

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO BỘ GIAO THÔNG VẬN TẢI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ GIAO THÔNG VẬN TẢI

NGUYỄN VĂN TIẾN

ỒN ĐỊNH ĐÀN HỒI PHI TUYẾN CỦA KẾT CẤU
CÔNG TRÌNH DẠNG TẮM VỎ FG-CNTRC CÓ TÍNH
TỚI CÁC BIỆN PHÁP TĂNG CỨNG

Ngành: Kỹ thuật xây dựng công trình đặc biệt

Mã số: 9580206

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI – 2024

Công trình được hoàn thành tại: Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS. TS. Vũ Hoài Nam

2. TS. Nguyễn Minh Khoa

Phản biện: GS.TSKH. Đào Huy Bích

Phản biện: PGS.TS. Trần Thế Truyền

Phản biện: PGS.TS. Đỗ Văn Thơm

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng cấp Trường chấm luận án tiến sĩ họp tại Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải vào hồi 8 giờ 30 ngày 24 tháng 05 năm 2024

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Thư viện Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Ổn định và sau mất ổn định phi tuyến là các bài toán quan trọng trong phân tích ứng xử cơ học của các kết cấu kỹ thuật nói chung và kỹ thuật xây dựng công trình nói riêng. Loại vật liệu composite tiên tiến gia cường carbon nanotube cơ tính biến đổi được quan tâm đặc biệt trong những năm gần đây có tên quốc tế là Functionally graded carbon nanotubes-reinforced composite (FG-CNTRC). Do những đặc tính cơ nhiệt ưu việt, chúng có thể được ứng dụng nhiều trong các kết cấu kỹ thuật chịu tải khắc nghiệt. Tăng cứng cho các kết cấu tấm vỏ bằng các hệ sừn là một biện pháp phổ biến. Các tiêu chuẩn thiết kế hiện nay chỉ tập trung cho thiết kế ổn định tổng thể tuyến tính tấm vỏ làm bằng vật liệu đẳng hướng. Vì vậy cần có các nghiên cứu lý thuyết cho các bài toán này làm cơ sở cho việc xây dựng các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu các công trình. Xuất phát từ những lý do trên đây, đề tài luận án này nghiên cứu: “**Ổn định đàn hồi phi tuyến của kết cấu công trình dạng tấm vỏ FG-CNTRC có tính tới các biện pháp tăng cứng**”.

2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

- i) Đề xuất biện pháp tăng cứng cho tấm và vỏ FG-CNTRC
- ii) Phát triển các kỹ thuật san tác dụng sừn cải tiến cho phương án tăng cứng bằng sừn cho kết cấu phù hợp
- iii) Phân tích xu hướng ứng xử ổn định và sau mất ổn định của kết cấu công trình dạng tấm vỏ FG-CNTRC có xét tới các biện pháp tăng cứng
- iv) Đánh giá các ảnh hưởng của các thông số đầu vào và các thông số khác của các kết cấu công trình dạng tấm và vỏ FG-CNTRC

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

Đối tượng nghiên cứu: kết cấu dạng tấm vỏ như tấm chữ nhật và vỏ trụ FG-CNTRC có xét tới một số biện pháp tăng cứng

Phạm vi nghiên cứu: bài toán ổn định và sau mất ổn định phi tuyến.

4. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu lý thuyết dựa trên tiếp cận giải tích.

5. Cấu trúc của luận án: Bao gồm mở đầu, 4 chương, kết luận, danh mục các công trình khoa học của tác giả và tài liệu tham khảo.

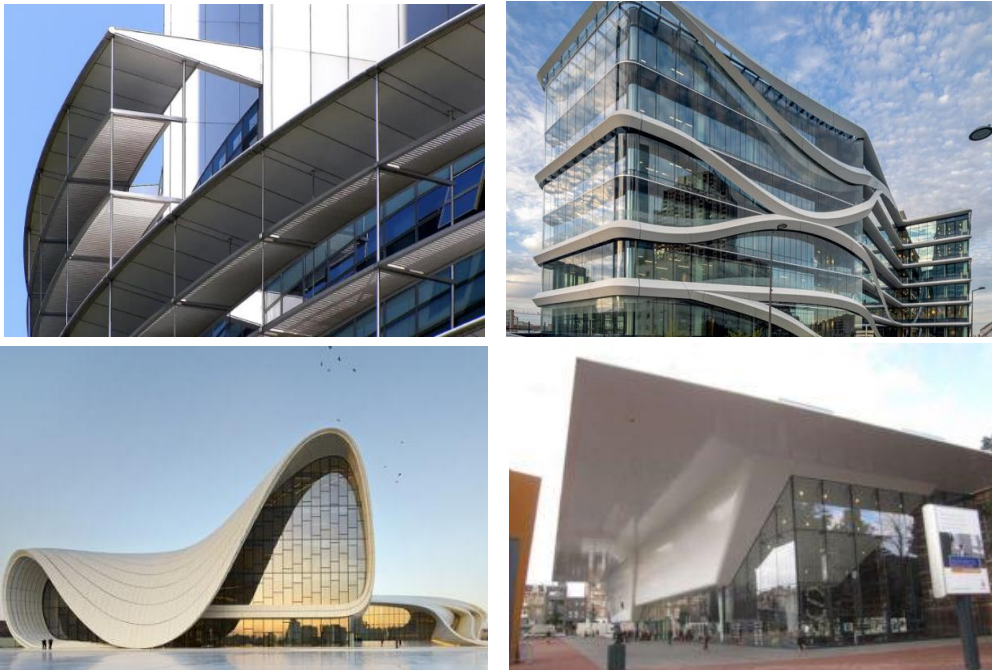
Chương 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Vật liệu Nanocomposite và các ứng dụng trong xây dựng công trình

1.1.2. Vật liệu Nanocomposite gia cường CNT cơ tính biến thiên (FG-CNTRC)

Với phát hiện quan trọng về carbon nanotube (CNT) của Iijima [58, 59], CNTs đã bắt đầu được quan tâm nghiên cứu áp dụng trong nhiều lĩnh vực khoa học và công nghệ khác nhau. Xuất phát từ ý tưởng của FGM, mô hình phân bố cơ tính biến thiên (FG) của CNT đầu tiên được đề xuất bởi Shen [119]. Sau đó, một loạt các nghiên cứu về ứng xử cơ nhiệt của dầm, tấm và vỏ FG-CNTRC đã được tiến hành nghiên cứu.

1.1.3. Ứng dụng vật liệu Nanocomposite trong xây dựng



Hình 1.1. Ứng dụng vật liệu composite tiên tiến cho các công trình xây dựng [62, 94, 103, 110]

1.2. Vật liệu FG-CNTRC, ổn định và sau mất ổn định và các nghiên cứu về ứng xử cơ nhiệt của kết cấu FG-CNTRC

1.2.1. Quy luật phân bố và các đặc trưng cơ tính của vật liệu FG-CNTRC

Theo quy tắc hỗn hợp, mô đun trượt và mô đun Young hiệu dụng có thể được biểu thị bằng [119-129]

$$E_{11} = \eta_1 V_{CNT} E_{11}^{CNT} + V_m E^m, \quad \frac{\eta_2}{E_{22}} = \frac{V_{CNT}}{E_{22}^{CNT}} + \frac{V_m}{E^m}, \quad \frac{\eta_3}{G_{12}} = \frac{V_{CNT}}{G_{12}^{CNT}} + \frac{V_m}{G^m}, \quad (1.1)$$

Các hệ số giãn nở nhiệt theo hướng đặt của CNT và hướng trục giao có thể được biểu thị bằng [119-129]

$$\begin{aligned}\alpha_{11} &= V_{CNT}\alpha_{11}^{CNT} + V_m\alpha^m, \\ \alpha_{22} &= (1 + \nu_{12}^{CNT})V_{CNT}\alpha_{22}^{CNT} + (1 + \nu^m)V_m\alpha^m - \nu_{12}\alpha_{11},\end{aligned}\quad (1.5)$$

Hệ số Poisson được xác định như sau [119-129]

$$\nu_{12} = V_{CNT}^*\nu_{12}^{CNT} + V_m\nu^m, \quad (1.6)$$

Vật liệu nền được lựa chọn là Poly (methyl methacrylate) (PMMA). Các tính chất phụ thuộc nhiệt độ được giả thiết $\nu^m = 0.34$, $\alpha^m = 45(1 + 0.0005\Delta T) \times 10^{-6} / K$, và $E^m = (3.52 - 0.0034T) GPa$.

1.2.3. Các nghiên cứu về ứng xử cơ nhiệt của tấm và vỏ FGM và FG-CNTRC

1.2.3.1. Kết cấu tấm và vỏ FGM

Nhiều tác giả quốc tế đã nghiên cứu đến tấm và vỏ FGM như Shen và Wang [125], Chen và ccs [20], Huang và Han [53-55], Sofiyev và Schnack [131], các tác giả Việt Nam [7, 13, 28, 29, 89, 142, 145].

1.2.3.2. Kết cấu tấm vỏ FGM có sườn tăng cứng

Đào Huy Bích và các cộng sự [11], Najafizadeh và các cộng sự [98].

1.2.2.3. Kết cấu tấm và vỏ FG-CNTRC

Các tác giả quốc tế đã phân tích các kết cấu tấm và vỏ FG-CNTRC như Shen và ccs [119-124, 126-129, 149], Kiani và ccs [61, 63, 64, 65, 66, 67, 95, 96], Lei và các cộng sự [74, 75, 76], Liew và các cộng sự [87], Sofiyev và các cộng sự [133-135], các tác giả Việt Nam [25, 30-41, 8, 92, 51, 52, 143, 144...].

1.2.3.4. Kết cấu Auxetic

Các công trình nghiên cứu tiêu biểu về kết cấu Auxetic trong và ngoài nước: Zhu và các cộng sự [158]. Nguyễn Văn Quyền và các cộng sự [109]. Phạm Hoàng Anh và các cộng sự [9] Lê Ngọc Lý và các cộng sự [92] Lan và các cộng sự [71] Li và các cộng sự [79-82]

1.3. Tiềm năng ứng dụng của các kết cấu dạng tấm vỏ FG-CNTRC trong các kết cấu công trình

Với những đặc điểm vượt trội của FG-CNTRC so với các vật liệu kim loại và composite truyền thống, có tiềm năng lớn để áp dụng trong nhiều

cấu kiện công trình và nhất là các công trình đặc biệt khi những yêu cầu đặc biệt khắt khe về khả năng chịu lực, độ bền và độ tin cậy.

Một số ứng dụng tiềm năng có thể nhận thấy như đường ống vận chuyển nước, vận chuyển khí nén áp suất cao và các cấu kiện dạng trụ ống trong các công trình biển và các kết cấu công trình đặc biệt khác....

1.4. Những kết quả đã đạt được trong nước và quốc tế và những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu

1.4.1. Những kết quả đã đạt được trong nước và quốc tế

1) Đã tiến hành phân tích tương đối toàn diện các vấn đề về ổn định tĩnh tuyến tính và phi tuyến các kết cấu tấm và vỏ FG-CNTRC

2) Đã khảo sát tương đối toàn diện bài toán ổn định động và dao động tuyến tính và phi tuyến của một số kết cấu FG-CNTRC

3) Kết cấu tấm vỏ FG-CNTRC có sườn tăng cứng vẫn còn rất hạn chế.

4) Các nghiên cứu về kết cấu tấm vỏ FG-CNTRC có lõi Auxetic cũng chưa được đề cập đến nhiều trong các nghiên cứu.

1.4.2. Những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu

1) Kỹ thuật sản xuất cải tiến cho sườn FG-CNTRC cần phát triển.

2) Nghiên cứu về ổn định và sau mất ổn định phi tuyến của kết cấu tấm FG-CNTRC có sườn tăng cứng FG-CNTRC trong môi trường nhiệt.

3) Nghiên cứu về ổn định và sau mất ổn định của kết cấu vỏ trụ FG-CNTRC có sườn tăng cứng chịu các dạng tải trọng khác nhau.

4) Nghiên cứu về ổn định và sau mất ổn định phi tuyến của kết cấu vỏ trụ FG-CNTRC có lõi Auxetic.

Chương 2. ỔN ĐỊNH PHI TUYẾN CỦA KẾT CẤU CÔNG TRÌNH DẠNG VỎ TRỤ FG-CNTRC TĂNG CỨNG BẰNG SƯỜN FG-CNTRC CHỊU ÁP LỰC NGOÀI HOẶC NÉN DỌC TRỰC TRONG MÔI TRƯỜNG NHIỆT

Chương này đề xuất một phương án thiết kế sườn làm bằng vật liệu FG-CNTRC cho kết cấu vỏ trụ FG-CNTRC. Kỹ thuật sản xuất sườn cải tiến dành cho sườn FG-CNTRC được phát triển dựa trên lý thuyết dầm dị hướng kết hợp với ý tưởng sản xuất sườn cổ điển của Lekhniskii. Các phương trình chủ đạo được thiết lập dựa trên lý thuyết vỏ Donnell trong đó có kể đến tính phi tuyến hình học von Kármán và mô hình nền đàn hồi

Pasternak. Phương pháp Galerkin được áp dụng để thu được hệ phương trình cân bằng dưới dạng đại số phi tuyến

2.1. Vỏ trụ FG-CNTRC có sườn tăng cứng FG-CNTRC và các phương trình chủ đạo

Vỏ trụ FG-CNTRC trong luận án này được nghiên cứu có hệ tọa độ $Oxyz$ đặt ở mặt trung bình của vỏ như trong Hình 2.1. Vỏ chịu tải áp lực ngoài q phân bố đều trên bề mặt vỏ hoặc tải nén dọc trục p phân bố đều trên hai cạnh và được bao quanh bởi nền đàn hồi Pasternak hai hệ số.

Ngoài ra, vỏ trụ FG-CNTRC được tăng cứng bằng các sườn FG-CNTRC theo hướng vòng hoặc theo hướng dọc ở mặt trong của vỏ.

Biểu thức lực giãn N_x, N_y, N_{xy} và mô men M_x, M_y, M_{xy} của vỏ trụ FG-CNTRC có sườn có thể thu được bằng cách tính tổng độ cứng của vỏ và sườn, dạng tổng quát được biểu diễn dưới dạng

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & B_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 & D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1x}^T \\ \phi_{1y}^T \\ 0 \\ \phi_{2x}^T \\ \phi_{2y}^T \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

Các thành phần độ cứng của vỏ có sườn dọc nhận được như sau

$$(A_{11}, B_{11}, D_{11}) = (A_{11}^{sh}, B_{11}^{sh}, D_{11}^{sh}) + (A_{11}^{stff-L}, B_{11}^{stff-L}, D_{11}^{stff-L}), \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} & (A_{22}, A_{12}, A_{66}, B_{22}, B_{12}, B_{66}, D_{22}, D_{12}, D_{66}) \\ & = (A_{22}^{sh}, A_{12}^{sh}, A_{66}^{sh}, B_{22}^{sh}, B_{12}^{sh}, B_{66}^{sh}, D_{22}^{sh}, D_{12}^{sh}, D_{66}^{sh}), \end{aligned} \quad (2.10)$$

Độ cứng của các sườn dọc $A_{11}^{stff-L}, B_{11}^{stff-L}, D_{11}^{stff-L}$ được tính toán

$$\begin{bmatrix} A_{11}^{stff-L} & B_{11}^{stff-L} \\ B_{11}^{stff-L} & D_{11}^{stff-L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A}_{11}^L & \hat{B}_{11}^L \\ \hat{B}_{11}^L & \hat{D}_{11}^L \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} \hat{A}_{12}^L & 0 & \hat{B}_{12}^L & 0 \\ \hat{B}_{12}^L & 0 & \hat{D}_{12}^L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{A}_{22}^L & 0 & \hat{B}_{22}^L & 0 \\ 0 & \hat{A}_{66}^L & 0 & \hat{B}_{66}^L \\ \hat{B}_{22}^L & 0 & \hat{D}_{22}^L & 0 \\ 0 & \hat{B}_{66}^L & 0 & \hat{D}_{66}^L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{A}_{12}^L & \hat{B}_{12}^L \\ 0 & 0 \\ \hat{B}_{12}^L & \hat{D}_{12}^L \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

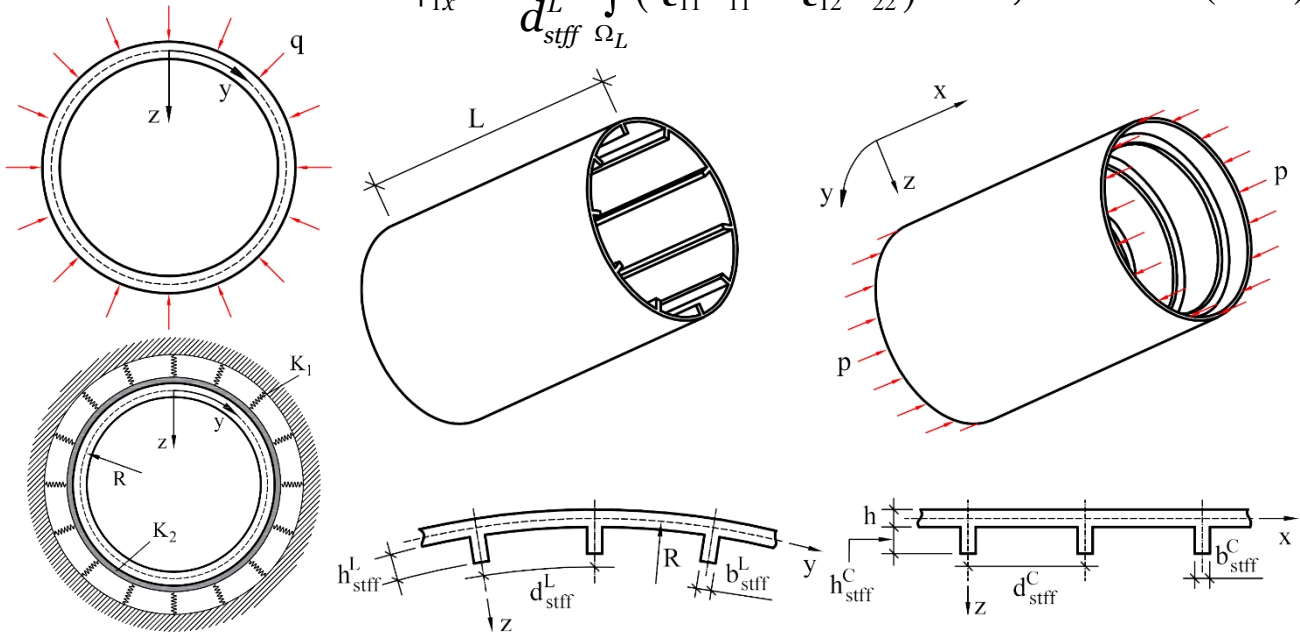
với Ω_L là miền tích phân theo chiều cao của các sườn.

Thành phần nội lực nhiệt của kết cấu vỏ có sườn L có thể được xác định như sau

$$\phi_{1x} = \phi_{1x}^{sh} + \phi_{1x}^{stff}, \quad \phi_{1y} = \phi_{1y}^{sh}, \quad (2.18)$$

và đối với sườn L được trình bày bởi

$$\phi_{1x}^{stff} = \frac{b_{stff}^L}{d_{stff}^L} \int_{\Omega_L} (Q_{11}\alpha_{11} + Q_{12}\alpha_{22}) \Delta T dz, \quad (2.21)$$



Hình 2.1. Các thông số hình học và hệ tọa độ của vỏ trụ FG-CNTRC được tăng cứng bằng sườn FG-CNTRC có nền đàn hồi bao quanh. Phương trình tương thích biến dạng có thể thu được trực tiếp từ phương trình (2.7), như sau

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x^0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y^0}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{xy}^0}{\partial x \partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0. \quad (2.22)$$

Hệ phương trình cân bằng theo lý thuyết vỏ Donnell phi tuyến [3]

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + \frac{N_y}{R} \\ + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = -q + K_1 w - K_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \end{aligned} \quad (2.23)$$

Phương trình thứ ba của phương trình (2.23) có thể được viết lại bằng cách thế các phương trình (2.8) và (2.24) vào phương trình này, dẫn đến

$$\begin{aligned} \Theta \equiv D_{11}^* \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + (D_{12}^* + D_{21}^* + 4D_{66}^*) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22}^* \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \\ + B_{21}^* \frac{\partial^4 \chi}{\partial x^4} - (B_{11}^* + B_{22}^* - 2B_{66}^*) \frac{\partial^4 \chi}{\partial x^2 \partial y^2} - B_{12}^* \frac{\partial^4 \chi}{\partial y^4} - \frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ - \frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 \chi}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} - q + K_1 w - K_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Phương trình tương thích biến dạng (2.22), kết hợp với các phương trình (2.8) và (2.24) trở thành

$$\begin{aligned} A_{11}^* \frac{\partial^4 \chi}{\partial x^4} + (A_{66}^* - 2A_{12}^*) \frac{\partial^4 \chi}{\partial x^2 \partial y^2} + A_{22}^* \frac{\partial^4 \chi}{\partial y^4} + B_{21}^* \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + B_{12}^* \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \\ + (B_{11}^* + B_{22}^* - 2B_{66}^*) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \end{aligned} \quad (2.26)$$

2.2. Điều kiện biên và phương pháp giải

Độ võng của vỏ thỏa mãn điều kiện biên (2.27) theo nghĩa gần đúng được chọn ở dạng ba số hạng như sau [53, 54]

$$w = \kappa_0 + \kappa_1 \sin \frac{m\pi x}{L} \sin \frac{ny}{R} + \kappa_2 \sin^2 \frac{m\pi x}{L}, \quad (2.28)$$

Thế biểu thức (2.28) vào phương trình (2.26), dạng hàm ứng suất được xác định bởi

$$\begin{aligned} \chi = Q_1 \cos \frac{2m\pi x}{L} + Q_2 \cos \frac{2ny}{R} \\ - Q_3 \sin \frac{m\pi x}{L} \sin \frac{ny}{R} + Q_4 \sin \frac{3m\pi x}{L} \sin \frac{ny}{R} - \frac{\sigma_{0y} h x^2}{2} - \frac{p h y^2}{2}, \end{aligned} \quad (2.29)$$

Thế các biểu thức (2.28) và (2.29) vào phương trình (2.25). Sau đó, phương pháp Galerkin được áp dụng cho ba thành phần độ võng dẫn đến

$$\frac{\sigma_{0y}h}{R} = q - \frac{K_1(\kappa_2 + 2\kappa_0)}{2}, \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} & \left(D + \frac{B^2}{A} \right) f_1 + \left(\frac{m^4\pi^4}{16A_{22}^*} + \frac{n^4L^4}{16A_{11}^*R^4} \right) \kappa_1^3 + m^4n^4\pi^4 \left(\frac{L}{R} \right)^4 \left(\frac{1}{A} + \frac{1}{E} \right) \kappa_1\kappa_2 \\ & + \left[\frac{2Bm^2n^2\pi^2L^2}{AR^2} - \frac{n^2L^2(L^2/R - 4B_{21}^*m^2\pi^2)}{4A_{11}^*R^2} \right] \kappa_1\kappa_2 - \frac{\sigma_{0y}hn^2L^4}{R^2} \kappa_1 \\ & - m^2\pi^2L^2hp\kappa_1 + L^4K_1\kappa_1 + L^2K_2\kappa_1 \left[\left(\frac{Ln}{R} \right)^2 + (m\pi)^2 \right] = 0, \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} & \left\{ \left[4B_{21}^* \left(\frac{m\pi}{L} \right)^4 - \frac{1}{R} \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 \right] \frac{n^2L^2}{16A_{11}^*m^2\pi^2R^2} + \frac{B}{2A} \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 \left(\frac{n}{R} \right)^2 \right\} \kappa_1^2 \\ & + \left\{ 4D_{11}^* \left(\frac{m\pi}{L} \right)^4 - \left[4B_{21}^* \left(\frac{m\pi}{L} \right)^4 - \frac{1}{R} \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 \right] \frac{L^2/R - 4B_{21}^*m^2\pi^2}{4A_{11}^*m^2\pi^2} \right\} \kappa_2 \\ & + \frac{1}{2} m^2n^2\pi^2 \left(\frac{\pi mn}{R^2} \right)^2 \left(\frac{1}{A} - \frac{1}{E} \right) \kappa_1^2\kappa_2 \\ & + \frac{\sigma_{0y}h}{R} - q - ph \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 \kappa_2 + K_1 \left(\kappa_2 \frac{3}{4} + \kappa_0 \right) + K_2\kappa_2 \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 = 0. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Điều kiện chu vi kín được thêm vào theo nghĩa trung bình [53-55]

$$\int_0^{2\pi R} \int_0^L \frac{\partial v}{\partial y} dx dy = 0. \quad (2.34)$$

2.2.1. Phân tích ổn định phi tuyến của vỏ trụ FG-CNTRC có sườn FG-CNTRC chịu áp lực ngoài ($p = 0$)

Thế σ_{0y} trong biểu thức (2.31) vào các phương trình (2.32), (2.33) và (2.35), và cho $p = 0$ dạng phương trình cân bằng mới thu được là

$$\kappa_0 = \frac{J_{32}}{2J_{31}} \kappa_1^2 - \frac{1}{2} \kappa_2 - \frac{J_{34}}{2J_{31}} + \frac{J_{33}}{2J_{31}} q, \quad (2.36)$$

$$J_{11} + J_{12}\kappa_0 + J_{13}\kappa_1^2 + J_{14}\kappa_2 + J_{15}\kappa_2^2 - J_{16}q = 0, \quad (2.37)$$

$$\kappa_1^2 = \frac{-J_{23}\kappa_2}{J_{21} + J_{22}\kappa_2}, \quad (2.38)$$

Thế κ_0, κ_1^2 từ phương trình (2.36) và (2.38) vào phương trình (2.37)

$$q = \left\{ J_{11} - \frac{J_{12}J_{34}}{2J_{31}} - \left[\frac{J_{12}J_{23}J_{32}}{2J_{31}(J_{21} + J_{22}\kappa_2)} + \left(J_{14} - \frac{J_{12}}{2} \right) \right] \kappa_2 - \right. \\ \left. + J_{15}\kappa_2^2 - J_{13} \frac{J_{23}\kappa_2}{J_{21} + J_{22}\kappa_2} \right\} \frac{2J_{31}}{2J_{31}J_{16} - J_{12}J_{33}}. \quad (2.39)$$

Độ võng lớn nhất thu được là

$$W_{\max} = q \frac{J_{33}}{2J_{31}} - \frac{J_{34}}{2J_{31}} - \frac{J_{32}J_{23}\kappa_2}{2J_{31}(J_{21} + J_{22}\kappa_2)} + \frac{\kappa_2}{2} + \left(\frac{-J_{23}\kappa_2}{J_{21} + J_{22}\kappa_2} \right)^{1/2}. \quad (2.42)$$

2.2.2. Phân tích ổn định phi tuyến của vỏ trụ FG-CNTRC có sườn FG-CNTRC chịu nén dọc trục ($q=0$)

Thế ứng suất trung bình theo hướng vòng σ_{0y} trong (2.31) vào các phương trình (2.32), (2.33) và (2.35), và cho $q=0$, nhận được

$$\kappa_0 = \frac{J_{32}}{2J_{31}} \kappa_1^2 - \frac{J_{35}}{2J_{31}} p - \frac{1}{2} \kappa_2 - \frac{J_{34}}{2J_{31}}, \quad (2.43)$$

$$J_{11} + J_{12}\kappa_0 + J_{13}\kappa_1^2 + J_{14}\kappa_2 + J_{15}\kappa_2^2 - J_{17}p = 0, \quad (2.44)$$

$$\kappa_1^2 = \frac{J_{24}\kappa_2 p - J_{23}\kappa_2}{J_{21} + J_{22}\kappa_2}, \quad (2.45)$$

Thế κ_0 và κ_1^2 từ các phương trình (2.43) và (2.45) vào phương trình (2.44), liên hệ của p và κ_2 xác định được như sau

$$p = \left(J_{11} + J_{14}\kappa_2 - J_{12} \frac{1}{2} \kappa_2 - J_{12} \frac{J_{34}}{2J_{31}} + J_{15}\kappa_2^2 - J_{12} \frac{J_{32}}{2J_{31}} \frac{J_{23}\kappa_2}{J_{21} + J_{22}\kappa_2} - \right. \\ \left. \frac{J_{13}J_{23}\kappa_2}{J_{21} + J_{22}\kappa_2} \right) \left(-J_{12} \frac{J_{32}}{2J_{31}} \frac{J_{24}\kappa_2}{J_{21} + J_{22}\kappa_2} - \frac{J_{13}J_{24}\kappa_2}{J_{21} + J_{22}\kappa_2} + J_{17} + J_{12} \frac{J_{35}}{2J_{31}} \right)^{-1}. \quad (2.46)$$

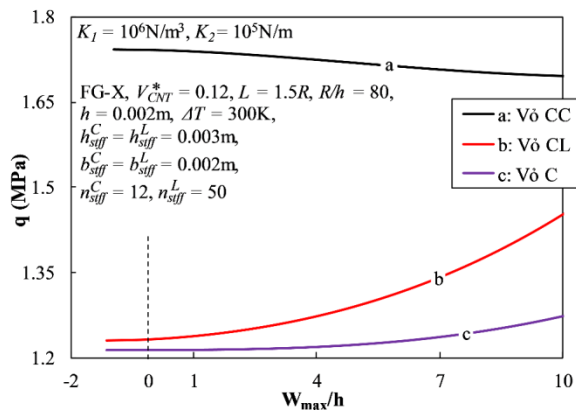
Thế các phương trình (2.43) và (2.45) vào biểu thức (2.41), độ võng lớn nhất của vỏ có thể viết lại thành

$$W_{\max} = \frac{J_{32}}{2J_{31}} \frac{J_{24}\kappa_2 p - J_{23}\kappa_2}{J_{21} + J_{22}\kappa_2} - \frac{J_{35}p}{2J_{31}} + \frac{\kappa_2}{2} - \frac{J_{34}}{2J_{31}} + \sqrt{\frac{J_{24}\kappa_2 p - J_{23}\kappa_2}{J_{21} + J_{22}\kappa_2}}. \quad (2.48)$$

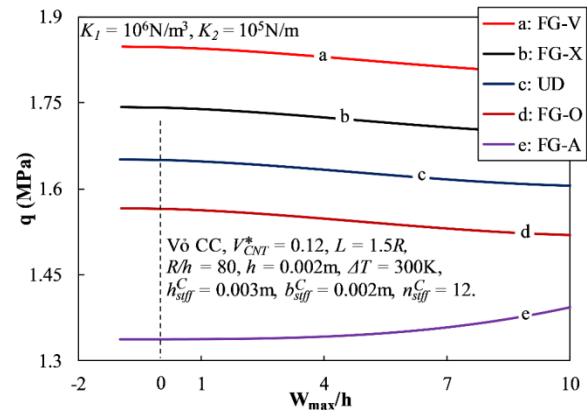
Độ co của cạnh $\bar{\Delta}_x$ theo nghĩa trung bình được xác định

$$\bar{\Delta}_x = A_{22}^* p h + \frac{A_{12}^* R K_1 \kappa_2}{2} + A_{12}^* R K_1 \left(\frac{J_{32}}{2J_{31}} \frac{J_{24} \kappa_2 p - J_{23} \kappa_2}{J_{21} + J_{22} \kappa_2} - \frac{J_{35} p}{2J_{31}} - \frac{\kappa_2}{2} \right. \\ \left. - \frac{J_{34}}{2J_{31}} \right) + \frac{\kappa_2^2}{4} \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 \frac{J_{24} \kappa_2 p - J_{23} \kappa_2}{J_{21} + J_{22} \kappa_2} - \left(A_{22}^* \phi_{1x}^T - A_{12}^* \phi_{1y}^T \right). \quad (2.50)$$

2.4. Ứng dụng kết quả lý thuyết vào phân tích ổn định phi tuyến kết cấu công trình dạng vỏ trụ FG-CNTRC có sườn FG-CNTRC chịu áp lực ngoài

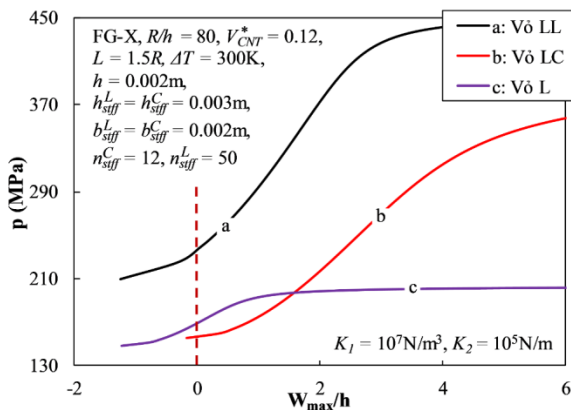


Hình 2.5. Ảnh hưởng của hướng sườn đến đường cong sau mất ổn định của vỏ trụ C-FG-CNTRC

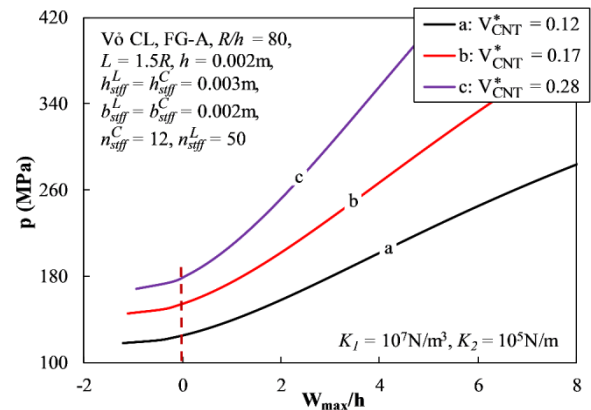


Hình 2.9. Ảnh hưởng của quy luật phân bố CNT đến đường cong sau mất ổn định của vỏ trụ C-FG-CNTRC

2.5. Ứng dụng kết quả lý thuyết vào phân tích ổn định phi tuyến kết cấu công trình dạng vỏ trụ FG-CNTRC có sườn FG-CNTRC chịu nén dọc trục



Hình 2.12. Ảnh hưởng của hướng sườn FG-CNTRC đến đường cong sau mất ổn định $p - W_{\max}/h$ của vỏ L-FG-CNTRC



Hình 2.22. Ảnh hưởng của tỷ phần thể tích CNT đến đường cong sau mất ổn định $p - W_{\max}/h$ của vỏ C-FG-CNTRC

2.6. Kết luận chương 2

Từ những kết quả khảo sát số, những nhận xét nổi bật đạt được như sau

1. Các sườn FG-CNTRC ảnh hưởng đáng kể đến tải áp lực ngoài mất ổn định tới hạn và khả năng chịu tải sau mất ổn định của vỏ. Giá trị lớn nhất của tải áp lực ngoài mất ổn định tới hạn đạt được với vỏ FG-V CC.

2. Không quan sát thấy hiện tượng snap-through đối với vỏ trụ L-FG-CNTRC trong tất cả các khảo sát số.

3. Các thông số hình học, nhiệt độ môi trường, nền đàn hồi, tỷ phần thể tích CNT trong vỏ ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử ổn định của vỏ.

4. Các sườn FG-CNTRC cải thiện đáng kể tải nén dọc trục tới hạn và khả năng chịu tải sau mất ổn định của vỏ trụ FG-CNTRC.

5. Các thiết kế về quy luật phân bố CNT của vỏ và sườn có ảnh hưởng đáng kể đến tác dụng của sườn FG-CNTRC.

6. Nền đàn hồi Pasternak, các thông số hình học, vật liệu và nhiệt độ môi trường có ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử ổn định của vỏ.

Chương 3. ỔN ĐỊNH PHI TUYẾN CỦA KẾT CẤU CÔNG TRÌNH DẠNG VỎ TRỤ FG-CNTRC CHỊU XOẮN TĂNG CỨNG BẰNG SƯỜN FG-CNTRC HOẶC LỖI AUXETIC

Vỏ trụ FG-CNTRC tiếp tục được xem xét nhưng trong một trường hợp tải trọng phức tạp hơn, đó là tải trọng xoắn, với hai trường hợp vỏ trụ FG-CNTRC có sườn và vỏ trụ FG-CNTRC sandwich lõi Auxetic.

3.1. Thiết kế vật liệu và kết cấu

3.1.1. Thiết kế vỏ trụ FG-CNTRC có sườn FG-CNTRC

Vỏ trụ FG-CNTRC có sườn FG-CNTRC, các quy luật phân bố của CNT và hệ tọa độ được xem xét tương tự như mô hình trong chương 2.

3.1.2. Thiết kế vỏ trụ FG-CNTRC sandwich lõi Auxetic

Vỏ trụ FG-CNTRC sandwich có lõi Auxetic chịu tải xoắn phân bố đều τ được xem xét. Các thông số hình học của vỏ trụ, lõi Auxetic tổ ong và các lớp mặt FG-CNTRC được thể hiện trên Hình 3.1.

Thay vì tính toán với kết cấu lõi tổ ong phức tạp, ta có thể phân tích ứng xử của lớp lõi như một lớp thuần nhất dị hướng với các hằng số đàn hồi được ước lượng như sau [150]

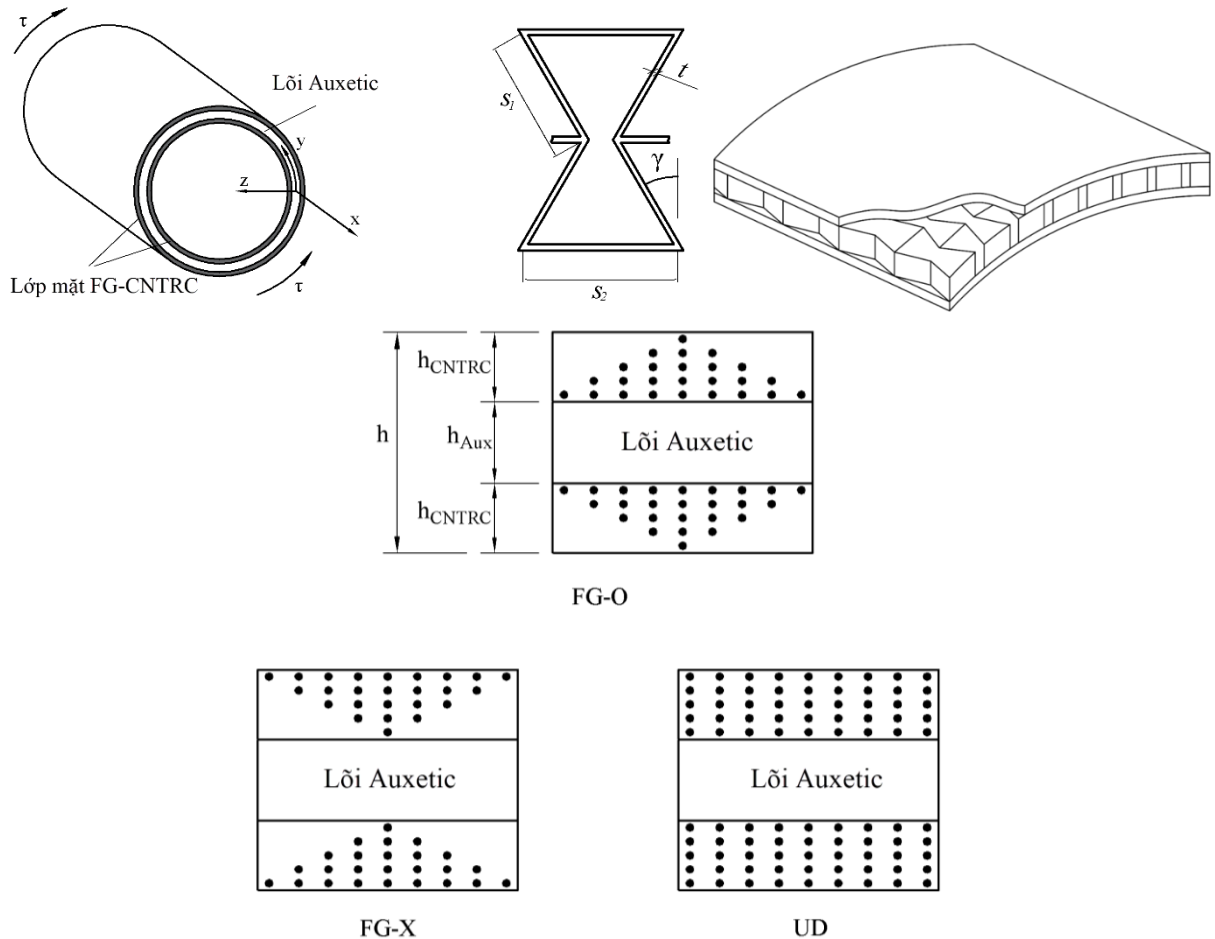
$$E_{11}^{Aux} = E^m \frac{\theta_2^3 (\theta_1 - \sin \gamma)}{\cos^3 \gamma \left[1 + (\tan^2 \gamma + \theta_1 \sec^2 \gamma) \theta_2^2 \right]}, \quad (3.7)$$

$$E_{22}^{Aux} = E^m \frac{\theta_2^3}{\cos \gamma (\theta_1 - \sin \gamma) (\tan^2 \gamma + \theta_2^2)}, \quad (3.8)$$

$$G_{12}^{Aux} = E^m \frac{\theta_2^3}{\theta_1 (1 + 2\theta_1) \cos \gamma}, \quad (3.9)$$

$$v_{12}^{Aux} = - \frac{\sin \gamma (1 - \theta_2^2) (\theta_1 - \sin \gamma)}{\left[1 + (\theta_1 \sec^2 \gamma + \tan^2 \gamma) \theta_2^2 \right] \cos^2 \gamma}, \quad (3.10)$$

$$v_{21}^{Aux} = - \frac{\sin \gamma (1 - \theta_2^2)}{(\tan^2 \gamma + \theta_2^2) (\theta_1 - \sin \gamma)}, \quad (3.11)$$



Hình 3.1. Thiết kế của vỏ trụ FG-CNTRC có lõi Auxetic

3.2. Hệ phương trình cân bằng phi tuyến và hàm ứng suất

Các biểu thức của các thành phần ma trận độ cứng và nội lực nhiệt được xác định

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) = (A_{ij}^{CNTRC}, B_{ij}^{CNTRC}, D_{ij}^{CNTRC}) + (A_{ij}^{Aux}, B_{ij}^{Aux}, D_{ij}^{Aux}), \quad (3.12)$$

$$\phi_{1x}^T = \phi_{1y}^T = 0, \quad \phi_{2x}^T = \phi_{2y}^T = 0, \quad (3.13)$$

trong đó

$$(A_{ij}^{CNTRC}, B_{ij}^{CNTRC}, D_{ij}^{CNTRC}) = \int_{\Pi_{out}} Q_{ij}^{CNTRC-out}(1, z, z^2) dz + \int_{\Pi_{inn}} Q_{ij}^{CNTRC-inn}(1, z, z^2) dz, \quad (i, j = 1, 2, 6) \quad (3.14)$$

$$(A_{ij}^{Aux}, B_{ij}^{Aux}, D_{ij}^{Aux}) = \int_{\Pi_{Aux}} Q_{ij}^{Aux}(1, z, z^2) dz, \quad (i, j = 1, 2, 6) \quad (3.15)$$

với Π_{out} và Π_{inn} là miền chiều dày của lớp CNTRC mặt ngoài và mặt trong của vỏ, Π_{Aux} là miền chiều dày của lớp lõi Auxetic.

Hệ phương trình cân bằng của vỏ trụ theo lý thuyết vỏ Donnell và tính phi tuyến hình học của von-Karman

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0, \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} = 0, \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + \frac{N_y}{R} + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0, \quad (3.18)$$

3.3. Dạng nghiệm độ võng và phương pháp Galerkin

Dạng nghiệm ba số hạng của độ võng có thể được chọn dưới dạng sau [55]

$$w = w(x, y) = \vartheta_0 + \vartheta_1 \sin \alpha x \sin \beta (y - \lambda x) + \vartheta_2 \sin^2 \alpha x, \quad (3.22)$$

Biểu thức hàm ứng suất có thể được xác định bằng cách thế dạng độ võng trong phương trình (3.22) vào phương trình (3.20), sau một số phép toán nhận được

$$\begin{aligned} \chi = & F_1 \cos 2\alpha x + F_2 \cos 2\beta (y - \lambda x) \\ & + F_3 \cos \beta \left[y + \left(\frac{\alpha}{\beta} - \lambda \right) x \right] + F_4 \cos \beta \left[y - \left(\frac{\alpha}{\beta} + \lambda \right) x \right] \\ & + F_5 \cos \beta \left[y - \left(\frac{3\alpha}{\beta} + \lambda \right) x \right] + F_6 \cos \beta \left[y + \left(\frac{3\alpha}{\beta} - \lambda \right) x \right] - \tau h x y, \end{aligned} \quad (3.23)$$

Thế các phương trình (3.22) và (3.23) vào phương trình cân bằng (3.19), sau đó áp dụng phương pháp Galerkin, hệ phương trình cân bằng mới dưới dạng đại số thu được như sau

$$2\tau h\beta^2\lambda + N_1 + N_2\vartheta_2 + N_3\vartheta_1^2 + N_4\vartheta_2^2 = 0, \quad (3.24)$$

$$N_5\vartheta_2 - N_6\vartheta_1^2 + N_7\vartheta_1^2\vartheta_2 = 0, \quad (3.25)$$

Các kết cấu vỏ tròn xoay kín như vỏ trụ chịu xoắn cũng phải thỏa mãn điều kiện chu vi kín dưới đây [55]

$$\int_0^{2\pi R} \int_0^L \frac{\partial v}{\partial y} dx dy = 0. \quad (3.26)$$

Thế các hệ thức (2.7), (2.8), và (2.24), có tính đến (3.22), vào phương trình (3.26), ta có

$$2\vartheta_0 + \vartheta_2 + 2R(A_{11}^*\phi_{1y}^T - A_{12}^*\phi_{1x}^T) - \frac{1}{4}R\vartheta_1^2\beta^2 = 0. \quad (3.27)$$

Khử ϑ_0 và ϑ_2 từ các phương trình (3.24), (3.25) và (3.27) và giải τ theo ϑ_1 , biểu thức liên hệ τ - ϑ_1 nhận được như sau

$$\tau = -\frac{1}{2h\beta^2\lambda} \left\{ \frac{2N_2N_6\vartheta_1^2}{2(N_5 + N_7\vartheta_1^2)} + N_1 + N_3\vartheta_1^2 + N_4 \left[\frac{2N_6\vartheta_1^2}{2(N_5 + N_7\vartheta_1^2)} \right]^2 \right\}. \quad (3.28)$$

Khi $\vartheta_1 \rightarrow 0$, phương trình (3.28) dẫn đến

$$\tau^{upper} = -\frac{N_1}{2h\beta^2\lambda}. \quad (3.29)$$

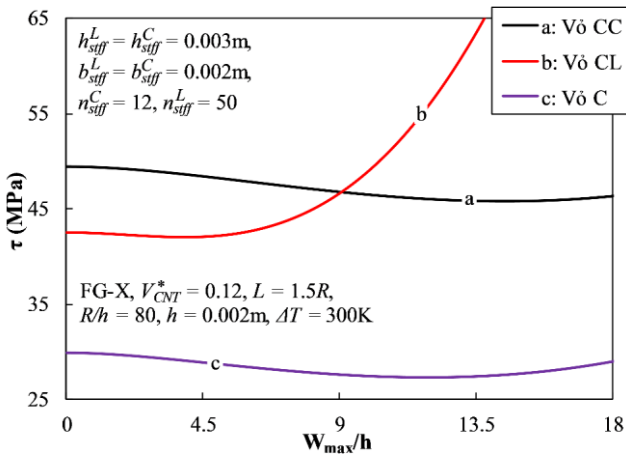
Độ võng lớn nhất không thứ nguyên được viết lại theo biên độ độ võng tuyến tính của trạng thái sau mất ổn định, dẫn đến

$$\bar{W} = W_{max}/h = \frac{R\vartheta_1^2\beta^2}{8h} - \frac{R(A_{11}^*\phi_{1y}^T - A_{12}^*\phi_{1x}^T)}{h} + \frac{\vartheta_1}{h} + \frac{2N_6\vartheta_1^2}{4h(N_5 + N_7\vartheta_1^2)}. \quad (3.30)$$

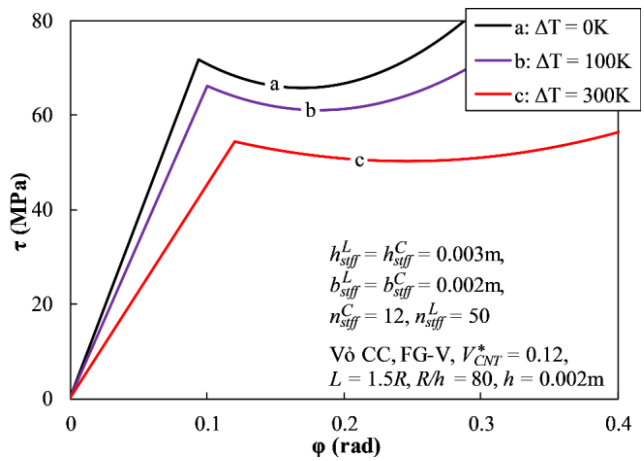
Góc xoắn được định nghĩa theo nghĩa trung bình như sau [55]

$$\varphi = \frac{1}{2\pi RL} \int_0^{2\pi R} \int_0^L \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) dx dy = A_{66}^*\tau h + \frac{n^2\lambda\vartheta_1^2}{4R^2}. \quad (3.31)$$

3.5. Ứng dụng kết quả lý thuyết vào phân tích ổn định phi tuyến kết cấu công trình dạng vỏ trụ FG-CNTRC có sườn FG-CNTRC chịu xoắn

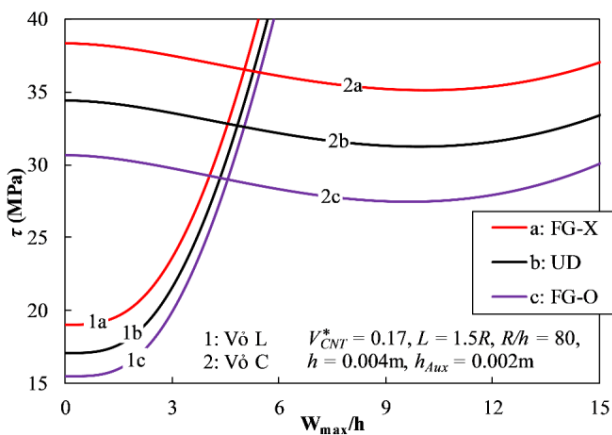


Hình 3.6. Ảnh hưởng của hướng của sườn đến đường cong sau mất ổn định $\tau - \bar{W}$ của vỏ trụ chịu xoắn C-FG-CNTRC

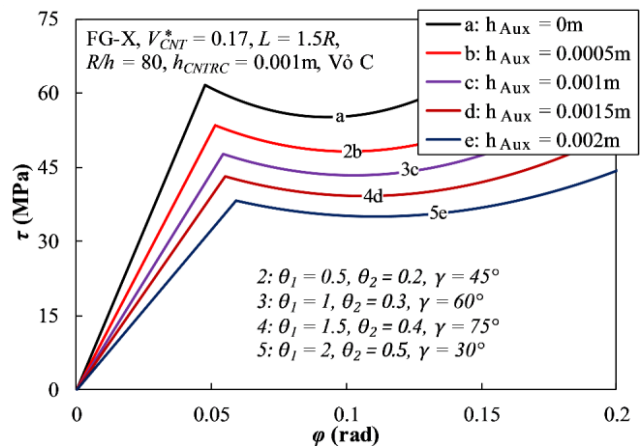


Hình 3.14. Ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường tới đường cong sau mất ổn định $\tau - \phi$ của vỏ trụ FG-CNTRC chịu xoắn

3.6. Ứng dụng kết quả lý thuyết vào phân tích ổn định phi tuyến kết cấu công trình dạng vỏ trụ FG-CNTRC lõi Auxetic chịu xoắn



Hình 3.17. Đường cong sau mất ổn định xoắn $\tau - \bar{W}$ với ba quy luật phân bố CNT của vỏ trụ sandwich lõi Auxetic



Hình 3.26. Đường cong sau mất ổn định $\tau - \phi$ với các thông số hình học khác nhau của vỏ trụ lõi Auxetic

3.7. Kết luận chương 3

Với bài toán vỏ trụ FG-CNTRC có sườn FG-CNTRC chịu xoắn:

1. Khả năng chịu tải xoắn của vỏ FG-CNTRC có sườn FG-CNTRC lớn hơn nhiều so với vỏ không sườn tương ứng.
2. Tác dụng lớn nhất của sườn đạt được trong trường hợp sườn vòng
3. Góc của đoạn thẳng trước mất ổn định $\tau - \phi$ không đổi với các trường hợp vỏ có sườn và không sườn

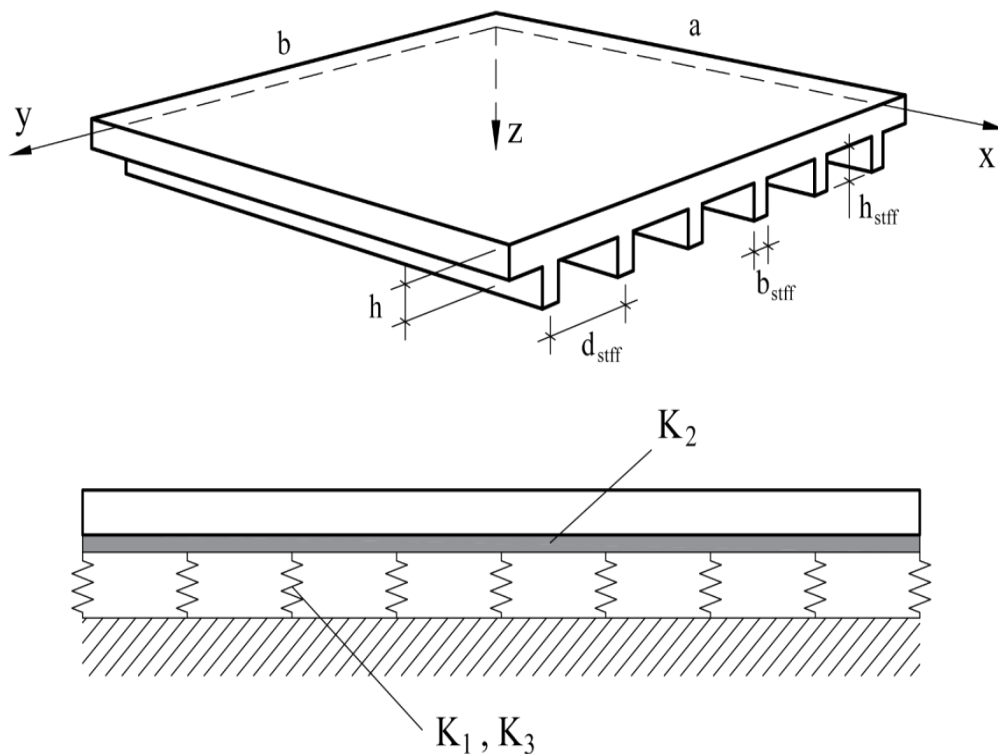
Với bài toán vỏ trụ FG-CNTRC sandwich lõi Auxetic:

1. Tải xoắn mất ổn định tới hạn của vỏ trụ L-FG-CNTRC nhỏ hơn nhiều so với vỏ trụ C-FG-CNTRC
2. Ảnh hưởng của các tính chất hình học của lõi Auxetic đến tải xoắn tới hạn của vỏ là không đáng kể
3. Độ dày của lõi Auxetic ảnh hưởng mạnh đến tải xoắn mất ổn định tới hạn và khả năng chịu tải sau mất ổn định của vỏ.

Chương 4. ỔN ĐỊNH PHI TUYẾN CỦA BẢN TRỤC HƯỚNG DẠNG TẮM FG-CNTRC ĐƯỢC TĂNG CỨNG BẰNG SƯỜN FG-CNTRC CHỊU TẢI TRỌNG KẾT HỢP THEO LÝ THUYẾT BIẾN DẠNG TRƯỢT BẬC CAO

4.1. Thiết kế của bản trục hướng dạng tấm FG-CNTRC được tăng cứng bằng sườn FG-CNTRC

Xét các bản trục hướng dạng tấm chữ nhật FG-CNTRC được tăng cứng bằng sườn FG-CNTRC chịu nén P_x và áp lực ngoài q trong môi trường nhiệt. Trong đó, CNT được gia cường vào một nền đẳng hướng theo phương dọc hoặc ngang tấm (Hình 4.1).



Hình 4.1. Thiết kế sườn của tấm FG-CNTRC và các thông số hình học của tấm và sườn

4.2. Xây dựng các phương trình chủ đạo

Sử dụng HSDT và xét độ không hoàn hảo về hình dạng ban đầu của tấm với các thành phần phi tuyến hình học của von Kármán.

Các biểu thức nội lực N_i và mômen M_i ($i = x, y, xy$) mômen bậc cao T_i của tấm FG-CNTRC có sườn được biểu diễn dưới dạng

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ T_x \\ T_y \\ T_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & B_{12} & 0 & C_{11} & C_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & B_{12} & B_{22} & 0 & C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & B_{66} & 0 & 0 & C_{66} \\ B_{11} & B_{12} & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 & F_{11} & F_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 & D_{12} & D_{22} & 0 & F_{12} & F_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} & 0 & 0 & D_{66} & 0 & 0 & F_{66} \\ C_{11} & C_{12} & 0 & F_{11} & F_{12} & 0 & L_{11} & L_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 & F_{12} & F_{22} & 0 & L_{12} & L_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} & 0 & 0 & F_{66} & 0 & 0 & L_{66} \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} \\ -\lambda \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ -\lambda \left(\frac{\partial \phi_y}{\partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ -\lambda \left(\frac{\partial \phi_x}{\partial y} + \frac{\partial \phi_y}{\partial x} + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varphi_{1x} \\ \varphi_{1y} \\ 0 \\ \varphi_{2x} \\ \varphi_{2y} \\ 0 \\ \varphi_{4x} \\ \varphi_{4y} \\ 0 \end{Bmatrix},$$

(4.7)

trong đó

$$\begin{aligned} & (A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}, C_{ij}, F_{ij}, L_{ij}) \\ & = (A_{ij}^P, B_{ij}^P, D_{ij}^P, C_{ij}^P, F_{ij}^P, L_{ij}^P) + (\bar{A}_{ij}, \bar{B}_{ij}, \bar{D}_{ij}, \bar{C}_{ij}, \bar{F}_{ij}, \bar{L}_{ij}), \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$(A_{ij}^P, B_{ij}^P, D_{ij}^P, C_{ij}^P, F_{ij}^P, L_{ij}^P) = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} Q_{ij}^P(1, z, z^2, z^3, z^4, z^6) dz, \quad (4.9)$$

và

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{B}_{11} & \bar{C}_{11} \\ \bar{B}_{11} & \bar{D}_{11} & \bar{E}_{11} \\ \bar{C}_{11} & \bar{E}_{11} & \bar{L}_{11} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11}^{stff} & B_{11}^{stff} & C_{11}^{stff} \\ B_{11}^{stff} & D_{11}^{stff} & F_{11}^{stff} \\ C_{11}^{stff} & F_{11}^{stff} & L_{11}^{stff} \end{bmatrix} \\ &- \begin{bmatrix} A_{12}^{stff} & 0 & B_{12}^{stff} & 0 & C_{12}^{stff} & 0 \\ B_{12}^{stff} & 0 & D_{12}^{stff} & 0 & F_{12}^{stff} & 0 \\ C_{12}^{stff} & 0 & F_{12}^{stff} & 0 & L_{12}^{stff} & 0 \end{bmatrix} \times \\ &\begin{bmatrix} A_{22}^{stff} & 0 & B_{22}^{stff} & 0 & C_{22}^{stff} & 0 \\ 0 & A_{66}^{stff} & B_{26}^{stff} & B_{66}^{stff} & 0 & C_{66}^{stff} \\ B_{22}^{stff} & 0 & D_{22}^{stff} & 0 & F_{22}^{stff} & 0 \\ 0 & B_{66}^{stff} & 0 & D_{66}^{stff} & 0 & F_{66}^{stff} \\ C_{22}^{stff} & 0 & F_{22}^{stff} & 0 & C_{66}^{stff} & 0 \\ 0 & L_{22}^{stff} & 0 & F_{66}^{stff} & 0 & L_{66}^{stff} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{12}^{stff} & B_{12}^{stff} & C_{12}^{stff} \\ 0 & 0 & 0 \\ B_{12}^{stff} & D_{12}^{stff} & F_{12}^{stff} \\ 0 & 0 & 0 \\ C_{12}^{stff} & F_{12}^{stff} & L_{12}^{stff} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

trong đó

$$\begin{aligned} & (A_{ij}^{stff}, B_{ij}^{stff}, D_{ij}^{stff}, C_{ij}^{stff}, F_{ij}^{stff}, L_{ij}^{stff}) = \\ & \frac{b_{stff}}{d_{stff}} \int_{\Omega} Q_{ij}^{stff}(1, z, z^2, z^3, z^4, z^6) dz, \quad (i, j = 1, 2, 6), \end{aligned}$$

$$\varphi_{1x} = \varphi_1^{xT} + \varphi_1^{x-stff} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (Q_{11}^P \alpha_{11}^P + Q_{12}^P \alpha_{22}^P) \Delta T dz + \varphi_1^{x-stff}, \quad (4.11)$$

$$\varphi_{1y} = \varphi_1^{yT} + \varphi_1^{y-stff} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (Q_{12}^P \alpha_{11}^P + Q_{22}^P \alpha_{22}^P) \Delta T dz + \varphi_1^{y-stff},$$

với $\varphi_1^{xS} = \frac{b_{stff}}{d_{stff}} \int_{\Omega} [Q_{11}^{stff} \alpha_{11}^{stff} + Q_{12}^{stff} \alpha_{22}^{stff}] \Delta T dz$, $\varphi_1^{y-stff} = 0$, đối với trường hợp

tấm được tăng cứng bằng sừn theo phương x ,

$\varphi_1^{y-stff} = \frac{b_{stff}}{d_{stff}} \int_{\Omega} [Q_{11}^{stff} \alpha_{11}^{stff} + Q_{12}^{stff} \alpha_{22}^{stff}] \Delta T dz$, $\varphi_1^{x-stff} = 0$, đối với trường hợp

tấm được tăng cứng bằng sừn theo phương y .

Biểu thức của lực cắt và lực cắt bậc cao được tính như sau

$$\begin{Bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ S_x \\ S_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} H_{44} \frac{\partial w}{\partial x} + H_{44} \phi_x \\ H_{55} \frac{\partial w}{\partial y} + H_{55} \phi_y \\ H_{66} \frac{\partial w}{\partial x} + H_{66} \phi_x \\ H_{77} \frac{\partial w}{\partial y} + H_{77} \phi_y \end{Bmatrix}, \quad (4.12)$$

trong đó

$$\begin{aligned} (H_{44}, H_{55}, H_{66}, H_{77}) = \\ (H_{44}^P, H_{55}^P, H_{66}^P, H_{77}^P) + (\bar{H}_{44}, \bar{H}_{55}, \bar{H}_{66}, \bar{H}_{77}), \end{aligned} \quad (4.13)$$

và tấm được tăng cứng bằng sừn theo phương y của tấm

$$\bar{H}_{44} = 0,$$

$$\bar{H}_{66} = 0,$$

$$\bar{H}_{55} = \frac{b_{stff}}{d_{stff}} \left(\int_{\Omega} Q_{44}^{stff} dz - 3\lambda \int_{\Omega} Q_{44}^{stff} z^2 dz \right), \quad (4.17)$$

$$\bar{H}_{77} = \frac{b_{stff}}{d_{stff}} \left(\int_{\Omega} Q_{44}^{stff} z^2 dz - 3\lambda \int_{\Omega} Q_{44}^{stff} z^4 dz \right),$$

với Ω là miền tích phân theo chiều cao của các sừn.

Hệ phương trình cân bằng của tấm FG-CNTRC có sừn không hoàn hảo theo HSDT được viết như sau [102]

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} = 0, \\
& \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} - 3\lambda \left(\frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} \right) + \lambda \left(\frac{\partial^2 T_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 T_{xy}}{\partial x \partial y} T_{xy,xy} + \frac{\partial^2 T_y}{\partial y^2} \right) \\
& + N_x \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} \right) + 2N_{xy} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x \partial y} \right) + N_y \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} \right) \\
& + q - K_1 w + K_2 \nabla^2 w - K_3 w^3 = 0, \\
& \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} + 3\lambda S_x - \lambda \left(\frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} \right) - Q_x = 0, \\
& \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} + 3\lambda S_y - \lambda \left(\frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} \right) - Q_y = 0,
\end{aligned} \tag{4.18}$$

4.3. Điều kiện biên và phương pháp giải

Ba điều kiện biên được xem xét như sau:

- Các tấm FG-CNTRC có sườn có bốn cạnh gôi di động (FFFF)
- Các tấm FG-CNTRC được có sườn với hai cạnh $x=0, x=a$ là gôi di động và hai cạnh còn lại $y=0, y=b$ là gôi cố định (FIFI)
- Các tấm FG-CNTRC có sườn có bốn cạnh gôi cố định (IIII) được xem xét:

Dạng nghiệm của độ võng, độ không hoàn hảo và góc xoay của phương trình (4.24-4.26) được chọn ở dạng gần đúng như sau [2, 7, 8, 102]

$$\begin{aligned}
w &= W \sin \alpha x \sin \beta y, \quad \bar{w} = \xi h \sin \alpha x \sin \beta y, \\
\phi_x &= \Phi_x \cos \alpha x \sin \beta y, \quad \phi_y = \Phi_y \sin \alpha x \cos \beta y,
\end{aligned} \tag{4.27}$$

Bằng cách thế dạng nghiệm (4.27) vào phương trình (4.23), sau một số phép toán, hàm ứng suất có thể nhận được là

$$f = f_1 \cos 2\alpha x + f_2 \cos 2\beta y + f_3 \sin \alpha x \sin \beta y + \frac{1}{2} N_{x0} y^2 + \frac{1}{2} N_{y0} x^2, \tag{4.28}$$

Thế các hệ thức (4.27) và (4.28) vào các phương trình (4.24-4.26), và áp dụng phương pháp Galerkin, ta được các phương trình cân bằng dưới dạng phương trình đại số phi tuyến như sau

$$\begin{aligned}
& y_2 q + (y_1 N_{x_0} + y_3 N_{y_0})(h\xi + W) + y_6 \Phi_y + y_5 \Phi_x \\
& + y_4 (X_1 \Phi_x + X_2 \Phi_y)(h\xi + W) + y_7 (2h\xi + W)W(h\xi + W) \\
& + y_8 (2h\xi + W)W + y_4 X_3 W(h\xi + W) + y_9 W + y_{10} W^3 = 0, \quad (4.29) \\
& z_1 (2h\xi + W)W + z_2 W + z_3 \Phi_x + z_4 \Phi_y = 0, \\
& z_5 (2h\xi + W)W + z_6 W + z_7 \Phi_x + z_8 \Phi_y = 0,
\end{aligned}$$

4.4. Phân tích mất ổn định phi tuyến

Bằng cách rút Φ_x và Φ_y từ hai phương trình sau của (4.29), và thay vào phương trình đầu của (4.29), liên hệ tải trọng và độ võng thu được

$$\begin{aligned}
& y_{10} \left(\frac{W}{h} \right)^3 h^2 + \left(\xi + \frac{W}{h} \right) (N_{x_0} y_1 + N_{y_0} y_3) + u_8 \frac{W}{h} + \frac{y_2 q}{h} \\
& + u_5 \frac{W}{h} \left(\xi + \frac{W}{h} \right) h + u_6 h^2 \left(2\xi + \frac{W}{h} \right) \frac{W}{h} \left(\xi + \frac{W}{h} \right) + u_7 h \left(2\xi + \frac{W}{h} \right) \frac{W}{h} = 0, \quad (4.30)
\end{aligned}$$

Với các cạnh cố định, $u = 0$ ở hai cạnh $x = 0, x = a$ và $v = 0$ ở hai cạnh $y = 0, y = b$. Điều kiện cố định theo nghĩa trung bình, được viết như sau [2, 7, 8, 102]

$$\int_0^a \int_0^b \frac{\partial u}{\partial x} dx dy = 0, \quad (4.31)$$

$$\int_0^a \int_0^b \frac{\partial v}{\partial y} dy dx = 0. \quad (4.32)$$

Các biểu thức của N_{x_0}, N_{y_0} có thể được xác định từ các phương trình (4.31) và (4.32), bằng cách sử dụng các biểu thức (4.2), (4.7), (4.22) và (4.27), nhận được

$$N_{x_0} = p_1 \Phi_x + p_2 \Phi_y + p_3 W(2h\xi + W) + p_4 W - \phi_{1x}, \quad (4.33)$$

$$N_{y_0} = p_5 \Phi_x + p_6 \Phi_y + p_7 W(2h\xi + W) + p_8 W - \phi_{1y}, \quad (4.34)$$

4.4.1. Phân tích ổn định tâm FG-CNTRC có sườn FG-CNTRC chỉ chịu tác dụng của tải áp lực ngoài

Thế các phương trình (4.33) và (4.34) vào phương trình (4.30), cho $P_x = 0$, để nhận được liên hệ giữa q và W như sau

$$\begin{aligned}
q = & q_1 \frac{W}{h} \left(2\xi + \frac{W}{h} \right) \left(\xi + \frac{W}{h} \right) + q_2 \frac{W}{h} \left(2\xi + \frac{W}{h} \right) + q_3 \left(\xi + \frac{W}{h} \right) \frac{W}{h} \\
& + q_4 \left(\frac{W}{h} \right)^3 + q_5 \frac{W}{h} + h \left(\beta_1 \frac{a_1 \varphi_{1x}}{a_2} + \beta_2 \frac{a_3 \varphi_{1y}}{a_2} \right) \left(\xi + \frac{W}{h} \right),
\end{aligned} \tag{4.35}$$

4.4.2. Phân tích ổn định tấm FG-CNTRC có sườn FG-CNTRC chịu tải áp lực ngoài và tải nén cạnh

Trong trường hợp $q = 0$, bốn cạnh là gối di động, hệ số $\beta_2 = 0$ được áp dụng. Tải trọng nén dọc trục P_x được xác định từ phương trình (4.37)

$$P_x = \frac{1}{\left(\frac{W}{h} + \xi \right) (hy_1)} \begin{bmatrix} y_{10} \left(\frac{W}{h} \right)^3 h^2 + \frac{W}{h} \left(\frac{W}{h} + 2\xi \right) \left(\frac{W}{h} + \xi \right) e_5 \\ + e_6 \left(\frac{W}{h} + 2\xi \right) \frac{W}{h} + e_8 \frac{W}{h} \left(\frac{W}{h} + \xi \right) + e_7 \frac{W}{h} \end{bmatrix}. \tag{4.38}$$

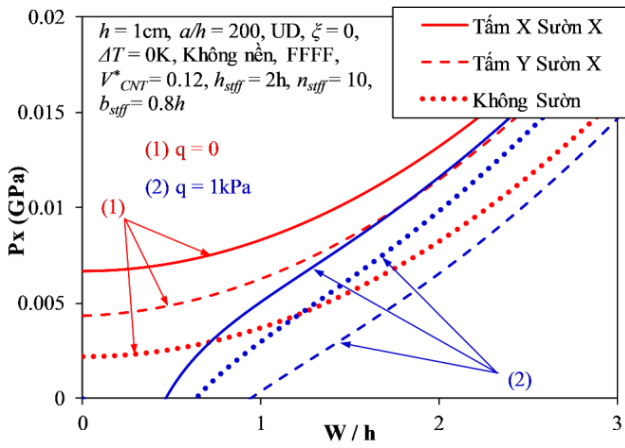
Xét điều kiện biên thứ hai, tấm có hai cạnh $x = 0, a$ là gối di động, hai cạnh $y = 0, b$ là gối cố định, $\beta_2 = 1$ được sử dụng, nhận được

$$\begin{aligned}
& y_{10} \left(\frac{W}{h} \right)^3 h^2 + \frac{y_2 q}{h} + \left(2\xi + \frac{W}{h} \right) \frac{W}{h} \left(\xi + \frac{W}{h} \right) e_5 \\
& + e_6 \left(2\xi + \frac{W}{h} \right) \frac{W}{h} + e_8 \frac{W}{h} \left(\xi + \frac{W}{h} \right) + e_7 \frac{W}{h} \\
& + e_4 \left(\xi + \frac{W}{h} \right) y_3 \varphi_{1x} - \left(\xi + \frac{W}{h} \right) y_3 \varphi_{1y} + \left(\xi + \frac{W}{h} \right) (y_3 z_1 - hy_1) P_x = 0.
\end{aligned} \tag{4.40}$$

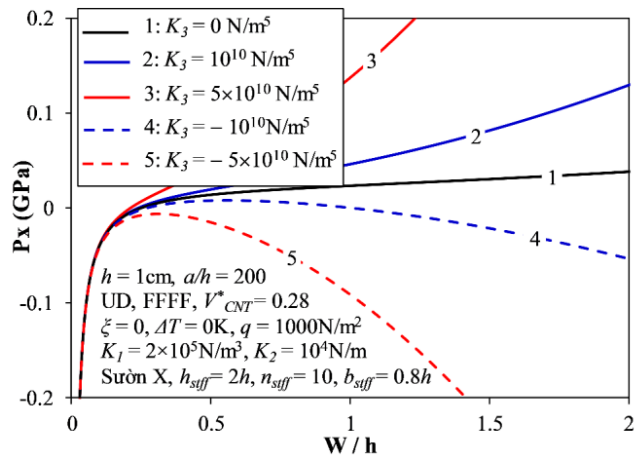
4.6. Ứng dụng kết quả tính toán lý thuyết vào phân tích ổn định kết cấu bản trục hướng dạng tấm FG-CNTRC có sườn FG-CNTRC

Bảng 4.2. Ảnh hưởng của hướng CNT, sườn và nhiệt độ môi trường đến tải nén dọc trục tới hạn P_x^{cr} của tấm FG-CNTRC hoàn hảo (MPa, không nền đàn hồi, FFFF, UD)

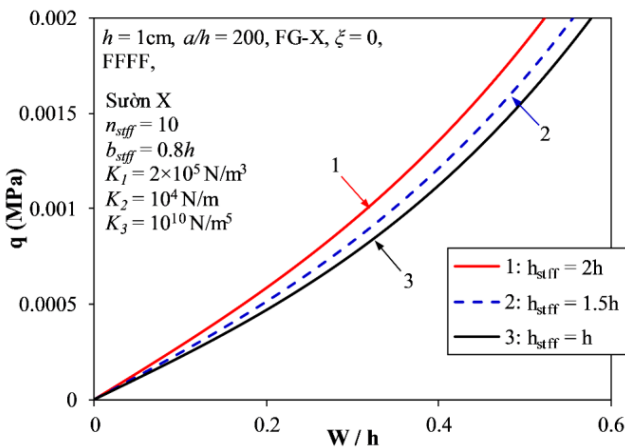
$\Delta T(K)$	Tấm X và Y không sườn	Tấm X và sườn Y	Tấm X và sườn X	Tấm Y và sườn Y	Tấm Y và sườn X
0	2.182	4.346	6.704	6.704	4.346
100	2.119	4.127	6.568	6.568	4.127
200	2.066	3.910	6.464	6.464	3.910



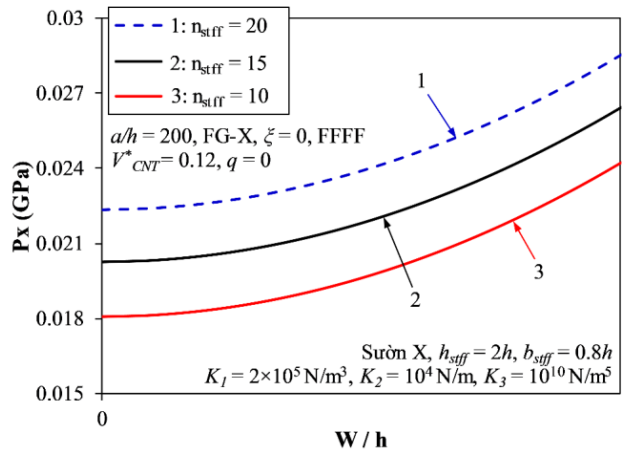
Hình 4.3. Ảnh hưởng của hướng của sườn đến ứng xử sau mất ổn định $P_x - W/h$ của tấm FG-CNTRC



Hình 4.14. Ảnh hưởng của độ cứng nền phi tuyến đến đường cong sau mất ổn định $P_x - W/h$ của tấm có sườn



Hình 4.15. Ảnh hưởng của chiều cao sườn đến đường cong sau mất ổn định $q - W/h$ của tấm



Hình 4.18. Ảnh hưởng của số lượng sườn đến đường cong sau mất ổn định $P_x - W/h$ của tấm

4.7. Kết luận chương 4

Kết quả số đã chỉ ra một số điểm đáng chú ý như sau:

1. Các sườn FG-CNTRC làm tăng đáng kể tải nén dọc trục tới hạn và khả năng chịu tải sau mất ổn định của tấm.
2. Ảnh hưởng của sườn tăng cứng FG-CNTRC lên tải nén dọc trục tới hạn của tấm FG-V là lớn nhất
3. Độ cứng nền phi tuyến không ảnh hưởng đến giá trị tải nén dọc trục tới hạn của các tấm hoàn hảo
4. Các thông số hình học và nhiệt độ môi trường ảnh hưởng đáng kể đến tải nén dọc trục tới hạn và đường cong sau mất ổn định của tấm.

KẾT LUẬN

Luận án đã thu được một số kết quả mới sau đây:

1. Đã đề xuất phương án tăng cứng cho vỏ trụ và tấm FG-CNTRC bằng các hệ sườn FG-CNTRC, đề xuất các quy luật phân bố CNT cho sườn phù hợp với tấm và vỏ trụ FG-CNTRC. Đã phát triển các kỹ thuật san tác dụng sườn cải tiến dành cho hệ sườn FG-CNTRC. Đã đề xuất phương án tăng cứng cho kết cấu vỏ trụ FG-CNTRC có lõi Auxetic và các hàm quy luật phân bố CNT cho các lớp mặt.

2. Các phương trình chủ đạo của bài toán ổn định phi tuyến của kết cấu vỏ trụ FG-CNTRC có sườn FG-CNTRC và có lõi Auxetic trong môi trường nhiệt đã được thiết lập. Lựa chọn dạng nghiệm ba số hạng để mô phỏng ứng xử ổn định và sau mất ổn định của hai bài toán vỏ trụ chịu áp lực ngoài và nén dọc trục, và vỏ trụ chịu tải xoắn

3. Đã thiết lập các phương trình chủ đạo của bài toán ổn định phi tuyến của tấm FG-CNTRC có sườn FG-CNTRC trên nền đàn hồi phi tuyến. Lựa chọn dạng nghiệm và áp dụng phương pháp Galerkin để nhận được các biểu thức ứng xử ổn định của tấm.

4. Đã ứng dụng các kết quả lý thuyết vào phân tích một cách chi tiết các ảnh hưởng của thông số hình học, vật liệu... tới ứng xử ổn định và sau mất ổn định. Các kết quả có tiềm năng sử dụng trong thực tế thiết kế kỹ thuật công trình và làm cơ sở để xây dựng các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu công trình dạng tấm và vỏ trụ FG-CNTRC trong tương lai.

KIẾN NGHỊ VỀ NHỮNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

1. Ổn định và động lực của tấm và vỏ FG-CNTRC có sườn tăng cứng FG-CNTRC hoặc có lõi Auxetic chịu các tải nhiệt và cơ - nhiệt kết hợp.

2. Nghiên cứu phi tuyến ổn định và động lực của các kết cấu FG-CNTRC có sườn tăng cứng FG-CNTRC xiên bằng FSDT và HSDT.

3. Ổn định và động lực của vỏ nón, nón cụt, vỏ cầu nhẵn, panel nón, panel cầu nhẵn, vỏ tròn xoay FG-CNTRC ... có xét đến các biện pháp tăng cứng.

4. Ổn định và động lực các loại vỏ có hình dạng phức tạp, điều kiện biên rời rạc... làm bằng FG-CNTRC có xét tới các biện pháp tăng cứng.

5. Nghiên cứu xây dựng các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu dạng tấm vỏ FG-CNTRC cho các công trình xây dựng.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

Luận án đã công bố 05 bài báo trên các tạp chí quốc tế ISI (SCIE):

1. Dang Thuy Dong, Pham Thanh Hieu, Vu Minh Duc, Nguyen Thi Phuong, **Nguyen Van Tien**, Vu Hoai Nam. Nonlinear Buckling Analysis of Stiffened Carbon Nanotube-Reinforced Cylindrical Shells Subjected to External Pressure in Thermal Environment. *Mechanics of Composite Materials* 59, pp. 779–794 (2023).
2. Dang Thuy Dong, Vu Hoai Nam, Nguyen Thi Phuong, Le Ngoc Ly, Vu Minh Duc, **Nguyen Van Tien**, Tran Quang Minh, Vu Tho Hung, Pham Hong Quan. An analytical approach of nonlinear buckling behavior of longitudinally compressed carbon nanotube-reinforced (CNTR) cylindrical shells with CNTR stiffeners in thermal environment. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 102, p. e202100228 (2022).
3. **Nguyen Van Tien**, Nguyen Thi Phuong, Vu Minh Duc, Tran Quang Minh, Dang Thuy Dong, Pham Hong Quan, Vu Hoai Nam, Le Ngoc Ly. Nonlinear Thermo-Mechanical Buckling of Torsion-Loaded Cylindrical Shells with Eccentric Stiffeners Made from CNT-Reinforced Composite. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering* 46, pp. 1107–1119 (2022).
4. Dang Thuy Dong, Nguyen Thi Phuong, Vu Hoai Nam, **Nguyen Van Tien**, Le Ngoc Ly, Vu Minh Duc, Tran Quang Minh, Vu Tho Hung, Nguyen Thi Huong Giang. An Analytical Approach for Nonlinear Buckling Analysis of Torsionally Loaded Sandwich Carbon Nanotube Reinforced Cylindrical Shells with Auxetic Core. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics* 15 (2023), pp. 468-484.
5. Tran Quang Minh, Dang Thuy Dong, Vu Tho Hung, Cao Van Doan, **Nguyen Van Tien**, Pham Thanh Hieu. Geometrically Nonlinear Buckling of FG-CNTRC Plates Stiffened by FG-CNTRC Stiffeners Subjected to Combined Loads Using Nonlinear Reddy's HSDT. *International Journal of Structural Stability and Dynamics* (2023). DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219455424501335>