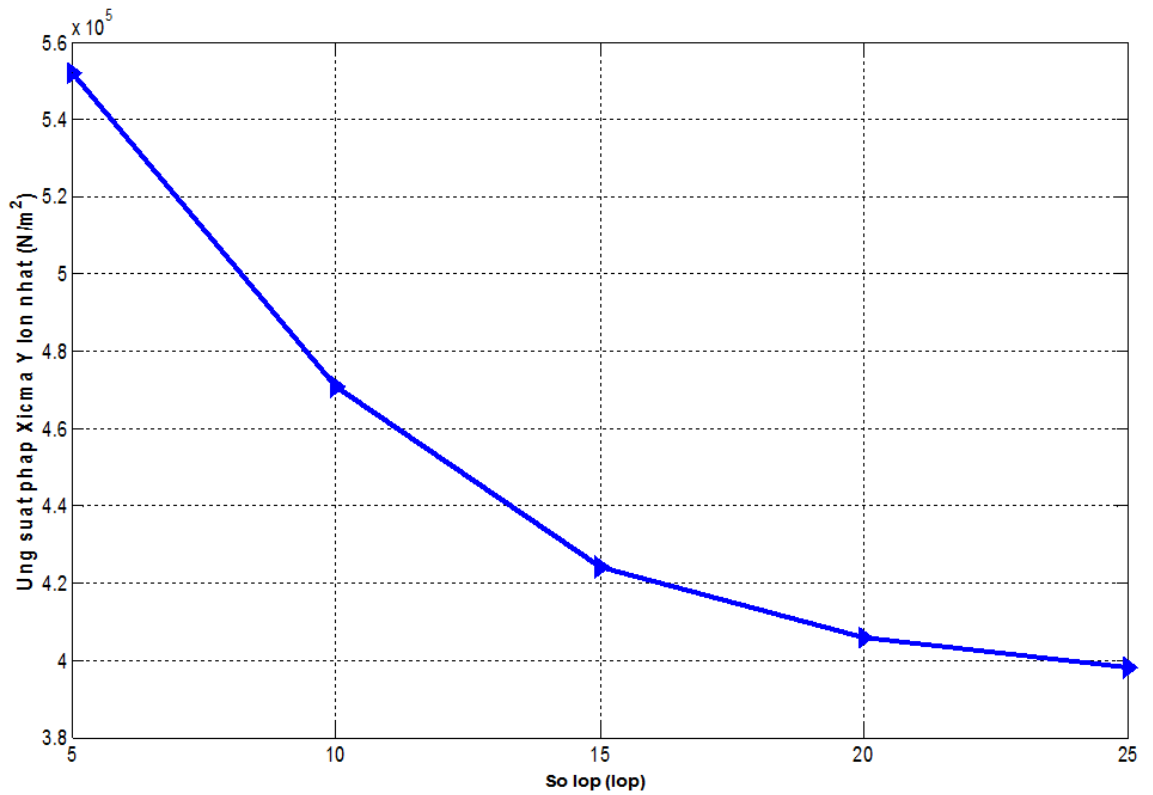
Số lớp	5	10	15	20	25
$w_{Max} (m) \cdot 10^{-4}$	3,51	1,86	0,72	0,36	0,25
$\sigma_y^{Max} (N/m^2) \cdot 10^5$	5,52	4,71	4,24	4,06	3,98
$\sigma_x^{Max} (N/m^2) \cdot 10^5$	8,32	7,11	6,54	6,25	6,19



**Hình 3.10.** Quan hệ chuyển vị hướng kính  $w_{Max}$  và số lớp



**Hình 3.11.** Quan hệ ứng suất pháp  $\sigma_y^{\text{Max}}$  và số lớp

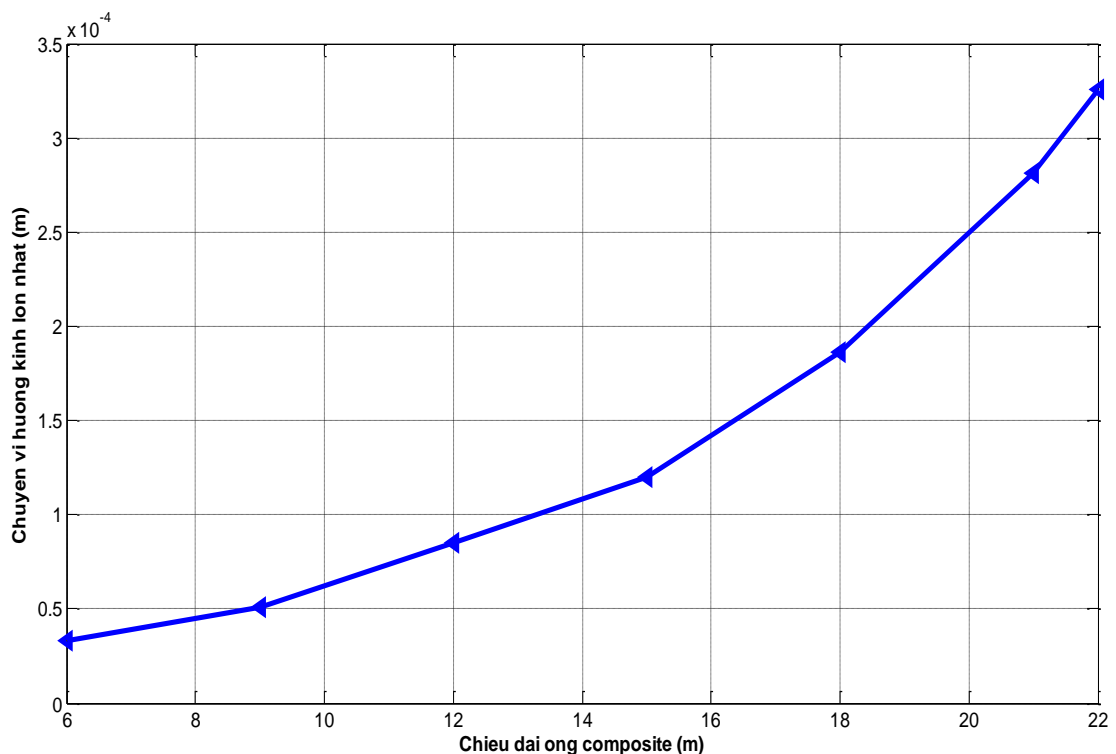


**Hình 3.12.** Quan hệ ứng suất pháp  $\sigma_x^{\text{Max}}$  và số lớp

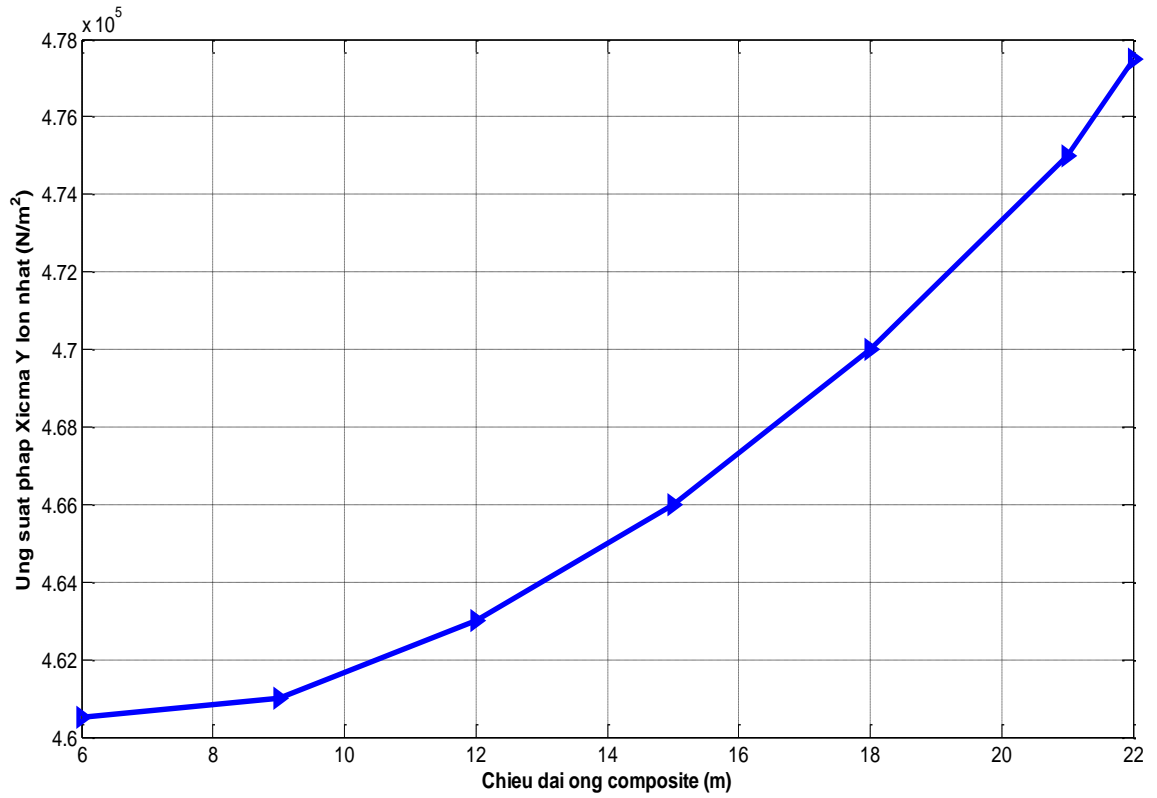
**Nhận xét:** Khi tăng số lớp từ 5 lớp đến 15 lớp thì chuyển vị hướng kính lớn nhất và ứng suất pháp lớn nhất giảm nhanh, khi tăng số lớp lên 20, 25 lớp thì ta thấy giá trị của chuyển vị hướng kính lớn nhất và ứng suất pháp lớn nhất giảm chậm lại. Điều đó cho thấy số lớp của ống composite có ảnh hưởng lớn đến đáp ứng động lực học của kết cấu.

### 3.2.3.2. Ảnh hưởng của chiều dài ống:

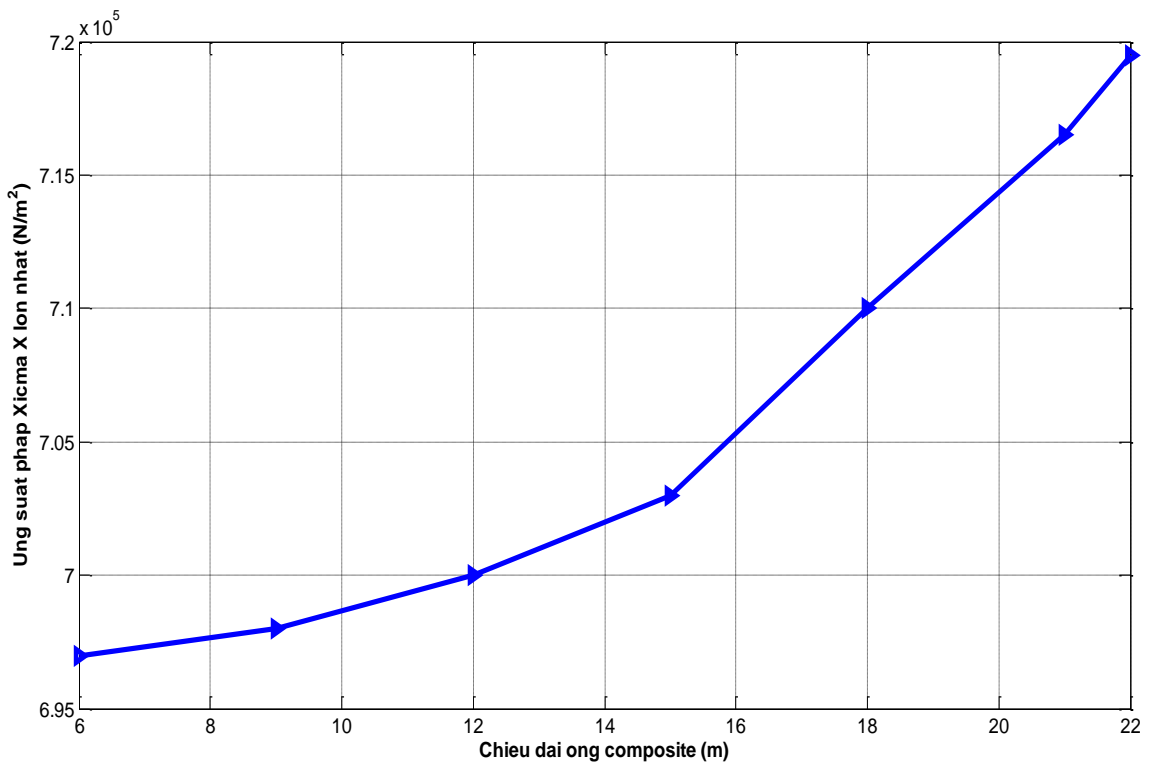
Khảo sát bài toán với chiều dài ống  $L$  thay đổi từ 6m đến 21m. Các tham số khác như chiều dày, bán kính ống, độ cứng nền đàn hồi, vận tốc và quy luật áp suất... vẫn giữ nguyên như đầu đề bài toán. Kết quả sự thay đổi chuyển vị hướng kính lớn nhất và ứng suất pháp lớn nhất được thể hiện trong bảng 3.8 và đồ thị các hình 3.13, 3.14, 3.15.



**Hình 3.13.** Quan hệ  $w_{Max}$  và chiều dài ống composite



**Hình 3.14.** Quan hệ  $\sigma_y^{\text{Max}}$  và chiều dài ống composite



**Hình 3.15.** Quan hệ  $\sigma_x^{\text{Max}}$  và chiều dài ống composite

**Bảng 3.8.** Đáp ứng động lực học lớn nhất và chiều dài ống composite

Chiều dài ống (m)	6	9	12	15	18	21
$w_{Max} (m) \cdot 10^{-4}$	0,46	0,88	1,15	1,39	1,86	2,71
$\sigma_y^{Max} (N/m^2) \cdot 10^5$	4,60	4,61	4,63	4,66	4,70	4,75
$\sigma_x^{Max} (N/m^2) \cdot 10^5$	6,97	6,98	7,00	7,03	7,10	7,16

**Nhận xét:** Ta thấy khi thay đổi chiều dài ống composite từ 6m đến 21m, chuyển vị hướng kính lớn nhất và ứng suất pháp lớn nhất đều tăng phi tuyến, trong đó chuyển vị hướng kính lớn nhất  $w_{Max}$  tăng 5,891 lần, ứng suất pháp  $\sigma_y^{Max}$  tăng 1,315 lần, ứng suất pháp  $\sigma_x^{Max}$  tăng 1,027 lần. Do vậy chiều dài ống composite có ảnh hưởng lớn đến đáp ứng động lực học của ống composite.

### 3.2.3.3. Ảnh hưởng của góc đặt cốt:

Giải bài toán với các phương án đặt cốt khác nhau, khi số lớp của ống composite và các tham số khác của bài toán không đổi.

Phương án 1:  $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$

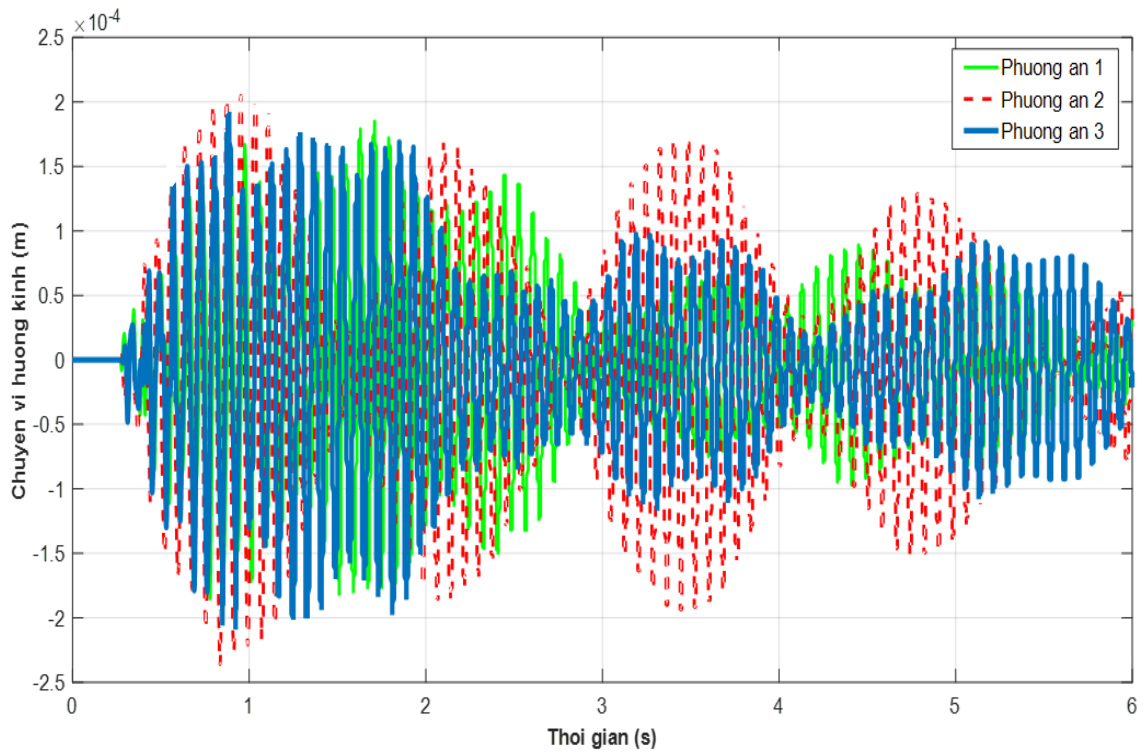
Phương án 2:  $45^0/0^0/-45^0/90^0/45^0/0^0/-45^0/90^0/45^0/0^0$

Phương án 3:  $30^0/60^0/30^0/60^0/30^0/60^0/30^0/60^0/30^0/60^0$

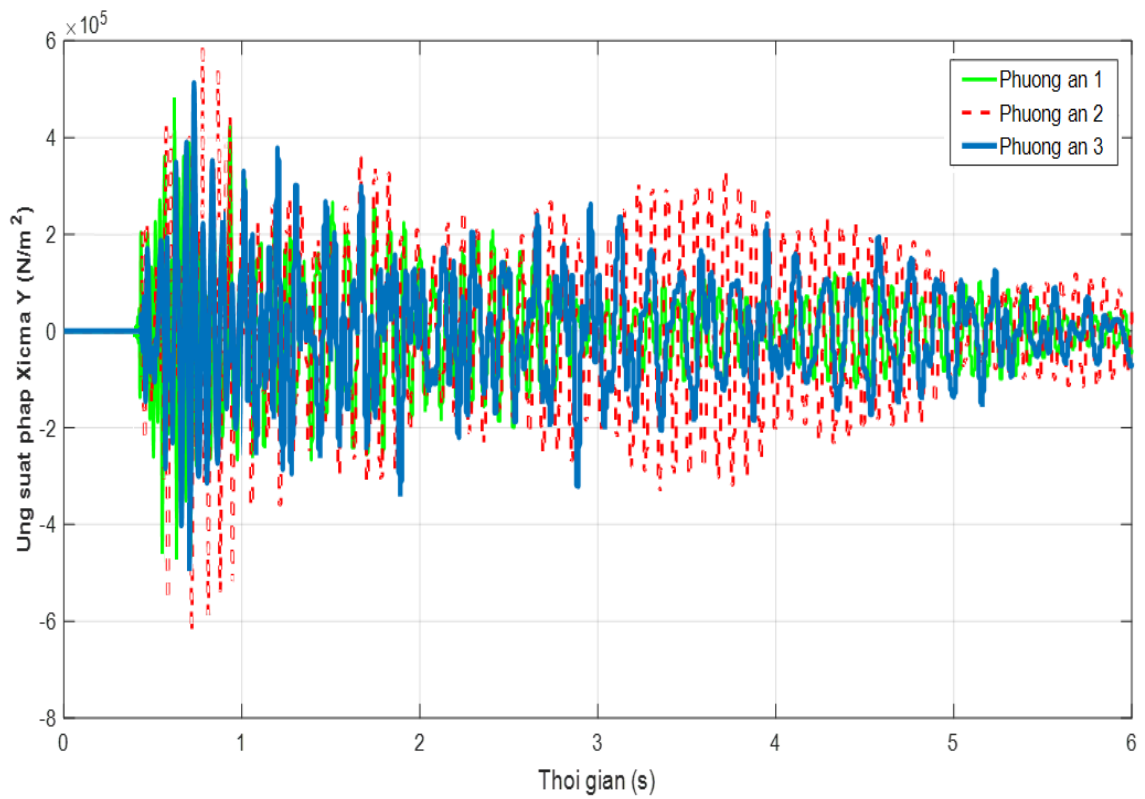
Kết quả đáp ứng động lực học của chuyển vị và ứng suất pháp tại điểm tính của ống composite thể hiện trong bảng 3.9 và đồ thị hình 3.16, 3.17, 3.18.

**Bảng 3.9.** Đáp ứng động lực học lớn nhất theo phương án đặt cốt

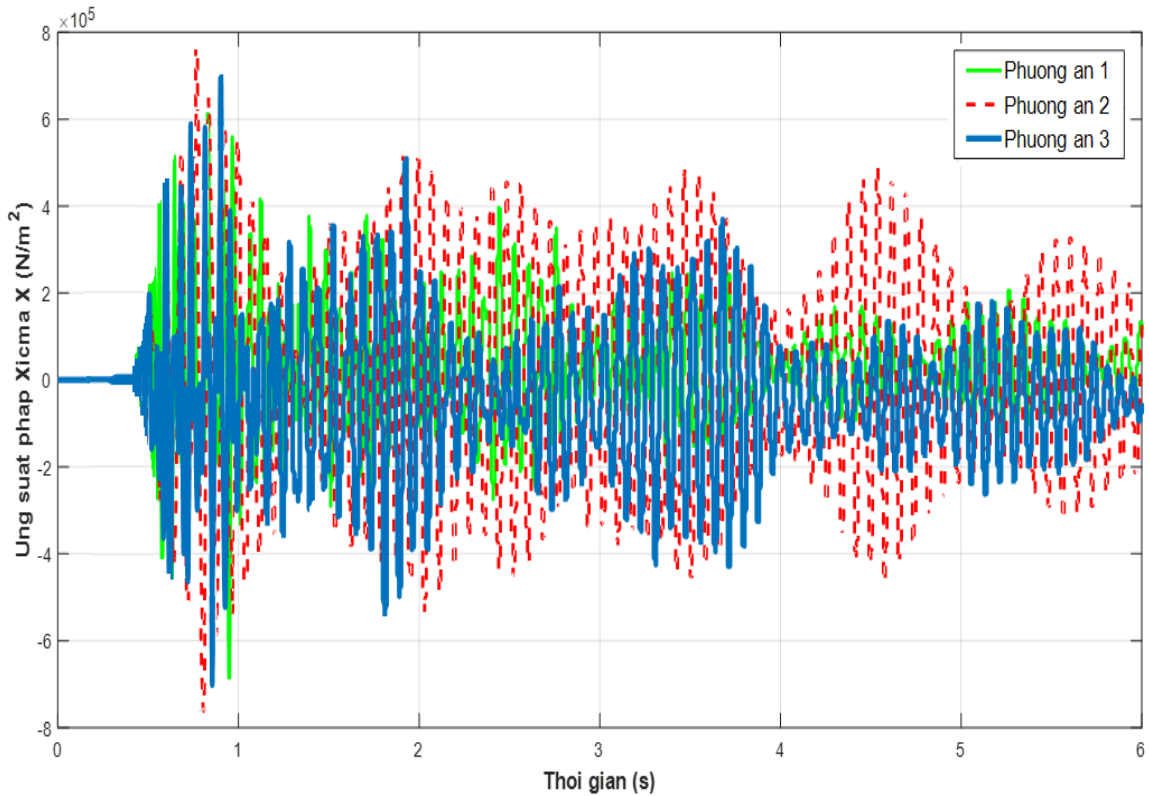
Phương án	Phương án 1	Phương án 2	Phương án 3
$w_{Max} (m) \cdot 10^{-4}$	1,86	2,40	2,15
$\sigma_y^{Max} (N/m^2) \cdot 10^5$	4,70	6,14	4,87
$\sigma_x^{Max} (N/m^2) \cdot 10^5$	7,11	7,42	7,83



**Hình 3.16.** Đáp ứng chuyển vị hướng kính  $w$  theo thời gian



**Hình 3.17.** Đáp ứng ứng suất pháp  $\sigma_y$  theo thời gian

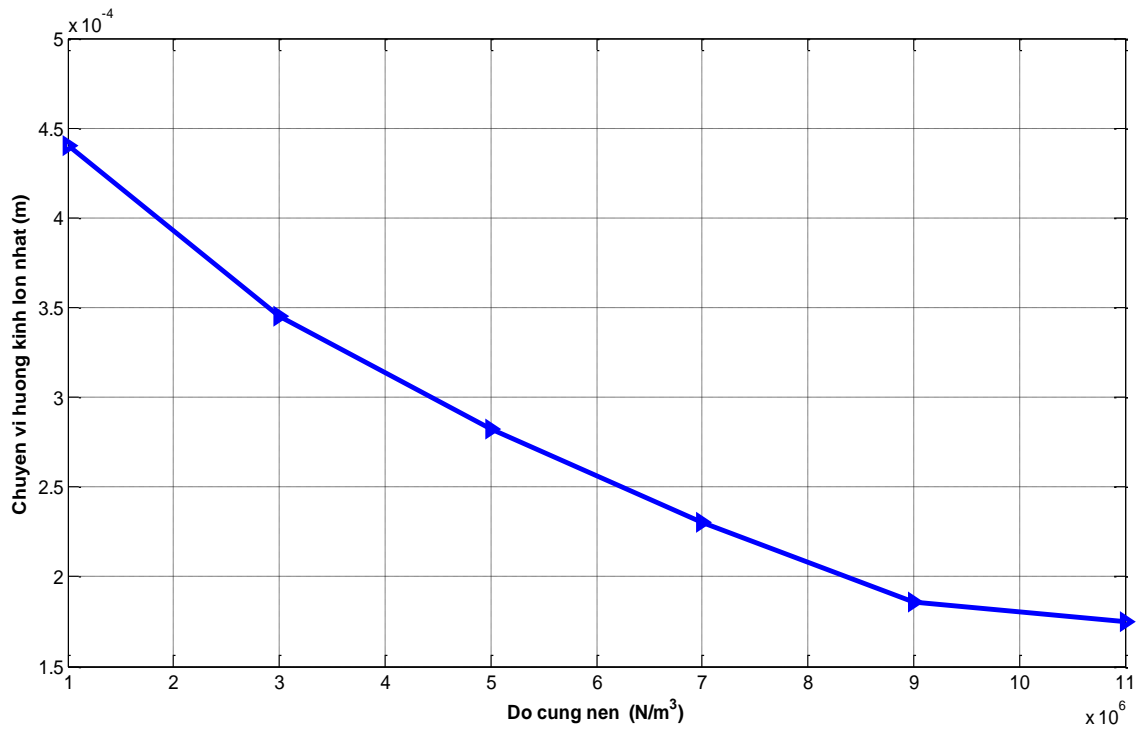


**Hình 3.18.** Đáp ứng ứng suất pháp  $\sigma_x$  theo thời gian

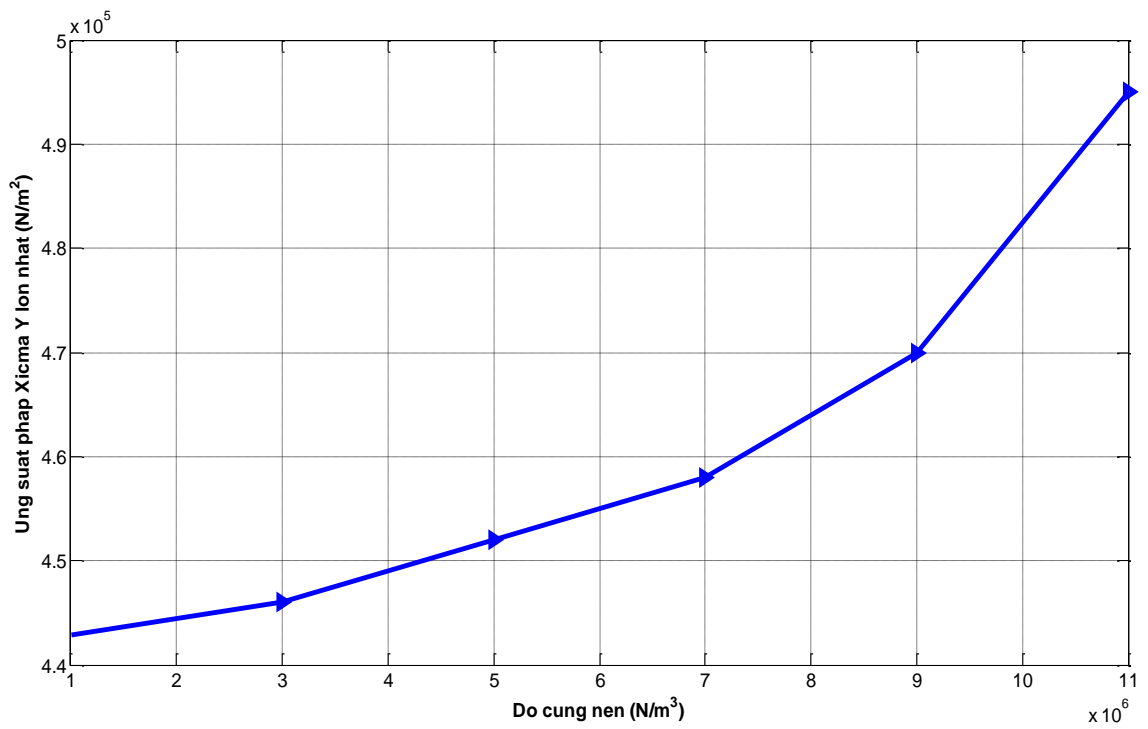
**Nhận xét:** Góc đặt cốt có ảnh hưởng đến chuyển vị hướng kính và ứng suất pháp của ống composite. Ta thấy so với các phương án đặt cốt, thì phương án 2 có chuyển vị hướng kính và ứng suất pháp lớn nhất và phương án 1 có chuyển vị và ứng suất pháp nhỏ nhất. So sánh phương án 2 với phương án 1 thì chuyển vị cao gấp 1,29 lần, ứng suất pháp  $\sigma_y$  là 1,3 lần,  $\sigma_x$  là 1,04 lần.

#### 3.2.3.4. Ảnh hưởng của độ cứng nền đàn hồi:

Khảo sát ảnh hưởng của độ cứng môi trường (nền) đàn hồi đến đáp ứng động lực học của ống composite, trong đó hệ số nền  $k_0$  biến thiên từ  $1 \cdot 10^6$  N/m<sup>3</sup> đến  $10 \cdot 10^6$  N/m<sup>3</sup>. Các tham số khác trong bài toán giữ nguyên. Kết quả sự thay đổi giá trị chuyển vị hướng kính lớn nhất và ứng suất pháp lớn nhất tại điểm tính của ống composite thể hiện như trong bảng 3.10 và các đồ thị hình 3.19, 3.20, 3.21.

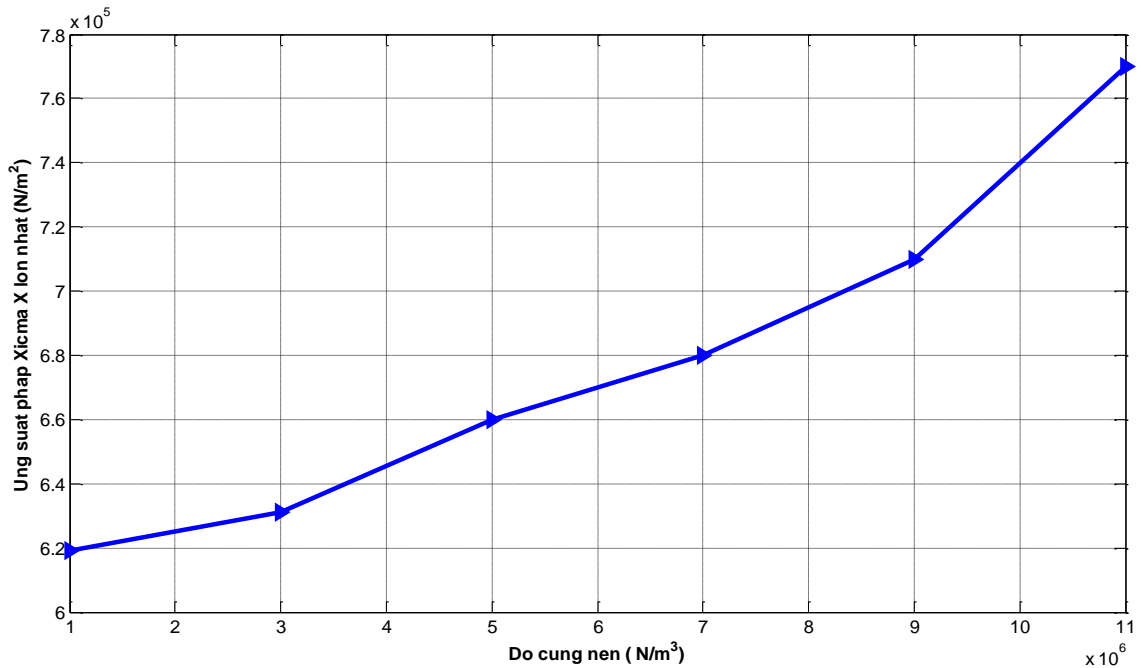


**Hình 3.19.** Quan hệ  $w_{Max}$  và độ cứng nền đàn hồi



**Hình 3.20.** Quan hệ  $\sigma_y^{Max}$  và độ cứng nền đàn hồi





**Hình 3.21.** Quan hệ  $\sigma_x^{Max}$  và độ cứng nền đàn hồi

**Bảng 3.10.** Đáp ứng động lực học lớn nhất và độ cứng nền

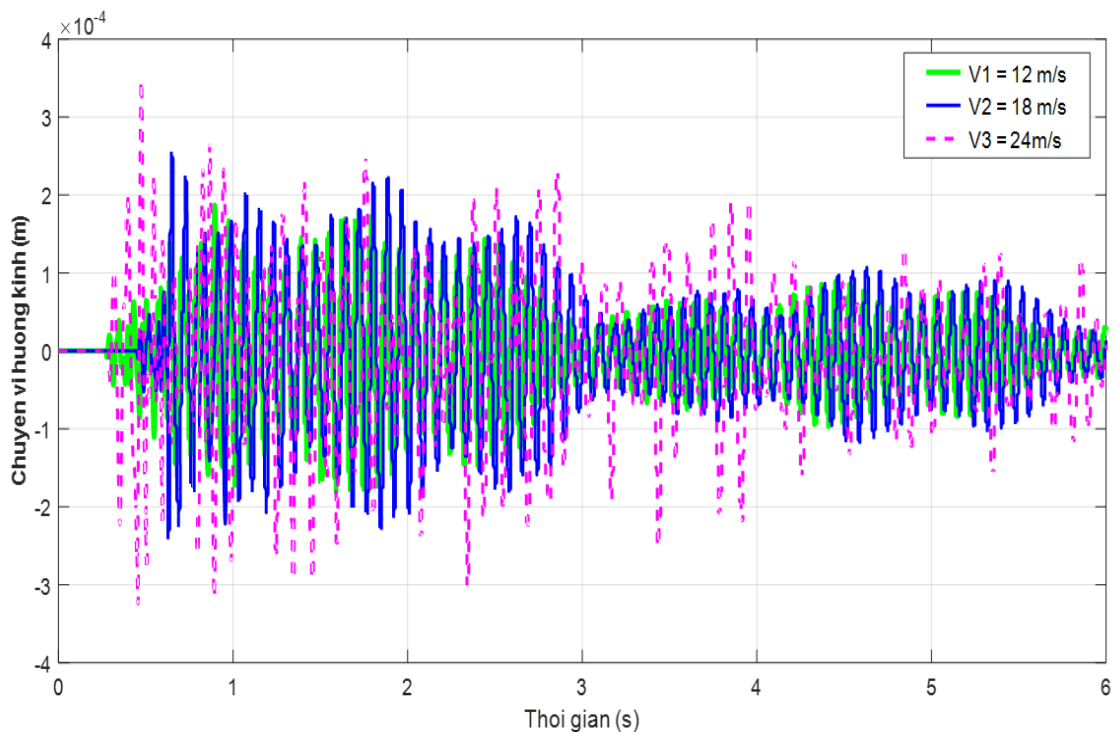
Hệ số nền ( $N/m^3$ )	$1.10^6$	$3.10^6$	$5.10^6$	$7.10^6$	$9.10^6$	$11.10^6$
$w_{Max}$ (m). $10^{-4}$	4,40	3,45	2,82	2,30	1,86	1,75
$\sigma_y^{Max}$ ( $N/m^2$ ). $10^5$	4,21	4,50	4,57	4,63	4,70	4,95
$\sigma_x^{Max}$ ( $N/m^2$ ). $10^5$	5,9	6,1	6,4	6,8	7,10	7,4

**Nhận xét:** Phân tích đồ thị cho thấy khi hệ số nền tăng lên từ  $1.10^6 N/m^3$  đến  $10.10^6 N/m^3$ , thì đáp ứng động lực học trong ống thay đổi phi tuyến, cụ thể chuyển vị trong kết cấu giảm, còn ứng suất pháp trong kết cấu tăng lên.

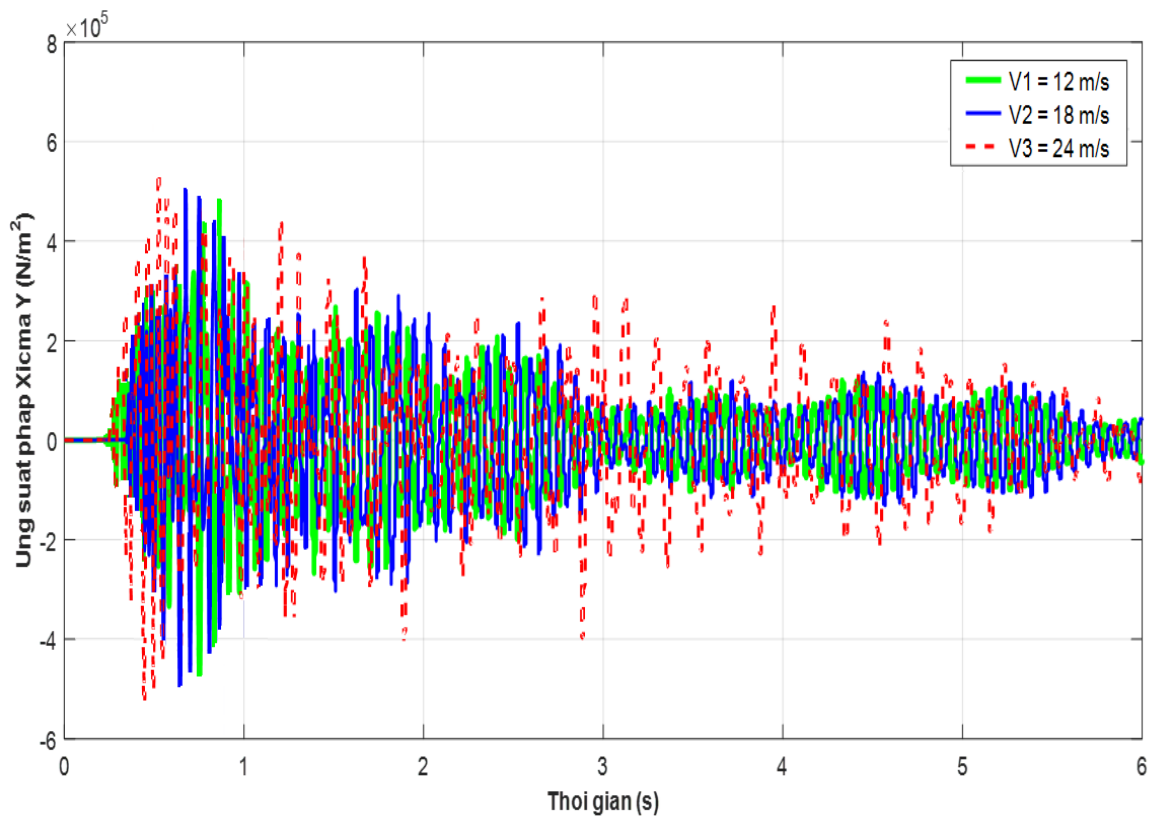
Khi hệ số nền tăng lên từ  $1.10^6 \text{ N/m}^3$  đến  $7.10^6 \text{ N/m}^3$  thì chuyển vị trong kết cấu giảm đáng kể ( giảm 1,91 lần), hệ số nền (độ cứng của nền) tiếp tục tăng lên thì chuyển vị của ống giảm chậm lại. Điều này hoàn toàn phù hợp với quy luật cơ học. Với ứng suất pháp thì ngược lại, nó tỉ lệ thuận với hệ số nền đàn hồi, khi độ cứng của nền nhỏ thì ứng suất pháp của ống nhỏ, khi tăng độ cứng nền lên cao ta thấy ứng suất pháp cũng tăng lên. Do vậy có thể thấy rằng, độ cứng nền có ảnh hưởng lớn đến đáp ứng động lực học của ống composite.

### 3.2.3.5. Ảnh hưởng tốc độ di chuyển của tải trọng:

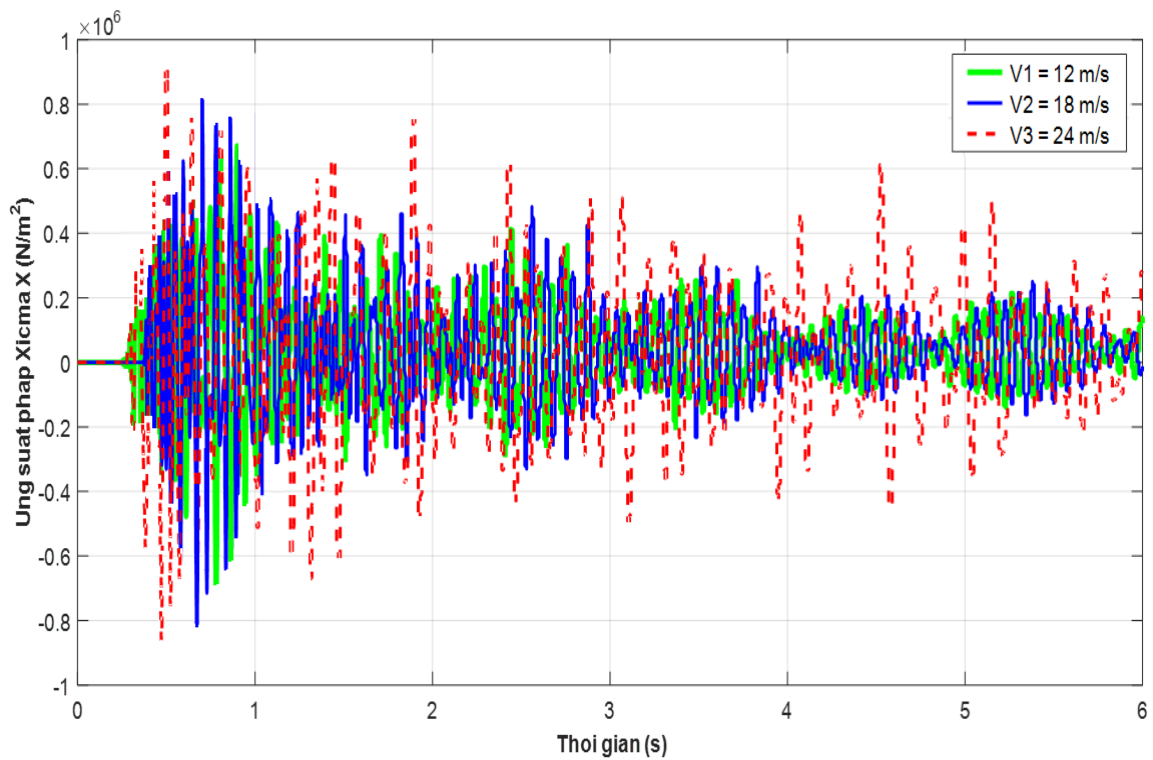
Giải bài toán với sự thay đổi vận tốc  $v$  của áp suất di động thay đổi: 12m/s, 18m/s và 24m/s. Các tham số khác của bài toán không đổi. Kết quả sự thay đổi các đại lượng tính thể hiện trong bảng 3.11 và đồ thị hình 3.22, 3.23, 3.24.



**Hình 3.22.** Đáp ứng chuyển vị hướng kính  $w$  theo thời gian



**Hình 3.23.** Đáp ứng ứng suất pháp  $\sigma_y$  theo thời gian



**Hình 3.24.** Đáp ứng ứng suất pháp  $\sigma_x$  theo thời gian

**Bảng 3.11.** Đáp ứng động lực học lớn nhất và sự thay đổi vận tốc tải trọng

Vận tốc (m/s)	12	18	24
$w_{\text{Max}} \text{ (m)} \cdot 10^{-4}$	1,86	2,54	3,32
$\sigma_y^{\text{Max}} \text{ (N/m}^2\text{)} \cdot 10^5$	4,70	5,17	5,61
$\sigma_x^{\text{Max}} \text{ (N/m}^2\text{)} \cdot 10^5$	7,11	8,12	8,89

**Nhận xét:** Khi tăng vận tốc của áp suất di động, ta thấy biên độ chuyển vị và ứng suất pháp cũng tăng lên, cụ thể khi vận tốc tăng từ 12m/s đến 24m/s thì chuyển vị  $w$  tăng 1,79 lần, ứng suất pháp  $\sigma_y$  tăng 1,19 lần và ứng suất pháp  $\sigma_x$  tăng 1,25 lần; còn vị trí biên độ của chuyển vị và ứng suất pháp cũng thay đổi với sự thay đổi của vận tốc, khi vận tốc tăng từ 12m/s đến 24m/s thì vị trí chuyển vị và ứng suất pháp lần lượt đạt giá trị lớn nhất tại thời điểm 0,75s, 0,65s và 0,55s.

### 3.2.3.6. Ảnh hưởng của tải trọng:

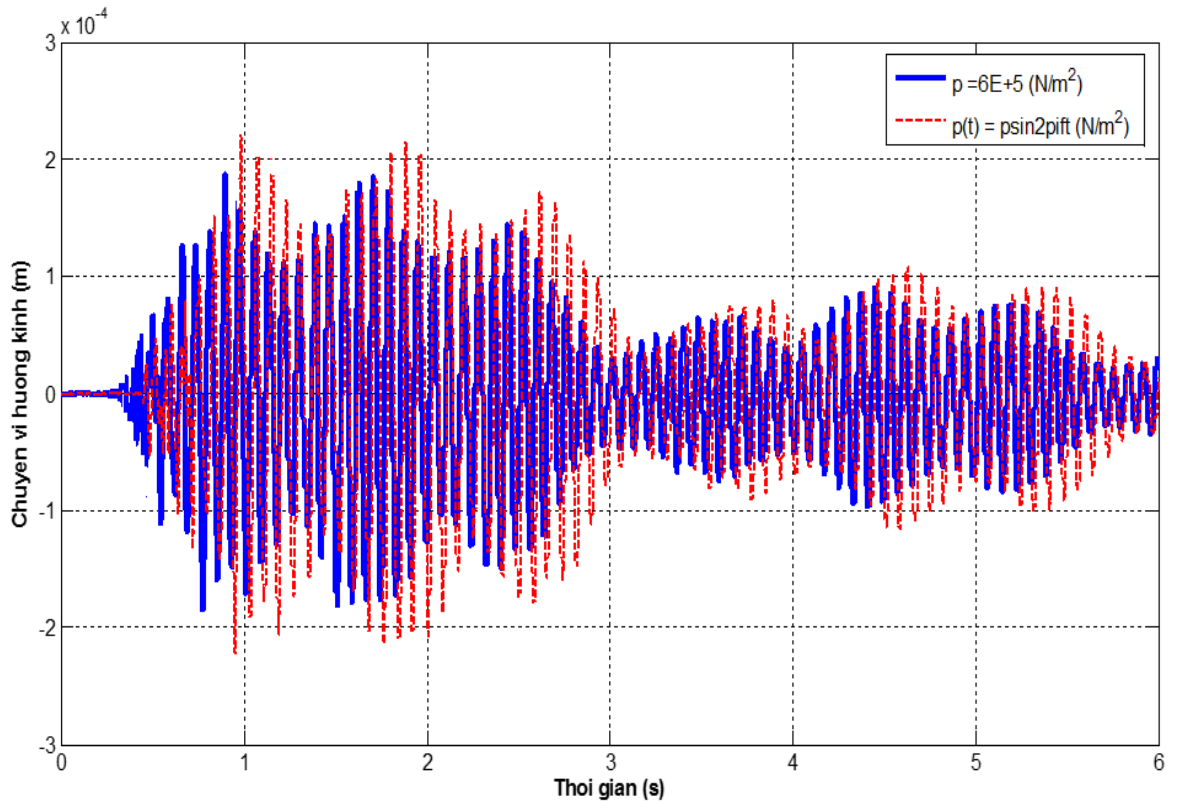
*Trường hợp 1: Áp suất là hàm điều hòa*

Xem xét bài toán như trên, với trường hợp khi áp suất trong ống thay đổi theo chu kỳ có dạng  $p(t) = p \sin 2\pi ft$ , với  $f = 50 \text{ Hz}$  và  $p = 6 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ .

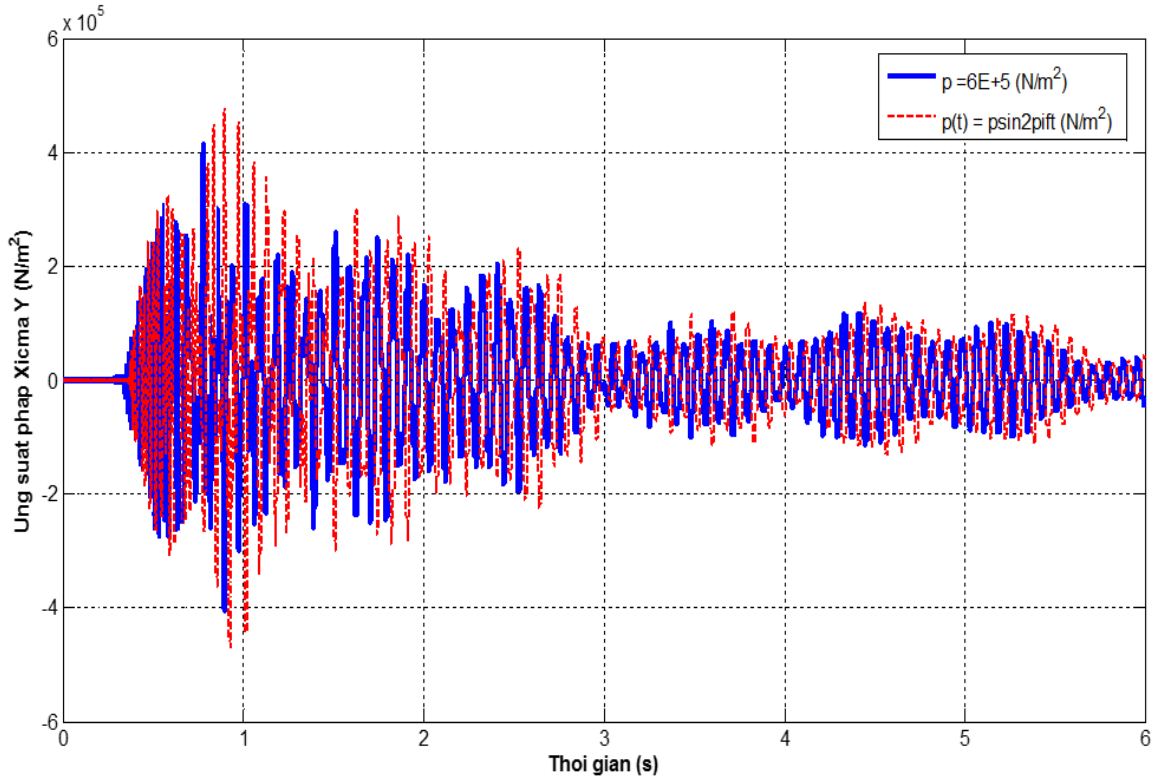
Kết quả hình 3.25, 3.26, 3.27 là đáp ứng chuyển vị  $w$  và ứng suất pháp  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  tại điểm tính thuộc ống.

**Bảng 3.12.** Đáp ứng động lực học lớn nhất và tải trọng

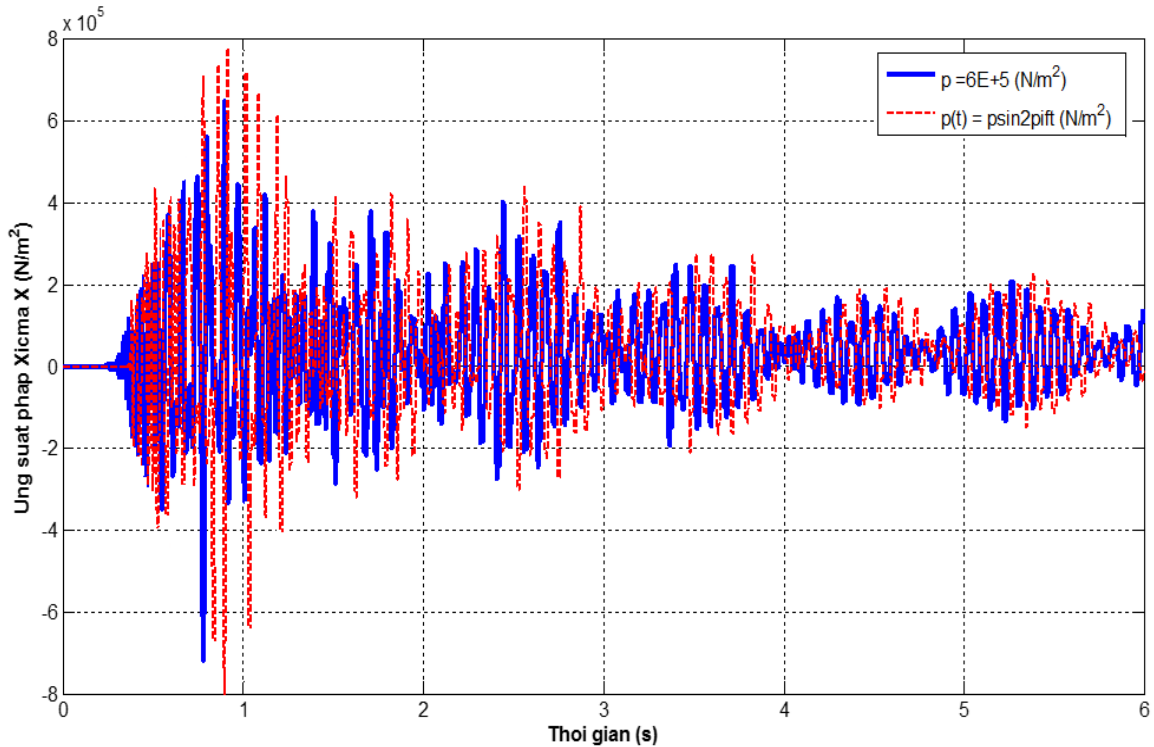
Tải trọng	$w_{\text{Max}} \text{ (m)}$	$\sigma_y^{\text{Max}} \text{ (N/m}^2\text{)}$	$\sigma_x^{\text{Max}} \text{ (N/m}^2\text{)}$
$p$	$1,86 \cdot 10^{-4}$	$4,70 \cdot 10^5$	$7,10 \cdot 10^5$
$p(t) = p \sin 2\pi ft$	$2,23 \cdot 10^{-4}$	$5,40 \cdot 10^5$	$7,95 \cdot 10^5$



**Hình 3.25.** Đáp ứng chuyển vị hướng kính  $w$  theo thời gian



**Hình 3.26.** Đáp ứng ứng suất pháp  $\sigma_y$  theo thời gian

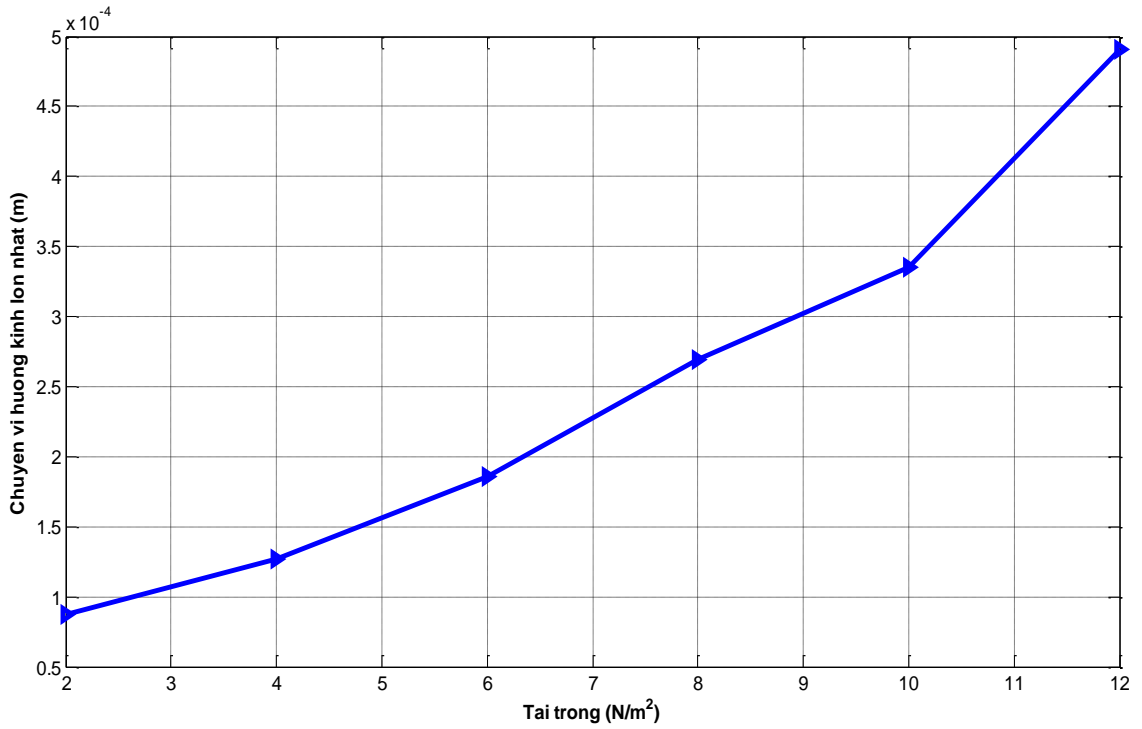


**Hình 3.27.** Đáp ứng ứng suất pháp  $\sigma_x$  theo thời gian

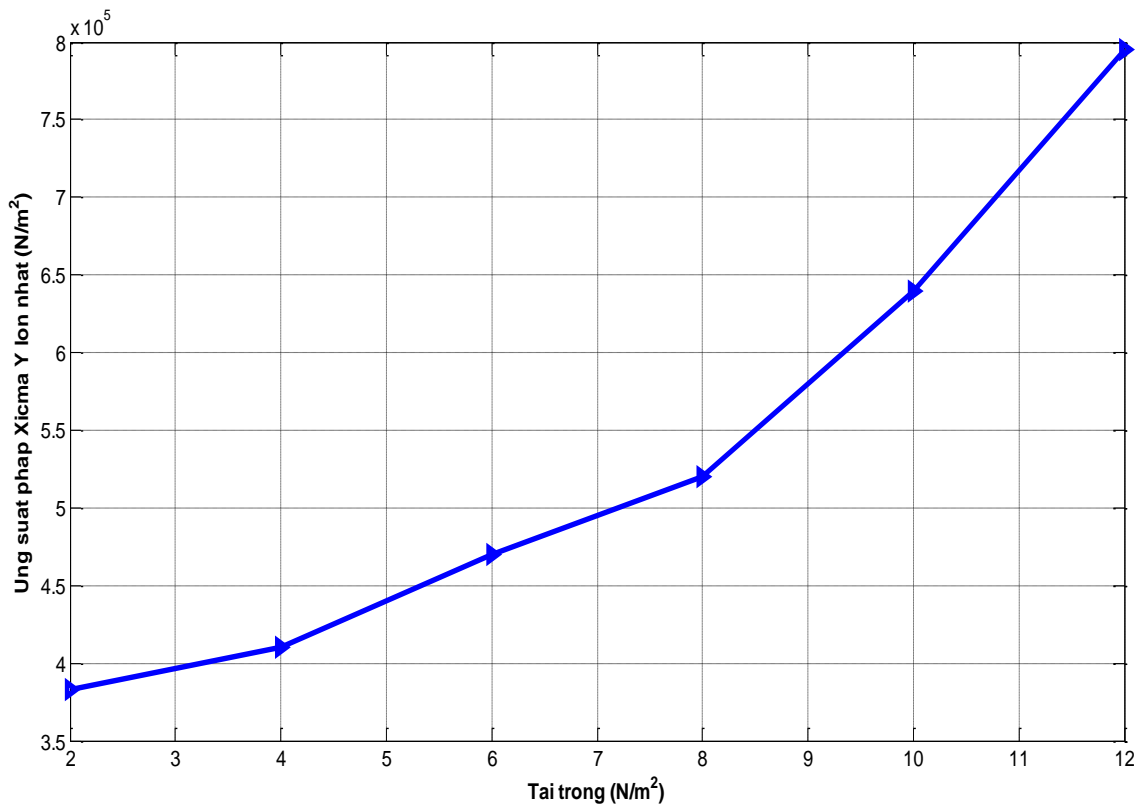
**Nhận xét:** Ta thấy quy luật biến thiên của đáp ứng động lực học của 2 trường hợp áp suất là hàm điều hòa và áp suất không đổi  $p$  là tương đồng, về mặt giá trị thì chuyển vị lớn nhất  $w_{Max}$  của ống composite trong trường hợp áp suất là hàm điều hòa lớn hơn trường hợp áp suất không đổi là 1,2 lần, ứng suất pháp lớn nhất lớn hơn 1,15 lần ( $\sigma_y^{Max}$ ) và 1,12 lần ( $\sigma_x^{Max}$ ). Giá trị lớn hơn trong trường hợp áp suất là hàm điều hòa có thể là do hiện tượng cộng hưởng xảy ra khi tần số dao động riêng trùng với tần số của hàm áp suất điều hòa.

*Trường hợp 2: Áp suất di động là hằng số*

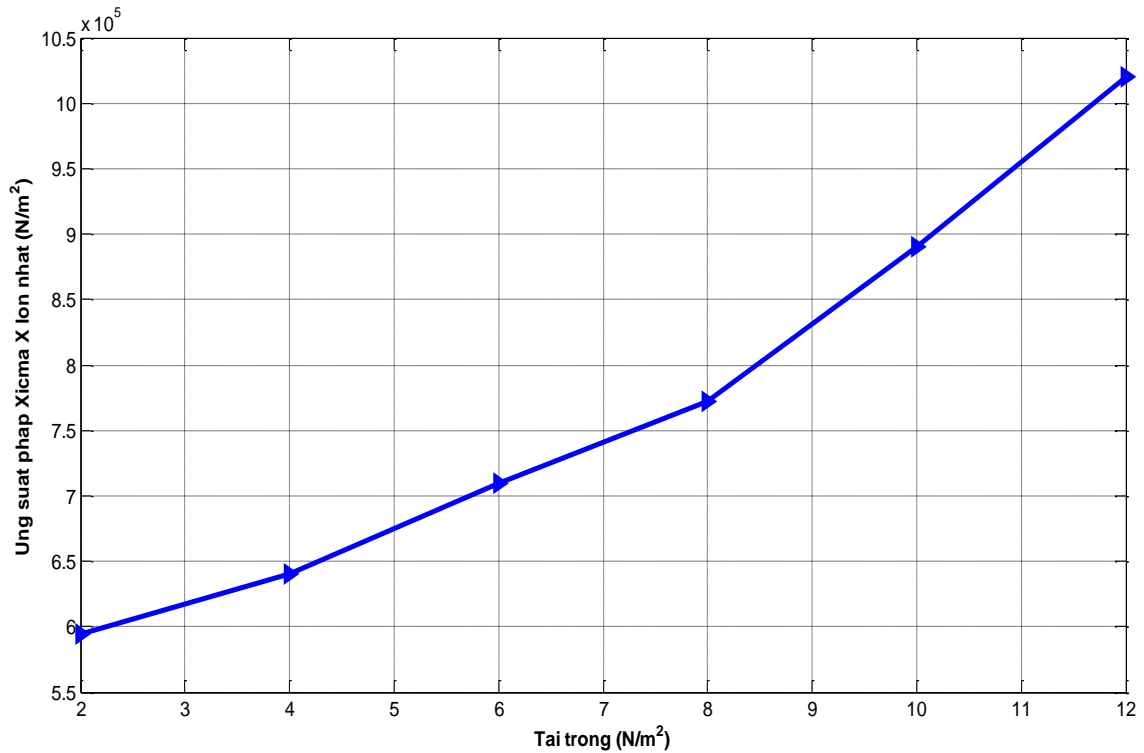
Xét sự thay đổi áp suất  $p$  từ  $2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  đến  $12 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ , kết quả của chuyển vị lớn nhất  $w_{Max}$  và ứng suất pháp lớn nhất  $\sigma_y^{Max}$ ,  $\sigma_x^{Max}$  tại điểm tính thuộc ống composite thể hiện trong bảng 3.13 và đồ thị hình vẽ 3.28, 3.29, 3.30.



Hình 3.28. Quan hệ  $w_{\text{Max}}$  và tải trọng



Hình 3.29. Quan hệ  $\sigma_y^{\text{Max}}$  và tải trọng



**Hình 3.30.** Quan hệ  $\sigma_x^{\text{Max}}$  và tải trọng

**Bảng 3.13.** Đáp ứng động lực học lớn nhất và sự thay đổi tải trọng

$p$ (N/m <sup>2</sup> ). 10 <sup>5</sup>	2	4	6	8	10	12
$w_{\text{Max}}$ (m) .10 <sup>-4</sup>	0,87	1,27	1,86	2,69	3,35	4,91
$\sigma_y^{\text{Max}}$ (N/m <sup>2</sup> ) .10 <sup>5</sup>	3,83	4,10	4,70	5,20	6,40	7,95
$\sigma_x^{\text{Max}}$ (N/m <sup>2</sup> ) .10 <sup>5</sup>	5,94	6,41	7,10	7,72	8,90	10,2

**Nhận xét:** Khi tăng tải trọng từ  $2 \cdot 10^5$  đến  $12 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup> chuyển vị hướng kính và ứng suất pháp tăng phi tuyến: chuyển vị hướng kính  $w_{\text{Max}}$  tăng 5,64 lần, ứng suất pháp  $\sigma_y^{\text{Max}}$  tăng 2,07 lần và ứng suất pháp  $\sigma_x^{\text{Max}}$  tăng 1,72 lần. Như vậy ta thấy rằng, tải trọng có ảnh hưởng lớn đến đáp ứng động lực học của ống composite.

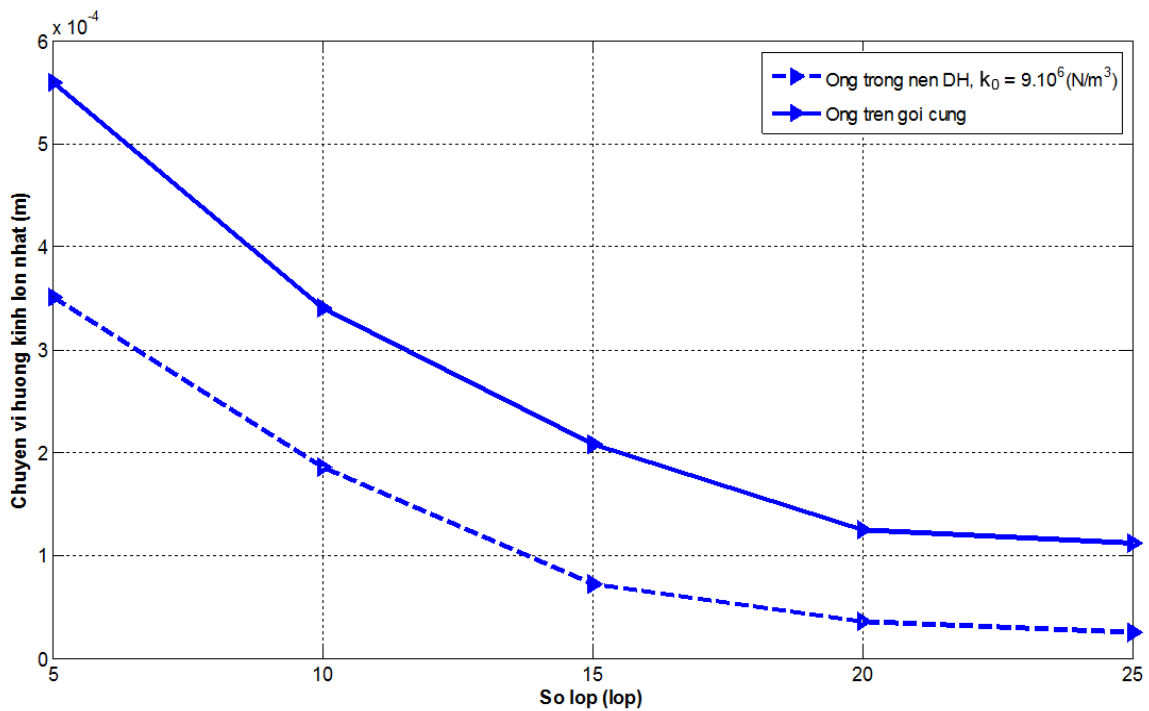


### 3.3. Ống trụ composite trên gối cứng chịu tác dụng áp suất di động

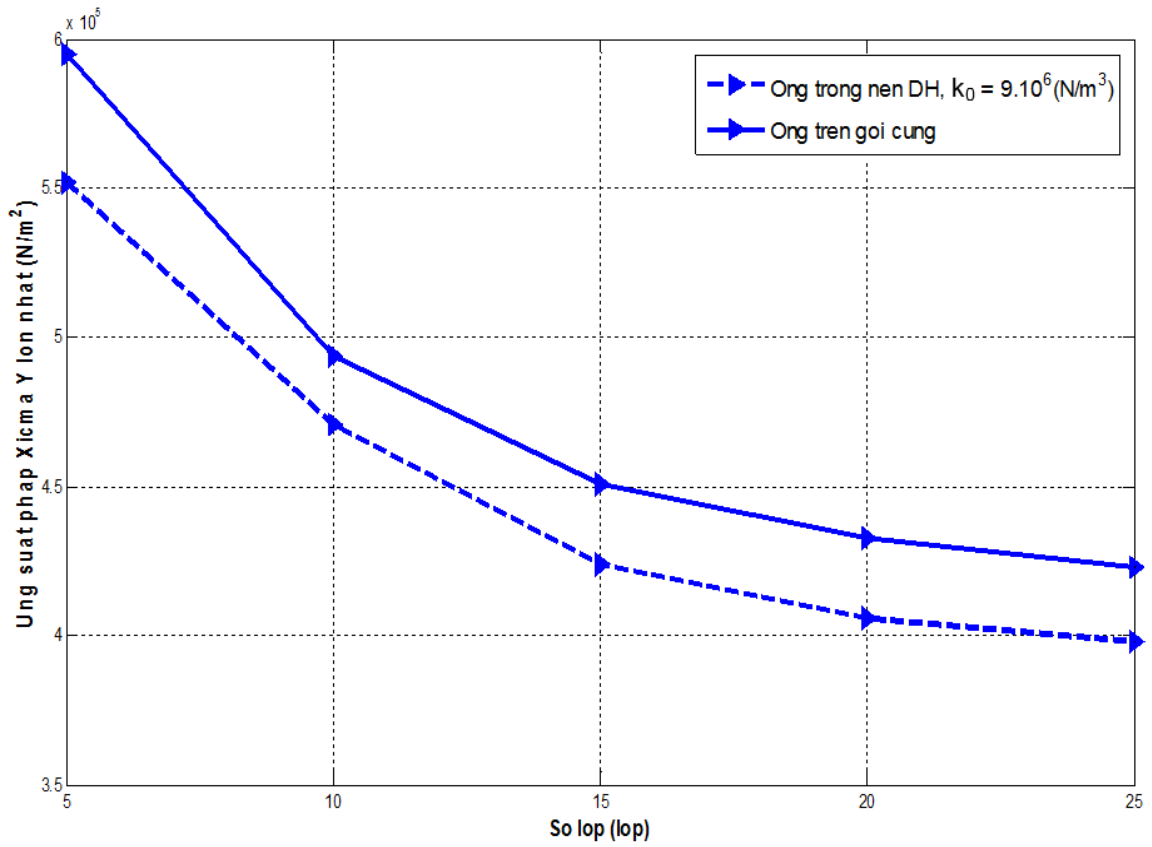
Trong phần này, để khẳng định tính linh hoạt của chương trình tính cũng như định hướng tham khảo trong tính toán, thiết kế các công trình ống dẫn lộ thiên thường gặp trong thực tế, tác giả tính toán số đối với bài toán ống trụ composite đặt trên 4 gối cứng tuyệt đối, bố trí cách đều nhau, chịu áp suất di động, trong đó các thông số kết cấu, tải trọng như mục 3.2. Lúc này hệ số nền trong phương trình (2.58)  $k_0 = 0$  và điều kiện biên với ống trụ composite đặt trên các gối cứng (liên kết tựa) là chuyển vị hướng kính tại các nút chứa liên kết tựa bằng 0.

#### 3.3.1. Ảnh hưởng của số lớp ống composite

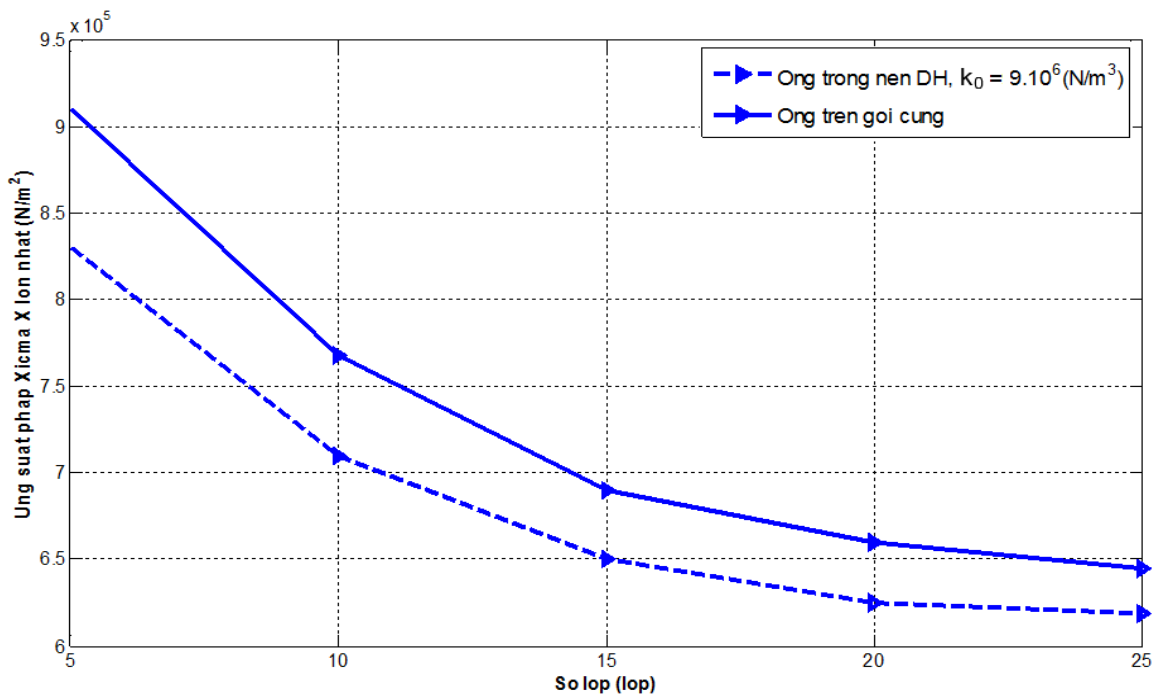
Khảo sát ống trụ composite với số lớp thay đổi từ 5 lớp đến 25 lớp. Góc đặt cốt  $[45/-45]_{10}$ . Kết quả ta được quan hệ giữa số lớp ống composite với chuyển vị hướng kính lớn nhất  $w_{Max}$  và ứng suất pháp lớn nhất  $\sigma_y^{Max}$ ,  $\sigma_x^{Max}$  tại điểm giữa của ống composite được thể hiện trong bảng 3.14 và đồ thị hình 3.31, 3.32, 3.33.



Hình 3.31. Quan hệ  $w_{Max}$  và số lớp



Hình 3.32. Quan hệ  $\sigma_y^{Max}$  và số lớp



Hình 3.33. Quan hệ  $\sigma_x^{Max}$  và số lớp

**Bảng 3.14.** Đáp ứng động lực học lớn nhất và số lớp ống composite

Số lớp	5	10	15	20	25
$w_{\text{Max}} \text{ (m)} \cdot 10^{-4}$	5,60	3,22	2,08	1,25	1,12
$\sigma_y^{\text{Max}} \text{ (N/m}^2\text{)} \cdot 10^5$	6,32	4,81	4,76	4,73	4,70
$\sigma_x^{\text{Max}} \text{ (N/m}^2\text{)} \cdot 10^5$	8,91	7,38	6,90	6,62	6,40

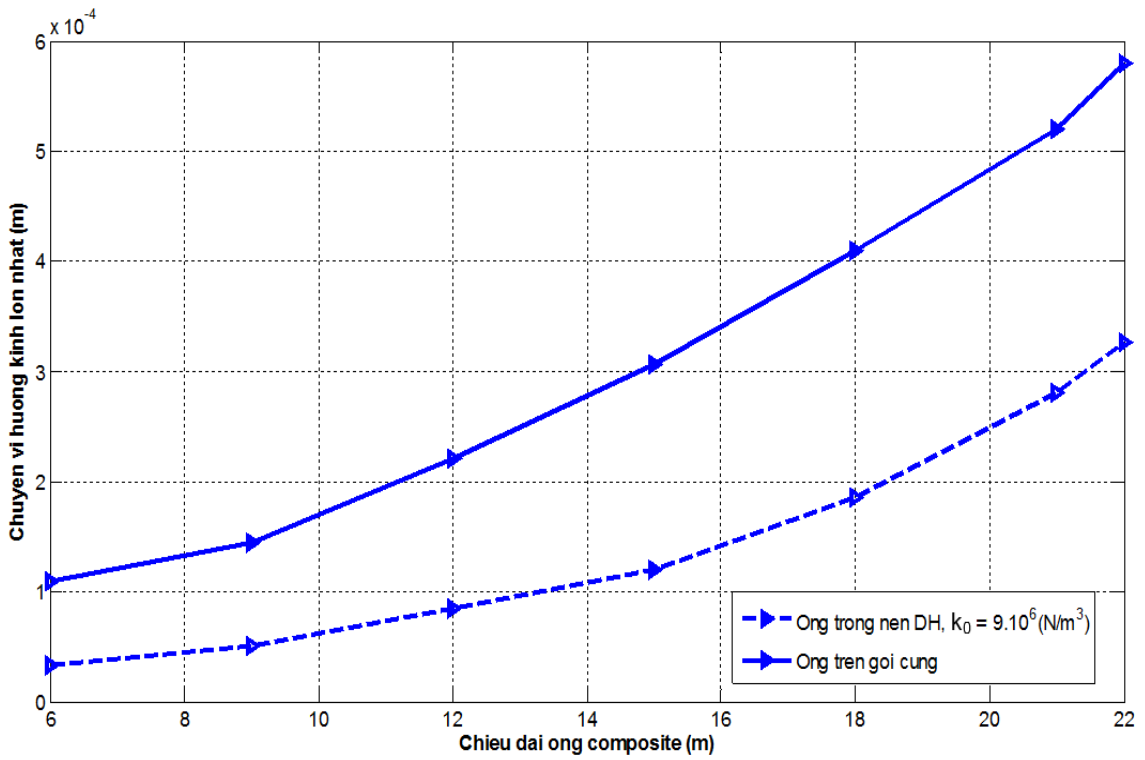
**Nhận xét:** Khi tăng số lớp từ 5 lớp đến 15 lớp thì chuyển vị hướng kính lớn nhất và ứng suất pháp lớn nhất giảm nhanh, còn khi số lớp từ 20 đến 25 thì giá trị của chuyển vị hướng kính và ứng suất pháp giảm với tốc độ chậm.

### 3.3.2. Ảnh hưởng của chiều dài ống

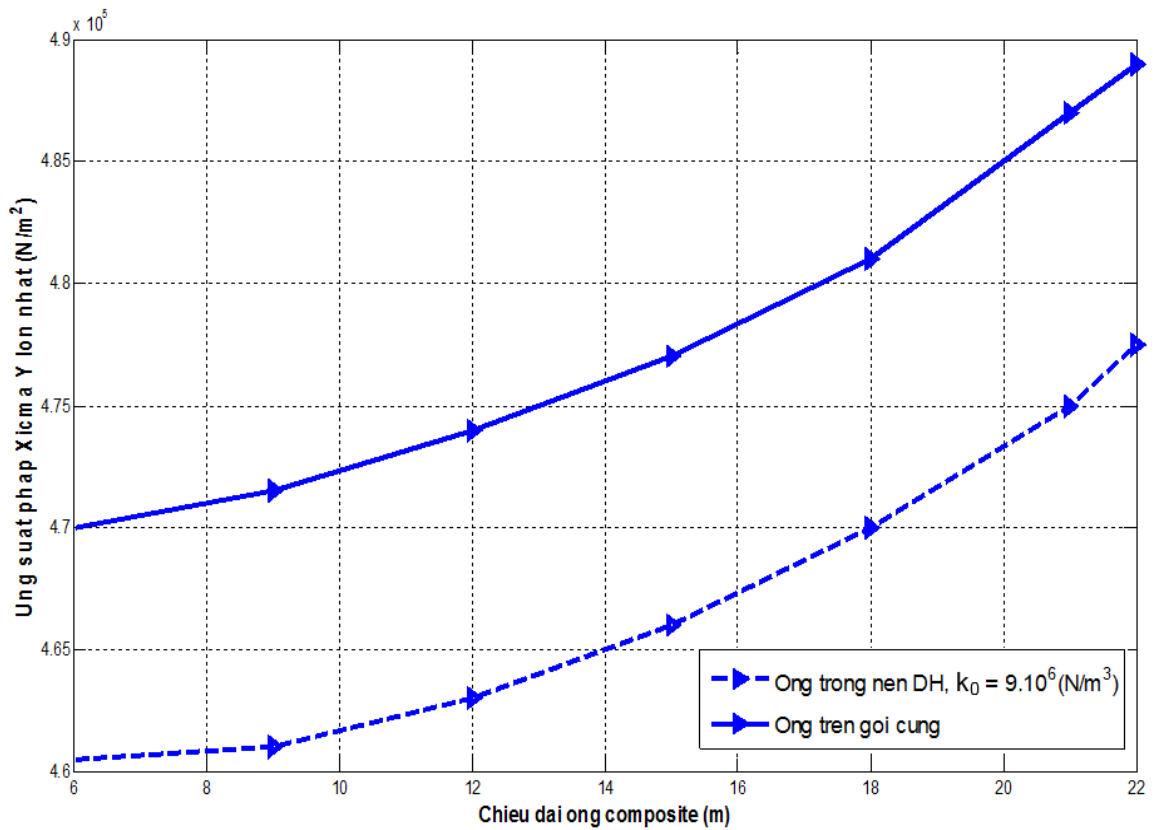
Khảo sát với bài toán với chiều dài của ống thay đổi từ 6m đến 21m, kết quả đáp ứng chuyển vị  $w_{\text{Max}}$  và ứng suất pháp  $\sigma_y^{\text{Max}}$ ,  $\sigma_x^{\text{Max}}$  tại điểm tính được thể hiện như trong bảng 3.15 và đồ thị hình 3.34, 3.35, 3.36.

**Bảng 3.15.** Đáp ứng động lực học lớn nhất và chiều dài ống composite

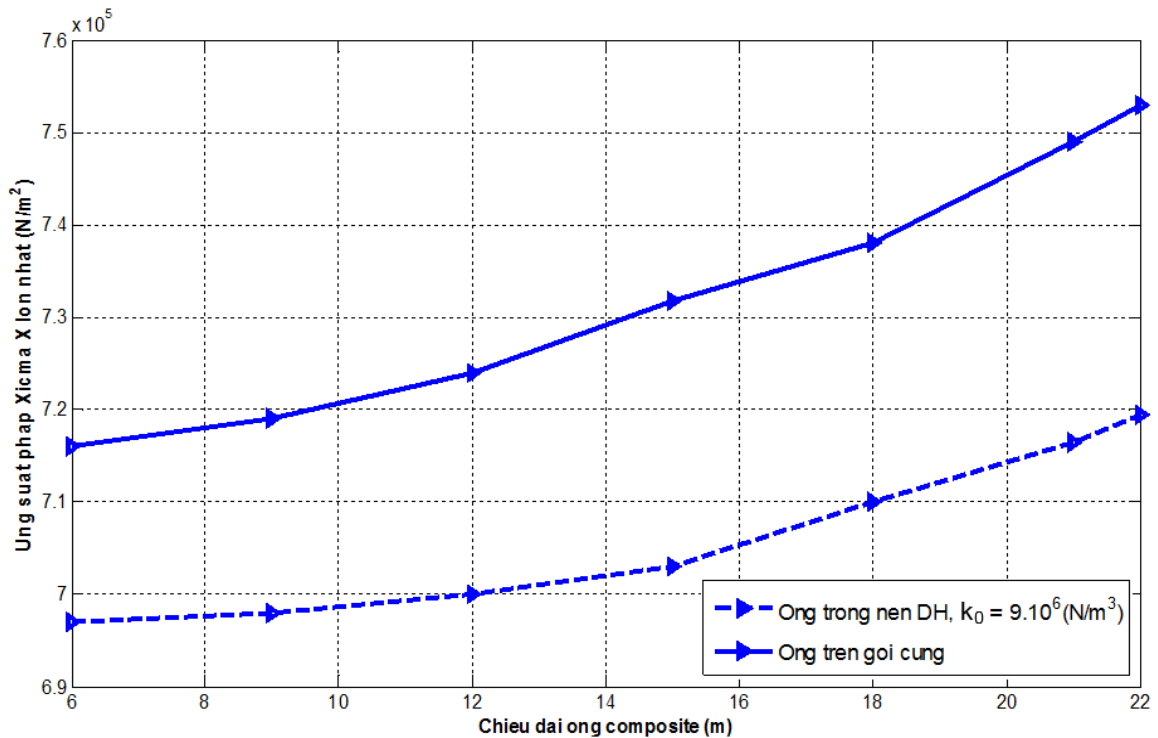
Chiều dài ống (m)	6	9	12	15	18	21
$w_{\text{Max}} \text{ (m)} \cdot 10^{-4}$	1,40	1,71	2,05	2,48	3,22	3,97
$\sigma_y^{\text{Max}} \text{ (N/m}^2\text{)} \cdot 10^5$	4,7	4,71	4,74	4,77	4,81	4,87
$\sigma_x^{\text{Max}} \text{ (N/m}^2\text{)} \cdot 10^5$	7,16	7,19	7,24	7,31	7,38	7,49



Hình 3.34. Quan hệ  $w_{Max}$  và chiều dài ống composite



Hình 3.35. Quan hệ  $\sigma_y^{Max}$  và chiều dài ống composite



**Hình 3.36.** Quan hệ  $\sigma_x^{\text{Max}}$  và chiều dài ống composite

**Nhận xét:** Trường hợp ống composite đặt trên các gối cứng, khi tăng chiều dài ống composite thì chuyển vị hướng kính lớn nhất và ứng suất pháp lớn nhất cũng tăng lên, cụ thể khi thay đổi chiều dài ống composite từ 6m đến 21m, ta thấy chuyển vị hướng kính lớn nhất  $w_{\text{Max}}$  tăng 5,26 lần, ứng suất pháp  $\sigma_y^{\text{Max}}$  tăng 1,04 lần, ứng suất pháp  $\sigma_x^{\text{Max}}$  tăng 1,05 lần. So sánh với trường hợp ống composite đặt trong nền đàn hồi (hệ số nền  $k_0 = 9.10^6 \text{ N/m}^3$ ), thì đáp ứng động lực học trong trường hợp ống đặt trên gối cứng là lớn hơn.

### 3.3.3. Ảnh hưởng của góc đặt cốt

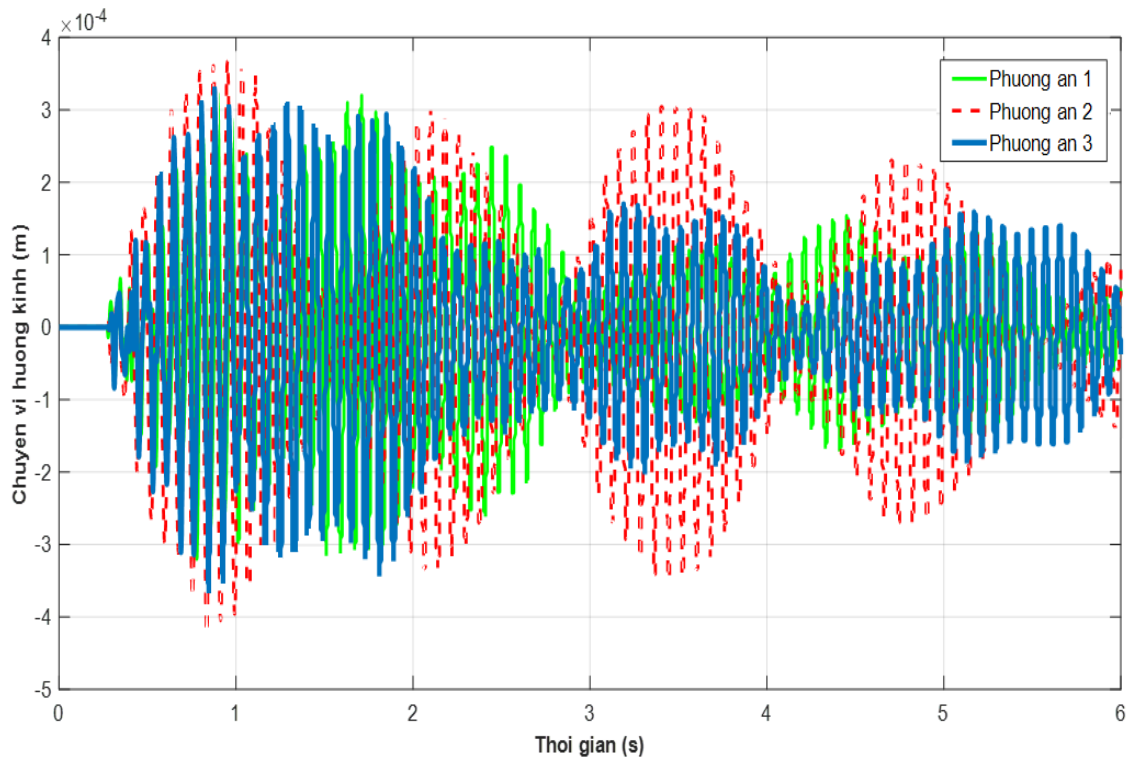
Xét bài toán với 3 phương án đặt cốt:

Phương án 1:  $45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0/45^0/-45^0$

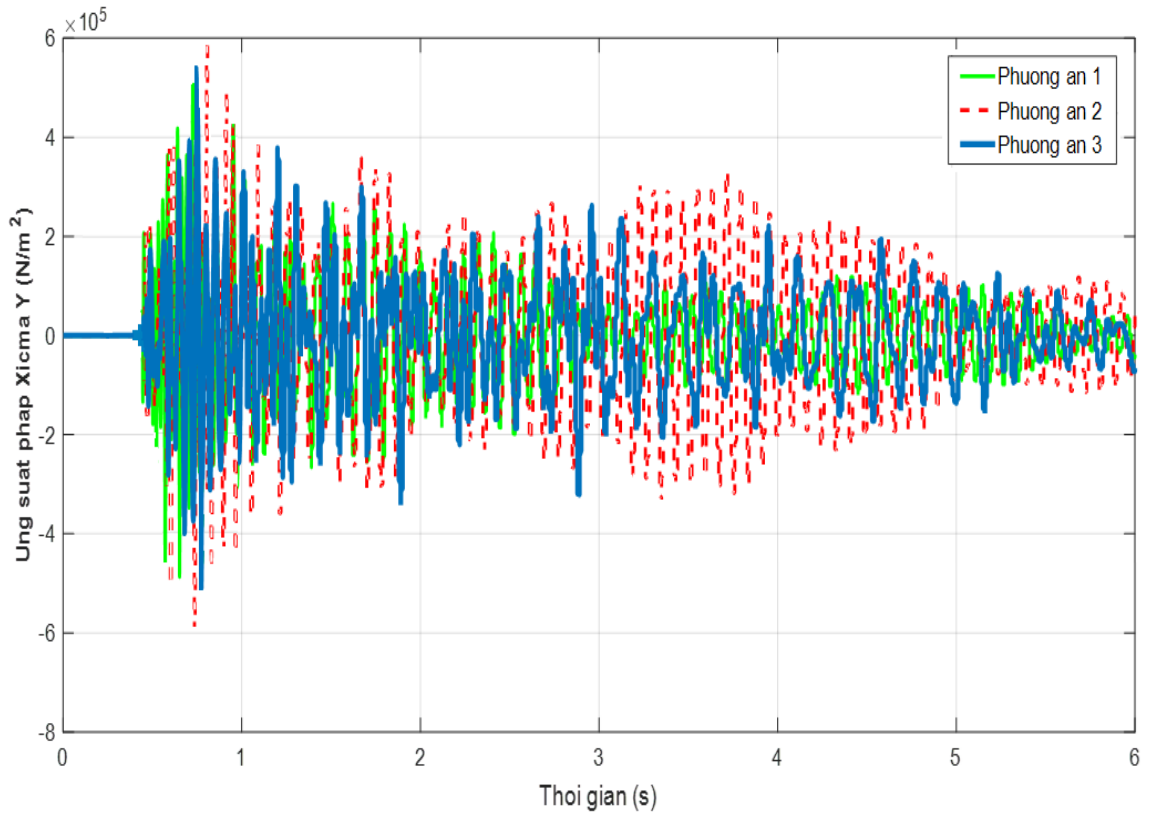
Phương án 2:  $45^0/0^0/-45^0/90^0/45^0/0^0/-45^0/90^0/45^0/0^0$

Phương án 3:  $30^0/60^0/30^0/60^0/30^0/60^0/30^0/60^0/30^0/60^0$

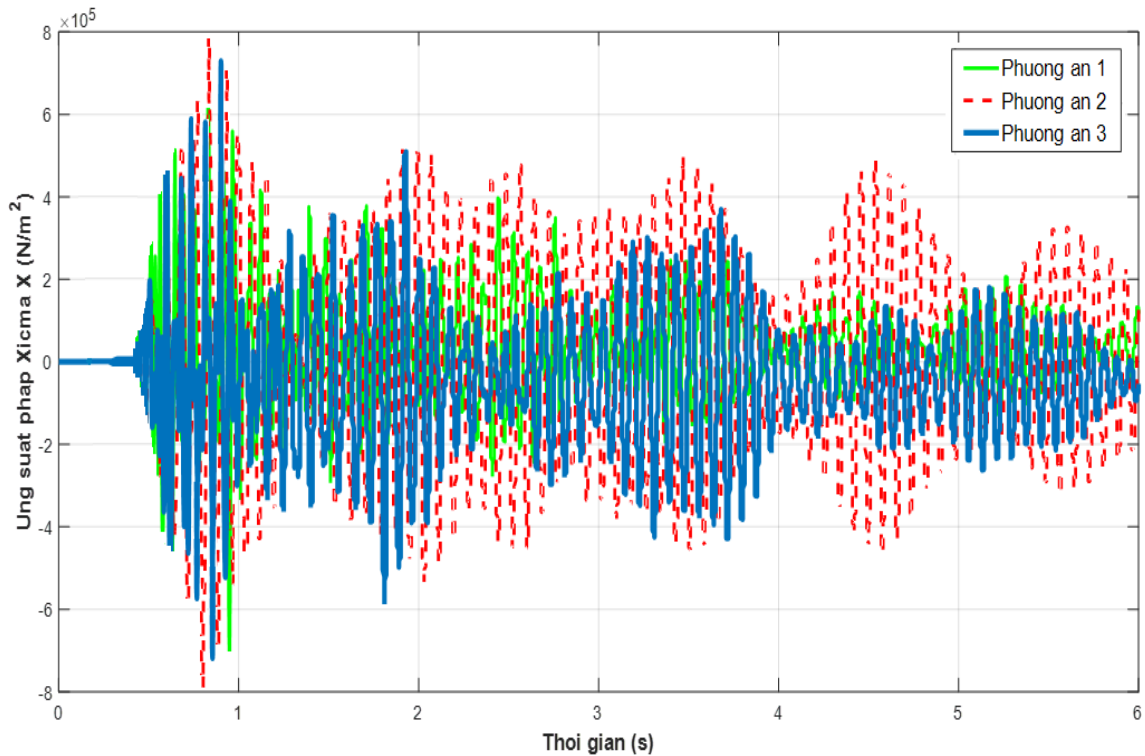
Kết quả đáp ứng chuyển vị, ứng suất tại điểm tính thể hiện như trong bảng 3.16 và đồ thị hình 3.37, 3.38, 3.39.



**Hình 3.37.** Đáp ứng chuyển vị hướng kính  $w$  với 3 phương án đặt cốt



**Hình 3.38.** Đáp ứng ứng suất pháp  $\sigma_y$  với 3 phương án đặt cốt



**Hình 3.39.** Đáp ứng ứng suất pháp  $\sigma_x$  với 3 phương án đặt cốt

**Bảng 3.16.** Đáp ứng động lực học lớn nhất theo phương án đặt cốt

Phương án	Phương án 1	Phương án 2	Phương án 3
$w_{\text{Max}} \text{ (m)} \cdot 10^{-4}$	3,22	4,17	3,61
$\sigma_y^{\text{Max}} \text{ (N/m}^2\text{)} \cdot 10^5$	4,81	5,95	5,42
$\sigma_x^{\text{Max}} \text{ (N/m}^2\text{)} \cdot 10^5$	7,38	7,94	7,51

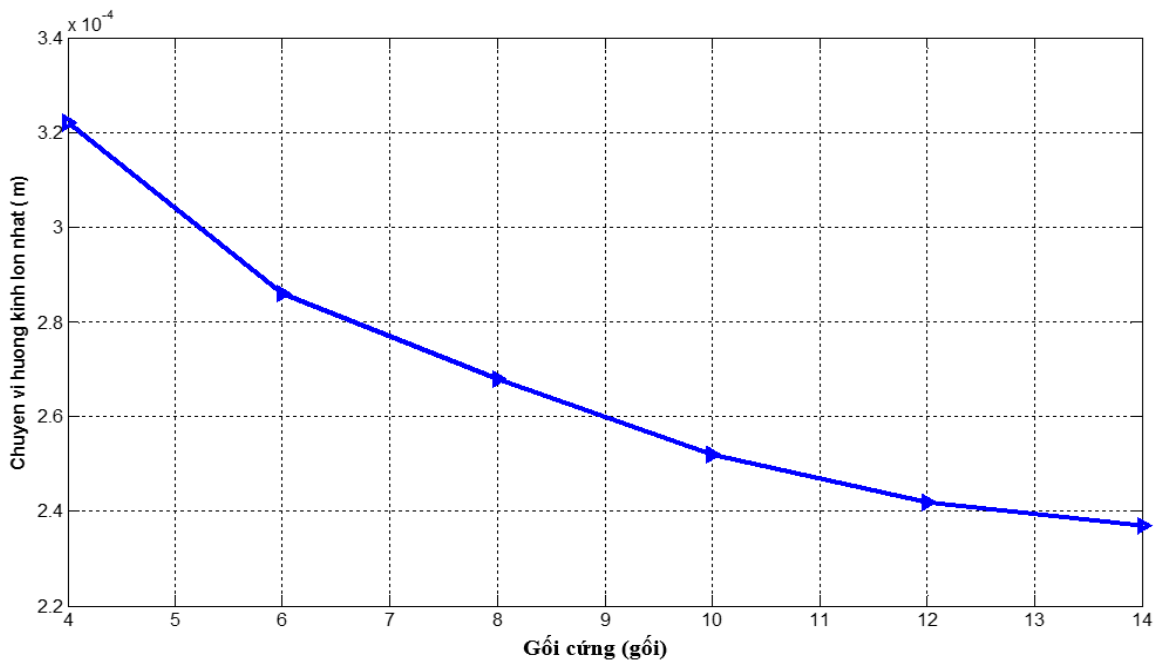
**Nhận xét:** Góc đặt cốt có ảnh hưởng đến chuyển vị và ứng suất của ống composite, trong 3 phương án trên, phương án 2 có chuyển vị và ứng suất pháp lớn nhất và phương án 1 có chuyển vị và ứng suất pháp nhỏ nhất, đây là cơ sở cho việc lựa chọn giải pháp đặt cốt hợp lý cho các lớp composite của ống.

### 3.3.4. Ảnh hưởng số lượng gôỉ cứng

Khảo sát bài toán với sự thay đổi số lượng gôỉ cứng từ 4 đến 14 gôỉ, bố trí cách đều nhau trên chiều dài  $L=18\text{m}$ . Điều kiện biên với ống đặt trên gôỉ cứng (liên kết ngàm): tất cả các bậc tự do tại các nút chứa liên kết ngàm bằng 0 ( $\tilde{q}_i = 0$ ). Phương trình động lực học sau khi khử biên được nêu rõ ở mục 2.5.2. Kết quả đáp ứng động lực học của ống được thể hiện trên bảng 3.17 và đồ thị hình 3.40, 3.41, 3.42.

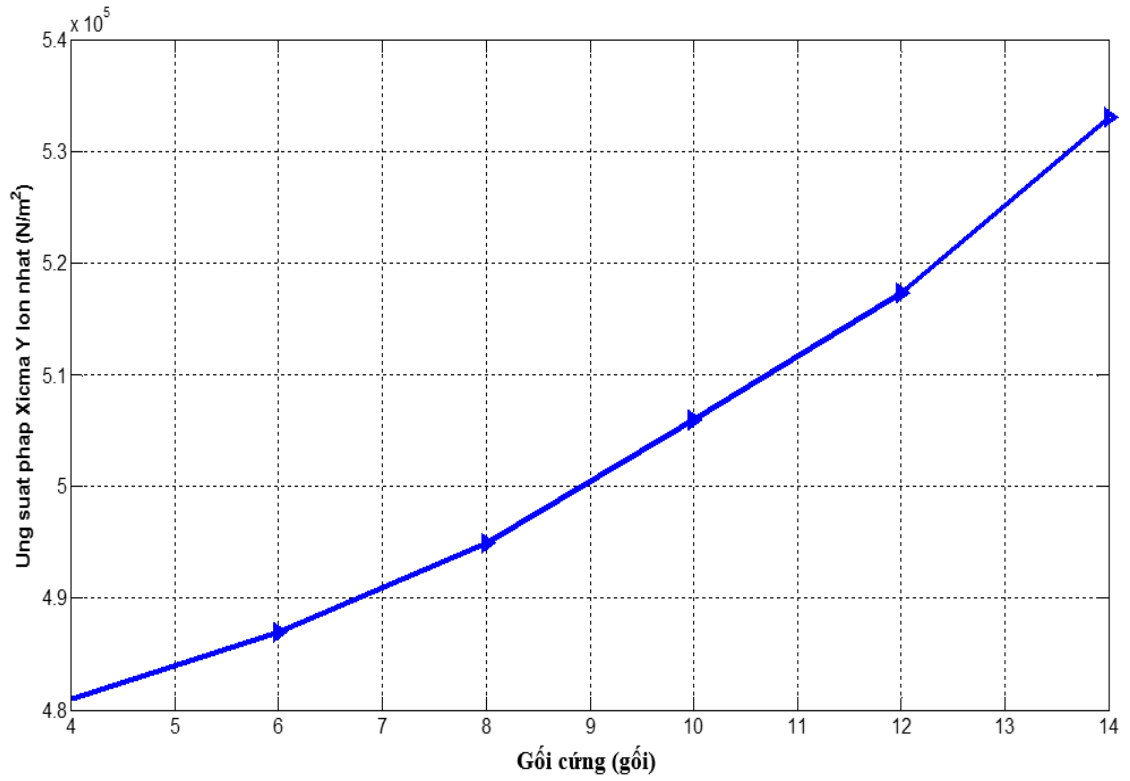
**Bảng 3.17.** Đáp ứng động lực học lớn nhất và gôỉ cứng

Gôỉ cứng (gôỉ)	4	6	8	10	12	14
$w_{\text{Max}} \text{ (m)} \cdot 10^{-4}$	3,22	2,86	2,68	2,52	2,42	2,37
$\sigma_y^{\text{Max}} \text{ (N/m}^2\text{)} \cdot 10^5$	4,81	4,87	4,95	5,06	5,17	5,33
$\sigma_x^{\text{Max}} \text{ (N/m}^2\text{)} \cdot 10^5$	7,38	6,71	7,04	7,48	7,81	8,10

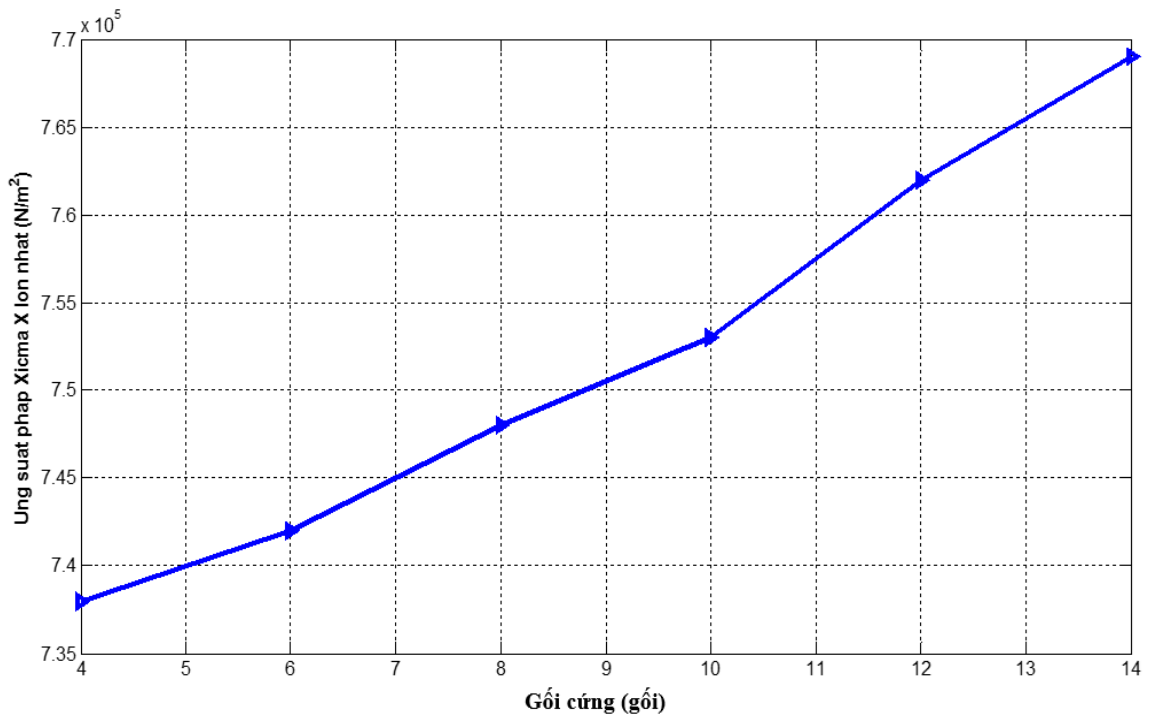


**Hình 3.40.** Quan hệ  $w_{\text{Max}}$  và gôỉ cứng





Hình 3.41. Quan hệ  $\sigma_y^{\text{Max}}$  và gói cứng



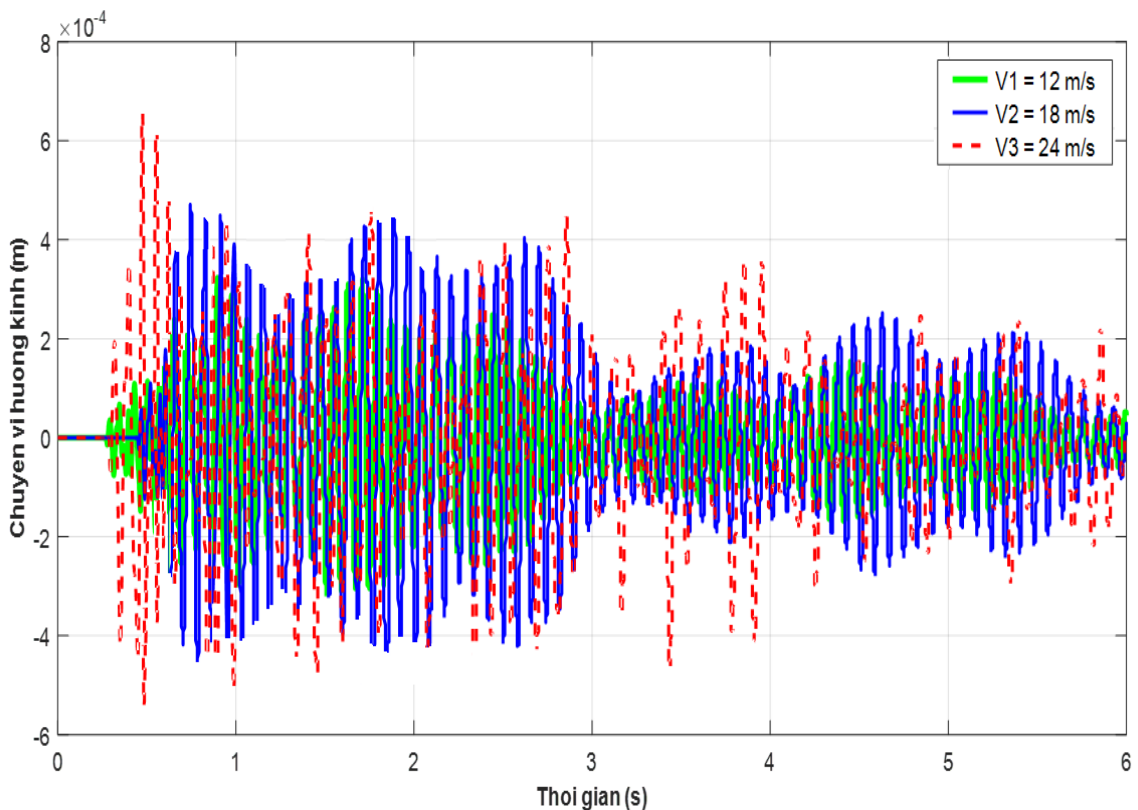
Hình 3.42. Quan hệ  $\sigma_x^{\text{Max}}$  và gói cứng

**Nhận xét:**

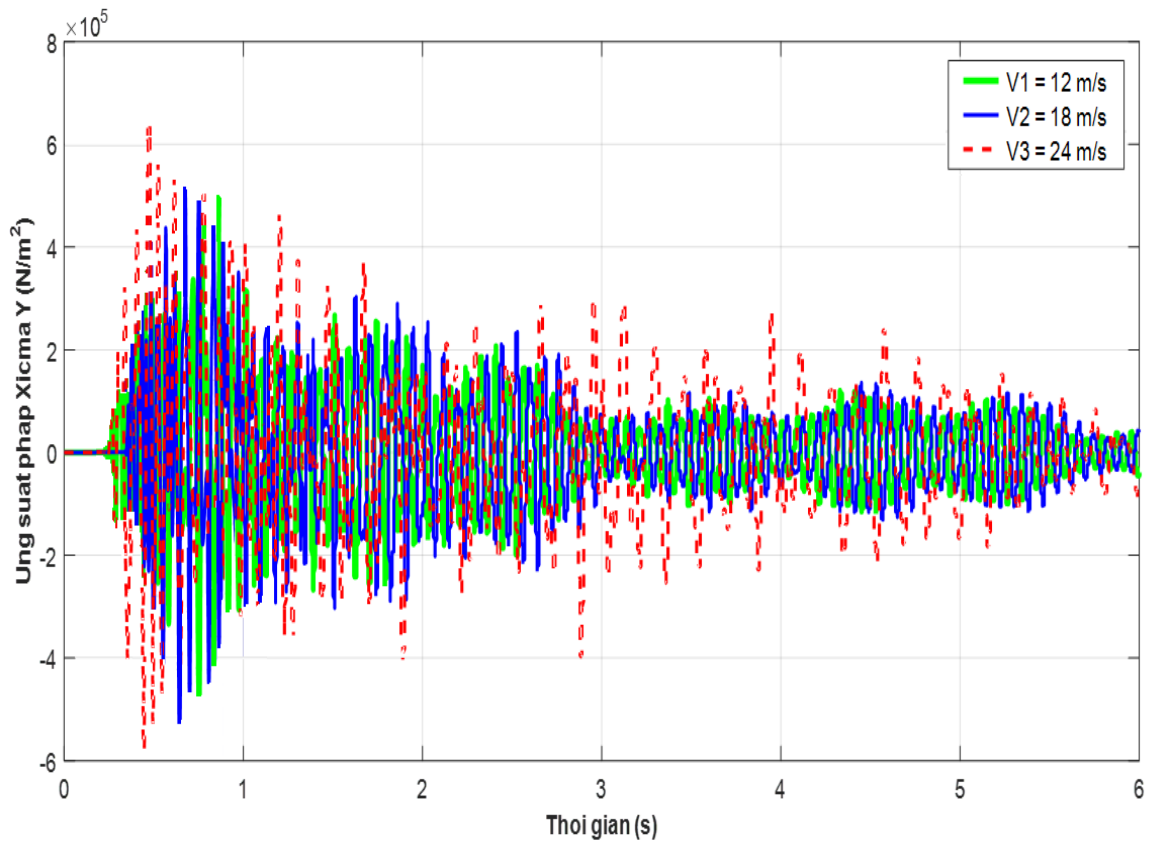
Khi số lượng gôì cứng tăng lên, đồng nghĩa với độ cứng vững của kết cấu cũng tăng lên, nên khi đó ta thấy chuyển vị của ống composite giảm và ứng suất pháp của kết cấu ống thì tăng lên. Điều này cũng hoàn toàn phù hợp với quy luật cơ học. Đây là cơ sở để lựa chọn số lượng gôì cho ống composite một cách hợp lý.

**3.3.5. Ảnh hưởng tốc độ di chuyển của tải trọng**

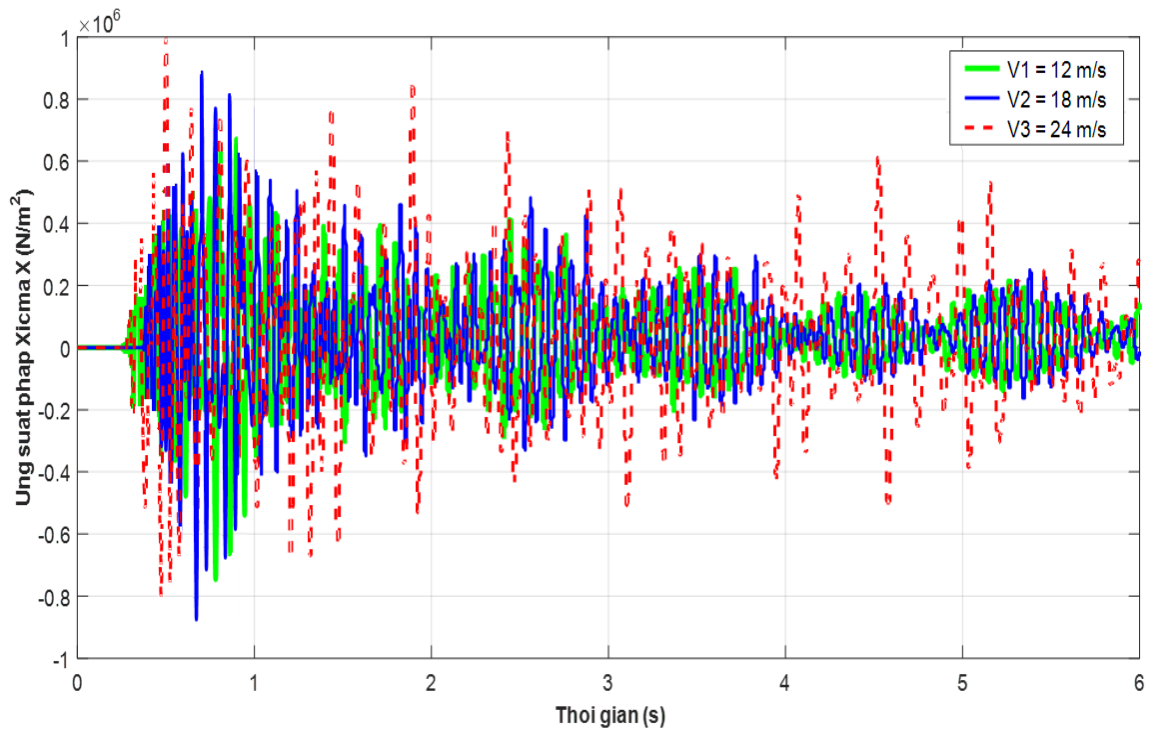
Khảo sát bài toán với sự thay đổi vận tốc của áp suất di động thay đổi: 9m/s, 12m/s, 18m/s và 24m/s. Kết quả đáp ứng động lực học của ống được thể hiện trên bảng 3.18 và đồ thị hình 3.43, 3.44, 3.45.



**Hình 3.43.** Đáp ứng chuyển vị hướng kính w với sự thay đổi của vận tốc



**Hình 3.44.** Đáp ứng ứng suất pháp  $\sigma_y$  với sự thay đổi của vận tốc



**Hình 3.45.** Đáp ứng ứng suất pháp  $\sigma_x$  với sự thay đổi của vận tốc

**Bảng 3.18.** Đáp ứng động lực học lớn nhất và vận tốc tải trọng

Vận tốc (m/s)	12	18	24
$w_{Max}$ (m). $10^{-4}$	3,22	4,39	6,25
$\sigma_y^{Max}$ (N/m <sup>2</sup> ). $10^5$	4,81	5,51	6,35
$\sigma_x^{Max}$ (N/m <sup>2</sup> ). $10^5$	7,38	8,62	9,96

**Nhận xét:**

Khi vận tốc của áp suất di động tăng lên, chuyển vị và ứng suất pháp cũng tăng. Khi vận tốc tăng từ 12m/s đến 24m/s thì chuyển vị  $w$  tăng lên 1,94 lần, ứng suất pháp  $\sigma_y$  tăng 1,32 lần và ứng suất pháp  $\sigma_x$  tăng 1,35 lần và vị trí biên độ của chuyển vị và ứng suất pháp cũng thay đổi với sự thay đổi của vận tốc, khi vận tốc tăng từ 12m/s đến 24m/s thì vị trí chuyển vị và ứng suất pháp lần lượt đạt giá trị lớn nhất tại thời điểm 0,75s, 0,65s và 0,55s.

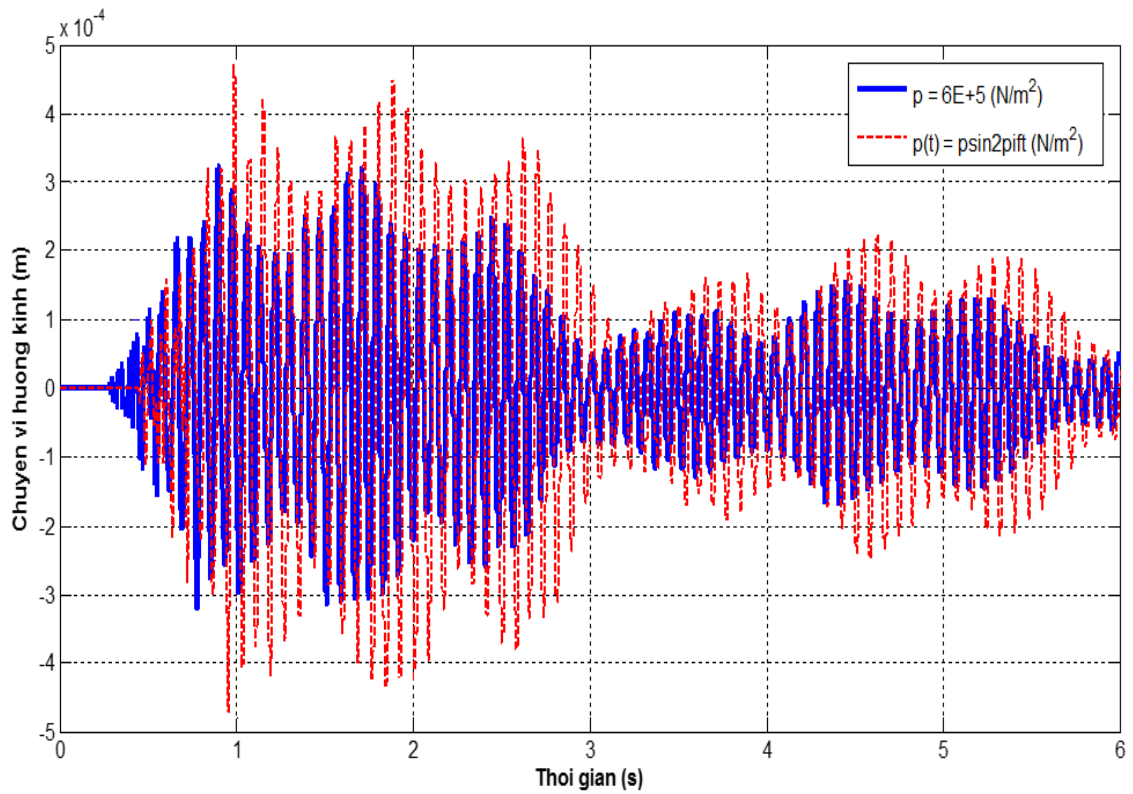
**3.3.6. Ảnh hưởng của tải trọng**

*Trường hợp 1: Tải trọng là hàm điều hòa*

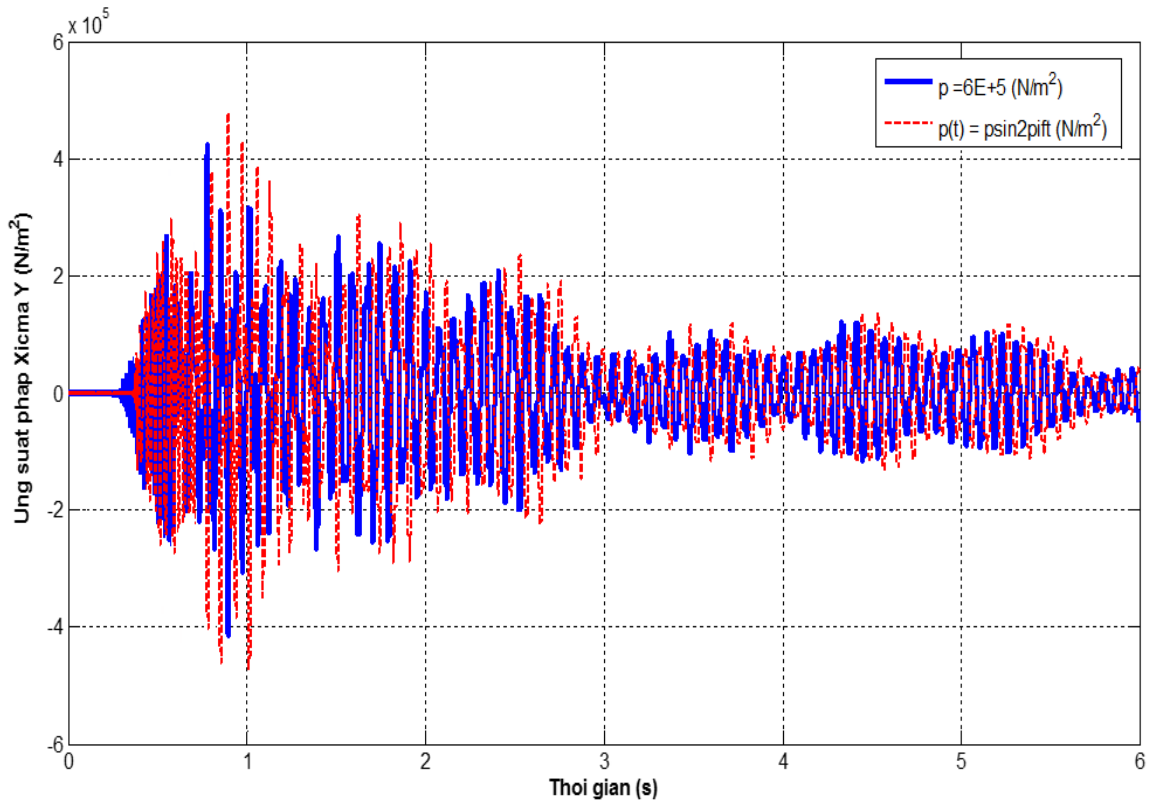
Tính toán với trường hợp: áp suất  $p(t) = p \sin 2\pi ft$ , với  $f = 50\text{Hz}$  và  $p = 6.10^5 \text{ N/m}^2$ . Kết quả hình 3.46, 3.47, 3.48 là đáp ứng chuyển vị  $w$  và ứng suất pháp  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  tại tính thuộc ống.

**Bảng 3.19.** Đáp ứng động lực học lớn nhất và tải trọng điều hòa

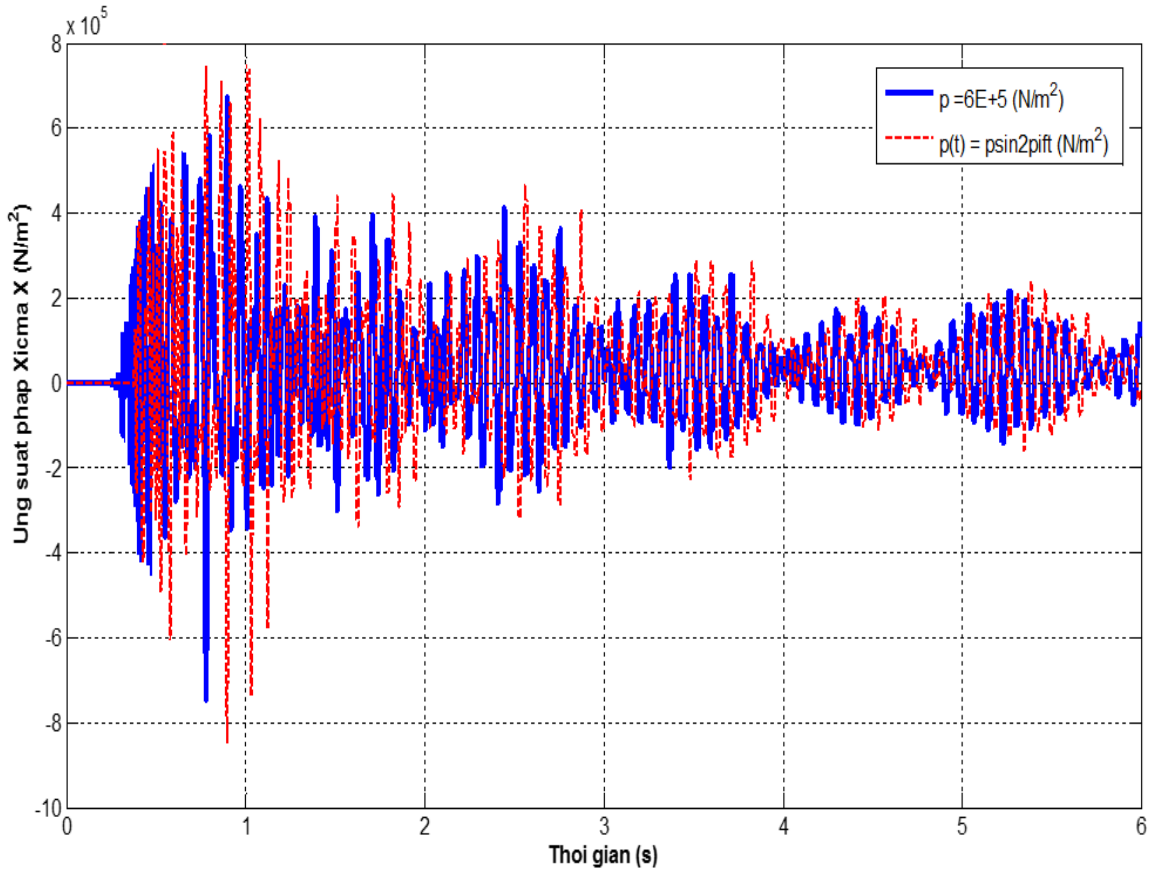
Áp suất	$w_{Max}$ (m)	$\sigma_y^{Max}$ (N/m <sup>2</sup> )	$\sigma_x^{Max}$ (N/m <sup>2</sup> )
$p$	$3,22.10^{-4}$	$4,81.10^5$	$7,38.10^5$
$p(t) = p \sin 2\pi ft$	$3,93.10^{-4}$	$5,46.10^5$	$8,32.10^5$



**Hình 3.46.** Đáp ứng chuyển vị hướng kính  $w$  theo thời gian



**Hình 3.47.** Đáp ứng ứng suất pháp  $\sigma_y$  theo thời gian



**Hình 3.48.** Đáp ứng ứng suất pháp  $\sigma_x$  theo thời gian

**Nhận xét:**

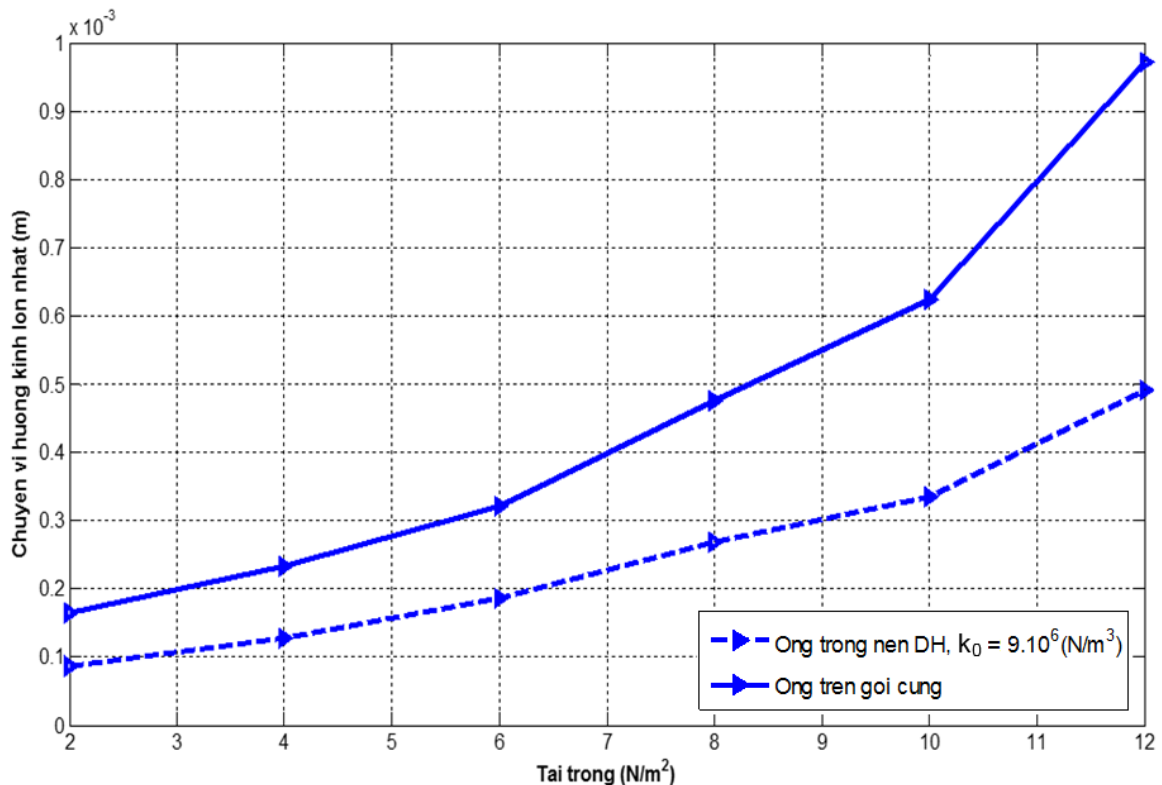
Ta thấy quy luật biến thiên của đáp ứng động lực học của 2 trường hợp áp suất là hàm điều hòa và áp suất không đổi  $p$  là tương đồng, về mặt giá trị thì chuyển vị lớn nhất  $w_{Max}$  của ống composite trong trường hợp áp suất là hàm điều hòa lớn hơn trường hợp áp suất không đổi là 1,22 lần, ứng suất pháp lớn nhất lớn hơn 1,135 lần ( $\sigma_y^{Max}$ ) và 1,127 lần ( $\sigma_x^{Max}$ ). Giá trị lớn hơn trong trường hợp áp suất là hàm điều hòa có thể là do hiện tượng cộng hưởng xảy ra khi tần số dao động riêng trùng với tần số của hàm áp suất điều hòa.

*Trường hợp 2: Áp suất di động là hằng số*

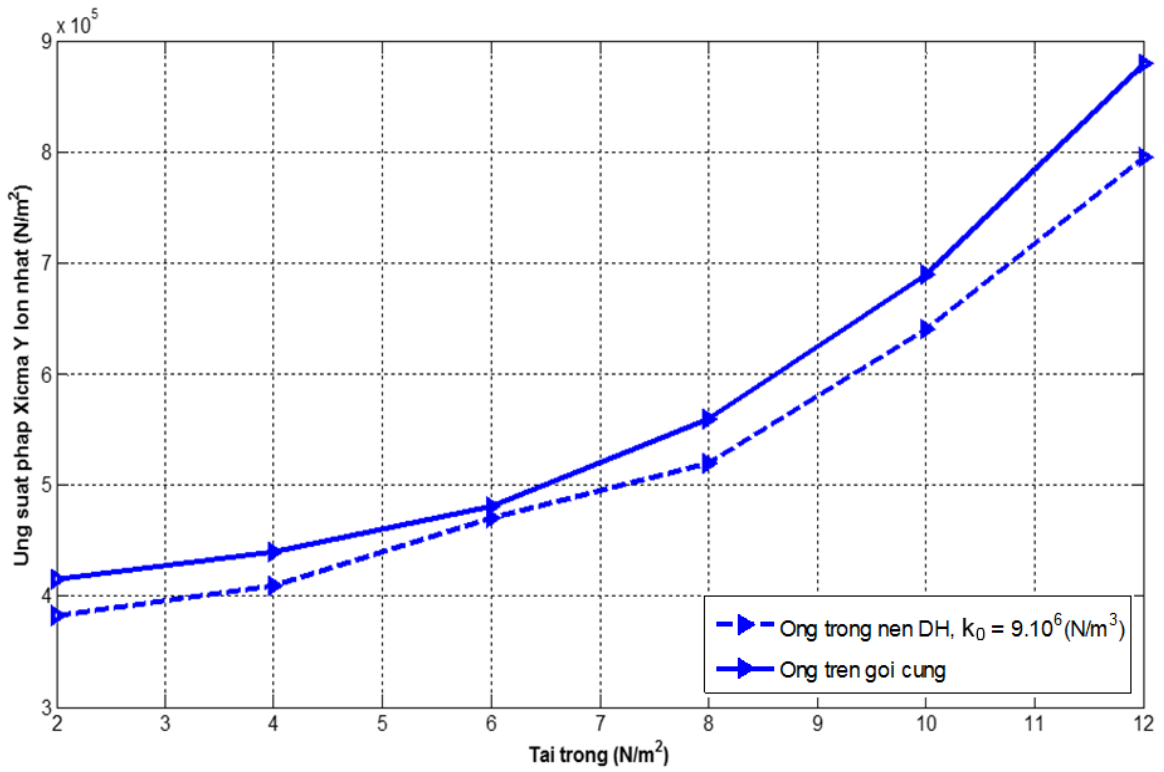
Phân tích bài toán với áp suất  $p$  biến thiên từ  $2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  đến  $12 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ , kết quả quan hệ của tải trọng với chuyển vị hướng kính lớn nhất  $w_{\text{Max}}$  và ứng suất pháp  $\sigma_y^{\text{Max}}$ ,  $\sigma_x^{\text{Max}}$  tại điểm tính thuộc ống được thể hiện trong bảng 3.20 và đồ thị hình 3.49, 3.50, 3.51.

**Bảng 3.20.** Đáp ứng động lực học lớn nhất và sự thay đổi tải trọng

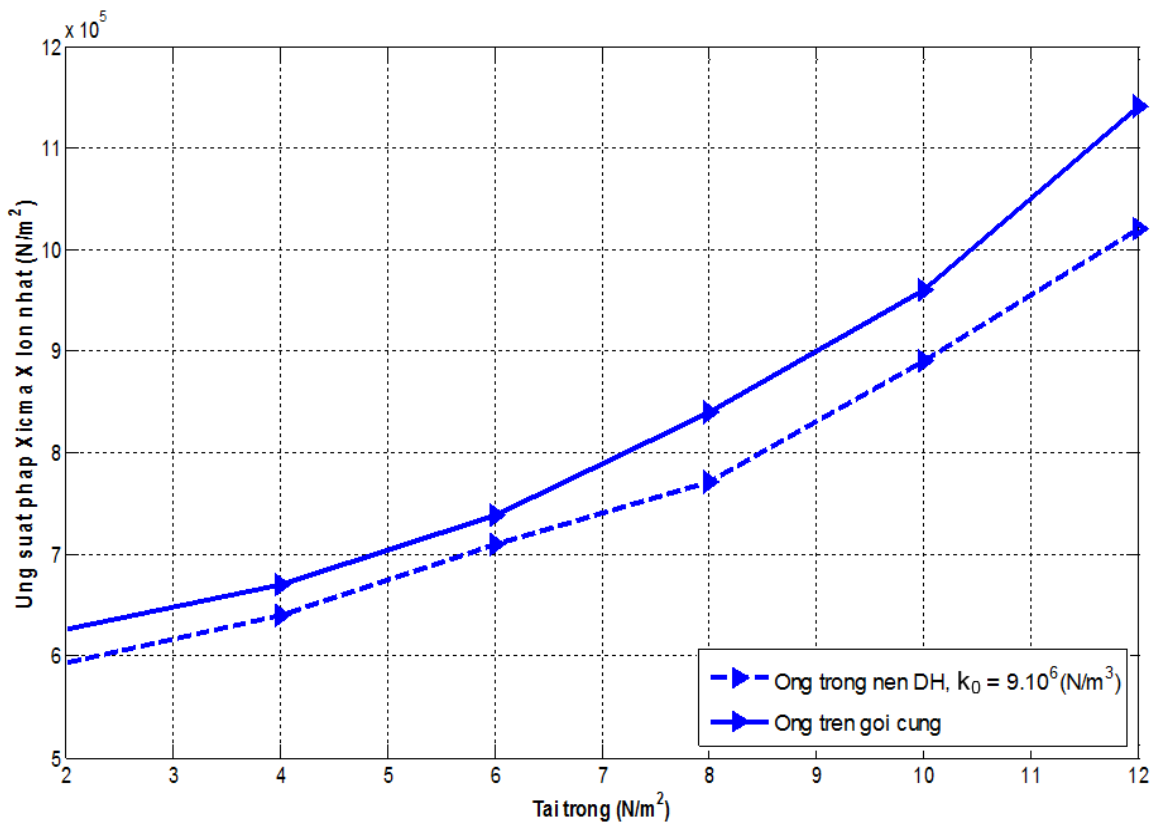
$p \text{ (N/m}^2) \cdot 10^5$	2	4	6	8	10	12
$w_{\text{Max}} \text{ (m)} \cdot 10^{-4}$	1,66	2,33	3,22	4,75	6,25	9,71
$\sigma_y^{\text{Max}} \text{ (N/m}^2) \cdot 10^5$	4,15	4,40	4,81	5,61	6,92	8,80
$\sigma_x^{\text{Max}} \text{ (N/m}^2) \cdot 10^5$	6,76	6,70	7,38	8,40	9,61	11,4



**Hình 3.49.** Quan hệ  $w_{\text{Max}}$  và tải trọng



Hình 3.50. Quan hệ  $\sigma_y^{Max}$  và tải trọng



Hình 3.51. Quan hệ  $\sigma_x^{Max}$  và tải trọng



**Nhận xét:** Khi tăng tải trọng từ  $2.10^5$  đến  $12.10^5$  N/m<sup>2</sup>, thì chuyển vị hướng kính và ứng suất pháp tăng phi tuyến. Chuyển vị hướng kính  $w_{Max}$  tăng 5,85 lần; ứng suất pháp  $\sigma_y^{Max}$  tăng 2,12 lần; ứng suất pháp  $\sigma_x^{Max}$  tăng 1,68 lần. So sánh với trường hợp ống composite đặt trong nền đàn hồi (hệ số nền  $k_0 = 9.10^6$  N/m<sup>3</sup>), thì đáp ứng động lực học của ống composite trên gối cứng là lớn hơn. Do vậy tải trọng có ảnh hưởng lớn đến đáp ứng động lực học của kết cấu ống composite.

### **Kết luận chương 3**

Một số kết quả chính đạt được trong chương này, đó là:

- Khảo sát số trên nhiều lớp bài toán để xem xét sự ảnh hưởng về đáp ứng động lực học của ống trụ composite trong nền đàn hồi và gối cứng chịu tác dụng của áp suất di động. Ta nhận thấy các thông số: số lớp ống, chiều dài ống, góc đặt cốt, độ cứng nền, vận tốc áp suất di động và tải trọng đã ảnh hưởng đáng kể đến đáp ứng chuyển vị, biến dạng và ứng suất trong ống composite. So với trường hợp ống composite đặt trong nền đàn hồi (hệ số nền  $k_0 = 9.10^6$  N/m<sup>3</sup>) thì đáp ứng chuyển vị, biến dạng và ứng suất của ống composite trên gối cứng là lớn hơn.

- Để tăng khả năng ổn định cho ống trụ composite, tùy theo mục đích và yêu cầu sử dụng mà ta có thể tính toán, điều chỉnh các thông số hình học, vật liệu ống và các tham số tải trọng để lựa chọn được các phương án hợp lý áp dụng cho các công trình ống dẫn trong nền và trên các liên kết truyền thống phục vụ các lĩnh vực kỹ thuật thực tiễn.

## CHƯƠNG 4

### NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

#### 4.1. Đặt vấn đề

Trong các chương trước tác giả đã trình bày cơ sở khoa học và thực hiện các tính toán số nhằm xác định đáp ứng phi tuyến động lực học ống trụ composite trong nền đàn hồi và trên các liên kết cứng chịu tác dụng của áp suất di động. Để kiểm chứng sự phù hợp của phương pháp lý thuyết và chương trình tính đã lập, trong chương này tác giả thiết lập và triển khai thí nghiệm trên mô hình ống composite chịu tác dụng của áp suất chất lỏng di động, trong đó ống được đặt trên liên kết được xem là cứng tuyệt đối và trên liên kết đàn hồi.

Mặc dù bài toán chất khí và chất lỏng có sự khác nhau về tính co giãn, tính chịu nhiệt, khối lượng và sự lan truyền áp suất ở trong ống. Tuy nhiên trong phạm vi luận án, với mục đích thí nghiệm là đo chuyển vị và biến dạng của ống, nên so với bài toán áp suất khí thì bài toán áp suất chất lỏng dễ dàng trong việc điều khiển tạo ra các áp suất khác nhau của từng lần đo. Hơn nữa, với điều kiện và trang thiết bị ở nước ta thì để tìm được các máy thí nghiệm tạo áp suất khí cao và vận tốc lớn là không hề dễ dàng bên cạnh phải đảm bảo an toàn tuyệt đối trong quá trình tổ chức thực nghiệm.

Từ những vấn đề như vậy, để đảm bảo an toàn và sự điều khiển sự thay đổi áp suất dễ dàng trong quá trình tổ chức thí nghiệm, tác giả chọn tải trọng tác dụng là áp suất chất lỏng để thí nghiệm. Tuy nhiên để có sự hợp lý hơn giữa 2 bài toán tải trọng áp suất chất khí và áp suất chất lỏng, tác giả đưa ra các giả thiết sau:

- Chất lỏng chảy trong ống là chất lỏng lý tưởng (Chất lỏng chảy ổn định, không tồn tại nội ma sát trong lòng chất lỏng, độ nhớt bằng 0).
- Bỏ qua khối lượng của chất lỏng chảy trong ống.
- Điều kiện thí nghiệm ở nhiệt độ môi trường bình thường.

## **4.2. Mục đích thí nghiệm**

So sánh, đối chứng và làm cơ sở đánh giá thuật toán và chương trình tính đã được xây dựng trong chương 2.

## **4.3. Nội dung thí nghiệm**

Xác định đáp ứng động của ống composite chịu áp suất chất lỏng di động do bơm cao áp tạo ra, trong đó tập trung vào biến dạng, chuyển vị và gia tốc của điểm cần đo thuộc ống.

## **4.4. Sơ đồ và thiết bị thí nghiệm**

### **4.4.1. Mô hình và mẫu thí nghiệm**

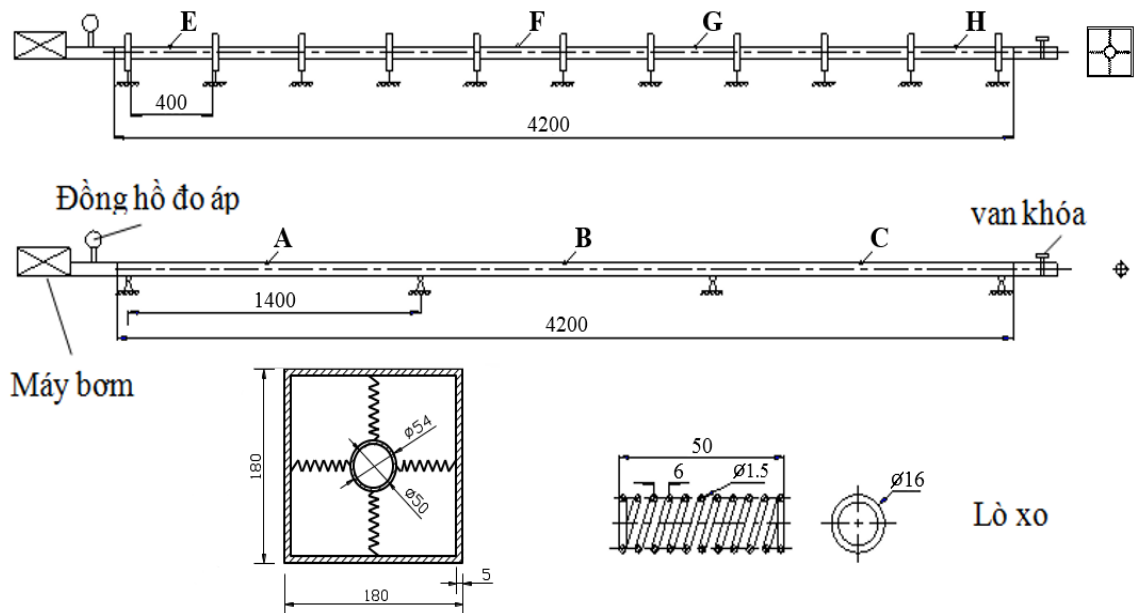
#### *4.4.1.1. Mô hình thí nghiệm*

Mô hình thí nghiệm được thiết kế, chế tạo là ống composite gồm 4 lớp có trật tự xếp lớp  $45^0/-45^0/45^0/-45^0$ , vật liệu chế tạo là cốt sợi thủy tinh, nền nhựa Epoxy; chiều dài  $L = 4200\text{mm}$ , đường kính trong  $d = 50\text{mm}$ , chiều dày  $h = 4\text{mm}$ .

Ống được đặt trên liên kết cứng và liên kết đàn hồi.

- Trường hợp liên kết cứng, ống composite được liên kết chặt bằng ốp và được hàn chặt với tấm thép dày nhằm tạo liên kết cứng.

- Trường hợp liên kết đàn hồi, ống composite được liên kết với hệ gồm 44 lò xo đàn hồi có tính chất giống nhau, chiều dài mỗi lò xo là  $50\text{mm}$ , đường kính ngoài  $D = 16\text{mm}$ , bước lò xo  $6\text{mm}$ , đường kính sợi lò xo  $1,5\text{mm}$  (Hình 4.1).



**Hình 4.1.** Mô hình thí nghiệm ống composite đặt trên gối cứng và gối đàn hồi  
4.4.1.2. Mẫu thí nghiệm

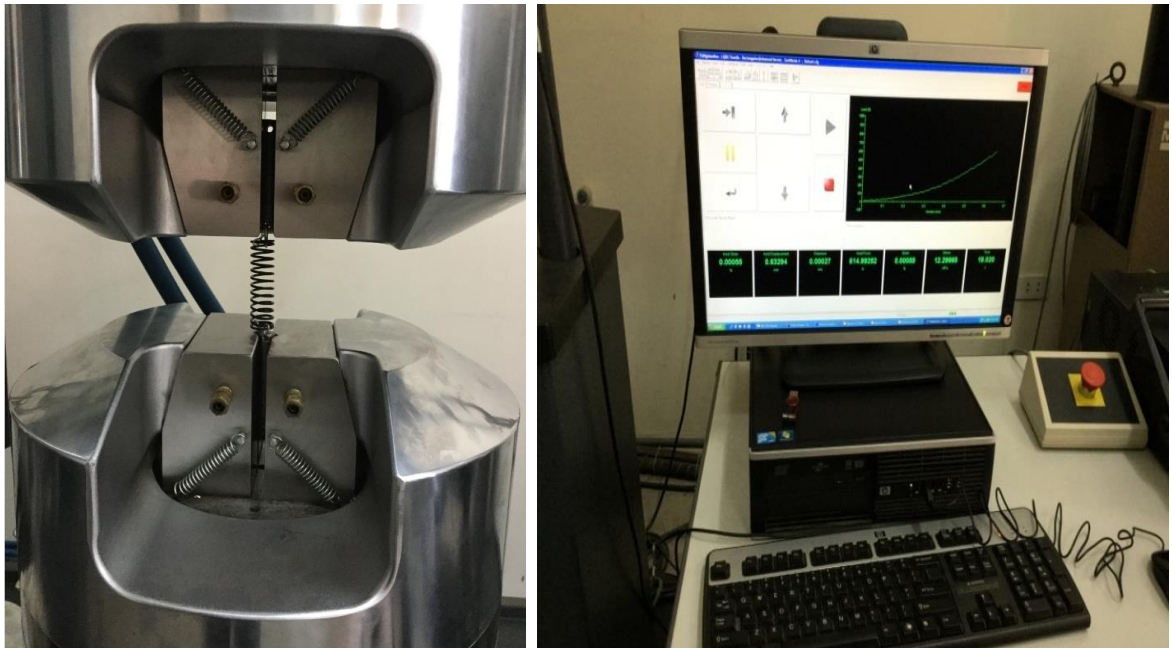
Việc xác định độ cứng lò xo đàn hồi được thực hiện tại Phòng thí nghiệm Cơ học - Bộ môn Cơ học vật rắn, Học viện Kỹ thuật Quân sự (Hình 4.3).

Mẫu của lò xo đàn hồi có chiều dài là 50mm, đường kính ngoài  $D = 16\text{mm}$ , bước lò xo 6mm, đường kính sợi lò xo 1,5mm (Hình 4.2).



**Hình 4.2.** Mẫu xác định độ cứng lò xo đàn hồi

Thí nghiệm xác định độ cứng chịu kéo, nén của lò xo đàn hồi được thực hiện trên hệ thống sinh lực vạn năng MTS – 810 Landmark của Mỹ, với tải trọng lớn nhất là 500 kN. Tiến hành thí nghiệm kéo lò xo để xác định độ giãn của mẫu ( số lần thực hiện là 15 lần), sau đó tiến hành xử lý thống kê theo trình tự các bước chung của phương pháp xử lý số liệu thực nghiệm. Kết quả ta xác định được độ cứng của lò xo là  $k = 5000 \text{ N/mm}$ .



**Hình 4.3.** Thí nghiệm xác định độ cứng lò xo đàn hồi

Các thành phần cơ tính vật liệu của từng lớp composite được cho bởi nhà cung cấp, theo đó với vật liệu mẫu là cốt sợi thủy tinh, nền nhựa Epoxy, các giá trị được cho trong bảng sau:

**Bảng 4.1.** Thành phần cơ tính của lớp vật liệu composite

$E_1$ [N/m <sup>2</sup> ]	$E_2$ [N/m <sup>2</sup> ]	$G_{12}$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\nu_{12}$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$150,17 \cdot 10^9$	$11,34 \cdot 10^9$	$5,67 \cdot 10^9$	0,26	2119,69

#### 4.4.2. Thiết bị thí nghiệm

##### 4.4.2.1. Thiết bị gây tải

Thiết bị gây tải là máy bơm công nghiệp IRCCEM của Công ty cổ phần Thương mại và dịch vụ Cường Thịnh Vương, với các thông số công suất 1.5KW , lưu lượng nước 2m<sup>3</sup>/h, áp lực 98m nước.



**Hình 4.4.** Thiết bị gây tải (a), cảm biến gia tốc (b), đầu đo biến dạng (c)

##### 4.4.2.2. Cảm biến gia tốc, đầu đo biến dạng

Trên kết cấu tại các vị trí của ống đã được xác định trên mô hình ở hình vẽ 4.4, tiến hành gắn các thiết bị cảm biến gia tốc để đo gia tốc dịch chuyển theo phương hướng kính của các điểm cần xác định.

Cảm biến gia tốc dùng trong thí nghiệm là cảm biến PV - 90T của Nhật với các thông số sau:

Khối lượng 2g, độ nhạy:  $0,5\text{mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$ , dải tần số đo: 1 đến 12000 ( $\pm 10\%$ )Hz, đỉnh cộng hưởng: 50kHz, vật liệu chế tạo: Titanium, sai số đo: 0,05% hoặc nhỏ hơn.

Đầu đo biến dạng sử dụng là loại tấm điện trở loại KFG - 5 - 120 - C1-11 của hãng Kyowa Nhật Bản (Hình 4.5), chuẩn đo 5mm,  $120.2 \pm 0.3\Omega$ , hệ số gage:  $k = 2.10 \pm 1.0\%$ . Các tấm điện trở được liên kết với bề mặt của kết cấu vỏ tại vị trí đo, theo phương đo bằng keo dán chuyên dụng.

#### 4.4.2.3. Máy đo dao động đa kênh

Máy đo động sử dụng loại LMS cung cấp bởi hãng LMS của Bỉ (Hình 4.5), đây là một hệ thống có thể đo, phân tích với tổng số kênh độc lập, tốc độ lấy mẫu tối đa 102.4 kHz, chịu được điều kiện làm việc khắc nghiệt lên đến  $55^{\circ}\text{C}$  và rung xóc.



**Hình 4.5.** Hệ thống đo động 16 kênh LMS và màn hình làm việc của máy

### 4.5. Phân tích và xử lý số liệu thí nghiệm

Việc thu thập, tích hợp số liệu (đáp ứng gia tốc, vận tốc, chuyển vị và biến dạng tại những điểm cần đo theo thời gian) của mỗi lần thí nghiệm được máy tính chuyên dụng của bộ thiết bị đo LMS thực hiện. Để có được

kết quả đo trung bình, tác giả phải tiến hành đo đặc nhiều lần rồi xử lý thống kê, trình tự các bước như sau [ 2], [10], [16], [18]:

Giả sử tiến hành đo  $n$  lần các giá trị gia tốc hoặc biến dạng tại mỗi vị trí cần xác định, mỗi lần đo có được bộ số liệu  $[t_i, N_i]$ , với  $i$  là bước thời gian trích mẫu thí nghiệm của máy đo,  $N_i$  - đại lượng đo tại bước thời gian thứ  $i$ .

Bước 1: Xuất bộ số liệu của  $n$  lần đo từ phần mềm máy tính.

Bước 2: Xác định trung bình  $\bar{N}_i$  của mỗi giá trị điểm đo trên dãy số liệu  $(N_i)_j$  với  $j=1, n$ .

Bước 3: Tập hợp bộ số liệu  $[t_i, \bar{N}_i]$ , vẽ đáp ứng theo thời gian của bộ số liệu đo sau khi xử lý thống kê.

Bước 4: Vẽ đáp ứng theo thời gian, xác định giá trị lớn nhất và giá trị nhỏ nhất  $\bar{N}_{max}$ ,  $\bar{N}_{min}$  của bộ số liệu đo.

Bước 5: Làm tương tự đối với đáp ứng vận tốc, chuyển vị tại điểm đo theo thời gian.

Bước 6: Đánh giá, nhận xét kết quả.



**Hình 4.6.** Gắn cảm biến đo



#### **4.6. Trình tự xác định gia tốc, biến dạng của ống composite**

Để đo gia tốc dao động tại vị trí nào đó thuộc kết cấu ống composite, tiến hành gắn đầu đo gia tốc cố định tại điểm cần đo, hướng trục đầu đo theo phương cần đo (Hình 4.6). Dưới tác dụng của tải trọng, ống dao động, và đồng nghĩa đầu đo gia tốc dao động theo, tín hiệu đáp ứng gia tốc theo thời gian được truyền về máy tính xử lý.

Kết quả mỗi lần đo, tương ứng với một đầu đo có được bộ số liệu thể hiện đáp ứng gia tốc theo thời gian tại vị trí trên kết cấu mà tại đó gắn đầu đo gia tốc. Từ đáp ứng gia tốc - thời gian, với bộ xử lý deflection analysis được tích hợp trong máy tính, tiến hành phân tích (tích phân số hai lần) và kết quả là có được đáp ứng chuyển vị theo phương hướng kính tại điểm đo theo thời gian. Để đo biến dạng tại một điểm, tiến hành dán tấm điện trở tại vị trí cần đo, phương chiều dài tấm điện trở trùng với phương cần đo biến dạng. Dưới tác dụng của tải trọng, ống bị biến dạng làm cho tấm điện trở biến dạng theo, tín hiệu biến dạng được máy tính xử lý và kết quả có được đáp ứng biến dạng theo thời gian.

#### **4.7. Thí nghiệm và kết quả đạt được**

##### **4.7.1. Nội dung thí nghiệm**

Mô hình thí nghiệm được gá chặt tương ứng liên kết trên gối cứng và đàn hồi, đảm bảo mô hình ổn định vị trí trong quá trình thí nghiệm. Lắp đặt thiết bị đo gia tốc, đo biến dạng tại các điểm đo tương ứng trên ống. Việc liên kết các đầu đo với bộ máy đo thông qua bộ cáp tín hiệu tiêu chuẩn đồng bộ với máy.

Tiến hành thí nghiệm đo đáp ứng động (đo biến dạng và gia tốc) của ống composite đặt trên liên kết cứng và liên kết đàn hồi, với các trường hợp áp lực trong ống khác nhau.

Tại một điểm đo, để xác định bộ số liệu đáp ứng gia tốc hoặc biến dạng theo thời gian, tác giả tiến hành đo 25 lần ( $n = 25$ ), chọn ra 15 lần đo có kết quả hội tụ. Bộ số liệu đo được thu thập, phân tích và xử lý thống kê, cuối cùng ta sẽ có được đáp ứng biến dạng, gia tốc, vận tốc và chuyển vị theo thời gian tại các điểm đo là trung bình cộng của 15 lần.

+ Trường hợp 1: Áp suất ống  $p_1 = 1 \text{ Kg/cm}^2$ .

- Mở van đóng mở ở đầu ra của ống, bật công tắc cho máy bơm hoạt động. Sau khi nước chạy ổn định trong ống, đọc thông số áp suất trên đồng hồ đo áp, ta được áp suất ống  $p_1 = 1 \text{ Kg/cm}^2$ .

- Đo vận tốc dòng chảy trong ống, bằng cách đo lưu lượng nước  $Q_1$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) trong thời gian  $t_1(\text{s})$ , từ đó ta tính được vận tốc di động  $v_1$  theo công

thức sau: 
$$v_1 = \frac{Q_1}{3,14.R^2} \text{ (m/s).} \quad (4.1)$$

trong đó:  $R$  là bán kính trong của ống composite

- Quan sát trên màn hình kết quả đáp ứng động của ống composite. Lưu kết quả dữ liệu.

+ Trường hợp 2: Áp suất ống  $p_2$ .

- Đóng dần van đóng mở ở đầu ra của ống (không đóng hết), bật công tắc cho máy bơm hoạt động. Sau khi nước chạy ổn định trong ống, đọc thông số áp suất trên đồng hồ đo áp, ví dụ áp suất ống lúc này là  $p_2$ .

- Đo vận tốc dòng chảy trong ống, bằng cách đo lưu lượng nước  $Q_2$  ( $m^3/s$ ) trong thời gian  $t_2(s)$ , từ đó ta tính được vận tốc di động  $v_2$  theo công

thức sau: 
$$v_2 = \frac{Q_2}{3,14.R^2} \text{ (m/s)}. \quad (4.2)$$

trong đó: R là bán kính trong của ống composite

- Quan sát trên màn hình kết quả đáp ứng động của ống composite. Lưu kết quả dữ liệu.

Tiếp tục làm như trên với trường hợp 3 với  $p_3$ , trường hợp 4 với  $p_4$ , trường hợp 5 với  $p_5$ . Lưu kết quả dữ liệu vào máy tính.

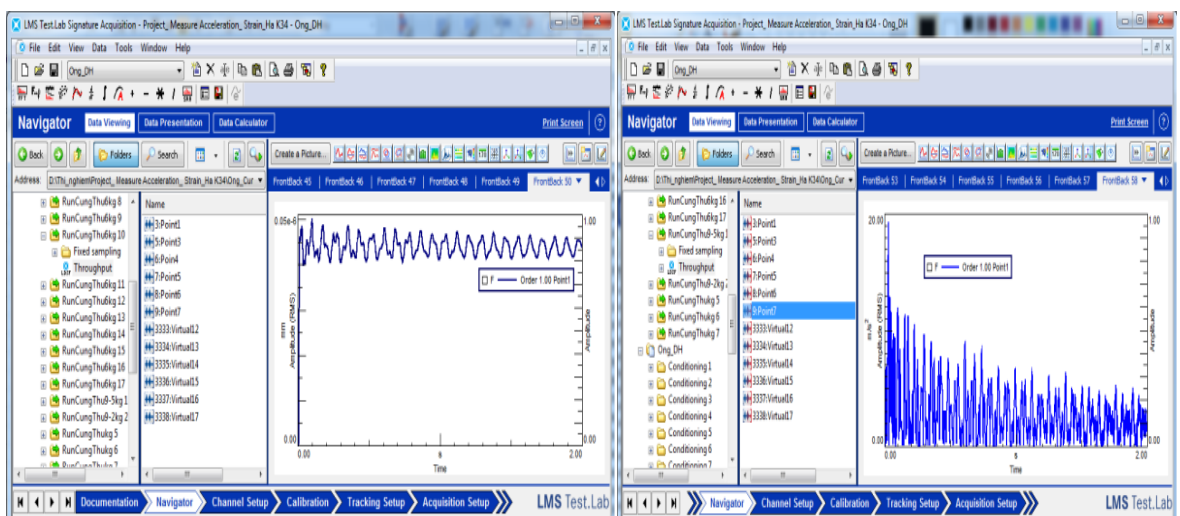
Dùng đồng hồ đo lưu lượng nước Q ( $m^3/s$ ) với các trường hợp trên, ta tính được vận tốc dòng chảy trong ống. Kết quả cho trong bảng 4.2.

**Bảng 4.2.** Giá trị lưu lượng dòng chảy Q và vận tốc dòng chảy v

Áp lực (Kg/cm <sup>2</sup> )		Lưu lượng (m <sup>3</sup> /s)		Vận tốc (m/s)	
$p_1$	1	$Q_1$	0,01312	$v_1$	6,68
$p_2$	3	$Q_2$	0,01074	$v_2$	5,46
$p_3$	5	$Q_3$	0,01064	$v_3$	5,48
$p_4$	7	$Q_4$	0,01052	$v_4$	5,36
$p_5$	9	$Q_5$	0,00952	$v_5$	4,84



**Hình 4.7.** Tiến hành đo đặc và lưu kết quả



**Hình 4.8.** Kết quả đo thu được từ thiết bị đo

### 4.7.2. Kết quả thí nghiệm đạt được

#### 4.7.2.1. Thử nghiệm trên kết cấu ống composite đặt trên gối cứng chịu tải trọng di động

Thử nghiệm trên kết cấu ống composite đặt trên gối cứng chịu tải trọng di động, khi áp lực trong ống  $p_3 = 5 \text{ Kg/cm}^2$ , kết quả đáp ứng động lực học lớn nhất của kết cấu tại các điểm đo được thể hiện trong bảng 4.3.

**Bảng 4.3.** Đáp ứng động lực học lớn nhất của kết cấu đặt trên gối cứng

	Điểm đo	Thực nghiệm	Lý thuyết	Sai số [%]
Chuyển vị hướng kính	A(m)	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$	22,5
	B(m)	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,61 \cdot 10^{-5}$	26,6
	C(m)	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	24,2
Gia tốc	A(m/s <sup>2</sup> )	17,53	13,55	22,7
	B (m/s <sup>2</sup> )	24,20	17,54	27,5
	C (m/s <sup>2</sup> )	19,76	14,58	26,2
Biến dạng dọc trục	A	$3,89 \cdot 10^{-8}$	$2,92 \cdot 10^{-8}$	24,9
	B	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$3,68 \cdot 10^{-8}$	26,4
	C	$4,24 \cdot 10^{-8}$	$3,14 \cdot 10^{-8}$	25,8

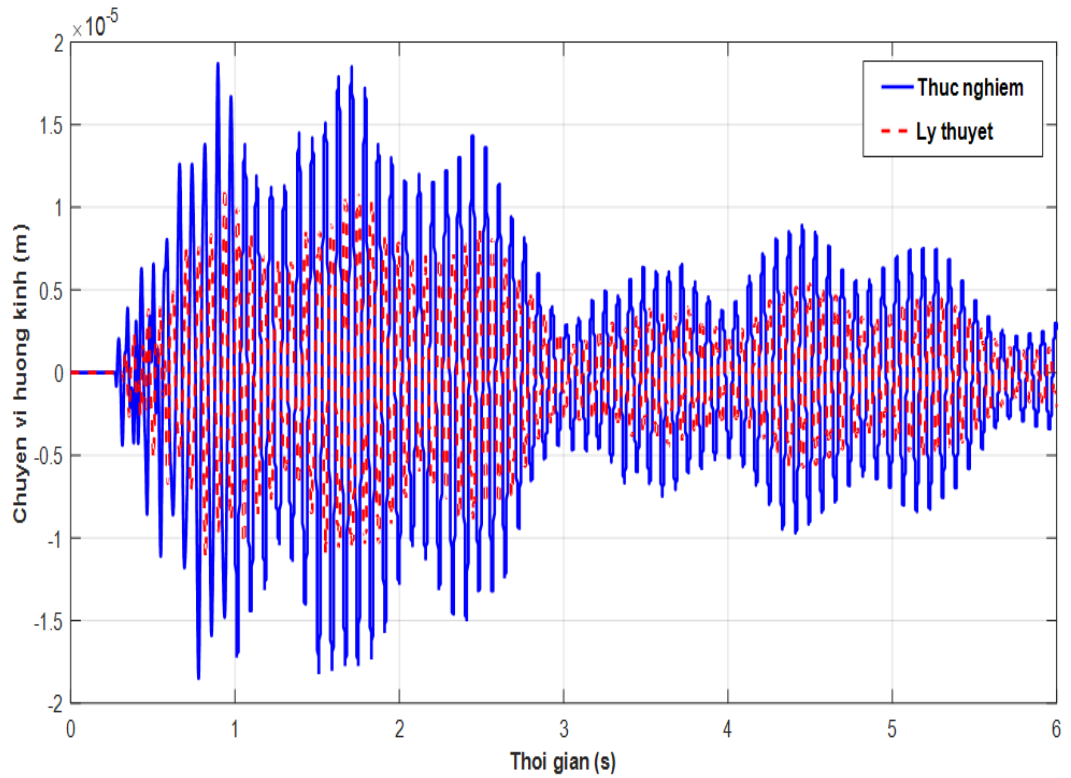
#### 4.7.2.2. Thử nghiệm trên kết cấu ống composite đặt trên gối đàn hồi chịu tải trọng di động

Thử nghiệm trên kết cấu ống composite đặt trên gối đàn hồi chịu tải

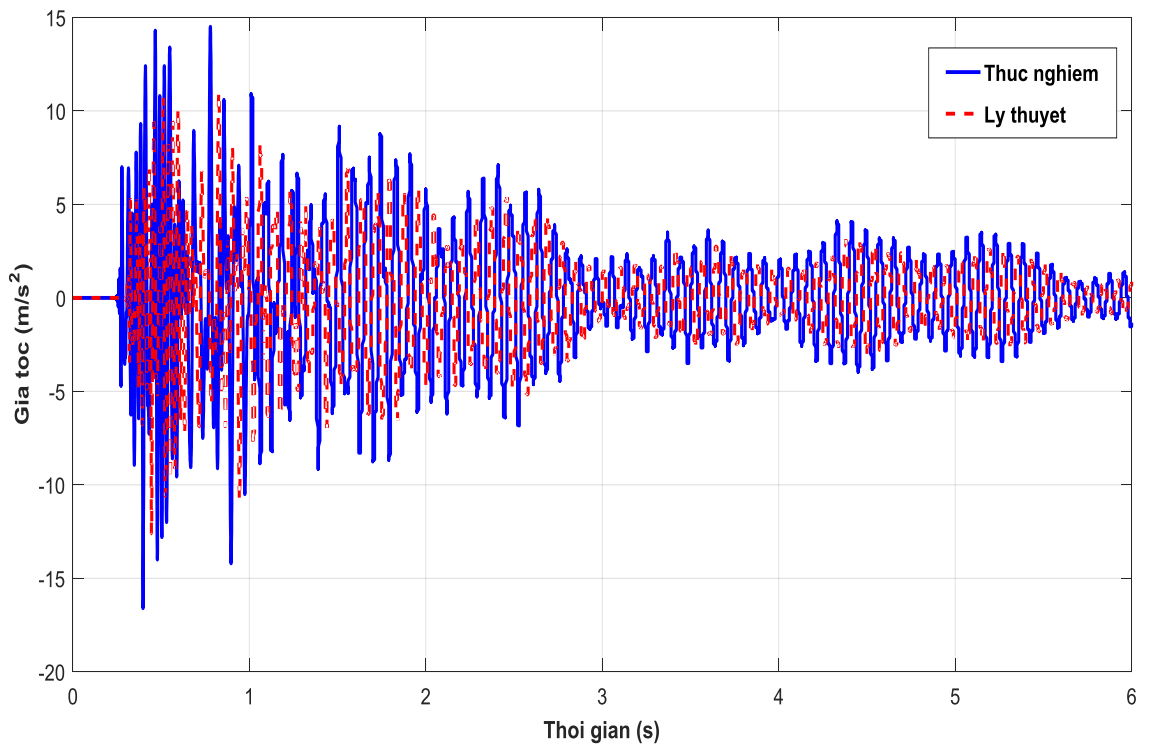
trọng di động, khi áp lực trong ống  $p_2 = 3 \text{ Kg/cm}^2$ , kết quả đáp ứng động lực học lớn nhất của kết cấu tại các điểm đo được thể hiện trên bảng 4.4 và kết quả chuyển vị, gia tốc và biến dạng theo thời gian tại các điểm xét, được thể hiện trên đồ thị hình 4.9, 4.10, 4.11.

**Bảng 4.4.** Đáp ứng động lực học lớn nhất của kết cấu đặt trên gối đàn hồi

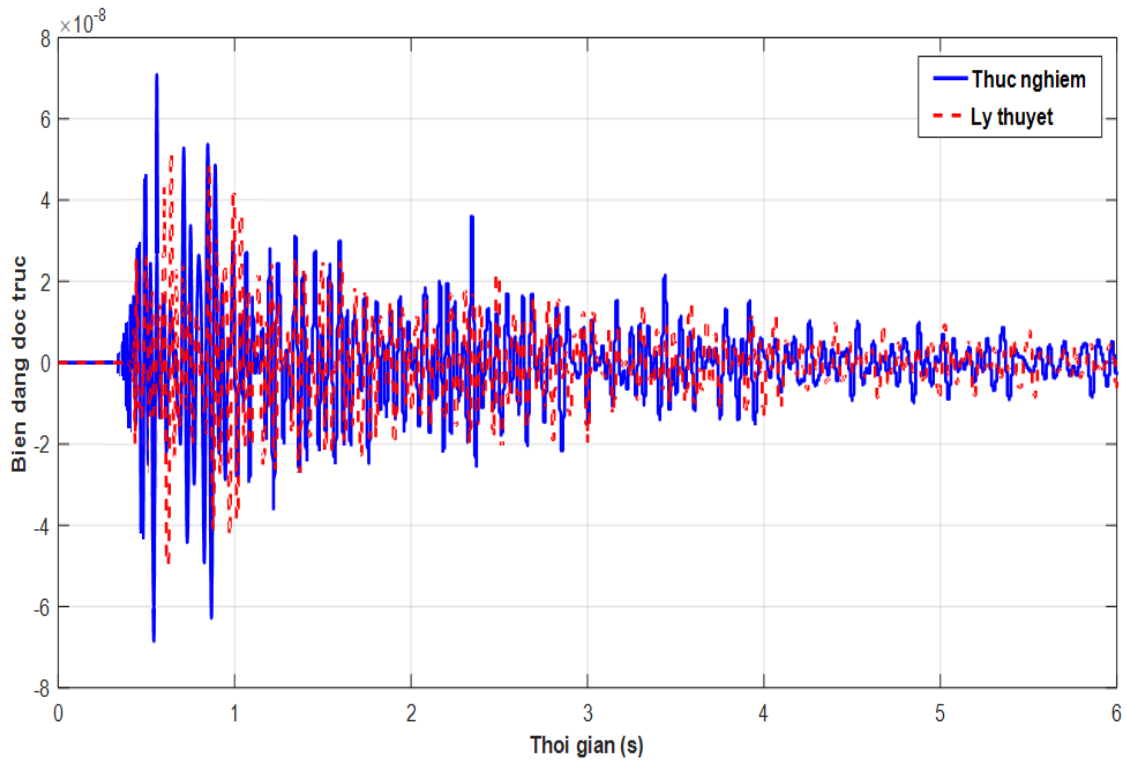
	Điểm đo	Thực nghiệm	Lý thuyết	Sai số [%]
Chuyển vị hướng kính	E (m)	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$0,77 \cdot 10^{-5}$	24,2
	F(m)	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$	26,6
	G(m)	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$	25,6
	H(m)	$1,34 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$	22,8
Gia tốc	E ( $\text{m/s}^2$ )	16,3	12,61	22,7
	F ( $\text{m/s}^2$ )	16,5	12,54	24,1
	G ( $\text{m/s}^2$ )	19,7	14,53	26,2
	H ( $\text{m/s}^2$ )	17,6	13,81	21,5
Biến dạng dọc trục	E	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$3,68 \cdot 10^{-8}$	26,4
	F	$7,1 \cdot 10^{-8}$	$5,27 \cdot 10^{-8}$	25,8
	G	$5,8 \cdot 10^{-8}$	$4,35 \cdot 10^{-8}$	25,0
	H	$3,8 \cdot 10^{-8}$	$2,75 \cdot 10^{-8}$	27,6



**Hình 4.9.** Đáp ứng chuyển vị – thời gian tại điểm F của ống composite



**Hình 4.10.** Đáp ứng gia tốc – thời gian tại điểm F của ống composite



**Hình 4.11.** Đáp ứng biến dạng – thời gian tại điểm F của ống composite

**Nhận xét:**

Với kết quả thể hiện trên bảng 4.5 và đồ thị 4.9, 4.10, 4.11 ta thấy đáp ứng chuyển vị, gia tốc, biến dạng theo thời gian tại các điểm đo từ kết quả thực nghiệm và lý thuyết là khá tương đồng về quy luật, sai số giữa thực nghiệm và lý thuyết khá lớn. Nguyên nhân thứ nhất là có thể là trong phần thực nghiệm thì sự gá lắp của ống trên các liên kết gối cứng và gối đàn hồi chưa đảm bảo độ cứng vững, trong khi tính toán lý thuyết thì mô hình ống trên các liên kết được coi như lý tưởng. Nguyên nhân thứ hai là do trong phần lý thuyết, khi tính toán tải trọng dạng áp suất di động không xét đến khối lượng tải trọng, còn trong phần thực nghiệm tải trọng là áp suất chất



lông di động, nên với khối lượng của chất lông đã làm tăng các giá trị chuyên vị, gia tốc và biến dạng của ống composite.

Tuy nhiên, với điều kiện các thiết bị thí nghiệm vẫn còn hạn chế, sai số là không thể tránh khỏi, do vậy theo tác giả kết quả so sánh thí nghiệm và tính toán lý thuyết là có thể chấp nhận được.

#### **Kết luận chương 4**

Một số kết quả chính đạt được trong chương này, đó là:

- Đã xây dựng mô hình thực nghiệm ống composite đặt trên liên kết cứng và liên kết đàn hồi chịu tác dụng của tải trọng dạng áp suất chất lông di động.

- Tiến hành thí nghiệm đo đáp ứng động với các trường hợp áp lực trong ống khác nhau cho kết quả đường đáp ứng động lực học có dạng tương đồng với phương pháp lý thuyết. Chứng tỏ tiến trình thí nghiệm mà tác giả xây dựng và chương trình khảo sát số bằng phương pháp lý thuyết đảm bảo độ tin cậy.

- Kết quả so sánh giữa thực nghiệm và lý thuyết có thể sử dụng trực tiếp mô hình thí nghiệm mà tác giả xây dựng để đưa ra các kết quả ban đầu cho đáp ứng động lực học của ống tại các vị trí đo khác nhau.

## **KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ**

### **1. Những đóng góp mới của luận án:**

- Xây dựng hệ phương trình vi phân dao động phi tuyến của phần tử vỏ cong trong nền đàn hồi, chịu tác dụng của áp suất di động, trong đó áp suất phân bố trên diện tích phần tử vỏ thay đổi theo thời gian. Tập hợp ma trận, vectơ tải tổng thể từ các ma trận và vectơ tải trọng phần tử, thiết lập được phương trình vi phân dao động phi tuyến của ống trụ composite trong nền đàn hồi chịu tác dụng của áp suất di động dọc trong ống.

- Sử dụng phương pháp PTHH, xây dựng thuật toán giải và viết chương trình máy tính trên nền Matlab phân tích phi tuyến động lực học ống trụ composite lớp đặt trong nền đàn hồi và trên liên kết cứng chịu tác dụng của áp suất di động.

- Khảo sát số xem xét ảnh hưởng của một số yếu tố như: kích thước hình học, vật liệu ống, vận tốc áp suất di động, tải trọng và liên kết... đến đáp ứng động lực học của ống trụ composite lớp. Từ đó giúp cho việc lựa chọn giải pháp, khuyến cáo hợp lý cho ống composite lớp chịu tác dụng của áp suất di động, ứng dụng trong kỹ thuật như: ống dẫn chất lỏng, chất khí, nòng súng, nòng pháo,...

- Tiến hành thực nghiệm trên mô hình để có được các số liệu làm cơ sở kiểm chứng kết quả tính toán bằng phương pháp PTHH. Kết quả thí nghiệm đo đáp ứng động lực học có dạng tương đồng với phương pháp lý thuyết, sai số trong phạm vi chấp nhận được, chứng tỏ tiến trình thí nghiệm và chương trình khảo sát số mà tác giả xây dựng đảm bảo độ tin cậy.

## 2. Nhận xét và kiến nghị:

Qua nghiên cứu và các kết quả đạt được trong luận án, tác giả đưa ra một số nhận xét và kiến nghị sau:

- Ảnh hưởng của kích thước hình học, vật liệu ống composite, thay đổi tải trọng, vận tốc áp suất di động và việc sử dụng nền đàn hồi hay gôỉ cứng đến phản ứng động lực học của ống trụ composite là khá lớn. Vì vậy trong thiết kế chế tạo có thể lựa chọn hợp lý số lớp, chiều dài của ống composite, phương án thiết kế nền và gôỉ phù hợp nhằm tăng sức kháng lực cho ống composite. Trong khai thác, sử dụng cần hạn chế tối đa sự thay đổi tốc độ của áp suất di động hay tải trọng trong ống composite.

- Nội dung nghiên cứu của luận án có thể phát triển theo các hướng sau:

+ Phân tích động lực học hệ ống dẫn trong nền biến dạng chịu tác dụng của áp suất di động trong đó có xét đến tính tương tác giữa hệ ống và nền.

+ Nghiên cứu thực nghiệm ống vật liệu composite, composite áp điện, FGM chịu tải trọng di động: khối lượng, áp suất,...

## DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ

1. Nguyễn Việt Hà, Phạm Tiến Đạt, Lê Trường Sơn (2016), “Phân tích đáp ứng động học của ống composite trên nền đàn hồi dưới tác dụng của áp suất di động”, *Tuyển tập công trình Hội nghị khoa học toàn quốc về cơ kỹ thuật và tự động hóa lần thứ 2, kỷ niệm 60 năm thành lập ĐHBK Hà Nội*, tr.268-273.
2. Nguyễn Việt Hà, Phạm Tiến Đạt, Lê Trường Sơn, Nguyễn Gia Thắng, Phan Thanh Phúc (2016), “Phân tích ảnh hưởng của tham số vận tốc tới chuyển vị của ống composite dưới tác dụng của áp suất di động”, *Hội nghị Khoa học và công nghệ toàn quốc về cơ khí - động lực, kỷ niệm 60 năm thành lập ĐHBK Hà Nội*, tr.475-480.
3. Nguyễn Việt Hà (2017), “Tính toán ống composite lớp trên liên kết đàn hồi chịu tác dụng của tải trọng di động”, *Hội nghị Khoa học và công nghệ toàn quốc về cơ khí - động lực, kỷ niệm 60 năm thành lập ĐHBK Tp HCM*, tr 118-124.
4. Nguyễn Việt Hà, Phạm Tiến Đạt, Lê Trường Sơn, Nguyễn Trường Thanh (2017), “Phân tích ảnh hưởng của một số yếu tố đến đáp ứng động học của ống composite lớp trên liên kết đàn hồi chịu tác dụng của tải trọng di động”, *Tạp chí nghiên cứu khoa học và công nghệ quân sự*, số 55, tr 190-196.
5. Nguyễn Việt Hà (2018), “Nghiên cứu động học ống trên gối đàn hồi chịu áp suất di động bằng phương pháp phần tử hữu hạn”, *Hội nghị cơ học toàn quốc lần thứ X*.
6. Nguyễn Việt Hà, Phạm Tiến Đạt, Lê Trường Sơn (2019), “Nghiên cứu đáp ứng động lực học của ống composite chịu tác dụng của tải trọng di động bằng phương pháp số và thực nghiệm”, *Tạp chí khoa học công nghệ xây dựng*, Trường đại học Xây dựng.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### Tiếng Việt

- [1]. Nguyễn Thanh Bình và cộng sự (2016), *Lý thuyết và phương pháp tính tấm – vỏ*, Nhà xuất bản quân đội nhân dân.
- [2]. Nguyễn Thái Chung (2013), *Thí nghiệm cơ học*, Học viện Kỹ thuật quân sự.
- [3]. Nguyễn Thái Chung (2016), *Cơ sở phương pháp phần tử hữu hạn và lập trình Ansys trong cơ kỹ thuật*, Nhà xuất bản quân đội nhân dân.
- [4]. Nguyễn Thái Chung, Hoàng Xuân Lương (2010), “Phân tích động lực học dầm liên hợp chịu tác dụng đồng thời của tải trọng di động và động đất”, *Tuyển tập Công trình khoa học Hội nghị Khoa học toàn quốc Cơ học vật rắn biến dạng lần thứ X*, Thái Nguyên 12-13/11/2010.
- [5]. Đỗ Anh Cường, Tạ Hữu Vinh (2004), “Tương tác giữa kết cấu hệ thanh và tải trọng di động có liên kết đàn hồi và cản nhớt”, *Tạp chí Khoa học kỹ thuật- Học viện Kỹ thuật quân sự* - Số 106, I-2004, tr. 27-35.
- [6]. Bùi Tiến Cường (2012), *Nghiên cứu ổn định đàn hồi của tấm và vỏ trụ composite lớp chịu tải trọng động*, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật quân sự.
- [7]. Nguyễn Chiến Hạm (2008), *Nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng xung, nhiệt đến độ bền của ống phóng composite cốt sợi sử dụng trong các tổ hợp phóng loạt*, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật quân sự.
- [8]. Lê Ngọc Lý (2013), *Phân tích động lực học kết cấu tấm mỏng chịu tải trọng di động*, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật quân sự.
- [9]. Lê Tân (2011), *Nghiên cứu tương tác giữa ống dẫn và nền san hô dưới tác dụng của tải trọng nổ*, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật quân sự.

- [10]. Võ Văn Thảo (2001), *Phương pháp khảo sát nghiên cứu thực nghiệm công trình*, Nhà xuất bản khoa học kỹ thuật – Hà nội.
- [11]. Đỗ Xuân Thọ (1996), *Tính toán dao động uốn của dầm liên tục chịu tác dụng của vật thể di động*, Luận án PTS KHKT, Hà Nội.
- [12]. Chu Quốc Thắng (1997), *Phương pháp phần tử hữu hạn*, Nhà xuất bản Khoa học kỹ thuật, Hà Nội.
- [13]. Nguyễn Hoa Thịnh, Nguyễn Đình Đức (2001), *Vật liệu Composite cơ học và công nghệ*, Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật.
- [14]. Trần Ích Thịnh, Ngô Như Khoa ( 2007), *Phương pháp phần tử hữu hạn*, Đại học bách khoa Hà Nội.
- [15]. Trần Minh Tú, Trần Ích Thịnh ( 2016), *Cơ học vật liệu và kết cấu composite*, Nhà xuất bản xây dựng Hà Nội.
- [16]. Nguyễn Minh Tuyên (2005), *Quy hoạch thực nghiệm*, Nhà xuất bản khoa học kỹ thuật – Hà nội.
- [17]. Tạ Hữu Vinh (2005), *Nghiên cứu dao động của kết cấu hệ thanh chịu tải trọng di động bằng phương pháp số*, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Học viện KTQS, Hà Nội.
- [18]. Nguyễn Mạnh Yên (1996), *Phương pháp số trong cơ học kết cấu*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.

### **Tiếng Anh**

- [19]. Sofiyev, A.H. (2010), “Dynamic response of an FGM cylindrical shell under moving load”, *Composite structures*,93, pp. 58-66.
- [20]. Ferreira, A.J.M. (2009), *Matlab Codes for Finite Element Analysis – Solids and Structures*, Springer.
- [21]. Chopra, A.K. (2004), *Dynamics of structures theory and applications to earthquake engineering* (Second edition), Pearson education Asia limited and Tsinghua university press.

- [22]. De Faria, A.R. (2004), “Finite element analysis of the dynamic response of cylindrical panels under traversing loads”, *Europaen Journal of Mechanics A/ Solids* 23, pp. 677- 687.
- [23]. Mehmood, A., Khan, A. A., & Mehdi, H. (2014), “Vibration Analysis Of Beam Subjected To Moving Loads Using Finite Element Method”, *Journal of Engineering*, Vol. 04, Issue 05 , V1, pp. 07-17.
- [24]. Neyaa, B.N., Ardeshir, M.A., Delavar, A.A., Bakhsh, M.Z.R. (2017), “Three-Dimensional Analysis of Buried Steel Pipes under Moving Loads”, *Open Journal of Geology*, 7, pp. 1-11.
- [25]. Saranjam, B., Bakhshandeh, K., & Kadivar, M. H. (2007), “The Dynamic Response of a Cylindrical Tube under the Action of a Moving Pressure”, *Journal of Mechanical Engineering*, 53, pp. 409-419.
- [26]. Bathe, K.J. (1996), *Finite element procedures*, Prentice Hall International, Inc.
- [27]. Budiansky, B. and Roth, R.S (1962), *Axisymmetric dynamic buckling of clamped shallow spherical shell*, In: Collected papers on instability of shell structures, NASA TN D-1510.
- [28]. Bajer, C. I., & Dyniewicz, B. (2012), *Numerical Analysis of Vibrations of Structures under Moving Inertial Load*, Springer.
- [29]. Nicoara, D. (2011), “Automotive suspension teaching using Matlab”, *Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering*, Volume X (XX), NR1, pp. 133-140.
- [30]. Morozov, E.V., Lopatin, A.V., Nesterov, V.A. (2011), “Finite-element modelling and buckling analysis of anisogrid composite lattice cylindrical shells”, *Composite Structures*, 93, pp. 308–323.
- [31]. Oñate, E. (2013), *Structural Analysis with the Finite Element Method. Linear Statics: Volume 2: Beam, Plates and shells*, Springer.

- [32]. Tornabene, F., Liverani, A., & Caligiana, G. (2012), “Static analysis of laminated composite curved shells and panels of revolution with a posteriori shear and normal stress recovery using generalized differential quadrature method”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 61, pp. 71–87.
- [33]. Sheng, G.G., Wang, X. (2009), “Studies on dynamic behavior of functionally graded cylindrical shells with PZT layers under moving loads”, *Journal of Sound and Vibration*, 323, pp. 772–789.
- [34]. Hassan and Adil, M. (2014), “Dynamic and static analyses of the oil and gas pipelines”, *Civil Engineering Department Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yasin Dursun Sari*, June 2014, pp. 119.
- [35]. Lee, H. (2010), *Finite element analysis of a buried pipeline*, A dissertation submitted to The University of Manchester for the degree of Master of Science by Research In the Faculty of Engineering and Physical Science.
- [36]. Sülü, İ. Y. (2016), “Stress Analysis of Multi-Layered Hybrid Composite Pipes Subjected to Internal Pressure”, *International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)*, Vol.8, Issue 4, pp. 87-98.
- [37]. Vinson, J. R. (2006), *Plate and panel structures of isotropic, composite and piezoelectric materials*, Including sandwich construction (Vol. 120), Springer Science & Business Media.
- [38]. Ather, J. (2011), *Dynamic Stability of delaminated cross ply composite plates and shells*, thesis, National Institute of Technology Rourkela.
- [39]. Huang, J., & Wang, X. (2009), “Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes”, *Composite Structures*, 91(2), pp. 222-228.
- [40]. Zhou, J., Deng, Z., Liu, T., & Hou, X. (2009), “Elastic structural response of prismatic metal sandwich tubes to internal moving pressure



- loading”, *International Journal of Solids and Structures*, 46, pp. 2354–2371.
- [41]. Wolf, J. P. (1985), *Dynamic soil - structure interaction*, Prentice - Hall, Inc.
- [42]. Przemieniecki, J.S. (1968), *Theory of Matrix Structural Analysis*, Dover Publications, INC. New York.
- [43]. Tzeng, J.T. (1998), “Dynamic response and fracture of composite cylinders”, *Composites Science and Technology*, pp.1443-1451
- [44]. Bendat, J.S. and Piersol, A.G. (1998), “Analysis and Measurement Produres”, Wiley – Interscience New York – London – Sydney - Toronto.
- [45]. Bakhshandeh, K., & Saranjam, B. (2009), “Thickness ratio effect on the dynamic response of a long cylinder tube under moving pressure”, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol.7, No.1, pp.1-10.
- [46]. Bagchi, K., Gupta, S. K., Kushari, A., & Iyengar, N. G. R. (2009), “Experimental study of pressure fluctuations and flow perturbations in air flow through vibrating pipes”, *Journal of Sound and Vibration*, 328, pp. 441–455.
- [47]. Eldalil, K. M. S., Baz, A. M., & Tawfik, M. (2009), “ stability of cylindrical shells under moving loads by applying advaced controlling techniques part I – Using periodic stiffeners”, *Hindawi Publishing Corporation Advances in Acoustics and Vibration*, Volume 2009, Article ID 317202, pp.1-17.
- [48]. Lam, K. Y., Zong, Z., & Wang, Q. X. (2003), “Dynamic response of a laminated pipeline on the seabed subjected to underwater shock”, *Composites Part B*, 34, pp. 59–66.

- [49]. Fryba, L. (1999), *Vibration of solids and structures under moving loads*, Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, Czech Republic, Thomas Telford.
- [50]. Pecinka, L. and Krasny, I. (2003), “Dynamic of piping with moving load”, *Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (Smirt 17)*, Prague, Czech Republic, August 17-22, pp. 1-4.
- [51]. Majid Mirzaei (2008), “On amplification of stress waves in cylindrical tubes under internal dynamic pressures”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 50, pp. 1292– 1303.
- [52]. Mirzaei, M. (2010), “Finite Element Analysis of Deformation and Fracture of Cylindrical Tubes under Internal Moving Pressures”, *Finite Element Analysis*, David Moratal (Ed.), ISBN: 978-953-307-123-7, InTech, Available.
- [53]. Mirzaei, M. (2012), “Vibrational response of thin tubes to sequential moving pressures”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 59, Issue 1, June 2012, pp. 44-54.
- [54]. Bouhafs, M., Sereir, Z., & Chateauneuf, A. (2012), “Probabilistic analysis of the mechanical response of thick composite pipes under internal pressure”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 95, pp. 7-15.
- [55]. Ghannad, M., & Nejad, M. Z. (2012), “Elastic Analysis of Heterogeneous Thick Cylinders Subjected to Internal or External Pressure Using Shear Deformation Theory”, *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 9, No. 6, pp.117-136.
- [56]. Olsson, M. (1984), “Finite element modal co ordinate analysis of structure subjected to moving loads”, *Journal of Sound and Vibration*, 99(1), pp. 1-12.

- [57]. Ruzzene, M. and Baz, A. (2006), “Response of Periodically Stiffened Shells to a Moving Projectile Propelled by an Internal Pressure Wave”, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 13, pp. 267–284.
- [58]. Xia, M., Takayanagi, H., Kemmochi, K. (2001), “Analysis of multi layerd filament wound composite pipes under internal pressure”, *Composite structures*, 53, pp. 483-491.
- [59]. Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L. (2005), *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*, sixth edition, Published with the cooperation of CIMNE, the international Centre for Numerical Methods in Engineering.
- [60]. Soykasap, O., Mecitoglu, Z. and Borat, O. (1996), “Dynamic response of composite cylindrical shells to shocking load”, *Mathematical and Computational Applications*, Vol 1, No 1, pp. 85-96.
- [61]. Casamichele, P., Maugeri, M. and Motta, E. (2004), “Nonlinear Analysis of Soil – Pipeline Interaction in Unstable Slopes”, *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No. 3161.
- [62]. Ansari, R., Alisafaei, F., & Ghaedi, P. (2010), “Dynamic analysis of multi-layered filament-wound composite pipes subjected to cyclic internal pressure and cyclic temperature”. *Composite Structures*, 92 (5), pp. 1100-1109.
- [63]. Reddy J.N. (2004), *Mechanics of Laminated Composite Plates and shells: Theory and Analysis*, CRC Press.
- [64]. Reddy J.N. (2005), *An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*, Oxford University Press.
- [65]. Release 11.0 Documentation for Ansys.
- [66]. Cooper, R., & Barnett, J. (2014), “Pipelines for transporting CO<sub>2</sub> in the UK”, *Science Direct Energy Procedia*, 63, pp. 2412 – 2431.

- [67]. Acharya, S. (2016), *Analysis and FEM Simulation of Flow of Fluids in Pipes*, Thesis, Arcada University of Applied Sciences.
- [68]. Azarpazhoo, S. A., & Kazemi, S. R. (2017), “Dynamic analysis of long thick cylindrical shell subjected to dynamic internal pressure using high order shear deformation theory”, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 427-438.
- [69]. Hasheminejad, S. M., & Komeili, M. (2007), “Dynamic response of a thick functionally graded material tube under a moving load”, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol 221 Part C.
- [70]. Dey, T., Ramachandra, L.S. (2017), “Non-linear vibration analysis of laminated composite circular cylindrical shells”, *Composite Structures*, 163, pp. 89–100.
- [71]. Lee, U., & Park, J. (2006), “Spectral element modelling and analysis of a pipeline conveying internal unsteady fluid”, *Journal of Fluids and Structures*, 22 (2), pp. 273–292.
- [72]. Beltman, W.M. and Shepherd, J.E. (2002), “Linear Elastic response of tubes to internal detonation loading”, *Journal of Sound and Vibration*, 252, pp. 617-655.
- [73]. Zhang, Y. L., Gorman, D. G., & Reese, J. M. (1999), “Analysis of the vibration of pipes conveying fluid”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 213(8), pp. 849-859.
- [74]. (2006), *Advanced Dynamic of structures*, NTUST – CT 6006.