



INFLUENCE OF MATERIAL AND GEOMETRY DEFECTS ON LOCAL BUCKLING RESISTANCE OF FRP COLUMNS

Tien Thuy Nguyen

Ho Chi Minh city University of Transport, No 2, Vo Oanh Street, 25 Ward, Binh Thanh District, Ho Chi Minh City, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 01/06/2023

Revised: 07/06/2023

Accepted: 14/06/2023

Published online: 15/06/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.5.5>

* *Corresponding author*

Email: thuy.nguyen@ut.edu.vn

Abstract. Fiber-reinforced Polymer materials manufactured by the pultrusion process are increasingly being widely used in the construction industry due to their reasonable cost, high strength, lightweight, corrosion resistance, and convenient for installation. Due to its low modulus of elasticity and material is linear until failure, the design of PFRP structures are governed by instabilities rather than by strengths. Local instability of the column occurs when the compressive plates of the structure undergo local buckling in a sinusoidal pattern. This study analyzes the local buckling and post-buckling resistance of a PFRP column, taken into account defects of material properties and geometric imperfections. The results show that geometric imperfections have significant influence on the local buckling resistance and greatly reduce the post-buckling resistance of the column. A comparison between nonlinear buckling analysis and theoretical calculations by Kollár, as well as the experimental values, demonstrates that Kollár's theoretical formula is suitable for determining local buckling resistance of PFRP column. The author proposes to use this formula in the design calculations for load-bearing PFRP columns.

Keywords: local buckling resistance, PFRP column, nonlinear analysis, geometric imperfection, material defects



ẢNH HƯỞNG CỦA KHUYẾT TẬT HÌNH HỌC VÀ TÍNH CHẤT VẬT LIỆU LÊN SỨC KHÁNG MẮT ỔN ĐỊNH CỤC BỘ CỘT FRP

Nguyễn Tiến Thủy

Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, Số 2 Võ Oanh, Phường 25, Quận Bình Thạnh, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 01/06/2023

Ngày nhận bài sửa: 07/06/2023

Ngày chấp nhận đăng: 14/06/2023

Ngày xuất bản Online: 15/06/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.5.5>

* Tác giả liên hệ

Email: thuy.nguyen@ut.edu.vn

Tóm tắt. Vật liệu polyme gia cường sợi sản xuất bằng phương pháp đúc kéo (Pultruded Fiber Reinforced Polymer - PFRP) ngày càng được sử dụng phổ biến trong lĩnh vực xây dựng do giá thành hợp lý, cường độ cao, trọng lượng nhẹ, khả năng chống ăn mòn tốt, thi công thuận tiện. Do modun đàn hồi thấp và ứng xử tuyến tính đến phá hoại, thiết kế của vật liệu này thường bị khống chế bởi ổn định. Mất ổn định cục bộ của cột xảy ra khi các bản chịu nén của cấu kiện bị oằn theo kiểu lượn sóng. Nghiên cứu này phân tích tải trọng gây oằn tới hạn và sức kháng sau oằn của cột PFRP có tính đến khuyết tật về tính chất vật liệu và khuyết tật hình học. Kết quả cho thấy, khuyết tật hình học có ảnh hưởng rất lớn đến tải trọng gây oằn và làm suy giảm nghiêm trọng sức kháng sau oằn của cột. So sánh phân tích ổn định phi tuyến với tính toán lý thuyết của Kollár và giá trị thực nghiệm cho thấy công thức của Kollár là phù hợp khi xác định tải trọng gây oằn cục bộ. Tác giả đề xuất sử dụng công thức này để xác định sức kháng ổn định cột trong tính toán thiết kế cột PFRP chịu nén.

Từ khóa: sức kháng oằn cục bộ, cột PFRP, phân tích phi tuyến, khuyết tật vật liệu, khuyết tật hình học

1. GIỚI THIỆU

Vật liệu polyme gia cường sợi (Fiber-Reinforced Polymer – FRP) là vật liệu có hai thành phần chính là cốt sợi (thường là sợi thủy tinh hoặc sợi carbon) và keo (polyester, vinylester, v.v...). Các sản phẩm FRP ngày càng được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực xây dựng cầu và dân dụng công nghiệp. Tấm gia cường sợi carbon (CFRP) sử dụng trong gia cố, tăng cường kết cấu xuống cấp, hư hỏng, hoặc nâng cấp sức kháng theo yêu cầu sử dụng như trên Hình 1 (a). Các thanh vật liệu gia cường sợi thủy tinh (GFRP rebar) thay thế cốt thép trong kết cấu cầu bê tông rất phổ biến tại các nước phát triển (Hình 1 (b)), nhờ ưu điểm đặc trưng của vật liệu gia cường sợi là: Chống ăn mòn tốt, trọng lượng nhẹ, dễ vận chuyển và thi công, cường độ chịu kéo cao, v.v.,..



Hình 1. (a) Tấm gia cường trong KC dầm BTCT [1] (b) Thanh GFRP trong kết cấu cầu [2].

Vật liệu gia cường sợi sản xuất bằng phương pháp đúc kéo (Pultruded Fiber-Reinforced Polymer – PFRP) là sản phẩm cấu kiện kết cấu đúc sẵn. Trong quy trình sản xuất, các thảm sợi và các tổ hợp sợi đơn hướng được bố trí theo kiến trúc sợi thiết kế, sợi được kéo qua khuôn đúc (với các loại tiết diện phổ biến tương tự kết cấu thép) và bơm keo đã gia nhiệt. Hiện tượng đóng rắn keo xảy ra, hình thành các liên kết với kết cấu sợi, tạo ra cấu kiện đúc sẵn, thông thường là các tiết diện chữ I, chữ H, chữ C, hình chữ nhật, hình tròn, v.v.. Những năm gần đây, PFRP, với chi phí sản xuất ngày càng hợp lý, dần được sử dụng phổ biến trong lĩnh vực xây dựng với vai trò kết cấu chịu lực chính (Hình 2). Tuy nhiên, đến thời điểm hiện nay chưa có tiêu chuẩn Eurocode hay của ASCE được ban hành chính thức cho PFRP.



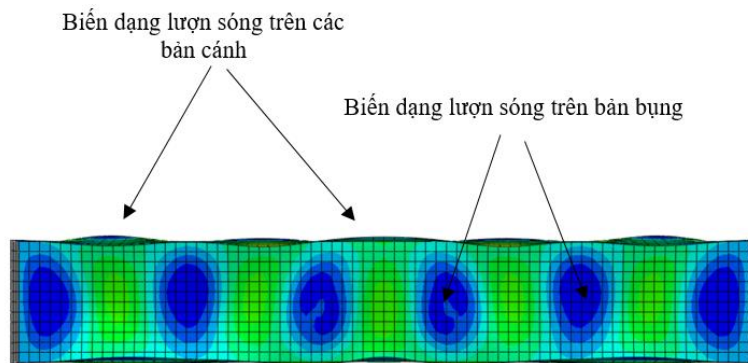
(a)

(b)

Hình 2. Cầu kiện PFRP sử dụng trong cầu giàn [3] : (a) các thanh giàn FRP ; (b) Cầu giàn PFRP.

Một trong những nguyên nhân khiến việc hoàn thành tiêu chuẩn của PFRP cần nhiều thời gian là do thiếu số lượng phong phú các kết quả thực nghiệm cũng như nghiên cứu lý thuyết, mô phỏng về ứng xử của cấu kiện PFRP dưới các điều kiện làm việc khác nhau.

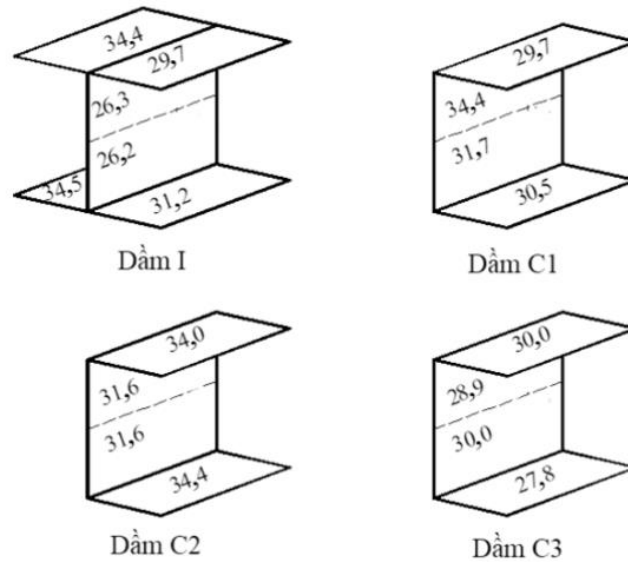
Là vật liệu có cường độ chịu kéo cao (đạt trên 400 Mpa khi sử dụng sợi thủy tinh) nhưng độ cứng thấp (modun đàn hồi theo phương dọc chỉ bằng 1/7 của thép), vấn đề ổn định và biến dạng lớn của vật liệu PFRP là nổi trội trong thiết kế cấu kiện PFRP chịu tải. Mất ổn định của cột chịu nén, với cột dài sẽ là mất ổn định tổng thể (còn gọi là mất ổn định Euler), xảy ra khi cột bị oằn tổng thể theo trục phụ (minor axis) và cột không còn khả năng chịu tải ngay sau khi mất ổn định xảy ra. Khi chiều dài cột ngắn lại tới chiều dài chuyển tiếp mà ở đó tải trọng tới hạn gây oằn tổng thể và tải trọng tới hạn gây oằn cục bộ là bằng nhau thì ở chiều dài cột ngắn hơn chiều dài chuyển tiếp, ổn định cục bộ sẽ bắt đầu xảy ra [3,4]. Oằn cục bộ (hay mất ổn định cục bộ) là một hình thức mất ổn định kết cấu, xảy ra khi các bản của cấu kiện (vd. Với tiết diện chữ I là bản cánh và bản bụng) bị oằn tạo ra các biến dạng lượn sóng (half-wave lengths) trên các bản.



Hình 3. Mất ổn định cục bộ cột.

Hình 3 thể hiện hình dạng khi oằn cục bộ của một cột tiết diện chữ I với các bản cánh và bản bụng xuất hiện các biến dạng lượn sóng. Nghiên cứu của Mottram [4] chỉ ra rằng, để loại trừ các hiệu ứng ở hai đầu cột lên ứng xử oằn cục bộ, chiều dài tối thiểu cần thiết của cột là 4 lần nửa bước sóng. Ví dụ trong Hình 3 có thể quan sát thấy 5 chiều dài nửa bước sóng trên bản cánh.

Mọi loại vật liệu đều có khuyết tật, sản sinh trong quá trình sản xuất, vận chuyển hoặc sử dụng, gây nguy hại cho vật liệu và làm suy giảm sức kháng cấu kiện. Với vật liệu PFRP, do quy trình sản xuất đặc thù và khác biệt của các hãng chế tạo, các loại khuyết tật cũng phong phú và có độ lớn khác nhau. Khuyết tật về tính chất vật liệu có ảnh hưởng rất lớn đến ứng xử của kết cấu PFRP nhưng ít được đề cập đến trong các nghiên cứu trước đây. Một số nghiên cứu cho thấy modun đàn hồi theo phương dọc trục của các bản cánh dầm tiết diện chữ I về hai phía so với trục bản bụng là khác nhau [5]. Hình 4 thể hiện giá trị modun đàn hồi trên các bản của dầm I. Trên bản cánh về hai phía của một tiết diện chữ I (sản xuất bởi Fiberline A/S, Đan Mạch), modun đàn hồi theo phương dọc có giá trị thực nghiệm trung bình lớn nhất là 34,5 GPa, lớn hơn giá trị trung bình bé nhất của bản cánh 29,7 GPa là 15,5%. Ngoài ra, modun đàn hồi theo phương dọc của bản bụng lại bé hơn bản cánh nhiều, chỉ đạt 26,3 GPa. Khuyết tật này có thể được xem là có tính phổ biến với vật liệu PFRP. Nghiên cứu của Stoddard [6] cũng chỉ ra khác biệt 13,3% của modun đàn hồi theo phương dọc trên dầm I về hai phía của bản bụng trên cấu kiện của nhà sản xuất Strongwell (Hoa kỳ).



Hình 4. Khuyết tật về modun đàn hồi theo phương dọc của vật liệu PFRP [5].

Với khuyết tật về tính chất vật liệu như vậy, một cấu kiện đối xứng về hình học (ví dụ tiết diện chữ I) sẽ không còn đối xứng trên thực tế và lực tác dụng đúng tâm hình học trên lý thuyết, thực tế sẽ lệch tâm, gây ra các moment phụ tác dụng lên cấu kiện. Ngoài khuyết tật về tính chất vật liệu, cấu kiện PFRP còn có các khuyết tật hình học. Trong quy trình sản xuất, cấu kiện được kéo qua khuôn đúc với nhiệt độ giảm dần khi ra khỏi khuôn và việc nhiệt độ giảm không đều, kết hợp với quá trình vận chuyển, lưu kho có thể gây ra các khuyết tật về hình học của cấu kiện PFRP.

Trong bài báo này, tác giả sử dụng phương pháp phân tích ổn định phi tuyến bằng phần tử hữu hạn và đưa vào mô hình các khuyết tật về tính chất vật liệu và hình học, để đánh giá ảnh hưởng đồng thời của hai khuyết tật này lên ứng xử mất ổn định cục bộ của một cột PFRP tiết diện chữ I chịu nén ở đầu cột với điều kiện biên là hai đầu ngàm. Nghiên cứu này cũng sẽ đánh giá ảnh hưởng của khuyết tật tính chất vật liệu và hình học lên sức kháng sau oằn của cột chịu nén.

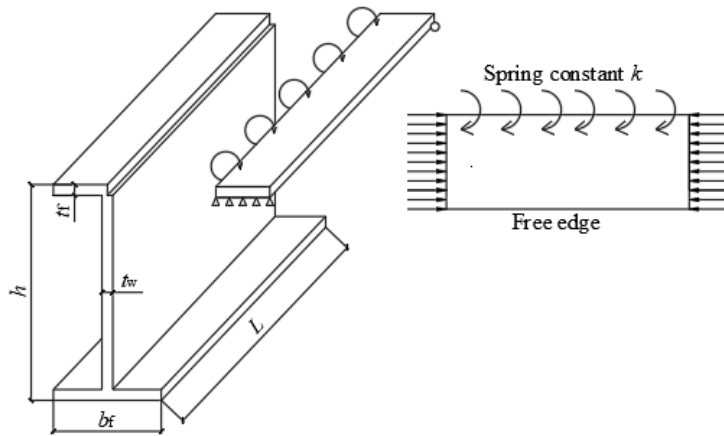
2. TẢI TRỌNG TỚI HẠN GÂY OẰN CỤC BỘ

Lundquist và cộng sự [7] sử dụng nguyên lý phân phối moment, cho một đơn vị moment trên 1 đơn vị chiều dài tác dụng lên phần liên kết của các bản (vd. giữa bản cánh và bản bụng) và phân phối cho các bản dựa trên độ cứng tương đối. Độ cứng của bản được xác định từ phương trình vi phân bậc bốn của bản chịu nén với moment tác dụng dọc theo một trong các cạnh với các điều kiện biên khác nhau. Tải trọng gây oằn tới hạn được xác định bằng cách thiết lập phương trình tổng độ cứng bằng 0 (điều kiện ổn định trung lập). Tuy nhiên phương pháp này cho lời giải phức tạp ngay cả với vật liệu đẳng hướng, và không cung cấp được các phương trình rõ ràng cho tải trọng gây oằn tới hạn.

Tiêu chuẩn ASCE – sổ tay thiết kế cấu trúc nhựa [8], sổ tay thiết kế Eurocomp [9], đề xuất các công thức tính toán tải trọng gây oằn với giả định phần liên kết giữa các bản là ràng buộc

giản đơn, bỏ qua ràng buộc xoay giữa các bản. Giả định này giúp đơn giản hóa vấn đề ổn định cấu kiện thành ổn định của các bản trực hướng đơn lẻ, dưới tải trọng nén đồng đều.

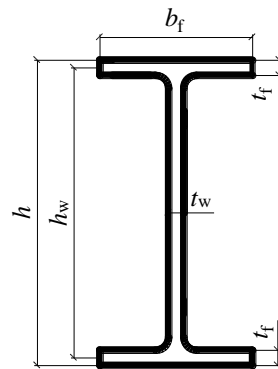
Bleich [10] xem xét ứng xử của các bản một cách riêng biệt, với điều kiện biên là ràng buộc góc xoay giữa các bản liền kề như trên Hình 5. Điều kiện biên này thể hiện chính xác hơn ràng buộc giữa các bản, so với giả thiết ràng buộc giản đơn được sử dụng trong [8], [9]. Kollár [11] và Qiao và Shan [12], trên nền tảng lý thuyết của Bleich [10], phát triển biểu thức dạng đóng xác định ứng suất tới hạn gây oằn cục bộ cho vật liệu trực hướng PFRP. Quy trình (dạng thử nghiệm) thiết kế theo hệ số tải trọng và sức kháng (LRFD) [13] lựa chọn công thức của Kollár [11] trong công bố của họ. Ứng suất gây oằn xác định theo Kollár [11] được trình bày dưới đây.



Hình 5. Mô hình giả định để tính toán ứng suất gây oằn tới hạn.

Ứng suất tới hạn gây oằn bản cánh được xác định bởi [3], [11]:

$$\sigma_{\text{Loc,flange}} = \frac{\pi^2}{t_f (b_f / 2)^2} \left[D_L \left(\frac{b_f / 2}{a} \right)^2 + \frac{12}{\pi^2} D_s \right] \quad (1)$$



(a) I-section

Hình 6 Tiết diện chữ I.

Với bản bụng, ứng suất gây oằn cục bộ là [3], [11] :

$$\sigma_{Loc,web} = \frac{2\pi^2}{t_w b_w^2} \left(\sqrt{D_L D_T} + D_{LT} + 2D_s \right) \quad (2)$$

Trong đó D_L , D_T , D_{LT} và D_s là độ cứng kháng uốn của bản trục hướng. Chúng được xác định như sau [3] :

$$D_L = \frac{E_L t_p^3}{12(1-\nu_L \nu_T)}; D_T = \frac{E_T t_p^3}{12(1-\nu_L \nu_T)}; D_{LT} = \frac{\nu_T E_L t_p^3}{12(1-\nu_L \nu_T)}; D_s = \frac{G_{LT} t_p^3}{12} \quad (3)$$

Trong công thức (3) t_p là bề dày của bản (là t_f hoặc t_w) trong Hình 6.

Nếu $\sigma_{Loc,flange}/(E_L)_f < \sigma_{Loc,web}/(E_L)_w$, bản cánh oằn trước bản bụng với ứng suất gây oằn là [11]:

$$\sigma_{Loc,a} = \frac{1}{(b_f/2)^2 t_f} \left(7 \sqrt{\frac{D_L D_T}{1 + 4.12 \zeta_{I-flange}}} + 12D_s \right) \quad (4)$$

$$\text{Trong đó } \zeta_{I-flange} = \frac{(D_T)_f}{k_{I-flange} (b_f/2)} \quad \text{và } k_{I-flange} = \frac{(D_T)_w}{d_w} \left[1 - \frac{\sigma_{flange} (E_L)_w}{\sigma_{web} (E_L)_f} \right] \quad (5)$$

Trong công thức (5) $k_{I-flange}$ là hằng số lò xo để tính đến ràng buộc xoắn ở vùng liên kết bản cánh - bản bụng và $h_w (=h-t_f)$ là chiều cao bản bụng.

Nếu $\sigma_{Loc,flange}/(E_L)_f > \sigma_{Loc,web}/(E_L)_w$, bản bụng sẽ oằn trước và ứng suất tới hạn gây oằn cục bộ của tiết diện chữ I được xác định như sau [3], [11]:

$$\sigma_{Loc,a} = \frac{\pi^2}{h_w^2 t_w} \left[\frac{2\sqrt{D_L D_T (1 + 4.14 \xi_{I-web})}}{+ (D_{LT} + 2D_s) (2 + 0.62 \xi_{I-web}^2)} \right] \quad (6)$$

$$\text{Trong đó } \xi_{I-web} = \frac{1}{1 + 10 \zeta_{I-web}} \quad \text{và } k_{I-web} = \frac{4(D_T)_f}{b_f} \left[1 - \frac{\sigma_{Loc,web} (E_L)_f}{\sigma_{Loc,flange} (E_L)_w} \right]$$

$$= \frac{1}{1 + 10 \left[(D_T)_w / k_{I-web} d_w \right]} \quad (7)$$

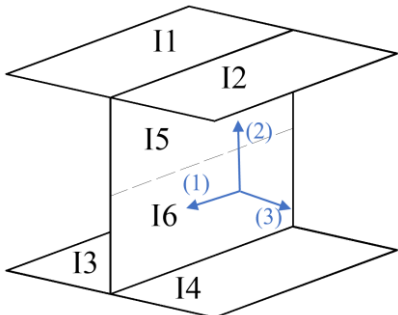
Tác giả [14] đã sử dụng hệ công thức đề xuất của Kollár [11] ở trên, xác định tải trọng gây oằn tới hạn của cột tiết diện chữ I kích thước $120 \times 60 \times 6$ mm và so sánh với giá trị thực nghiệm. Kết quả cho thấy, khác biệt giữa tính toán lý thuyết của Kollár và thực nghiệm là $< 15\%$, là chấp nhận được để áp dụng công thức của Kollár vào thực tế thiết kế.

3. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

Trong mô phỏng hoặc đánh giá ứng xử kết cấu, vật liệu PFRP được xem là vật liệu trục hướng hoặc vật liệu đẳng hướng theo phương ngang ([3] [15]). Vật liệu trục hướng có ba trục vuông góc với tính chất vật liệu của mỗi trục khác nhau. Vật liệu đẳng hướng theo phương ngang là trường hợp đặc biệt của vật liệu trục hướng, với tính chất vật liệu của hai phương trong một mặt phẳng ngang là như nhau. Trong cấu trúc của PFRP, các sợi thủy tinh đơn hướng có đóng góp quan trọng nhất vào sức kháng của vật liệu và chúng được phân bố theo chiều dọc của cấu kiện. Với hai hướng còn lại, vật liệu phân bố có thể được xem cơ bản là giống nhau. Do đó mô phỏng PFRP như vật liệu đẳng hướng theo phương ngang là phù hợp.

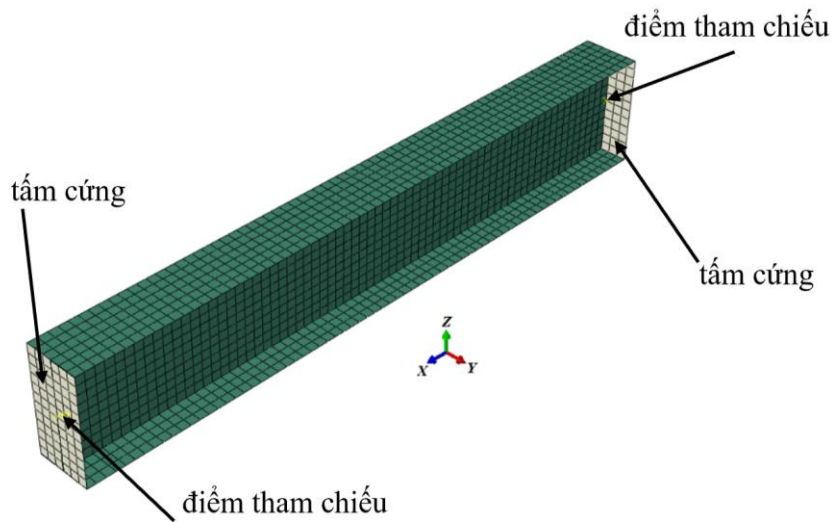
Đặt hướng “1” là hướng dọc trục, hướng “2” là hướng vuông góc với hướng 1, và hướng “3” là hướng theo bề dày của tiết diện. Ví dụ với bản bụng, các hướng “1”, “2”, “3”, được mô tả trên Bảng 1, cột (1). Với cách đặt tên như vậy, ta có 9 tham số vật liệu cần thiết cho mô hình là $E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23}, \nu_{12}, \nu_{13}$ và ν_{23} . Hướng “2” và “3” có tính chất cơ lý được xem là tương đối giống nhau [3], do đó mô hình mô phỏng phần tử hữu hạn chỉ cần 6 tham số, bao gồm: $E_1, E_2=E_3, G_{12}=G_{13}, G_{23}, \nu_{12}=\nu_{13}, \nu_{23}$. Ngoài ra khi phân tích ứng suất trong mặt phẳng, chỉ có các tham số của mặt phẳng 1-2, bao gồm E_1, E_2, G_{12} và ν_{12} là cần thiết [15], giá trị của G_{23} và ν_{23} được xem là có ảnh hưởng rất nhỏ. Trong nghiên cứu này ta chọn ν_{23} với giá trị là 0,35 là giá trị tối đa theo lý thuyết [15]. Từ đó $G_{23} = \frac{E_2}{2(1+\nu_{23})} = 4 \text{ GPa}$. Các tham số còn lại được xác định bằng thực nghiệm và được cung cấp ở Bảng 1.

Bảng 1. Tính chất vật liệu của bản trong phân tích phần tử hữu hạn ABAQUS.

Tiết diện (1)	Cánh I1 (2)	Cánh I2 (3)	Cánh I3 (4)	Cánh I4 (5)	Bụng I5 (6)	Bụng I6 (7)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
E_1 (GPa)	34,4	29,7	34,5	31,2	26,3	26,2
E_2 (GPa)	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8
G_{12} (GPa)	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
ν_{12}	0,23	0,25	0,24	0,21	0,22	0,23

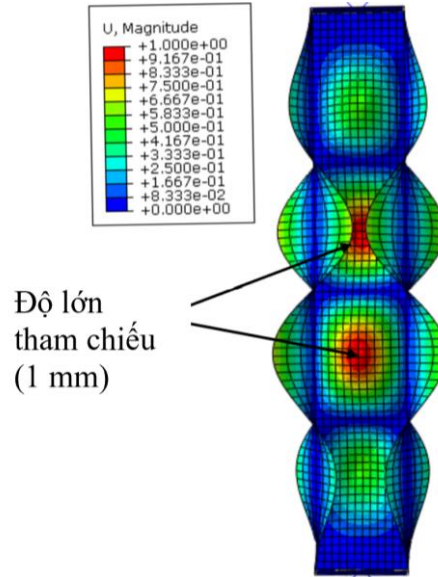
Việc lựa chọn phần tử có ảnh hưởng rất quan trọng đến tốc độ tính toán và tính chính xác của mô hình. Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phần tử tám dày S8R. S8R sử dụng dụng 8 nút cho mỗi phần tử với công thức ma trận độ cứng áp dụng lý thuyết tám Mindlin cho biến dạng cắt bậc nhất. S8R có khả năng tương thích về chuyển vị, giảm thiểu sự đứt đoạn giữa cạnh phần tử và được các nghiên cứu trước đây đề xuất trong mô phỏng vật liệu PFRP ([16]–[18]).

Tải trọng trong nghiên cứu này là tải trọng tập trung tác dụng ở đầu cột. Điều kiện biên là ràng buộc ngàm. Điều kiện biên được mô phỏng bằng cách sử dụng hai bản cứng (rigid plate) không biến dạng, gắn vào hai đầu cột như trên Hình 7. Chuyển vị của các bản cứng được khống chế bởi các điểm tham chiếu (reference points) nằm trên mỗi bản. Sử dụng chức năng “khống chế đa điểm” để liên kết điểm tham chiếu (điểm chủ) với điểm phụ thuộc (các cạnh của tiết diện chữ I tiếp xúc với bản cứng), biến dạng của toàn bộ mặt này được khống chế qua biến dạng của điểm tham chiếu, tránh các biến dạng cục bộ không mong muốn phát sinh ở đầu cột. Ràng buộc ngàm được thực hiện bằng cách ràng buộc điểm tham chiếu. Tại một điểm tham chiếu sẽ ràng buộc toàn bộ 3 chuyển vị và 3 góc xoay để hình thành ngàm. Ở điểm tham chiếu còn lại sẽ bị ràng buộc 2 chuyển vị và 3 góc xoay. Chuyển vị theo hướng dọc trục của cột được tự do để làm điểm tác dụng lực.

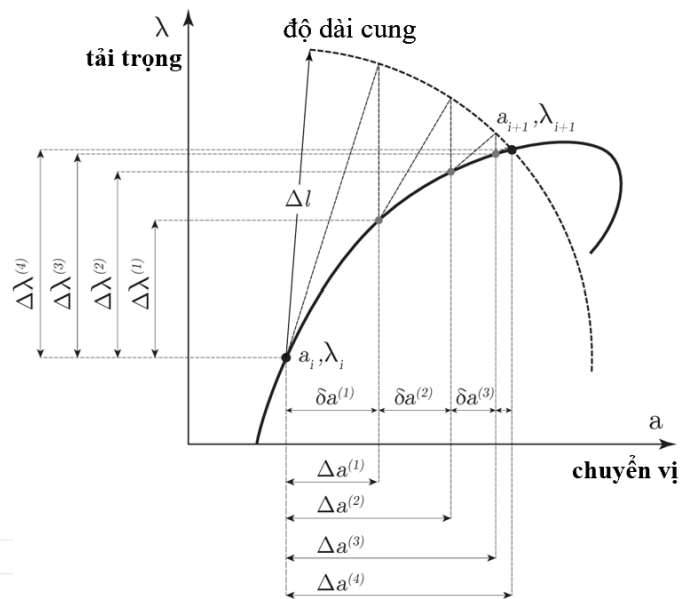


Hình 7. Mô hình hóa điều kiện biên của cột FRP.

Khuyết tật về tính chất vật liệu (modun đàn hồi theo phương dọc E_1 của các bản là khác nhau, tô đậm trong Bảng 1), với các giá trị cung cấp từ cột (2) đến cột (7) ở Bảng 1, được đưa vào mô hình phần tử hữu hạn ABAQUS bằng cách định nghĩa 6 loại vật liệu và gán cho 6 tiết diện bản tương ứng đại diện cho các bản cánh và bản bụng. Khuyết tật hình học sử dụng trong nghiên cứu này là khuyết tật có hình dạng như Hình 8. Khuyết tật hình học có được bằng phân tích mất ổn định cục bộ qua lời giải giá trị đặc trưng (phân tích nhiễu loạn tuyến tính trong ABAQUS). Phương pháp này bỏ qua sự thay đổi hình học của cột khi gia tăng tải trọng tới điểm phân nhánh gây phá hoại. Các nhiễu loạn được đưa vào tiết diện đã chia lưới và tìm kiếm các khiếm khuyết kích hoạt sự mất ổn định do hiệu ứng bậc hai, từ đó tìm ra hệ số tải trọng (nghiệm của lời giải giá trị đặc trưng) của phá hoại mất ổn định cục bộ. Kết quả của phân tích nhiễu loạn tuyến tính cho ta giá trị đặc trưng, chính là tải trọng gây oằn tới hạn, và một hình dạng oằn tương ứng (ví dụ như biến dạng trên Hình 8). Sử dụng hình dạng oằn này để điều chỉnh tọa độ các nút của mô hình hoàn hảo (không có khuyết tật hình học) ta có mô hình mới với khuyết tật hình học. Về độ lớn của khuyết tật, Hình 8 đang cho giá trị khuyết tật tham chiếu với giá trị biến dạng lớn nhất là 1 mm. Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng 5 trường hợp giá trị khuyết tật hình học có độ lớn: 0 mm (không khuyết tật), 0,1 mm (khuyết tật rất nhỏ), 0,5 mm, 1mm và 2 mm (khuyết tật lớn) để xem xét ảnh hưởng độ lớn khuyết tật hình học tới ứng xử của cột dưới tải trọng tập trung.



Hình 8. Hình dạng sử dụng trong khuyết tật hình học.



Hình 9. Mô tả phương pháp phân tích ổn định phi tuyến bằng phương pháp Riks sửa đổi.

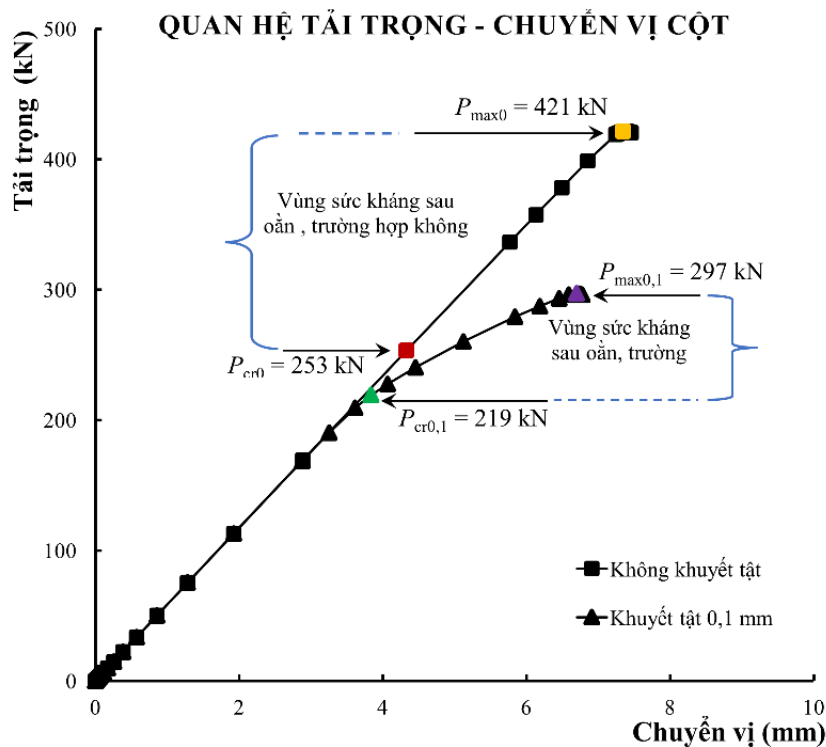
Phân tích ổn định phi tuyến sử dụng phương pháp Riks sửa đổi (phương pháp độ dài cung), được Riks [19] đề xuất và được Crisfield [20] điều chỉnh để cải thiện về hiệu quả tính toán. Trong phương pháp này, cả chuyển vị và tải trọng đều được xem là các biến thay đổi đồng thời (khác với phương pháp của Newton là giả thiết tải trọng là biến để tìm chuyển vị tương ứng). Phương trình bổ sung để giải hệ phương trình trong mỗi trạng thái cân bằng là phương trình độ dài cung, trong đó các bước gia tăng được xác định bởi đường tròn bán kính Δl với điểm gia tăng tiếp theo là giao điểm giữa đường tròn với đường tải trọng hiện tại (load path), như mô tả trên Hình 9. Phương pháp này được xem là phù hợp hơn phương pháp Newton, đặc biệt khi

xuất hiện nhiều điểm tới hạn trong phân tích ổn định phi tuyến. Phân tích ổn định phi tuyến giúp nghiên cứu được ứng xử thực tế của kết cấu như quan hệ giữa tải trọng/chuyển vị hoặc ứng suất/ biến dạng. Lưu ý rằng khi kết cấu không có khiếm khuyết và là vật liệu đẳng hướng với tính chất vật liệu là tuyến tính và tải trọng tác dụng đúng tâm thì phân tích ổn định phi tuyến sẽ không cho kết quả hội tụ. Trong nghiên cứu này, do vật liệu luôn có khuyết tật (tính chất vật liệu trên các bản là khác nhau) nên cấu kiện không còn đối xứng và lực tác dụng đúng tâm trên thực tế sẽ là lệch tâm, vì vậy phân tích ổn định phi tuyến cho kết quả hội tụ được ngay cả khi không có khuyết tật hình học.

4. ẢNH HƯỞNG CỦA KHUYẾT TẬT

Hình 10 là đồ thị quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị cột cho hai trường hợp: (1) không có khuyết tật hình học, thể hiện qua các điểm số liệu hình vuông; (2) khuyết tật hình học rất nhỏ (giá trị khuyết tật lớn nhất là 0,1 mm), thể hiện qua các điểm số liệu hình tam giác. Phương pháp xác định giá trị tải trọng tới hạn gây oằn cục bộ cho trường hợp không có khuyết tật hình học P_{cr0} đã được trình bày trong nghiên cứu của tác giả [21] với tải trọng gây oằn tới hạn trong trường hợp này là $P_{cr0} = 253$ kN và giá trị tải trọng tối đa là $P_{cr,max0} = 421$ kN. Với trường hợp có khuyết tật hình học rất nhỏ (0,1 mm), có thể thấy từ

Hình 10 rằng ảnh hưởng của khuyết tật lên ứng xử của cột là rất lớn. Đầu tiên là sức kháng sau oằn tối đa của cột suy giảm đáng kể khi có khuyết tật hình học dù là rất nhỏ, giảm từ 421 kN xuống còn 297 kN (giảm 29,4%).

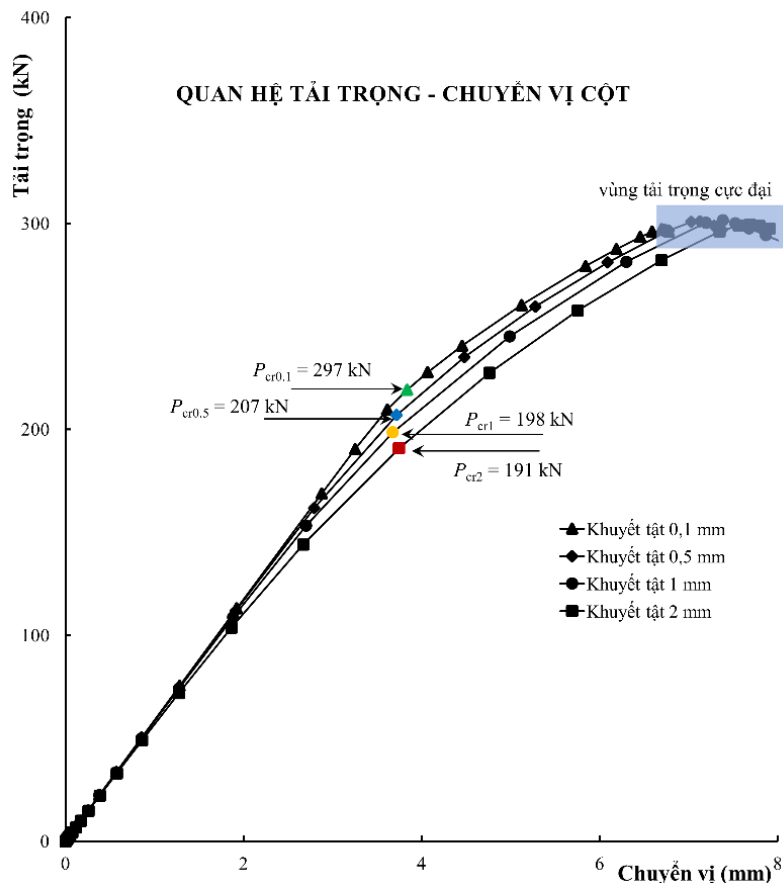


Hình 10. Quan hệ tải trọng - chuyển vị cột, trường hợp không khuyết tật và khuyết tật hình học 0,1 mm.

Để xác định tải trọng gây khởi phát oằn cục bộ, rõ ràng khi khuyết tật xuất hiện ngay từ bước gia tải đầu tiên thì không thể xác định điểm khởi phát oằn cục bộ thông qua biến dạng ngoài mặt phẳng của bản cánh hay bản bụng như trong nghiên cứu trước đây [21]. Trong trường hợp này có thể giả thiết điểm khởi phát oằn cục bộ là thời điểm độ cứng kết cấu có thay đổi lớn. Đây là phương pháp thường được các nhà nghiên cứu sử dụng khi điểm khởi phát gây oằn không thể xác định rõ ràng. Tác giả lựa chọn thời điểm độ cứng bắt đầu suy giảm hơn 50%. Sử dụng giả thiết này, với trường hợp khuyết tật hình học rất nhỏ (0,1 mm), ta có $P_{cr0,1} = 219$ kN (điểm tam giác màu xanh lá trên

Hình 10). Như vậy giá trị tải trọng gây oằn khi không có khuyết tật giảm 13,4% so với trường hợp khuyết tật 0,1 mm.

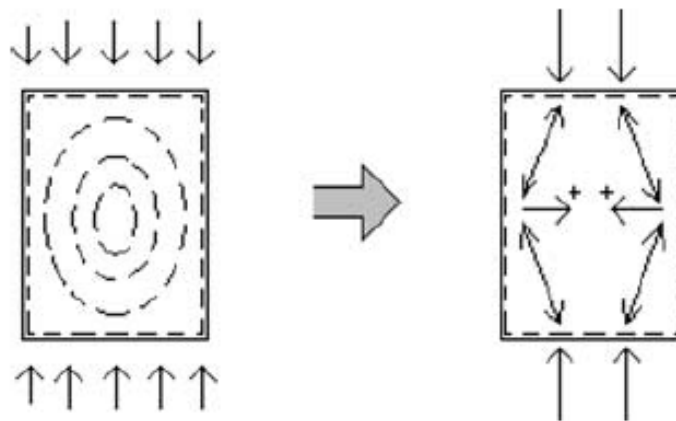
Về tăng trưởng sức kháng sau oằn (post-buckling resistance): Trường hợp không có khuyết tật hình học, sức kháng sau oằn tăng thêm 66,4% ; trường hợp khuyết tật 0,1 mm, sức kháng sau oằn chỉ tăng thêm 35,6%. Ngoài ra giá trị tải trọng cực đại của hai trường hợp chênh lệch rất cao, $(P_{max0} - P_{max0,1}) / P_{max0} = 29,4\%$. Sử dụng công thức của Kollár [11] như trình bày ở trên để xác định giá trị ứng suất tới hạn gây oằn cục bộ trong trường hợp này, ta có ứng suất gây oằn cục bộ là 151 MPa, tương ứng với tải trọng gây oằn cục bộ 214 kN. Giá trị này nhỏ hơn 2,3% so với trường hợp khuyết tật 0,1 mm và nhỏ hơn 18,2% so với trường hợp không có khuyết tật hình học.



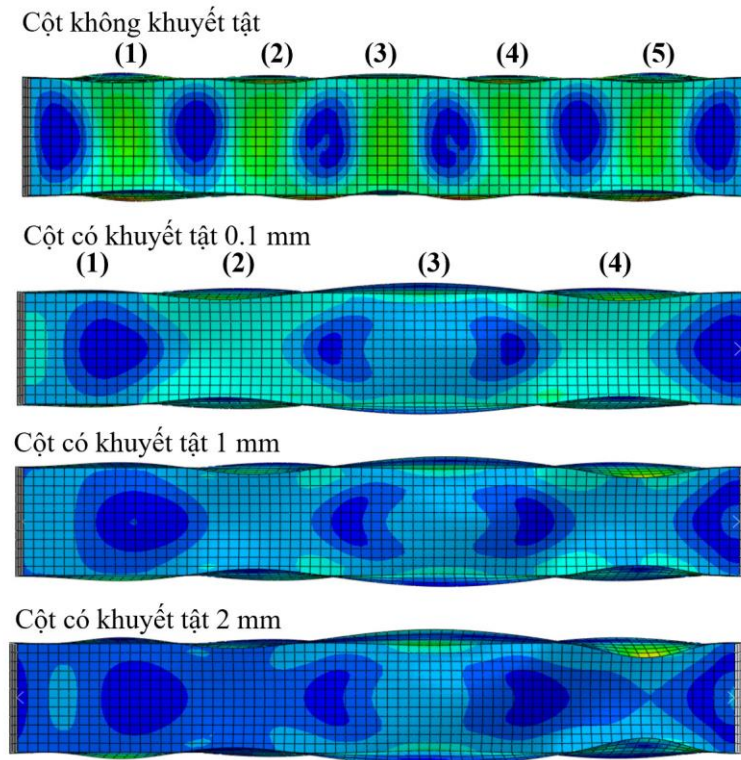
Hình 11. Quan hệ tải trọng – chuyển vị của các trường hợp khuyết tật.

Hình 11 là đồ thị quan hệ tải trọng - chuyển vị cột cho 4 trường hợp khuyết tật hình học với độ lớn : 0,1 mm ; 0,5 mm ; 1 mm và 2 mm. Từ đồ thị trên, chúng ta thấy rằng với cả 4 trường hợp có khuyết tật, vùng tải trọng cực đại là gần như không thay đổi với các giá trị đều ở vùng 297 kN. Như vậy, thay đổi độ lớn của khuyết tật hình học không làm thay đổi sức kháng cực đại của cấu kiện. Điều này là do tác giả sử dụng mẫu khuyết tật có hình dạng giống với hình dạng cấu kiện khi mất ổn định cục bộ, như vậy khi cấu kiện khi bắt đầu mất ổn định cục bộ, sự thay đổi độ lớn khuyết tật sẽ được bao gồm vào trong biến dạng tổng thể của cấu kiện.

Cấu kiện sau khi oằn cục bộ sẽ có xuất hiện hiện tượng tái phân phối ứng suất như trên Hình 12 cho đến khi sức kháng đạt cực đại, nên cuối cùng thì ứng xử của các cấu kiện có khuyết tật sẽ giống nhau. Về tải trọng gây oằn, các giá trị xác định theo mức độ cứng suy giảm <50%, ta có các giá trị cho các trường hợp khuyết tật 0,1 mm ; 0,5 mm ; 1 mm và 2 mm lần lượt là $P_{cr0,1} = 297$ kN, $P_{cr0,5} = 207$ kN, $P_{cr1} = 198$ kN, $P_{cr2} = 191$ kN.



Hình 12. Tái phân phối ứng suất sau oằn cho tới trạng thái tải trọng cực đại [22].



Hình 13 Hình dạng sau oằn của các cột.

Hình 13 thể hiện hình dạng sau oằn của các cột tương ứng với các trường hợp không có khuyết tật và có khuyết tật. Về trực quan, có thể thấy rằng các cột khi có khuyết tật hình học, số lượng nửa bước sóng (half-wave length) đều là 4, trong khi với cột không có khuyết tật thì số lượng nửa bước sóng là 5. Như vậy, khuyết tật hình học làm thay đổi hình dạng sau oằn của cấu kiện sau khi tương tác với khuyết tật vật liệu và như vậy làm suy giảm sức kháng sau oằn của cấu kiện.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn ổn định phi tuyến bằng phần mềm ABAQUS, trong đó tính đến ảnh hưởng của khuyết tật về tính chất vật liệu (modun đàn hồi theo phương dọc trên các bản cánh và bản bụng của cấu kiện chữ I khác nhau) và khuyết tật hình học, lên tải trọng tới hạn gây oằn P_{cr} và tải trọng cực đại P_{max} . Các kết luận và kiến nghị được rút ra như sau:

- Biểu thức dạng đóng của Kollár là tương đối phù hợp để xác định giá trị tải trọng tới hạn gây oằn cục bộ của cột PFRP với khác biệt <15% khi so sánh với giá trị thực nghiệm. Giá trị từ công thức của Kollár nhỏ hơn 18,2% so với kết quả mô phỏng ổn định phi tuyến (không có khuyết tật hình học); nhỏ hơn 2,3% so với kết quả mô phỏng ổn định tuyến tính. Từ kết quả so sánh, tác giả đề xuất áp dụng công thức này vào việc xác định tải trọng tới hạn gây oằn cục bộ trong thiết kế cột PFRP chịu nén.

- Ảnh hưởng của khuyết tật hình học, dù với độ lớn rất nhỏ (0,1 mm), gây ảnh hưởng rất lớn đến tải trọng gây oằn tới hạn của cột PFRP (giảm 13,4%) và đặc biệt làm suy giảm nghiêm trọng sức kháng sau oằn (giảm 29,4%).
- Gia tăng độ lớn của khuyết tật hình học không làm thay đổi sức kháng cực đại sau oằn mà chỉ làm suy giảm tải trọng tới hạn gây oằn. Nguyên nhân là hình dạng khuyết tật hình học sử dụng trong mô hình là cùng giống với hình dạng khi oằn cục bộ của cột. Nếu tác giả sử dụng một hình dạng khuyết tật khác thì sức kháng cực đại sau oằn có thể thay đổi cùng với độ lớn khuyết tật.
- Do ảnh hưởng của khuyết tật vật liệu và hình học là lớn, tác giả thấy rằng cần thiết đề xuất hệ số khiếm khuyết (imperfection factor) phù hợp trong đường cong thiết kế của cột PFRP trong quy trình để đảm bảo về tính không chắc chắn của các khuyết tật trong thiết kế.
- Do sức kháng mất ổn định cột phụ thuộc vào bề dày, bề rộng chịu tải của bản mà không phụ thuộc vào chiều dài cột. Đề tăng sức kháng này, khi cần thiết có thể gia tăng bề dày của bản hoặc bề rộng phần chịu tải của cấu kiện. Ngoài ra việc bố trí các sườn tăng cứng ngang sao cho bề rộng khoang (theo phương dọc) nhỏ hơn bề rộng chịu tải cũng giúp tăng sức kháng mất ổn định cục bộ của cột PFRP.
- Việc không chế các khuyết tật trong quá trình sản xuất, lắp đặt và sử dụng là cần được cải thiện để gia tăng khả năng ổn định cục bộ (và tổng thể) của cấu kiện.
- Các nghiên cứu tiếp theo về các loại khuyết tật hình học với hình dạng khác, và khuyết tật về tải trọng (tác dụng lệch tâm) là cần thiết để cung cấp thêm hiểu biết về ảnh hưởng của từng khuyết tật và tương tác giữa các khuyết tật lên sức kháng của cấu kiện.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo này là một phần của đề tài NKCH cấp trường, Trường ĐH Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh, mã số KHDN2301.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Tâm gia cường trong dầm bê tông cốt thép, <https://www.structuremag.org/?p=8643> , Truy cập ngày 1 tháng 6 năm 2023.
- [2]. Thanh GFRP trong công trình cầu, <https://www.owenscorning.com/en-us/composites/applications/bridge-construction> , Truy cập ngày 1 tháng 6 năm 2023.
- [3]. L. C. Bank, Composites for Construction. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006. <https://doi.org/10.1002/9780470121429>
- [4]. J. T. Mottram, Determination of critical load for flange buckling in concentrically loaded pultruded columns, Compos B Eng, 35 (2004) 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2003.08.006>.
- [5]. T. T. Nguyen, A. Nguyen Tuan, Thí nghiệm xác định modun đàn hồi theo phương dọc và hệ số nở ngang của vật liệu polyme gia cường sợi thủy tinh (GFRP), Transport and Communications Science Journal, 74 (2023) 147–159.
- [6]. W. P. Stoddard, Lateral-torsional buckling behavior of polymer composite I-shaped members., Georgia Institute of Technology, USA, 1997.
- [7]. E. E. Lundquist, E. Z. Stowell, and E. H. Schuette, Principles of moment distribution applied to stability of structures composed of bars or plates, 1943.

- [8]. T. C. on P. of S. P. S. of the S. P. R. C. of the T. C. on R. of ASCE, Structural Plastics Selection Manual, American Society of Civil Engineers, 1985.
- [9]. J. L. Clarke, Structural design of polymer composites: Eurocomp design code and background document. CRC Press, 2003.
- [10].F. Bleich, Buckling strength of metal structures, Mc Graw-Hill Book Company, Inc., Cardnr. 51-12588, 1952.
- [11].L. P. Kollár, Local Buckling of Fiber Reinforced Plastic Composite Structural Members with Open and Closed Cross Sections, Journal of Structural Engineering, 129 (2003) 1503–1513. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:11\(1503\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:11(1503))
- [12].P. Qiao, L. Shan, Explicit local buckling analysis and design of fiber-reinforced plastic composite structural shapes, Compos Struct, 70 (2005) 468–483, <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2004.09.005>
- [13].ASCE, Pre-standard for load and resistance factor design (LRFD) of pultruded fiber reinforced polymer (FRP) structures, Arlington,VA,USA, 2010.
- [14].T.-T. Nguyen, Local buckling resistance of Pultruded FRP columns: Theoretical predictions vs. Experimental study, Journal of Transportation Science and Technology, 12 (2023), [https://doi.org/10.55228/JTST.12\(1\).33-43](https://doi.org/10.55228/JTST.12(1).33-43)
- [15].M. E. Tuttle, M. E. Tuttle, Structural Analysis of Polymeric Composite Materials, Chapman and Hall/CRC, 2012. <https://doi.org/10.1201/b13672>.
- [16].P. Qiao, G. Zou, and J. F. Davalos, Flexural-torsional buckling of fiber-reinforced plastic composite cantilever I-beams, Compos Struct, 60 (2003) 205–217, [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00304-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00304-5)
- [17].T. T. Nguyen, S. Selvaraj, T.-M. Chan, J. T. Mottram, Influence of Combined Imperfections on Lateral-torsional Buckling Behavior of Pultruded FRP Beams, Compos Struct, 2002, p.p 116385, <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.116385>.
- [18].L. Shan, P. Qiao, Flexural-torsional buckling of fiber-reinforced plastic composite open channel beams, Compos Struct, 68 (2005) 211–224. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.03.015>
- [19].E. Riks, An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems, Int J Solids Struct, 15 (1979) 529–551. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(79\)90081-7](https://doi.org/10.1016/0020-7683(79)90081-7)
- [20].M. A. Crisfield, A fast incremental/iterative solution procedure that handles ‘snap-through,’ Comput Struct, 13 (1981) 55–62, [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(81\)90108-5](https://doi.org/10.1016/0045-7949(81)90108-5)
- [21].T. T. Nguyen, Ứng xử mất ổn định cục bộ của kết cấu composite có tính đến độ nhảy của khiếm khuyết hình học và vật liệu, Thuyết minh đề tài KHDN2301 - Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh, 2023.
- [22].B. Åesson, Plate Buckling in Bridges and Other Structures, CRC Press, 2014. <https://doi.org/10.1201/9781482266030>