

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ XÂY DỰNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ GIAO THÔNG VẬN TẢI

ĐỖ THỊ KIỀU MY

**ỒN ĐỊNH PHI TUYẾN CẦU KIẾN CỦA KẾT CẤU
CÔNG TRÌNH DẠNG TẤM VÀ VỎ
NANOCOMPOSITE SANDWICH LỖI GẤP NẾP**

Ngành: Kỹ thuật xây dựng công trình đặc biệt

Mã số: 9580206

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI – 2025

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. PGS. TS. Đặng Thùy Đông

Phản biện:

Phản biện:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng cấp Trường chấm luận án tiến sĩ
hợp tại Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
vào hồi ... giờ ... ngày ... tháng ... năm ...

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

Nghiên cứu dao động và ổn định phi tuyến giữ vai trò thiết yếu trong cơ học kết cấu hiện đại, đặc biệt với tấm và vỏ composite tiên tiến có khả năng chịu biến dạng lớn. Kết cấu nanocomposite sandwich cơ tính biến thiên, gồm hai lớp mặt bền và lõi nhẹ, có ưu điểm nhẹ, bền, cách âm, cách nhiệt, chống va đập, nên được ứng dụng rộng rãi trong giao thông, hàng không, xây dựng và có tiềm năng thay thế vật liệu truyền thống. Các nghiên cứu gần đây nhấn mạnh việc kết hợp mô hình phi tuyến hình học với lý thuyết tấm vỏ và các phương pháp FEM, Ritz, biến phân, đồng thời xét đến nhiệt độ và tải trọng để phản ánh đúng điều kiện thực tế. Phân tích ổn định cục bộ, tổng thể và dao động là cần thiết cho thiết kế an toàn, mở rộng quy mô ứng dụng, đồng thời góp phần xây dựng cơ sở khoa học cho tiêu chuẩn kỹ thuật mới trong xây dựng, quốc phòng, công trình biển và năng lượng tái tạo. Trên cơ sở những phân tích ở trên, đề tài luận án được lựa chọn để nghiên cứu là “*Ổn định phi tuyến cấu kiện của kết cấu công trình dạng tấm và vỏ nanocomposite sandwich lõi gấp nếp*”.

Mục tiêu nghiên cứu của luận án

1. Cải tiến kỹ thuật đồng nhất hóa cho lõi gấp nếp đẳng hướng và lõi nhiều lớp gấp nếp FG-CNTRC, xét đến biến dạng nhiệt.
2. Xây dựng lời giải giải tích cho bài toán ổn định phi tuyến cho vỏ trụ, vỏ trống FG-CNTRC, FG-GRC lõi gấp nếp hình thang, lượn sóng chịu tải trong môi trường nhiệt.
3. Xây dựng lời giải giải tích cho bài toán ổn định phi tuyến cho tấm chữ nhật, panel trụ FG-CNTRC sandwich lõi nhiều lớp trên nền đàn hồi phi tuyến chịu tải cơ trong môi trường nhiệt.
4. Khảo sát số các ảnh hưởng của tham số vật liệu, hình học đến ứng xử ổn định, rút ra kết luận cho thiết kế và tiêu chuẩn.

Đối tượng, phạm vi nghiên cứu của luận án

Đối tượng nghiên cứu: Các kết cấu dạng tấm chữ nhật, panel trụ, vỏ trụ tròn, vỏ trống FG-CNTRC sandwich, FG-GRC sandwich có lõi gấp nếp hoặc gấp nếp nhiều lớp.

Phạm vi nghiên cứu: Các bài toán ổn định tĩnh phi tuyến.

Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu lý thuyết dựa trên tiếp cận giải tích

Bố cục của luận án

Gồm mở đầu, 4 chương, kết luận, danh mục công trình khoa học của tác giả và tài liệu tham khảo.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Giới thiệu về kết cấu sandwich

Kết cấu sandwich nhẹ nhưng chịu lực cao, phù hợp điều kiện tải khắc nghiệt, khẩu độ lớn, thuận lợi vận chuyển, thi công và giảm chi phí nền móng. Cấu tạo gồm ba lớp: hai lớp mặt bên, cứng chịu tải trọng và một lõi nhẹ tăng độ cứng tổng thể.

1.2. Các loại vật liệu cơ tính biến thiên

1.2.2. Vật liệu composite cơ tính biến thiên gia cường carbon nanotube

CNTs với tính chất cơ, nhiệt, điện vượt trội được xem là vật liệu gia cường ưu tiên cho nền polymer. Shen [110] phát triển composite mới – FG-CNTRC, trong đó CNTs sắp xếp song song theo một phương, tỷ phần thể tích thay đổi theo chiều dày theo quy luật tuyến tính để tối ưu ứng xử cơ học. Các mô đun đàn hồi của FG-CNTRC được xác định từ mô đun đàn hồi và tỷ phần thể tích của nền và CNT, theo quy tắc hỗn hợp mở rộng hiệu chỉnh bằng mô phỏng động lực phân tử (MD).

1.2.3. Vật liệu composite cơ tính biến thiên gia cường graphene

Năm 2004 graphene được tách thành công, năm 2010 Novoselov và Geim nhận Nobel Vật lý. Graphene là vật liệu mỏng nhất, nhẹ, gần như trong suốt, bền gấp 100 lần thép, dẫn nhiệt gấp 10 lần đồng, dẫn điện tốt, được xem là vật liệu tiềm năng gia cường composite, đặc biệt khi phân bố FG giúp tăng mô đun đàn hồi và độ cứng. FG-GRC được tạo từ sắp xếp graphene trong nền polymer theo các hướng như zigzag hoặc armchair. Tính chất FG-GRC phụ thuộc nhiệt độ: nhiệt độ tăng làm hệ số dẫn nhiệt, giãn nở tăng, mô đun đàn hồi giảm, các đặc tính cơ – nhiệt – điện suy giảm; mô đun cơ học của GRC có thể tính bằng mô hình Halpin-Tsai cải tiến.

1.2.4. Tiềm năng ứng dụng vật liệu nanocomposite và kết cấu tấm vỏ nanocomposite trong xây dựng công trình

Vật liệu nanocomposite được nghiên cứu, sử dụng trong xây dựng nhờ tiềm năng ứng dụng thực tế, mang lại cơ hội lớn cho xây dựng bền vững và công trình xanh. Nanocomposite được dùng để sản xuất bê tông, xi măng có độ bền

cao, giảm chi phí bảo trì, tăng an toàn và tuổi thọ công trình. Tấm sàn, trần nanocomposite có trọng lượng nhẹ, bền, giảm khối lượng công trình, chi phí vận chuyển, lắp đặt, chống mài mòn, ăn mòn và chịu được thời tiết khắc nghiệt. CNT cải thiện tính cơ học của bê tông và thép, tăng độ cứng, chống nứt, chịu kéo; ứng dụng cho cầu, tòa nhà, cơ sở hạ tầng; dùng cho sơn tự làm sạch, màng phim nano, cảm biến giám sát công trình. Graphene tăng cường độ bền kéo, giảm trọng lượng, chống ăn mòn; ứng dụng trong bê tông, thép, nhựa đường; tạo bê tông tự phục hồi, composite nhẹ và cứng. Vật liệu nanocomposite đã được đưa vào sản xuất công nghiệp với giá thành giảm, chất lượng cao, ngày càng phổ biến trong thiết kế và thi công xây dựng, trở thành lựa chọn hàng đầu, góp phần phát triển bền vững.

1.3. Các nghiên cứu về ứng xử cơ học của kết cấu tấm vỏ cơ tính biến thiên và cơ tính biến thiên sandwich

1.3.2. Kết cấu tấm vỏ FG-CNTRC và FG-CNTRC sandwich

Nhiều nghiên cứu đã tập trung vào ứng xử phi tuyến, ổn định và dao động của tấm, panel, vỏ FG-CNTRC và FG-CNTRC sandwich trong môi trường nhiệt, cơ – nhiệt và trên nền đàn hồi. Shen và cộng sự đã nghiên cứu ổn định nhiệt [112, 113], panel trụ chịu nén [119], uốn phi tuyến [120], cơ – nhiệt kết hợp [122], sau mất ổn định với áp lực hướng tâm [121, 123], dao động [125], dao động biên độ lớn [155]. Liew và cộng sự nghiên cứu ổn định panel trụ chịu nén [70]. Các công trình khác: ổn định nhiệt – đàn hồi của panel trụ có biên đàn hồi [147, 149], snap-buckling cơ – nhiệt [9], panel trụ cong chịu cắt – nén [74]. Về dao động, Mirzaei và Kiani [77, 76], Mohammadimehr [81], Di Sciuva [19], Lei [62], Kiani [54], Foroutan [31, 32], Bhagat [13] đã có nhiều khảo sát. Các nghiên cứu về ổn định phi tuyến gồm vỏ trụ, vỏ trống chịu tải cơ – nhiệt bằng Galerkin [40, 41], áp lực hướng tâm [41, 43], độ võng lớn [35], chịu xoắn [85], gân gia cường [21, 145], sau mất ổn định nhiệt – xoắn [148], lõi auxetic [22, 146, 73]. Đáp ứng động với đàn nhót, nhiệt ẩm cũng được nghiên cứu [36, 44, 130, 14, 140, 55, 38].

1.3.3. Kết cấu tấm vỏ FG-GRC và FG-GRC sandwich

Nghiên cứu về FG-GRC và FG-GRC sandwich tập trung vào ổn định và dao động. Mất ổn định của vỏ trụ FG-GRC chịu nén, áp lực được khảo

sát bằng HSDT [124, 126–128]; sau mất ổn định của tấm và panel nhiều lớp trong môi trường nhiệt được phân tích bởi Yu [160], Shen [129] và Vũ Hoài Nam [87]. Về dao động, Fan nghiên cứu va chạm chậm [30], Wang và Shen khảo sát dao động phi tuyến nhiệt [156], phương pháp B-spline áp dụng cho ổn định nhiệt và dao động tự do [56, 57, 78], Zeverdejani nghiên cứu tấm có khuyết tật [163], các công trình khác tập trung vào panel xếp [164, 89], vỏ trống [99], vỏ trụ có gân [86, 98, 100] hoặc lõi auxetic [101, 102], cũng như va chạm tốc độ thấp [63, 64].

1.3.4. Kết cấu gấp nếp và sandwich lõi gấp nếp

Kết cấu sandwich lõi gấp nếp có đặc tính dị hướng, nhẹ nhưng bền, được ứng dụng trong hàng không, giao thông và xây dựng. Nhiều nghiên cứu đã phân tích ổn định và dao động: Vũ Thọ Hưng [47, 48] nghiên cứu mất ổn định phi tuyến vỏ gấp nếp; Liew [68, 94], Xia [159] khảo sát ứng xử phi tuyến; Kumar [60] phân tích vòng lớn, dao động nhiệt – đàn hồi; Pathirana [92, 93] mất ổn định cục bộ; Xia [157, 158] uốn dọc panel; Shi [132] mô phỏng nhiệt; Kavermann [51], Shaban [107], Shu [133] thí nghiệm và phân tích đàn hồi, phá hủy. Dao động và động lực được nghiên cứu bởi Li [65], Zamanifar [161], Liew [69], Mohammadi [80]. Các nhóm Việt Nam như Phạm Thanh Hiếu [39], Đặng Thùy Đông, Vũ Hoài Nam [20, 83], Nguyễn Minh Khoa [52, 53], Nguyễn Thị Phương [95, 96] đã khảo sát ổn định vỏ và panel gấp nếp bằng Galerkin, Donnell.

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

1. Đã có nghiên cứu về ổn định phi tuyến của vỏ trống, vỏ trụ nanocomposite sandwich không lõi, lõi mềm, lõi đặc, lõi auxetic dưới tải cơ, nhiệt, cơ-nhiệt bằng phương pháp số, Galerkin. Chưa có nghiên cứu về ổn định phi tuyến của vỏ trụ, vỏ trống FG-CNTRC, FG-GRC lõi gấp nếp chịu kéo, nén dọc trục, áp lực hướng tâm và xoắn bằng phương pháp Ritz.

2. Đã nghiên cứu ổn định tĩnh, động lực phi tuyến của tấm, panel trụ nanocomposite sandwich không lõi, lõi mềm, lõi đặc, lõi gấp nếp vật liệu đẳng hướng. Chưa có phân tích ổn định phi tuyến của panel trụ và tấm chữ nhật FG-CNTRC lõi gấp nếp nhiều lớp FG-CNTRC.

3. Chưa có kỹ thuật đồng nhất hóa kết cấu gấp nếp xét biến dạng nhiệt và cho gấp nếp nhiều lớp, gây hạn chế khi phân tích kết cấu gấp nếp chịu tải nhiệt hoặc trong môi trường nhiệt.

1.5. Kết luận chương 1 và những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu

1. Phân tích ổn định phi tuyến của vỏ trụ, vỏ trống FG-CNTRC và FG-GRC sandwich lõi gấp nếp chịu kéo, nén dọc trục, áp lực hướng tâm trong điều kiện nhiệt, bằng phương pháp Ritz.

2. Phân tích ổn định phi tuyến của vỏ trụ, vỏ trống FG-CNTRC và FG-GRC sandwich lõi gấp nếp chịu xoắn trong điều kiện nhiệt, bằng phương pháp Ritz.

3. Phân tích ổn định phi tuyến của panel trụ, tấm chữ nhật FG-CNTRC sandwich lõi nhiều lớp gấp nếp FG-CNTRC chịu nén dọc trục, áp lực hướng tâm, bằng phương pháp Ritz và lý thuyết vỏ Donnell, với các điều kiện biên khác nhau.

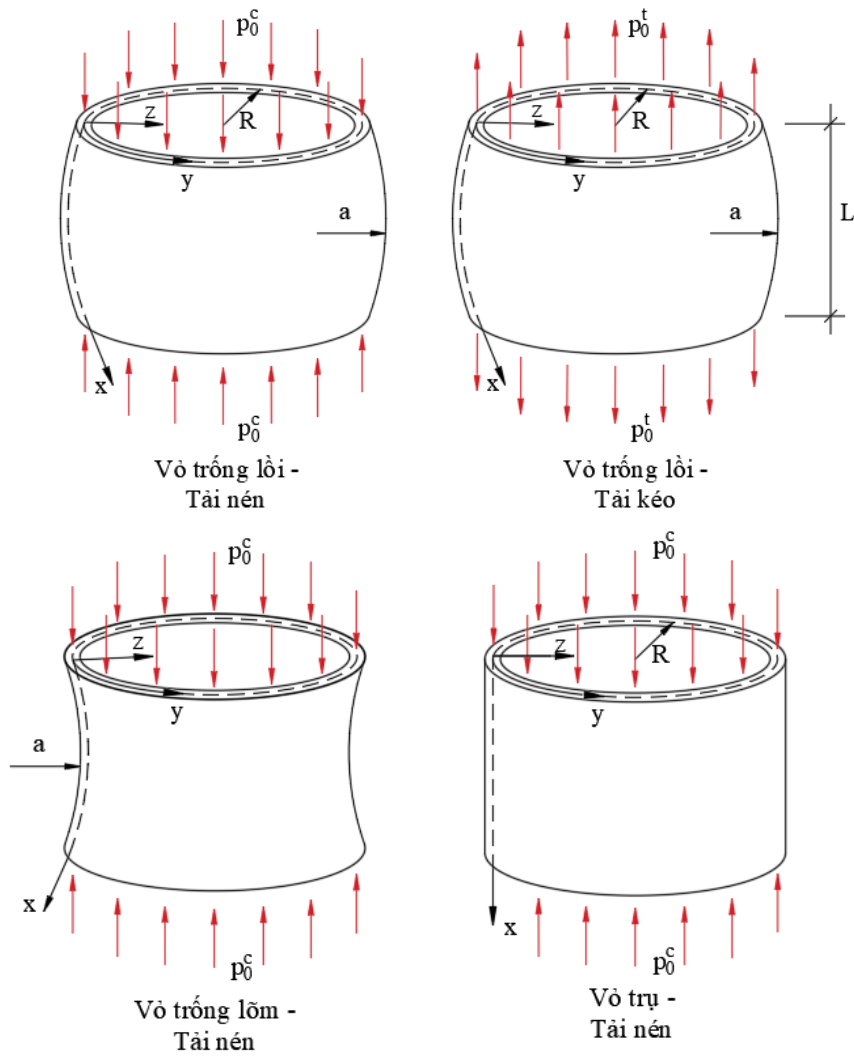
CHƯƠNG 2. ỔN ĐỊNH PHI TUYẾN CỦA VỎ TRỤ VÀ VỎ TRỐNG FG-CNTRC VÀ FG-GRC SANDWICH LỖI GẤP NẾP CHỊU KÉO, NÉN DỌC TRỤC VÀ ÁP LỰC HƯỚNG TÂM

Luận án cải tiến kỹ thuật đồng nhất hóa của Xia và cộng sự [159] bằng cách bổ sung nội lực nhiệt để xét ảnh hưởng nhiệt độ đến kết cấu sandwich lõi gấp nếp. Xây dựng mô hình ổn định phi tuyến cho vỏ trụ, vỏ trống FG-CNTRC và FG-GRC sandwich bằng phương pháp Ritz, lý thuyết Donnell và phi tuyến von Kármán.

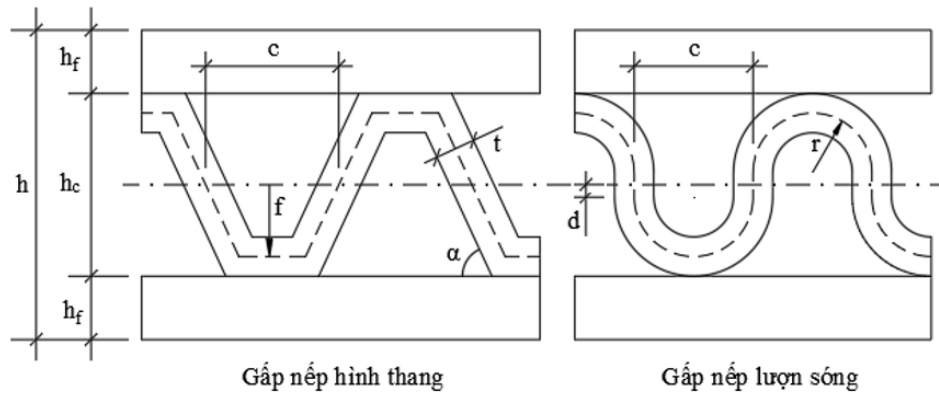
2.1. Mô hình kết cấu và vật liệu

2.1.1. Mô hình kết cấu

Vỏ trụ và vỏ trống có lõi gấp nếp chịu kéo, nén dọc trục phân bố đều p_0 và áp lực hướng tâm q_0 trong môi trường nhiệt T với các thông số đặc trưng cho lõi gấp nếp, vỏ và lớp mặt thể hiện trong Hình 2.1 và 2.2. Giá trị dương của p_0 được áp dụng cho tải nén ($p_c = p_0$) và giá trị âm của p_0 áp dụng cho tải kéo ($p_t = -p_0$).



Hình 2.1. Hệ tọa độ và hình dạng của vỏ trụ và vỏ trống sandwich



Hình 2.2. Các kích thước hình học của lõi gấp nếp hình thang và gấp nếp lượn sóng

Các dạng phân bố CNT được thể hiện trong Hình 2.3. Lớp mặt ngoài có tỷ phần thể tích CNT phân bố theo chiều dày của vỏ $\left(-\frac{h}{2} \leq z \leq -\frac{h_c}{2}\right)$ được xác định theo các biểu thức sau:

- Dạng UD: $V_{CNT} = V_{CNT}^*$, (2.1)

- Dạng FG-X: $V_{CNT} = 2 \left(\frac{h_c + 2z}{h_c - h} \right) V_{CNT}^*$, (2.2)

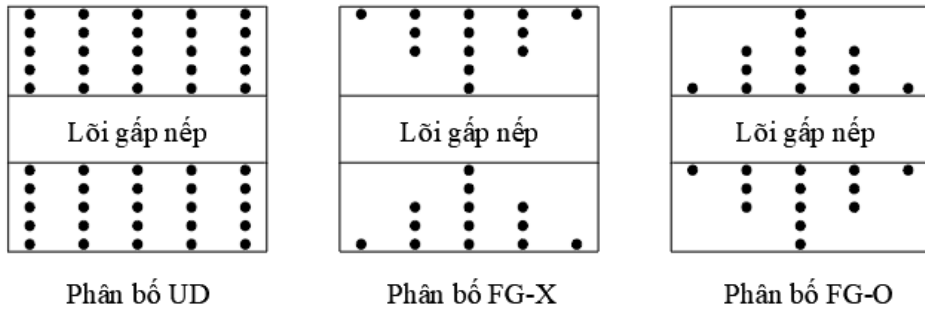
- Dạng FG-O: $V_{CNT} = 2 \left(\frac{h + 2z}{h - h_c} \right) V_{CNT}^*$, (2.3)

Và cho lớp mặt trong $\left(\frac{h_c}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} \right)$:

- Dạng UD: $V_{CNT} = V_{CNT}^*$, (2.4)

- Dạng FG-X: $V_{CNT} = 2 \left(\frac{h_c - 2z}{h_c - h} \right) V_{CNT}^*$, (2.5)

- Dạng FG-O: $V_{CNT} = 2 \left(\frac{h - 2z}{h - h_c} \right) V_{CNT}^*$. (2.6)

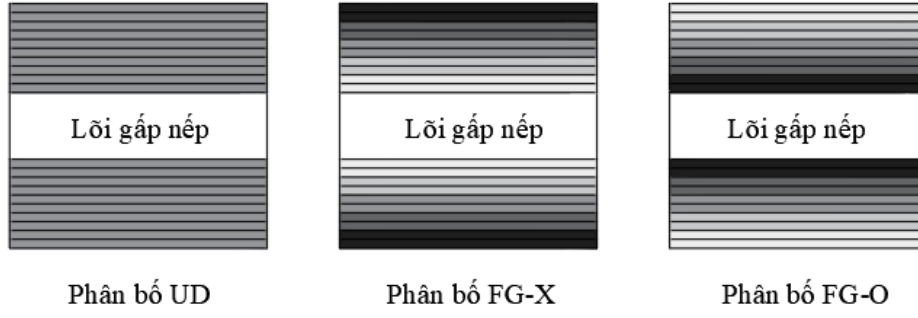


Hình 2.3. Các dạng phân bố CNT trong các lớp mặt của vỏ trụ và vỏ trống FG-CNTRC sandwich lõi gấp nếp

Ba dạng phân bố của graphene được thiết kế như trong Hình 2.4. của lớp mặt được phân bố lần lượt theo từng lớp từ bên ngoài cho đến bên trong như sau

- Dạng UD: năm lớp trên cùng có được phân bố đối xứng với năm lớp bên dưới qua lõi gấp nếp và ở tất cả các lớp là bằng nhau và bằng $[0.07/0.07/0.07/0.07/0.07]$

- Dạng FG-X và FG-O: năm lớp trên cùng có được phân bố đối xứng với năm lớp bên dưới qua lõi gấp nếp lần lượt là $[0.11/0.09/0.07/0.05/0.03]_s$ và $[0.03/0.05/0.07/0.09/0.11]_s$.



Hình 2.4. Các dạng phân bố graphene trong các lớp mặt của vỏ trụ và vỏ trống FG-GRC sandwich lõi gấp nếp

2.2. Các phương trình cơ bản và phương pháp giải

2.2.1. Các công thức và phương trình cơ bản

Các thành phần nội lực và mô men của vỏ trống và vỏ trụ sandwich lõi gấp nếp

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & B_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 & D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ -w_{,xx} \\ -w_{,yy} \\ -2w_{,xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \phi_{1x}^T \\ \phi_{1y}^T \\ 0 \\ \phi_{2x}^T \\ \phi_{2y}^T \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

Độ cứng của lõi gấp nếp thu được bằng cách áp dụng kỹ thuật đồng nhất hóa của Xia và cộng sự [159]

$$A_{11}^c = \frac{2c}{\frac{I_1}{\bar{A}_{11}} + \frac{I_2}{\bar{D}_{11}}}, \quad A_{12}^c = \frac{A_{11}^c \bar{A}_{12}}{\bar{A}_{11}}, \quad A_{66}^c = \frac{c}{l} \bar{A}_{66}, \quad A_{22}^c = \frac{l}{c} \frac{\bar{A}_{11} \bar{A}_{22} - \bar{A}_{12}^2}{\bar{A}_{11}} + \frac{A_{12}^c \bar{A}_{12}}{\bar{A}_{11}},$$

$$D_{11}^c = \frac{c}{l} \bar{D}_{11}, \quad D_{12}^c = \frac{\bar{D}_{12}}{\bar{D}_{11}} D_{11}^c, \quad D_{22}^c = \frac{1}{2c} (I_2 \bar{A}_{22} + I_1 \bar{D}_{22}), \quad D_{66}^c = \frac{l}{c} \bar{D}_{66},$$

Hệ số nhiệt của vỏ trụ và vỏ trống sandwich phụ thuộc vào hệ số nhiệt của lớp mặt và lõi gấp nếp được biểu diễn như sau

$$\phi_{1x}^T = \phi_{1x}^{ou} + \phi_{1x}^c + \phi_{1x}^{in}, \quad \phi_{1y}^T = \phi_{1y}^{ou} + \phi_{1y}^c + \phi_{1y}^{in}, \quad (2.17)$$

Hệ số nhiệt của lõi gấp nếp được thêm vào kỹ thuật đồng nhất hóa của Xia và cộng sự [159]

$$\phi_{1x}^c = \Delta T \alpha_m (A_{11}^c + A_{12}^c), \quad \phi_{1y}^c = \Delta T \alpha_m (A_{12}^c + A_{22}^c). \quad (2.19)$$

Bằng cách vận dụng phương trình (2.8), phương trình tương thích biến dạng cho vỏ trụ và vỏ trống có lõi gấp nếp được thiết lập như sau

$$\varepsilon_{x,yy}^0 + \varepsilon_{y,xx}^0 - \gamma_{xy,xy}^0 + \frac{w_{,xx}}{R} + \frac{w_{,yy}}{a} - w_{,xy}^2 + w_{,xx} w_{,yy} = 0. \quad (2.20)$$

Hàm ứng suất $\psi(x, y)$ được đưa vào thỏa mãn các điều kiện

$$N_x = \psi_{,yy}, \quad N_y = \psi_{,xx}, \quad N_{xy} = -\psi_{,xy}. \quad (2.21)$$

Từ các phương trình (2.8), (2.11) và (2.21), có thể viết lại phương trình tương thích biến dạng (2.20) như sau

$$\begin{aligned} & (A_{11}^* + A_{22}^* + A_{66}^*) \psi_{,xxyy} + A_{12}^* \psi_{,yyyy} + A_{21}^* \psi_{,xxxx} + B_{21}^* w_{,xxxx} \\ & + (B_{11}^* + B_{22}^* - B_{66}^*) w_{,xxyy} + B_{12}^* w_{,yyyy} + \frac{w_{,xx}}{R} + \frac{w_{,yy}}{a} - w_{,xy}^2 + w_{,xx} w_{,yy} = 0, \end{aligned} \quad (2.22)$$

2.2.2. Điều kiện biên và phương pháp năng lượng Ritz

Giả định với hai cạnh tựa đơn. Các điều kiện biên của vỏ được xác định như sau

$$N_x|_{x=0,L} = -p_0 h, \quad N_{xy}|_{x=0,L} = 0, \quad M_x|_{x=0,L} = 0, \quad w|_{x=0,L} = 0. \quad (2.23)$$

Độ võng xấp xỉ thỏa mãn điều kiện biên của vỏ có thể được giả thiết dưới dạng [42, 146]

$$w(x, y) = f_0 + f_1 \sin\left(\frac{m\pi}{L}x\right) \sin\left(\frac{n}{R}y\right) + f_2 \sin^2\left(\frac{m\pi}{L}x\right). \quad (2.24)$$

Khi thay dạng độ võng trong phương trình (2.24) vào phương trình (2.22), ta thu được hàm ứng suất dưới dạng như sau

$$\begin{aligned} \psi = & \psi_1 \cos \frac{2m\pi x}{L} + \psi_2 \cos \frac{2ny}{R} + \psi_3 \sin \frac{m\pi x}{L} \sin \frac{ny}{R} \\ & + \psi_4 \sin \frac{3m\pi x}{L} \sin \frac{ny}{R} - \sigma_{0y} \frac{hx^2}{2} - p_0 \frac{hy^2}{2}, \end{aligned} \quad (2.25)$$

Thế năng biến dạng đàn hồi của vỏ trụ và vỏ trống có lõi gấp nếp là

$$U_{\text{int}} = \frac{1}{2} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_0^{2\pi R L} \int_0^0 \left[\sigma_x (\varepsilon_x - \alpha_1 \Delta T) + \sigma_y (\varepsilon_y - \alpha_2 \Delta T) + \tau_{xy} \gamma_{xy} \right] dx dy dz. \quad (2.28)$$

Công của ngoại lực có xét đến nền đàn hồi được biểu diễn như sau

$$U_{ext} = \int_0^L \int_0^{2\pi R} \left[q_0 w - \frac{K_1}{2} w^2 + \frac{K_2}{2} (w_{,xx} + w_{,yy}) w \right] dx dy - p_0 h \int_0^L \int_0^{2\pi R} \left(\varepsilon_x^0 - \frac{1}{2} w_{,x}^2 + \frac{w}{a} \right) dx dy, \quad (2.29)$$

Từ phương trình (2.26) và (2.27), năng lượng toàn phần thu được là $U = U_{int} - U_{ext}$. Áp dụng phương pháp năng lượng Ritz

$$\frac{\partial U}{\partial f_0} = \frac{\partial U}{\partial f_1} = \frac{\partial U}{\partial f_2} = 0, \quad (2.30)$$

dẫn tới

$$X_{11}f_0 + X_{12}f_1^2 + X_{13}f_2 + X_{14}p_0 + X_{15}J - 2q_0 = 0, \quad (2.31)$$

$$X_{21}f_0 + X_{22}f_1^2 + X_{23}f_2^2 + X_{24}f_2 + X_{25}p_0 + X_{26} + X_{27}J = 0, \quad (2.32)$$

$$X_{31}f_0 + X_{32}f_1^2 + X_{33}f_1^2 f_2 + X_{34}f_2 + X_{35}p_0 f_2 + X_{36}p_0 + X_{37}J - q_0 = 0, \quad (2.33)$$

Trường hợp vỏ chịu tải trọng dọc trục p_0 . Từ phương trình (2.31) và (2.33), thay f_0 và f_2 vào phương trình (2.32), dẫn tới

$$p_0 = -\frac{Z_{11}f_2^3 + Z_{12}f_2^2 + Z_{13}f_2 + Z_{18}}{Z_{14}f_2 + Z_{16}}, \quad (2.35)$$

Bằng cách cho $f_2 \rightarrow 0$ trong phương trình (2.35), ta thu được tải nén, kéo tới hạn của vỏ như sau

$$p_0^{upper} = -\frac{Z_{18}}{Z_{16}}. \quad (2.36)$$

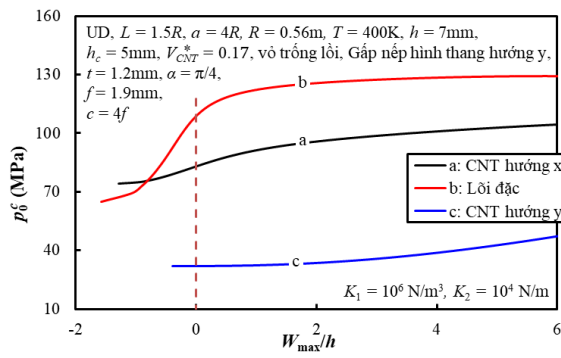
Tương tự, ta có liên hệ đối với trường hợp vỏ chịu áp lực hướng tâm q_0

$$q_0 = -\frac{Z_{11}f_2^3 + Z_{12}f_2^2 + Z_{13}f_2 + Z_{18}}{Z_{15}f_2 + Z_{17}}, \quad (2.37)$$

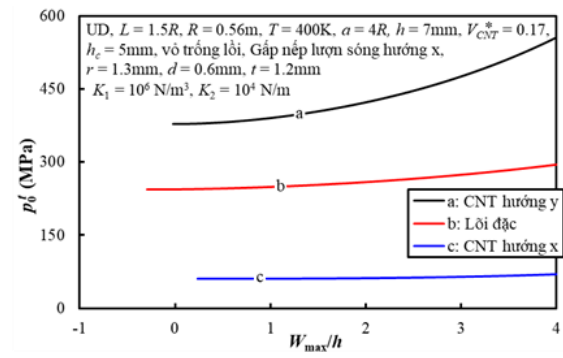
Bằng cách cho $f_2 \rightarrow 0$ trong phương trình (2.37), nhận được tải áp lực hướng tâm tới hạn của vỏ, như sau

$$q_0^{upper} = -\frac{Z_{18}}{Z_{17}}. \quad (2.38)$$

2.3. Kết quả số và thảo luận

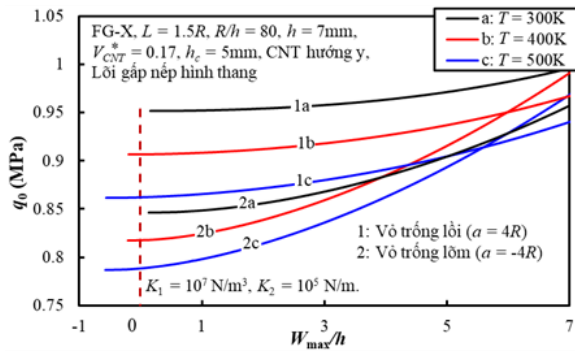


a)

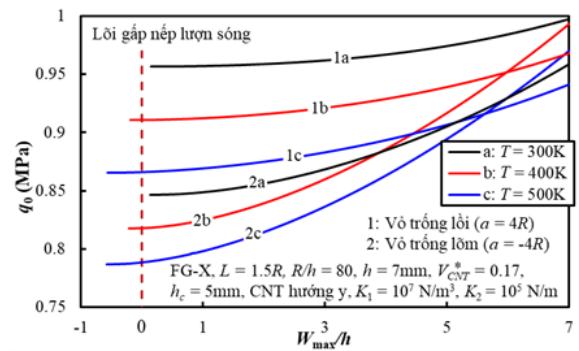


b)

Hình 2.6. Ảnh hưởng của loại lõi đến các đường cong postbuckling của vò trống FG-CNTRC sandwich

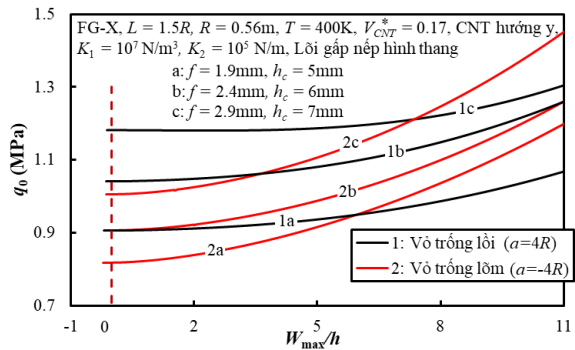


(c)

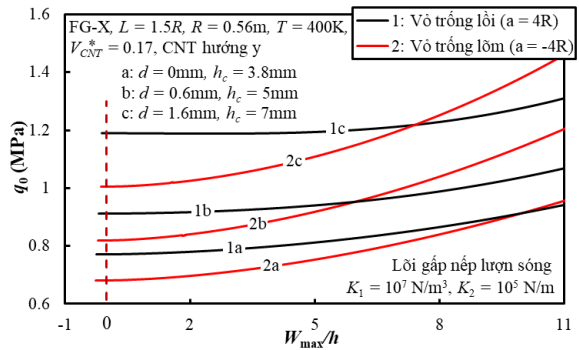


(d)

Hình 2.10. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến các đường cong postbuckling của vò trống FG-CNTRC sandwich

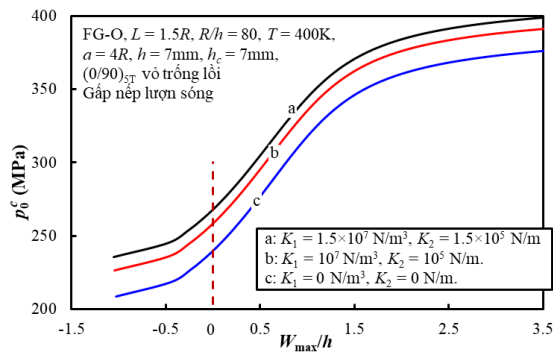


(c)

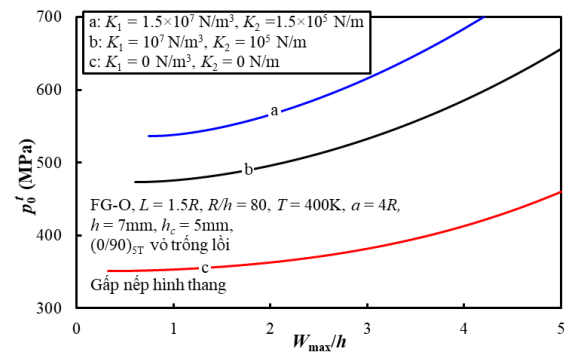


(d)

Hình 2.11. Ảnh hưởng của các thông số hình học của nếp gấp đến các đường cong postbuckling của vò trống



(e)



(f)

Hình 2.14. Ảnh hưởng của các tham số nền đàn hồi đến các đường cong postbuckling của vỏ trống FG-GRC lõi gấp nếp

2.4. Kết luận Chương 2

Từ các ví dụ số, rút ra một số nhận xét đáng chú ý:

1. Vỏ lõi gấp nếp có tải tới hạn và cường độ sau mất ổn định lớn hơn vỏ lõi đặc, nhất là khi chịu kéo dọc trục và áp lực hướng tâm.
2. Với FG-CNTRC, phân bố FG-X vượt trội hơn UD, FG-O ở vỏ lõi đặc, nhưng khác biệt ít ở vỏ lõi gấp nếp; với FG-GRC, UD luôn lớn nhất.
3. Vỏ trống lõi gấp nếp cải thiện tải tới hạn rõ rệt, nhất là khi chịu kéo; vỏ lõi có tải nén tới hạn lớn hơn nhiều so với vỏ lõm.
4. Nhiệt độ, độ dày lõi, phân bố vật liệu, độ cứng nền ảnh hưởng mạnh; lõi gấp nếp tăng khoảng cách lệch tâm, nâng cao độ cứng tổng thể.

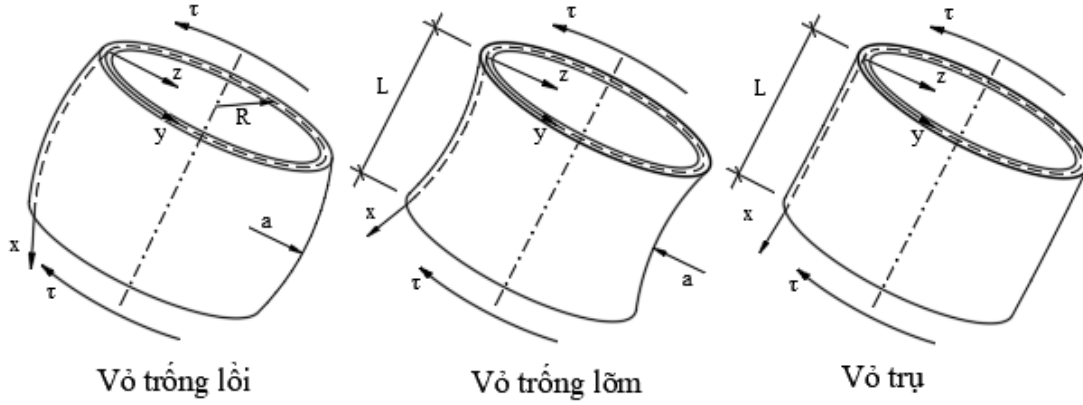
CHƯƠNG 3. ỔN ĐỊNH PHI TUYẾN CỦA VỎ TRỤ VÀ VỎ TRỐNG FG-CNTRC VÀ FG-GRC SANDWICH LỖI GẤP NẾP CHỊU XOẮN

Chương này tiếp tục sử dụng kỹ thuật đồng nhất hóa cải tiến cho lõi gấp nếp như trong Chương 2. Các phương trình chủ đạo của kết cấu được thiết lập dựa trên lý thuyết vỏ Donnell và tính phi tuyến hình học Von Kármán. Phương pháp năng lượng Ritz được sử dụng để thu được nghiệm giải tích cho cả tải tới hạn mất ổn định và ứng xử sau mất ổn định dưới tác động của tải xoắn.

3.1. Mô hình kết cấu và vật liệu

Trong chương này, mô hình vỏ trụ và vỏ trống FG-CNTRC và FG-GRC sandwich lõi gấp nếp chịu xoắn τ có xét đến ảnh hưởng nhiệt độ môi trường T và được đặt trên nền đàn hồi được minh họa trong Hình 3.1. Mô hình vật liệu trong chương này cũng xét đến các đặc trưng hình học của

lõi gấp nếp, của vỏ và lớp mặt, cũng như các dạng phân bố của graphene và CNT, tương tự giống Chương 2.



Hình 3.1. Hệ tọa độ và hình dạng của vỏ trụ và vỏ trống chịu tải xoắn

3.2. Các phương trình cơ bản và phương pháp giải

3.2.1. Các phương trình cơ bản

Các thành phần ma trận độ cứng và nội lực nhiệt được trình bày như trong các phương trình (2.10) - (2.17). Hàm ứng suất $\psi(x, y)$ và phương trình tương thích biến dạng cũng được trình bày như các phương trình (2.18) - (2.20).

3.2.2. Điều kiện biên và phương pháp năng lượng Ritz

Các điều kiện biên của vỏ có thể xác định như sau

$$N_x|_{x=0,L} = 0, N_{xy}|_{x=0,L} = \tau h, M_x|_{x=0,L} = 0, w|_{x=0,L} = 0. \quad (3.1)$$

Độ võng gần đúng của vỏ được chọn dưới dạng [46]

$$w(x, y) = f_0 + f_1 \sin\left(\frac{m\pi}{L}x\right) \sin\left[\frac{n}{R}(y - \lambda x)\right] + f_2 \sin^2\left(\frac{m\pi}{L}x\right). \quad (3.2)$$

Thay thế dạng độ võng ở phương trình (3.2) vào phương trình tương thích biến dạng (2.22) để thu được hàm ứng suất dưới dạng sau

$$\begin{aligned} \psi = & \psi_1 \cos(2\alpha x) + \psi_2 \cos[(y - \lambda x)2\beta] + \psi_3 \cos\left\{\left[x\left(\frac{\alpha}{\beta} - \lambda\right) + y\right]\beta\right\} \\ & + \psi_4 \cos\left\{\left[-x\left(\frac{\alpha}{\beta} + \lambda\right) + y\right]\beta\right\} + \psi_5 \cos\left\{\left[-x\left(\frac{3\alpha}{\beta} + \lambda\right) + y\right]\beta\right\} \\ & + \psi_6 \cos\left\{\left[x\left(\frac{3\alpha}{\beta} - \lambda\right) + y\right]\beta\right\} + \sigma_{0y} \frac{hx^2}{2} - \tau hxy, \end{aligned} \quad (3.3)$$

Thế năng biến dạng đàn hồi của vỏ trụ và vỏ trống có lõi gấp nếp được xác định là

$$U_{\text{int}} = \frac{1}{2} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_0^{2\pi R} \int_0^L \left[\sigma_x (\varepsilon_x - \alpha_1 \Delta T) + \sigma_y (\varepsilon_y - \alpha_2 \Delta T) + \tau_{xy} \gamma_{xy} \right] dx dy dz. \quad (3.6)$$

Công do tải trọng xoắn và sự tương tác giữa vỏ - nền được biểu diễn dưới dạng

$$U_{\text{ext}} = \int_0^L \int_0^{2\pi R} \tau h (u_{,y} + v_{,x}) dx dy + \int_0^L \int_0^{2\pi R} w \left\{ -\frac{1}{2} \left[K_1 w - K_2 (w_{,xx} + w_{,yy}) \right] \right\} dx dy \quad (3.7)$$

Từ các phương trình (3.6) và (3.7), ta thu được phương trình của năng lượng toàn phần như sau

$$U_{\text{total}} = U_{\text{int}} - U_{\text{ext}}$$

Phương pháp năng lượng Ritz được áp dụng như sau

$$\frac{\partial U}{\partial f_0} = \frac{\partial U}{\partial f_1} = \frac{\partial U}{\partial f_2} = 0, \quad (3.8)$$

dẫn tới

$$X_1 (2f_0 + f_2) + X_2 f_1^2 + X_3 = 0, \quad (3.9)$$

$$2X_2 f_0 f_1 + 4X_5 f_1^3 + 2(X_8 \tau + X_7) f_1 + 2X_9 f_1 f_2^2 + 2X_{10} f_1 f_2 = 0, \quad (3.10)$$

$$X_1 f_0 + 2X_6 f_2 + \frac{X_3}{2} + 2X_9 f_1^2 f_2 + X_{10} f_1^2 = 0, \quad (3.11)$$

Từ các phương trình (3.9) và (3.11) xác định được các phương trình f_0 và f_2 , sau đó thay vào phương trình (3.10), dẫn đến

$$\begin{aligned} \tau = & -\frac{4X_1 X_5 f_1^2 - X_2 X_3 + 2X_1 X_7}{2X_1 X_8} - \frac{2X_2^2 X_6 f_1^2}{X_1 X_8 (X_1 - 4X_6 - 4X_9 f_1^2)} \\ & - \frac{(-8X_9 f_1^2 + 3X_1 - 8X_6) X_2^2 X_9 f_1^4}{X_1 X_8 (-4X_9 f_1^2 + X_1 - 4X_6)^2} \\ & - \frac{2X_1 X_{10} f_1^2 (-2X_9 f_1^2 + X_1 - 4X_6) (X_2 - X_{10})}{X_1 X_8 (-4X_9 f_1^2 + X_1 - 4X_6)^2} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Phương trình của tải xoắn tới hạn trên của vỏ thu được từ phương trình (3.12) ở dạng rõ ràng bằng cách cho $f_1 \rightarrow 0$ như sau

$$\tau_{upper} = -\frac{2X_1X_7 - X_2X_3}{2X_1X_8}. \quad (3.13)$$

Từ phương trình (3.2) độ võng lớn nhất của vỏ có thể được tính toán như sau

$$W_{max} = f_0 + f_1 + f_2$$

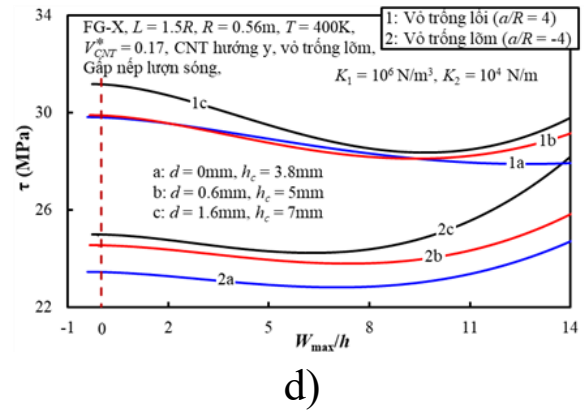
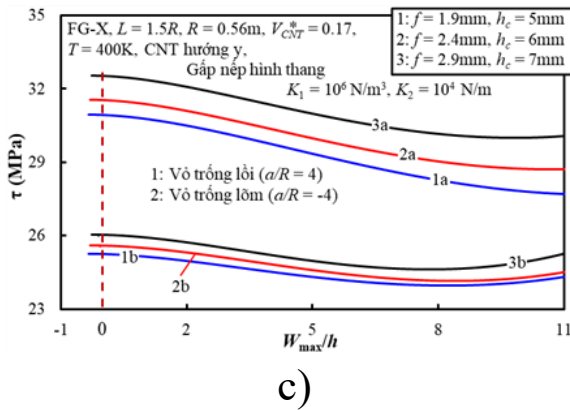
$$= \frac{\left\{ \begin{aligned} &2X_9f_1^4 + [(-2X_2 + 2X_{10})X_1 + 4X_2X_6 + 4X_9X_3]f_1^2 \\ &+ 2X_1(X_1 - 4X_6)f_1 - (X_1 - 4X_6)X_3 - 8X_1X_9f_1^3 \end{aligned} \right\}}{(-4X_9f_1^2 + X_1 - 4X_6)X_1}. \quad (3.14)$$

Góc xoắn được xác định như sau

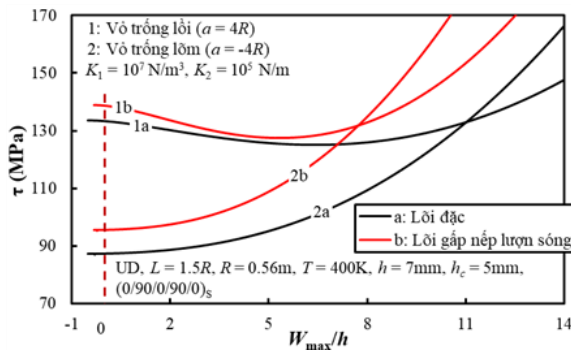
$$\phi = \frac{1}{2\pi RL} \int_0^{2\pi R} \int_0^L (v_{,x} + u_{,y}) dx dy = \frac{\lambda\beta^2}{4} f_1^2 + A_{66}^* h \tau. \quad (3.15)$$

Các đường cong thể hiện mối quan hệ tải xoắn - độ võng và tải xoắn - góc xoắn của vỏ có lõi gấp nếp thu được khi kết hợp các phương trình (3.12) và (3.14), (3.15) và (3.14), tương ứng.

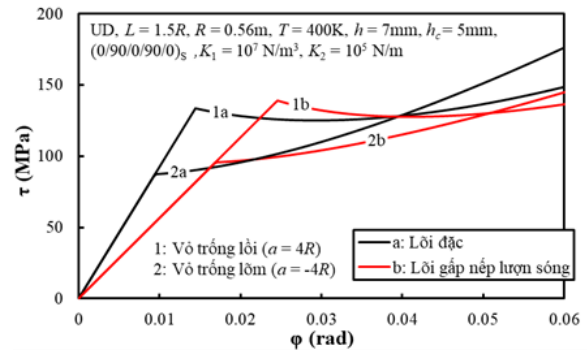
3.3. Kết quả số và thảo luận



Hình 3.4. Các đường cong postbuckling của vỏ trống FG-CNTRC sandwich với ảnh hưởng của các thông số hình học của lõi gấp nếp

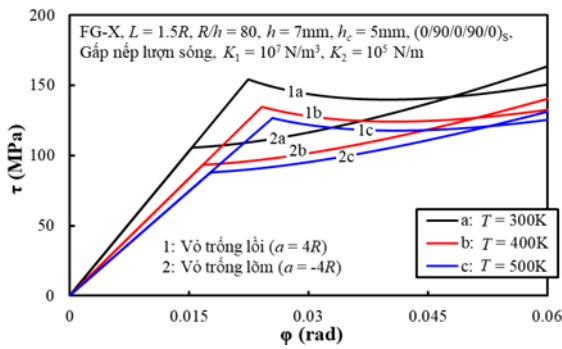


a)

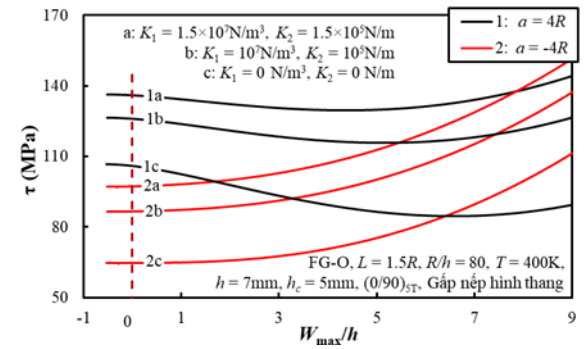


b)

Hình 3.5. Các đường cong postbuckling của vỏ trống FG-GRC lõi gấp nếp và lõi đặc



d)



c)

Hình 3.6. Ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường đến các đường cong của vỏ trống FG-GRC

Hình 3.7. Ảnh hưởng của các tham số nền đàn hồi đến đường cong của vỏ trống FG-GRC

Từ các ví dụ số, rút ra một số nhận xét đáng chú ý

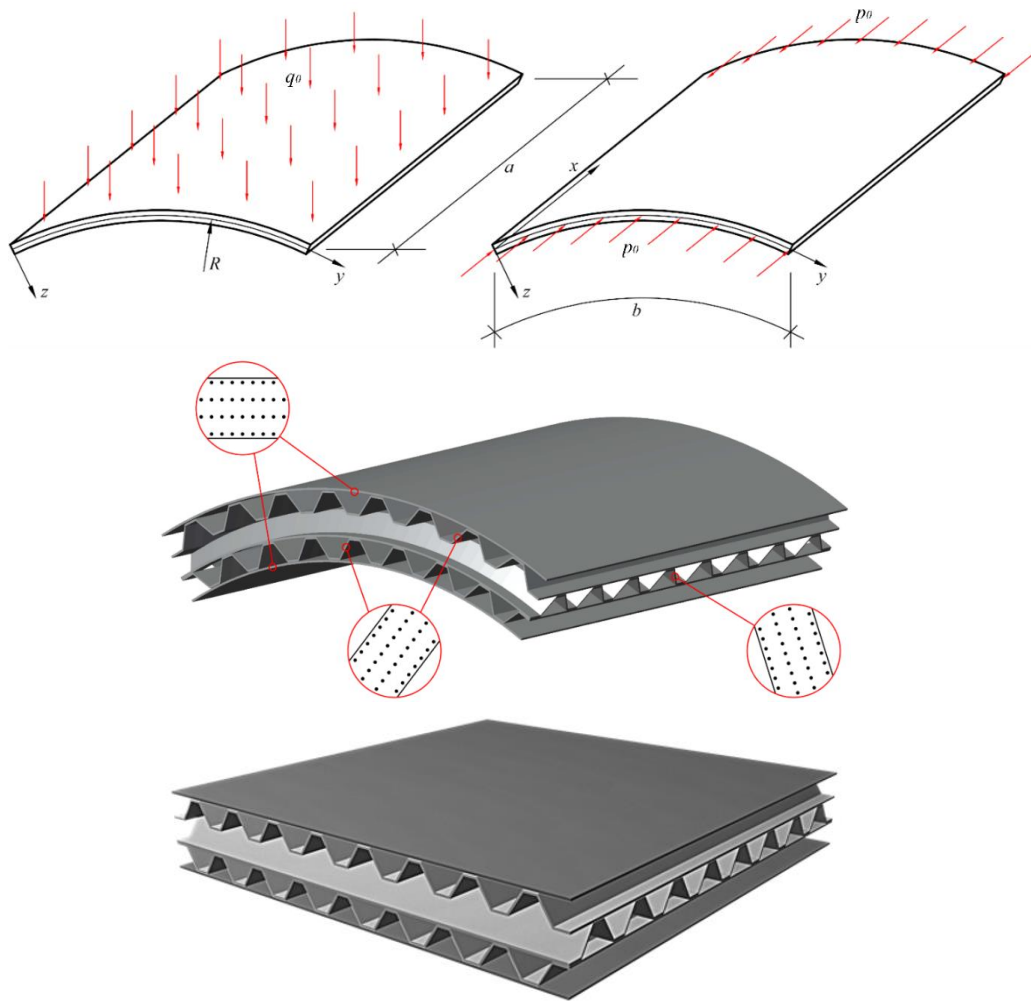
1. Vỏ lõi gấp nếp có tải tới hạn và cường độ sau mất ổn định cao hơn lõi đặc; CNT hoặc graphene hướng y cho tải tới hạn lớn hơn hướng x.
2. Với FG-CNTRC, CNT hướng x có snap-through thấp hơn nhưng cường độ sau mất ổn định cao hơn; FG-GRC chỉ có snap-through rõ ở vỏ lõi; hiện tượng này rõ hơn ở vỏ lõi gấp nếp so với lõi đặc.
3. Đường cong mô men xoắn – góc xoắn trùng ở giai đoạn mất ổn định; sau mất ổn định, vỏ lõi vượt trội ở độ võng nhỏ, vỏ lõm vượt trội ở độ võng lớn.

4. Nhiệt độ, độ cứng nền, chiều dày lõi, bán kính dọc, đặc trưng vật liệu ảnh hưởng mạnh đến ứng xử xoắn, cho thấy cần tối ưu hóa thiết kế.

CHƯƠNG 4. ỔN ĐỊNH PHI TUYẾN CỦA TẤM CHỮ NHẬT VÀ PANEL TRỤ FG-CNTRC SANDWICH LỖI NHIỀU LỚP GẤP NẾP FG-CNTRC

Trong chương này, điểm mới đáng chú ý là các nếp gấp được làm từ chính vật liệu FG-CNTRC thay vì đơn thuần là vật liệu đẳng hướng như trong các nghiên cứu trước, đồng thời lớp lõi được cấu tạo từ nhiều lớp gấp nếp FG-CNTRC. Kỹ thuật đồng nhất hóa của Xia và cộng sự [159] tiếp tục được phát triển cho trường hợp này và vẫn tính tới các biến dạng nhiệt trong lõi.

4.1. Mô hình tấm chữ nhật và panel trụ FG-CNTRC sandwich lõi nhiều lớp gấp nếp FG-CNTRC



Hình 4.1. Hệ tọa độ và hình dạng của tấm chữ nhật và panel trụ FG-CNTRC sandwich lõi nhiều lớp gấp nếp

Các thông số đặc trưng hình học cho lõi gấp nếp, lớp mặt, lớp lõi và các quy luật phân bố của CNT được xem xét giống như mô hình đã trình bày trong hai chương trước. CNT trong các lớp mặt có thể được thiết kế theo phương dọc (CNT theo hướng x , lớp 0°) hoặc theo phương ngang (CNT theo hướng y , lớp 90°) của panel hoặc tấm. Đối với lõi gấp nếp, các CNT luôn được phân bố theo hướng của nếp gấp, các nếp gấp có thể theo

hướng dọc (lớp 0 độ) hoặc hướng ngang (lớp 90 độ) so với tấm và panel. Bốn trường hợp kết hợp hướng của CNT và hướng nếp gấp được xem xét như sau: 0/0/90/0/0, 0/90/0/90/0, 90/0/90/0/90, 90/90/0/90/90.

Tỷ phần thể tích CNT trong lớp lõi gấp nếp $\left(-\frac{t}{2} \leq \zeta \leq \frac{t}{2}\right)$ được phân bố tuyến tính theo chiều dày của thành lõi như sau

- Dạng UD: $V_{CNT} = V_{CNT}^*$, (4.1)

- Dạng FG-X: $V_{CNT} = \left(\frac{4\zeta}{t}\right) V_{CNT}^*$, (4.2)

- Dạng FG-O: $V_{CNT} = \left(2 - \frac{4|\zeta|}{t}\right) V_{CNT}^*$. (4.3)

4.2. Các phương trình chủ đạo

Từ phương trình (4.7), liên hệ giữa lực dẫn, mô men với các thành phần biến dạng tại mặt trung bình có dạng

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} H_{11} & H_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{12} & H_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{11} & S_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ -w_{,xx} \\ -w_{,yy} \\ -2w_{,xy} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \Phi_{1x} \\ \Phi_{1y} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (4.8)$$

Các thành phần của ma trận độ cứng $H_{ij}^{[1]c}, H_{ij}^{[2]c}, H_{ij}^{[3]c}, S_{ij}^{[1]c}, S_{ij}^{[2]c}, S_{ij}^{[3]c}$ và $\Phi_{1x}^{[1]c}, \Phi_{1x}^{[2]c}, \Phi_{1x}^{[3]c}, \Phi_{1y}^{[1]c}, \Phi_{1y}^{[2]c}, \Phi_{1y}^{[3]c}$ được xác định như sau:

Đối với lõi gấp nếp theo hướng x

$$S_{22}^{[2]c} = \frac{c}{l} \bar{S}_{11}, \quad S_{12}^{[2]c} = \frac{\bar{S}_{12}}{\bar{S}_{11}} S_{22}^{[2]c}, \quad S_{11}^{[2]c} = \frac{1}{2c} (I_2 \bar{H}_{22} + I_1 \bar{S}_{22}), \quad S_{66}^{[2]c} = \frac{l}{c} \bar{S}_{66},$$

$$S_{ij}^{[1]c} = \int_{-\frac{h_c}{2}}^{\frac{h_c}{6}} Q_{ij}^{*c} z^2 dz, \quad S_{ij}^{[3]c} = \int_{\frac{h_c}{6}}^{\frac{h_c}{2}} Q_{ij}^{*c} z^2 dz, \quad (4.10)$$

$$\Phi_{1x}^{[k]c} = H_{11}^{[k]c} \bar{\alpha}_{11}^c + H_{12}^{[k]c} \bar{\alpha}_{22}^c, \quad \Phi_{1y}^{[k]c} = H_{12}^{[k]c} \bar{\alpha}_{11}^c + S_{22}^{[k]c} \bar{\alpha}_{22}^c, \quad k = (1, 2, 3),$$

Đối với lõi gấp nếp theo hướng y

$$S_{11}^{[2]c} = \frac{c}{l} \bar{S}_{11}, S_{12}^{[2]c} = \frac{\bar{S}_{12}}{\bar{S}_{11}} S_{11}^{[2]c}, S_{22}^{[2]c} = \frac{1}{2c} (I_2 \bar{H}_{22} + I_1 \bar{S}_{22}), S_{66}^{[2]c} = \frac{l}{c} \bar{S}_{66},$$

$$S_{ij}^{[1]c} = \int_{-\frac{h_c}{2}}^{\frac{h_c}{2}} Q_{ij}^{*c} z^2 dz, S_{ij}^{[3]c} = \int_{-\frac{h_c}{2}}^{\frac{h_c}{2}} Q_{ij}^{*c} z^2 dz, \quad (4.11)$$

$$\Phi_{1y}^{[k]c} = H_{11}^{[k]c} \bar{\alpha}_{11}^c + H_{12}^{[k]c} \bar{\alpha}_{22}^c, \Phi_{1x}^{[k]c} = H_{12}^{[k]c} \bar{\alpha}_{11}^c + H_{22}^{[k]c} \bar{\alpha}_{22}^c, k = (1, 2, 3),$$

và

$$(\bar{H}_{ij}, \bar{S}_{ij}) = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} Q_{ij}^c(1, \zeta^2) d\zeta, (\bar{\alpha}_{11}^c, \bar{\alpha}_{22}^c) = \frac{1}{t} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} (\alpha_{11}, \alpha_{22}) d\zeta, Q_{ij}^{*c} = \frac{12}{\left(\frac{h_c}{3}\right)^3} S_{ij}^{[2]c}, \quad (4.12)$$

Lưu ý: Độ cứng $S_{ij}^{[2]c}$ trong phương trình (4.12) được xác định từ phương trình (4.10) cho lớp thứ nhất và thứ ba đối với lõi gấp nếp hướng y, ngược lại, từ phương trình (4.11) cho lớp thứ nhất và thứ ba đối với lõi gấp nếp hướng x.

4.3. Điều kiện biên và phương pháp năng lượng Ritz

Điều kiện biên của các panel được giả định với bốn cạnh tựa đơn và có thể di chuyển tự do, được xác định như sau:

$$N_x = N_{0x} = -hp_0, M_x|_{x=0,a} = 0, N_{xy}|_{x=0,a} = 0, w|_{x=0,a} = 0, \quad (4.15)$$

$$N_y = N_{0y} = 0, M_y|_{y=0,b} = 0, N_{xy}|_{y=0,b} = 0, w|_{y=0,b} = 0.$$

Trường hợp điều kiện biên tựa đơn, nghiệm gần đúng của độ không hoàn hảo và độ võng $w^*(x, y)$ được chọn dưới dạng:

$$w^* = \xi h \sin \alpha x \sin \beta y, \quad (4.16)$$

$$w = W \sin \alpha x \sin \beta y,$$

Thế năng biến dạng đàn hồi của panel trụ và công của ngoại lực được biểu diễn lần lượt là

$$U_{\text{int}} = \frac{1}{2} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_0^b \int_0^a [\sigma_x (\epsilon_x - \alpha_{11} \Delta T) + \sigma_y (\epsilon_y - \alpha_{22} \Delta T) + \sigma_{xy} \gamma_{xy}] dx dy dz \quad (4.19)$$

$$U_{ext} = - \int_0^b \int_0^a \left[\frac{1}{2} \left(K_1 w - K_2 (w_{,xx} + w_{,yy}) + \frac{K_3 w^3}{2} \right) w \right] dx dy$$

$$+ \int_0^b \int_0^a q_0 w dx dy + N_{0x} \int_0^b \int_0^a u_{,x} dx dy \quad (4.20)$$

Năng lượng toàn phần thu được như sau

$$U_{total} = U_{int} - U_{ext}. \quad (4.21)$$

Áp dụng phương pháp cực tiểu hoá năng lượng Ritz, tức là

$$\frac{\partial U_{total}}{\partial W} = 0, \quad (4.22)$$

dẫn tới

$$X_{11} W + X_{12} W \left(W + \frac{4}{3} \xi h \right) + X_{13} W (2h\xi + W)(h\xi + W)$$

$$+ X_{14} W^3 K_3 + X_{15} q_0 - X_{16} p_0 h (h\xi + W) = 0 \quad (4.23)$$

Liên hệ giữa độ võng - tải nén dọc trục thu được từ phương trình (4.23) có dạng như sau

$$p_0 = \frac{\left\{ X_{11} W + X_{12} W h \left(W + \frac{4}{3} \xi \right) + X_{13} W h^2 (2\xi + W)(\xi + W) \right.}{X_{16} h(\xi + W)} \left. + X_{14} W^3 h^2 K_3 + \frac{X_{15} q_0}{h} \right\} \quad (4.24)$$

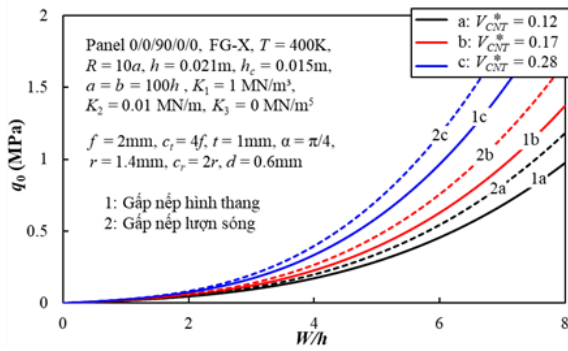
Đối với panel/tấm hoàn hảo, tải nén tới hạn tĩnh đạt được bằng cách cho $W \rightarrow 0$ và $\xi = 0$, như sau

$$p_0^{cr} = \frac{X_{11}}{X_{16} h} \quad (4.25)$$

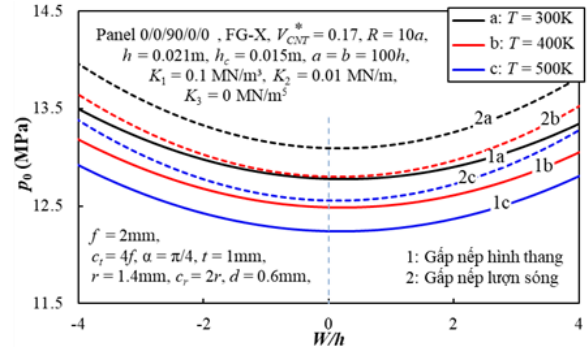
Từ phương trình (4.23) thu được liên hệ giữa độ võng - áp lực hướng tâm là

$$q_0 = h \frac{\left\{ X_{16} p_0 h(\xi + W) - X_{11} W - X_{12} W h \left(W + \frac{4\xi}{3} \right) \right.}{X_{15}} \left. - X_{13} W h^2 (2\xi + W)(\xi + W) - X_{14} W^3 h^2 K_3 \right\} \quad (4.26)$$

4.4. Kết quả số và thảo luận

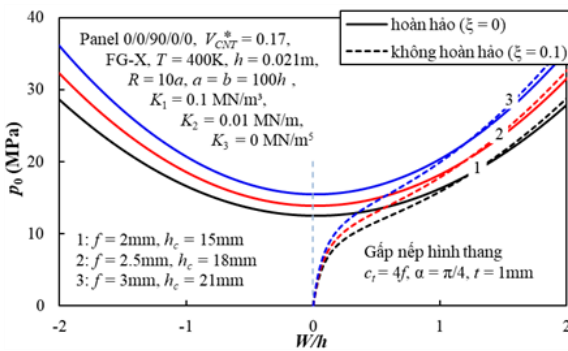


b)

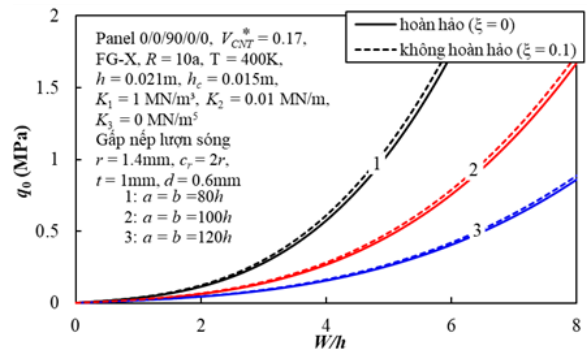


c)

Hình 4.2. Ứng xử sau mất ổn định của các panel trụ FG-CNTRC sandwich lõi gấp nếp hình thang và lượn sóng FG-CNTRC chịu nén dọc trục và áp lực hướng tâm

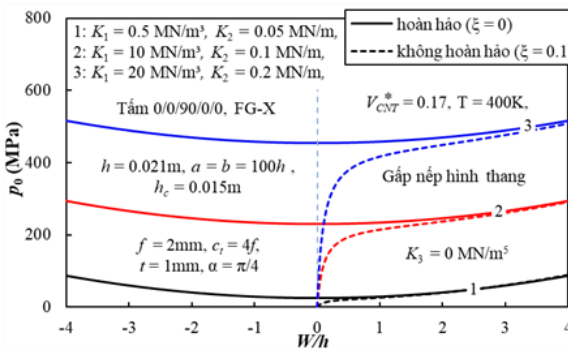


a)

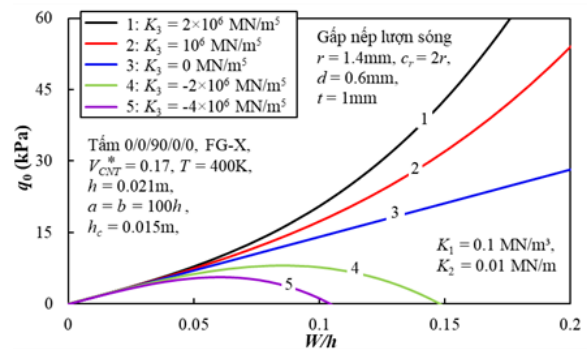


d)

Hình 4.3. Ứng xử sau mất ổn định của các panel trụ FG-CNTRC sandwich lõi gấp nếp nhiều lớp FG-CNTRC hình thang và lượn sóng chịu áp lực hướng tâm và nén dọc trục



a)



d)

Hình 4.9. Độ cứng nền tuyến tính ảnh hưởng đến các đường cong của tấm FG-CNTRC

Hình 4.10. Độ cứng nền phi tuyến ảnh hưởng đến các đường cong của tấm FG-CNTRC

4.4. Kết luận Chương 4

Qua các khảo sát số, những nhận xét quan trọng được rút ra như sau:

1. Lỗi gấp nếp cải thiện đáng kể khả năng chịu tải so với lỗi đặc; lỗi lượn sóng ưu thế ở độ võng lớn, lỗi hình thang vượt trội khi tỷ phần CNT cao.

2. Tỷ phần, quy luật và hướng CNT ảnh hưởng rõ đến tải nén tới hạn và cường độ sau mất ổn định; phân bố FG-X cho giá trị cao nhất.

3. Kết hợp hướng CNT và hướng nếp gấp 0/0/90/0/0 cho tải nén tới hạn cao nhất, 90/90/0/90/90 thấp nhất, cho thấy vai trò quan trọng của cách kết hợp.

4. Nhiệt độ tăng làm giảm độ cứng và khả năng chịu tải; các thông số nền tuyến tính, phi tuyến ảnh hưởng rõ, đặc biệt ở vùng độ võng lớn.

KẾT LUẬN

Luận án đã đạt được một số kết quả khoa học mới và có ý nghĩa thực tiễn sau:

1. Luận án đã cải tiến kỹ thuật đồng nhất hóa kết cấu gấp nếp của Xia cho trường hợp lỗi gấp nếp làm bằng vật liệu đẳng hướng và có tính đến các thành phần biến dạng nhiệt trong lỗi. Luận án cũng đã cải tiến kỹ thuật đồng nhất hóa này cho trường hợp lỗi gấp nếp nhiều lớp làm bằng FG-CNTRC, trong đó các thành phần biến dạng nhiệt và hướng gấp nếp khác nhau của các lớp lỗi gấp nếp cũng được xem xét.

2. Luận án đã xây dựng lời giải giải tích cho bài toán ổn định phi tuyến của vỏ trụ và vỏ trống sandwich FG-CNTRC và FG-GRC có lỗi gấp nếp dạng hình thang và lượn sóng, dưới tác dụng tải trọng nén dọc trục, áp lực hướng tâm và tải trọng xoắn, trong môi trường nhiệt. Sử dụng lý thuyết vỏ Donnell, tính phi tuyến hình học kiểu von Kármán, phương pháp năng lượng Ritz, kết hợp kỹ thuật đồng nhất hóa cải tiến cho lỗi gấp nếp làm bằng vật liệu đẳng hướng và dạng nghiệm ba số hạng cho phép mô tả trạng thái trước mất ổn định, sau mất ổn định tuyến tính và phi tuyến của vỏ trong môi trường nhiệt.

3. Luận án đã xây dựng lời giải giải tích cho bài toán ổn định phi tuyến của tấm chữ nhật và panel trụ sandwich FG-CNTRC với lỗi gấp nếp nhiều lớp FG-CNTRC dưới tác dụng của tải cơ trong môi trường nhiệt. Lời giải dựa trên lý thuyết vỏ Donnell, tính phi tuyến hình học của von Kármán, phương pháp năng lượng Ritz, kết hợp kỹ thuật đồng nhất hóa cải tiến cho

lõi gấp nếp nhiều lớp FG-CNTRC, ngoài ra mô hình nền đàn hồi phi tuyến được sử dụng cho phép đánh giá tốt hơn tương tác giữa panel và nền đàn hồi khi kết cấu chịu độ võng lớn.

4. Luận án đã thực hiện các khảo sát số để đánh giá các ảnh hưởng của các thông số hình học, vật liệu của tấm vỏ và lõi gấp nếp, hướng gấp nếp, hướng CNT/graphene, tỷ phần thể tích CNT/graphene, nhiệt độ môi trường, nền đàn hồi, độ không hoàn hảo đến ứng xử ổn định và sau mất ổn định của các kết cấu được xem xét, qua đó đưa ra các nhận xét và thảo luận có ý nghĩa.

KIẾN NGHỊ VỀ NHỮNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

1. Nghiên cứu ổn định động và dao động phi tuyến của vỏ trụ, vỏ trống sandwich lõi gấp nếp và lõi nhiều lớp (đẳng hướng, nanocomposite) chịu tải điều hòa, xung, va chạm.

2. Nghiên cứu ổn định động và dao động phi tuyến của tấm, panel trụ, vỏ thoải hai độ cong sandwich lõi gấp nếp (một lớp, nhiều lớp), có xét biến dạng trượt ngang.

3. Phát triển kỹ thuật đồng nhất hóa cho lõi gấp nếp xiên, bất đối xứng, có/không xét biến dạng trượt ngang.

4. Thực nghiệm tấm, vỏ sandwich lõi gấp nếp trong điều kiện tải thực tế và nghiên cứu ứng dụng vào công trình tại Việt Nam.

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

Luận án đã công bố được **09** công trình khoa học.

1. V.H. Nam, **D.T.K. My**, V.M. Duc, L.N. Ly, N.T. Giang, N.T. Phuong, Nonlinear thermo-elastic stability of corrugated-core toroidal shell segments with carbon nanotube-reinforced face sheets under radial pressure, Journal of Thermoplastic Composite Materials 2023; 37(6):2100-2122. (SCIE, Q1)

2. **D.T.K. My**, V.M. Duc, N.H. Giang, N.T. Phuong, V.H. Nam, Buckling and postbuckling of laterally pressured sandwich FG-GRC laminated toroidal shell segments with corrugated core in thermal environment, International Journal of Structural Stability and Dynamics 2024;24(04):2450036. (SCIE, Q1)

3. V.H. Nam, **D.T.K. My**, V.M. Duc, N.T. Giang, P.T. Hieu, N.T. Phuong, A new analytical approach for nonlinear global buckling of axially compressed and tensiled sandwich toroidal shell segments with CNTRC coatings and corrugated core in thermal environment, *International Journal of Applied Mechanics* 2024;16(02):2450021. (SCIE, Q2)

4. V.H. Nam, L.N. Ly, **D.T.K. My**, V.M. Duc, N.T. Phuong, On the nonlinear buckling and postbuckling responses of sandwich FG-GRC core under axial tension and compression in the thermal environment, *Polymer Composites* 2024;45(15):13737-13752. (SCIE, Q1)

5. V.H. Nam, **D.T.K. My**, V.M. Duc, V.T. Hung, P.T. Hieu, N.T. Phuong, A new analytical approach for nonlinear buckling and postbuckling of torsion-loaded FG-CNTRC sandwich toroidal shell segments with corrugated core in thermal environments, *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 2023;31(26):1-12. (SCIE, Q1)

6. D.T. Dong, **D.T.K. My**, V.M. Duc, L.N. Ly, V.T. Hung, V.H. Nam, Nonlinear torsional buckling of corrugated core sandwich toroidal shell segments with graphene-reinforced coatings in temperature change using the Ritz energy method, *Applied Mathematical Modelling* 2024;126:739-752. (SCIE, Q1)

7. V.M. Duc, **D.T.K. My**, V.H. Nam, Nonlinear buckling and postbuckling of FG-CNTRC sandwich plates with multi-layer corrugated FG-CNTRC core, *Journal of Science and Transport Technology* 2024;4(4):55-70.

8. **D.T.K. My**, D.T. Dong, V.H. Nam, Buckling analysis of corrugated-core FGM toroidal shell segments subjected to axial loads using the first-order shear deformation theory, *Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ XI, Hà Nội, 02-03/12/2022.*

9. V.M. Duc, **D.T.K. My**, V.T. Hung, C.C. Anh, V.H. Nam, Nonlinear buckling and postbuckling of FG-CNTRC sandwich cylindrical panels with corrugated FG-CNTRC core using the Ritz energy method, *Hội nghị Cơ học toàn quốc, Kỷ niệm 45 năm thành lập Viện Cơ học, Hà Nội, 09/04/2024.*