

Xác định sức kháng oằn cục bộ cột composite có khiếm khuyết về tính chất vật liệu bằng phân tích ổn định phi tuyến

Determination of local buckling resistance of Fiber-reinforced composite column having material imperfection by nonlinear buckling analysis

Nguyễn Tiên Thủy

Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Tác giả liên hệ: thuy.nguyen@ut.edu.vn

Tóm tắt:

Vật liệu FRP sản xuất bằng phương pháp đúc kéo có nhiều ứng dụng trong lĩnh vực xây dựng. Phương pháp đúc kéo với nhiều công đoạn khó kiểm soát, có thể gây ra các khiếm khuyết về tính chất vật liệu. Bài báo này đề xuất phương pháp xác định sức kháng mất ổn định cục bộ của cột composite tiết diện chữ I, trong trường hợp vật liệu trên các bản cánh và bản bụng là không đồng nhất. Nghiên cứu cho thấy tải trọng tới hạn gây oằn trong phân tích phi tuyến có giá trị lớn hơn 15.5% so với giá trị xác định bằng lời giải phương trình đặc trưng (phân tích nhiễu loạn tuyến tính). Ngoài ra sức kháng sau oằn của cấu kiện lớn hơn 66.4% so với tải trọng gây oằn tới hạn. Tác giả đề xuất phương pháp mô phỏng và xác định sức kháng này được áp dụng phổ biến cho vật liệu PFRP khi nghiên cứu về ổn định của cột hoặc dầm dưới các điều kiện tải trọng, điều kiện biên và với nhiều tổ hợp khiếm khuyết khác nhau.

Từ khóa: Mất ổn định cục bộ; ABAQUS; Phân tích phi tuyến; Khiếm khuyết vật liệu.

Abstract:

The pultruded Fiber Reinforced Polymer (PFRP) material manufactured by the “pultrusion” process has many applications in the construction industry. However, the production process involves several difficult-to-control stages, which can lead to material defects. This paper proposes a method to determine the local buckling resistance of FRP composite I column having material imperfection on the flanges and web. The research has shown that the buckling load determined in nonlinear buckling analysis is 15.5% higher than that obtained from eigenvalue solution (linear perturbation analysis). In addition, the post-buckling resistance of the column is 66.4% higher compared to the local buckling load. The author suggests that this modelling and determination method be widely applied to PFRP structures when studying the instability of columns or beams under various loadings and boundary conditions and different combinations of defects.

Keywords: Local buckling; ABAQUS; Nonlinear analysis; Material imperfection.

1. Giới thiệu

Vật liệu composite gia cường sợi (FRP), sản xuất bằng phương pháp đúc kéo (pultrusion) là vật liệu mới có nhiều ứng dụng trong lĩnh vực xây dựng công trình giao thông (Hình 1) do nhiều ưu điểm nổi trội so với vật liệu truyền thống (thép, bê tông, nhôm, gỗ) như: Cường độ cao (đạt 400 MPa), trọng

lượng nhẹ (tỉ trọng bằng 1/4 thép), chống ăn mòn tốt, cách điện, cách từ,...

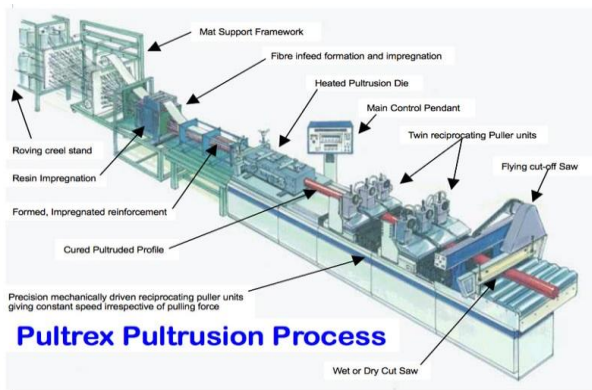
Quy trình đúc kéo là quy trình sản xuất composite liên tục, ít gây tác hại đến môi trường với chi phí hợp lý. Trong quy trình này (Hình 2), các kết cấu sợi được kéo qua khuôn đúc theo một kiến trúc sợi (bố trí số lượng và vị trí các lớp sợi) nhất

định, sau đó trải qua quá trình tẩm nhựa bằng cách di chuyển kết cấu sợi qua bể polyme ướt hoặc bơm thẳng nhựa vào khuôn đúc được làm nóng. Sợi được hóa rắn hình thành hình sản phẩm định hình (cấu kiện PFRP) khi bắt đầu quá trình xây dựng liên kết ngang trong các sợi gia cường đã được tẩm nhựa.



Hình 1. Sử dụng PFRP vào cầu đường bộ [1]

Việc khống chế nhiệt độ trong giai đoạn này có ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng sản phẩm xuất xưởng. Nhiệt độ thấp có thể làm cho thành phẩm không đủ độ cứng, trong khi nhiệt độ cao có thể làm nứt bề mặt thậm chí gây ra các vết nứt trong lõi cấu kiện (khiếm khuyết), ảnh hưởng tới sức kháng cũng như khả năng chịu ăn mòn và bền thời tiết.



Hình 2. Quy trình đúc kéo sản xuất cấu kiện PFRP.

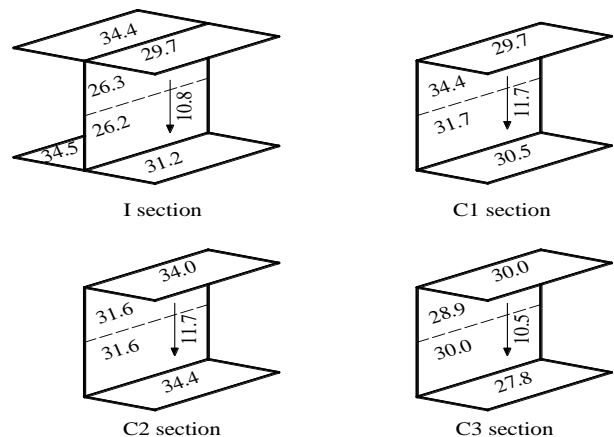
Nguồn: <https://pultrex.com/pultrusion-process/>

Là loại vật liệu mới, xuất hiện thương mại từ những năm 1970, với quy trình sản xuất được điều chỉnh và chuẩn hóa theo thời gian. Ở thời điểm hiện tại, quy trình thiết kế cho vật liệu PFRP chưa có bản chính thức. ASCE [2] công bố quy trình thiết kế theo hệ số tải trọng và sức kháng (LRFD) ở dạng thử nghiệm từ năm 2013 cho vật liệu PFRP. Các công thức và hệ số trong quy trình này được xây dựng dựa trên số lượng hạn chế các kết quả thí nghiệm và nghiên cứu liên quan. Năm 2016, Trung tâm nghiên cứu chung của Ủy ban châu Âu [3] xuất bản ấn

phẩm Triển vọng hướng dẫn thiết kế của FRP, đặt nền móng cho dự thảo tiêu chuẩn Eurocode cho vật liệu này. Năm 2018, Mottram và Henderson [4] công bố hướng dẫn thiết kế cầu FRP, trong đó đề xuất các công thức cơ bản thiết kế cầu theo triết lý Eurocode. Hiện nay, quy trình Eurocode chính thức cho FRP (dự kiến ban hành trước năm 2030) đang trong quá trình chuẩn bị dự thảo với số lượng thí nghiệm và nghiên cứu liên quan vẫn còn hạn chế.

Khiếm khuyết là yếu tố ảnh hưởng lớn đến ứng xử của kết cấu dưới các điều kiện tải trọng. Với vật liệu PFRP, do quy trình sản xuất đặc thù và tiêu chuẩn kỹ thuật của các hãng sản xuất là khác nhau, do đó các loại khiếm khuyết và độ lớn khiếm khuyết cũng khác nhau.

Khiếm khuyết đầu tiên có ảnh hưởng lớn, nhưng ít được đề cập thuộc về tính chất vật liệu. Nhiều nghiên cứu cho thấy, modun đàn hồi theo phương dọc của các bản cánh tiết diện chữ I về hai phía so với trục bản bụng có thể khác nhau tương đối lớn [5]. Hình 3 thể hiện modun đàn hồi trên các bản của tiết diện chữ I với modun đàn hồi trên bản cánh về hai phía của một tiết diện chữ I (hãng sản xuất: Fiberline A/S, Đan Mạch) có giá trị thực nghiệm lớn nhất là 34.5 GPa, lớn hơn giá trị bé nhất xác định được 29.7 GPa là 15.5%. Khiếm khuyết này có thể được xem là tương đối phổ biến với vật liệu PFRP. Stoddard [6] cũng tìm thấy sự khác biệt modun đàn hồi về hai phía bản bụng là 13.3% trên cấu kiện của Strongwell (Hoa Kỳ).

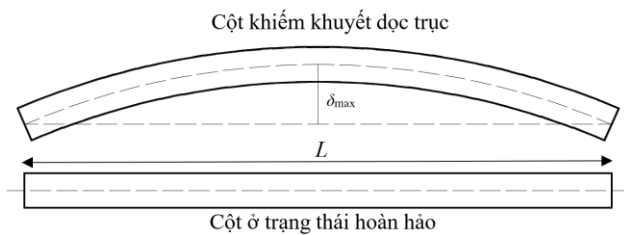


Hình 3. Modun đàn hồi theo phương dọc [5]

Khi khiếm khuyết này xuất hiện, cấu kiện đối xứng về hình học trở nên không còn đối xứng trên

thực tế, như vậy, lực tác dụng đúng tâm hình học, trên thực tế sẽ lệch tâm, gây ra các moment phụ tác dụng, làm thay đổi sức kháng.

Ngoài ra từ quy trình sản xuất ở trên, cấu kiện được kéo qua khuôn đúc với nhiệt độ giảm dần khi ra khỏi khuôn. Nhiệt độ giảm không đều, kết hợp với quá trình vận chuyển, lưu kho có thể tạo ra các khiếm khuyết về hình học của cấu kiện. Hình 4 thể hiện khiếm khuyết của một cấu kiện theo phương dọc trục. Các đo đạc trên thực tế cho thấy, khiếm khuyết này có thể đạt $\delta_{max} = L/800$, là giá trị rất lớn [7], gây bất lợi cho khả năng chịu tải của cấu kiện.



Hình 4. Cột ở trạng thái hoàn hảo và khiếm khuyết.

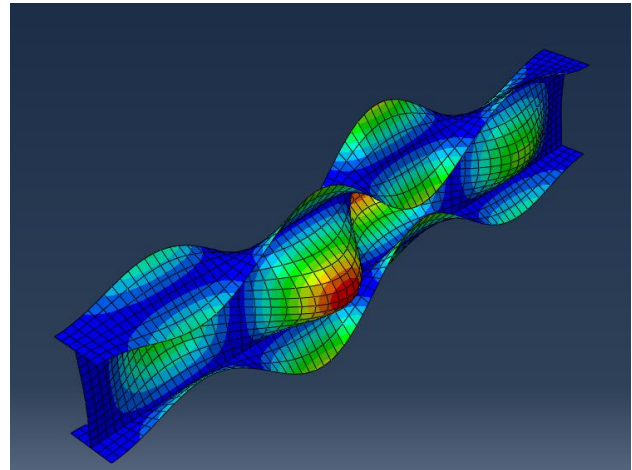
Qua phân tích ở trên, có thể thấy rằng các khiếm khuyết đã nêu là cố hữu và luôn tồn tại trong thực tế. Sự xuất hiện của chúng gây ảnh hưởng lên ứng xử của dầm hoặc cột dưới các điều kiện tải trọng và điều kiện biên khác nhau. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn tuyến tính (phân tích giá trị đặc trưng) và phi tuyến bằng ABAQUS, để đánh giá ảnh hưởng của khiếm khuyết về tính chất vật liệu đến ứng xử mất ổn định cục bộ của cột PFRP, cung cấp thêm thông tin và căn cứ cho việc xác định sức kháng ổn định của vật liệu. Nghiên cứu ảnh hưởng của tổ hợp khiếm khuyết vật liệu và hình học không thuộc phạm vi của bài báo này.

2. Mất ổn định cục bộ của cột

Mất ổn định cục bộ của cột chịu nén là một hình thức mất ổn định kết cấu, xảy ra khi bản cánh hoặc bản bụng có hiện tượng oằn, hình thành các biến dạng lượn sóng (như Hình 5).

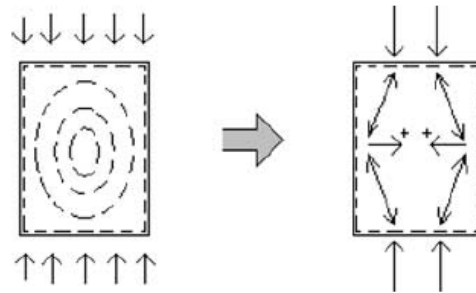
Tùy vào sức kháng của từng bản (có điều kiện biên, điều kiện tải trọng, tính chất vật liệu, kích thước bản khác nhau) mà bản bụng hoặc một trong các bản cánh (04 bản cánh trên tiết diện I)

có thể oằn trước, được xem là sức kháng oằn cục bộ của cột (hoặc dầm).



Hình 5. Biến dạng lượn sóng trên bản cánh và bản bụng do mất ổn định cục bộ gây ra [8]

Đặc trưng và khác biệt của mất ổn định cục bộ với mất ổn định tổng thể đó là phá hoại không xảy ra ngay sau khi khởi phát oằn cục bộ mà sức kháng sau oằn (post-buckling resistance) tiếp tục gia tăng, đạt giá trị lớn hơn tải trọng gây oằn rất nhiều. Lý do là sau khi mất ổn định, vùng vật liệu bị oằn ở phần bản lượn sóng chuyển phần chịu lực qua hai biên của bản cho tới khi vùng diện tích hai biên này chảy dẻo hoàn toàn [9], nhờ đó giúp sức kháng tiếp tục gia tăng như trên Hình 6.



Hình 6. Tái phân phối ứng suất từ trạng thái khởi phát oằn cục bộ tới trạng thái sau oằn [9]

Các cấu kiện có độ mảnh nhỏ thường xảy ra mất ổn định cục bộ, trong khi với các cấu kiện có độ mảnh lớn, mất ổn định tổng thể là hình thức phổ biến xảy ra hơn. Ứng xử mất ổn định cục bộ của dầm hoặc cột PFRP được nghiên cứu rộng rãi [10]–[15] với nhiều công thức xác định ứng suất gây oằn được đề xuất. So sánh công thức của Kollár [14] với kết quả thực nghiệm và mô phỏng phần tử hữu hạn tuyến tính giá trị đặc trưng [8],

cho thấy công thức của Kollár là phù hợp để xác định ứng suất gây oằn cục bộ trên cấu kiện PFRP.

3. Mô phỏng phần tử hữu hạn

Độ chính xác và tính phù hợp của mô phỏng phần tử hữu hạn (FEA) phụ thuộc vào việc lựa chọn phương pháp mô hình hóa, loại phần tử và mật độ lưới. ABAQUS cung cấp ba phương pháp để mô hình vật liệu tấm composite, bao gồm: (i) *phương pháp vi mô*: keo và vật liệu gia cường được mô hình riêng rẽ; (ii) *phương pháp vĩ mô*: tấm vật liệu được mô hình như vật liệu trục hướng có 01 lớp và (iii) *phương pháp hỗn hợp*: tấm vật liệu được mô hình từ nhiều tấm vật liệu trục hướng rời rạc [7]. Do phương pháp 1, 3 yêu cầu tham số chi tiết về kiến trúc sợi và tính chất cơ lý của các thành phần vật liệu, trong phạm vi nghiên cứu chưa thể áp dụng, qua đó, tác giả lựa chọn sử dụng phương pháp 2 trong nghiên cứu này. Khi mô hình hóa vật liệu PFRP là các tấm trục hướng, cần có số liệu của 04 đặc tính vật liệu, bao gồm: E_L - modun đàn hồi theo phương dọc; E_T - modun đàn hồi theo phương ngang; G_{LT} - modun cắt trong mặt phẳng và ν_{LT} hệ số nở ngang. Các số liệu này được xác định bằng thực nghiệm và cung cấp ở Bảng 1 [5], [16].

Kết cấu PFRP được xem là kết cấu tường mỏng (Thin-walled), tác giả lựa chọn phần tử tấm để mô hình. Ba loại phần tử tấm phổ biến sử dụng để mô phỏng mất ổn định của cấu kiện PFRP bằng phần mềm ABAQUS là S4R, S4R5 và S8R [17]–[19]. Các nghiên cứu cho thấy sử dụng phần tử S8R cho vật liệu PFRP là phù hợp và có độ chính xác cao cho các kích thước lưới khác nhau. Do đó, trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phần tử S8R, đồng thời, sử dụng phân tích phi tuyến trên cột I. Phân tích phi tuyến giúp dự đoán ứng xử tải trọng - độ võng (biến dạng) bằng cách tác dụng tải trọng lên cột theo các gia số nhỏ và tính toán trạng thái biến dạng (cân bằng tĩnh) hiện tại ở mỗi gia số. Tải trọng gia tăng kéo theo biến dạng tuyến tính của cột cho đến khi hiện tượng mất ổn định cột xảy ra. Từ ứng xử của vật liệu

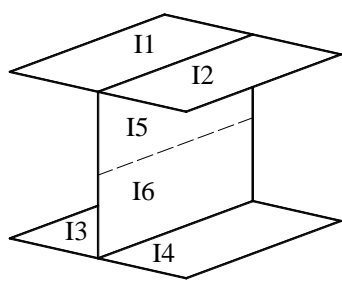
PFRP [5], có thể giả thiết rằng không có ứng xử phi tuyến của vật liệu đến khi hiện tượng mất ổn định xuất hiện. Giả thiết này chấp nhận được với điều kiện tải trọng (cho tới phá hoại) là ngắn hạn và biến dạng do tính đàn nhớt của vật liệu là nhỏ.

Về phân tích tuyến tính, tác giả sử dụng phương pháp nhiễu loạn tuyến tính (tìm lời giải giá trị đặc trưng) trong đó, bỏ qua sự thay đổi hình học của cấu kiện 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 làm kích hoạt mất ổn định do hiệu ứng bậc 2, từ đó, tìm ra hệ số tải trọng phá hoại mất ổn định. Lời giải này, cùng với công thức của Kollár [14] được sử dụng đồng thời với phân tích ổn phi tuyến để đánh giá kết quả.

Về phân tích ổn định phi tuyến, tác giả sử dụng phương pháp Riks sửa đổi trong ABAQUS. Phương pháp này xem xét chuyển vị và các bước tải trọng như các biến số thay đổi đồng thời. Phương pháp này ưu thế hơn so với phương pháp truyền thống của Newton-Raphson khi có thể xác định được nhiều điểm tới hạn trong cùng một phân tích. Các phân tích phần tử hữu hạn trên cấu kiện PFRP trước đây cho thấy phương pháp Riks sửa đổi là phù hợp và cho khả năng hội tụ tốt [20], [21]. Lưu ý rằng phân tích phi tuyến giúp tìm ứng xử thực tế giữa tải trọng và chuyển vị hoặc ứng suất/biến dạng. Tuy nhiên, việc xác định giá trị tải trọng gây oằn sẽ không trực quan và đơn giản như trong phân tích tuyến tính. Việc xác định được tác giả trình bày trong phần kết quả mô phỏng.

Về khiếm khuyết tính chất vật liệu, giá trị modun đàn hồi theo phương dọc của các bản cánh và bản bụng là khác nhau, do đó, trong mô hình, tác giả định nghĩa 06 giá trị về tính chất vật liệu riêng biệt và định nghĩa 06 tiết diện tương ứng. Những tiết diện này được gán lên các bản của mô hình phần tử hữu hạn để mô phỏng khiếm khuyết vật liệu. Các giá trị về tính chất vật liệu được thể hiện tại Bảng 1 [7].

Bảng 1. Các tham số tính chất vật liệu của cột PFRP.

Tiết diện	Cánh I1	Cánh I2	Cánh I3	Cánh I4	Bụng I5	Bụng I6
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
E_T (GPa)	34.4	29.7	34.5	31.2	26.3	26.2
E_L (GPa)	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8
G_{LT} (GPa)	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
ν_{LT}	0.23	0.25	0.24	0.21	0.22	0.23

Về lựa chọn kích thước lưới, để đảm bảo việc chia lưới là phù hợp với mô phỏng ổn định kết cấu, cần thiết phải phân tích một mô hình với nhiều kích thước chia lưới khác nhau nhằm tìm ra kích thước tối ưu. Nghiên cứu của tác giả [7] cho thấy với kích thước cạnh phần tử ≤ 15 mm, kết quả hội tụ là nhanh và chính xác.

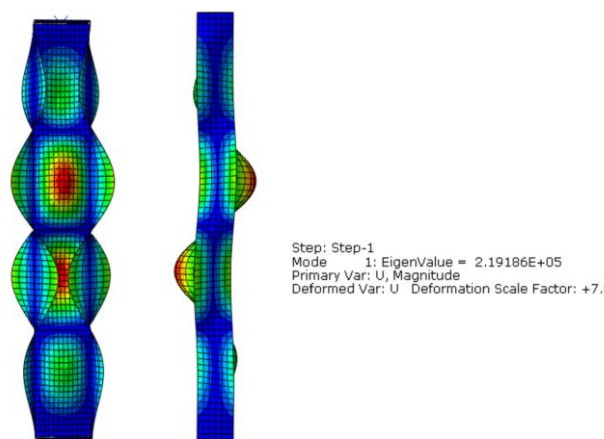
Mô phỏng được thực hiện trên cột PFRP chữ I, kích thước tiết diện $60 \times 120 \times 6$ mm, chiều dài cột 700 mm với điều kiện ngàm ở hai đầu cột. Phương pháp mô phỏng điều kiện biên được trình bày chi tiết trong nghiên cứu đã công bố của tác giả [8], nên sẽ không đề cập trong bài báo này. Về khai báo vật liệu trong ABAQUS, tác giả sử dụng khai báo vật liệu đàn hồi (elastic) dạng lớp (laminar). Độ dày của các bản cánh và bản bụng (dày 6 mm) được khai báo trong quá trình định nghĩa và gán tiết diện (section).

4. Kết quả mô phỏng

Mô phỏng FEA được tiến hành trên 03 trường hợp, bao gồm phân tích tuyến tính: (i) có khiếm khuyết vật liệu; (ii) không khiếm khuyết vật liệu; phân tích phi tuyến chỉ có khiếm khuyết vật liệu.

4.1. Kết quả mô phỏng tuyến tính và công thức lý thuyết

Kết quả mô phỏng tuyến tính tại trường hợp 1 (có khiếm khuyết vật liệu), cho kết quả giá trị đặc trưng $P_{cr} = 219$ kN với mode 1 (mode mất ổn định đầu tiên). Hình 7 thể hiện hình dạng mất ổn định của mode 1 với góc nhìn từ bản bụng và bản cánh.



Hình 7. Mất ổn định cục bộ (phân tích giá trị đặc trưng): (a) nhìn từ bản bụng; (b) nhìn từ bản cánh.

Khi vật liệu giả thiết là đồng chất (trường hợp 2); với giá trị cơ lý vật liệu như trên cánh I1 (cột (2) bảng 1), ta có giá trị $P_{cr} = 219$ KN, là không thay đổi so với trường hợp 1.

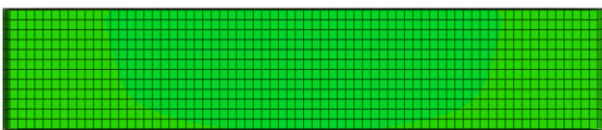
Với modun đàn hồi ở bản cánh 2 (cột (3), bảng 1), $P_{cr} = 212$ kN. Modun đàn hồi ở bản bụng (cột (6), bảng 1) $P_{cr} = 203$ kN.

Có thể thấy rằng trong phân tích phi tuyến, ảnh hưởng của khiếm khuyết vật liệu là không nổi trội. Điều này là do các hiệu ứng bậc hai, xảy ra khi vật liệu không đối xứng, sẽ không được xét đến trong phân tích nhiễu loạn tuyến tính.

4.2. Kết quả mô phỏng phi tuyến

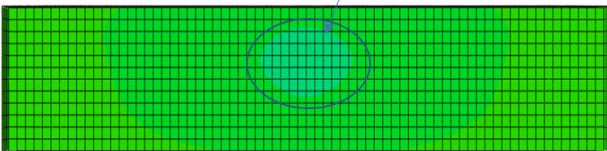
Trường hợp 3: Phân tích phi tuyến, với giá trị vật liệu của bản bụng và bản cánh là không đồng nhất, như trên bảng 1.

Để xem xét bản bị oằn trước, tác giả phân tích về biến dạng của các bản cánh và bản bụng qua các bước gia tăng tải trọng trong phân tích phi tuyến. Ở đây, tác giả xét biến dạng ngoài mặt phẳng, theo phương vuông góc với bản. Rõ ràng, khi oằn cục bộ chưa xảy ra, các bản chỉ chịu nén trong mặt phẳng và biến dạng ngoài mặt phẳng là gần như không có. Khi oằn cục bộ xuất hiện bản sẽ phát sinh biến dạng ngoài mặt phẳng. Hình 8 thể hiện biến dạng ngoài mặt phẳng, theo phương vuông góc với bản bụng ở bước gia tăng 32 (incremental 32), tải trọng ở bước này là $P = 337$ kN và bước gia tăng tải trọng 33, $P = 357$ kN. Từ Hình 8 (b) cho thấy biến dạng ngoài mặt phẳng bắt đầu xuất hiện từ bước này. Như vậy có thể kết luận, bản bụng khởi phát oằn ở giá trị tải trọng $P = 357$ kN, cao hơn 63% giá trị tải trọng tới hạn gây oằn trong phân tích nhiễu loạn tuyến tính ($P_{cr} = 219$ kN).



(a) Biến dạng ngoài mặt phẳng bản bụng ở bước gia tăng 32, tải trọng $P = 337$ kN.

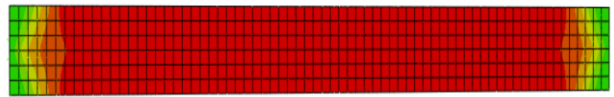
Biến dạng bắt đầu xuất hiện



(b) Biến dạng ngoài mặt phẳng bản bụng ở bước gia tăng 32, tải trọng $P = 357$ kN

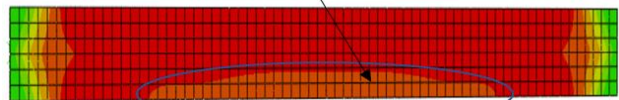
Hình 8. Biến dạng ngoài mặt phẳng theo phương vuông góc của bản bụng ở các bước gia tải khác nhau.

Tương tự như Hình 8, tại hình 9 thể hiện biến dạng ngoài mặt phẳng của bản cánh trên (bản cánh I1, I2 của tiết diện chữ I trong Bảng 1). Có thể bỏ qua ảnh hưởng từ các bước gia tải đầu tiên ở hai vùng đầu cột theo hiệu ứng St. Venant và tập trung vào vùng biến dạng phần giữa cột. Có thể thấy cho đến bước gia tăng 31, biến dạng ngoài mặt phẳng của bản cánh trên không thay đổi. Tại bước gia tăng 32, ở tải trọng $P = 337$ kN, biến dạng này có sự không đồng nhất (thay đổi phổ màu). Như vậy, xác định rằng bản cánh trên bắt đầu khởi phát oằn cục bộ ở tải trọng $P_{cr} = 337$ kN. So sánh với giá trị đặc trưng từ phân tích nhiễu loạn tuyến tính, tải trọng này lớn hơn 53%.



(a) Biến dạng ngoài mặt phẳng bản cánh trên ở bước gia tăng 31, tải trọng $P = 253$ kN.

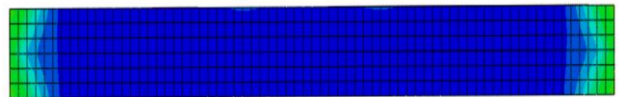
Biến dạng bắt đầu xuất hiện



(b) Biến dạng ngoài mặt phẳng bản cánh trên ở bước gia tăng 32, tải trọng $P = 337$ kN.

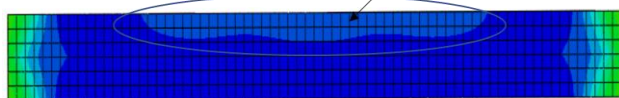
Hình 9. Biến dạng ngoài mặt phẳng ở bản cánh trên.

Tiếp tục phân tích biến dạng của bản cánh dưới, bỏ qua biến dạng xuất hiện từ những bước gia tải đầu tiên hai đầu cột. Tác giả quan sát thấy rằng ở bước gia tăng 30, chưa thay đổi về biến dạng ngoài mặt phẳng của bản cánh dưới. Biến dạng này chỉ bắt đầu xuất hiện ở bước gia tăng 31 (hình 11(b)).



(a) Biến dạng ngoài mặt phẳng bản cánh dưới ở bước gia tăng 30, tải trọng $P = 169$ kN.

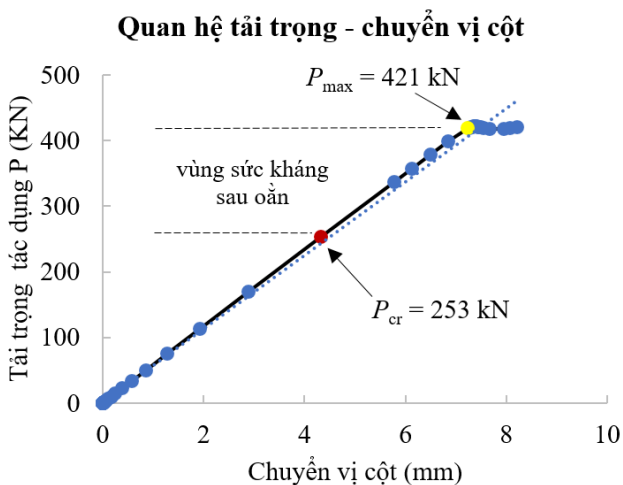
Biến dạng bắt đầu xuất hiện



(b) Biến dạng ngoài mặt phẳng bản cánh dưới ở bước gia tăng 31, tải trọng $P = 253$ kN.

Hình 10. Biến dạng ngoài mặt phẳng ở bản cánh dưới.

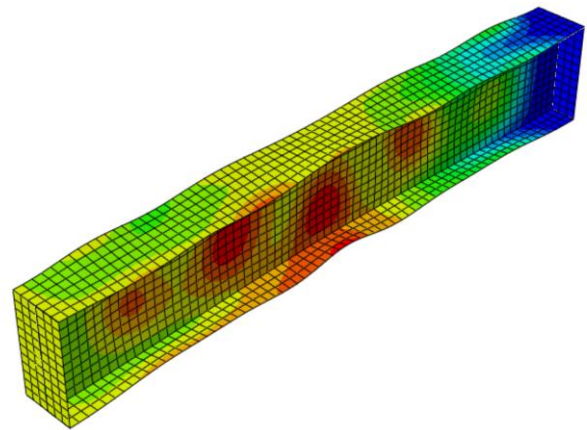
Như vậy, đối với bản cánh dưới, có thể xác định hiện tượng oằn cục bộ xuất hiện ở giá trị tải trọng $P_{cr} = 253$ kN. Qua phân tích trên, so sánh giá trị tải trọng gây oằn của bản bụng, các bản cánh trên và bản cánh dưới, tác giả thấy rằng cột PFRP xuất hiện oằn cục bộ đầu tiên ở bản cánh dưới, tại vị trí bản cánh I4 (mô tả vị trí ở cột (5), bảng 1), ở giá trị tải trọng là 253 kN, cao hơn 15.5% so với kết quả mô phỏng tuyến tính. Xác định ứng suất gây oằn cục bộ cột, với các tính chất vật liệu như ở cột (2) Bảng 1 (bản cánh I1), bản cánh sẽ oằn trước tại giá trị ứng suất $\sigma_{cr} = 151$ MPa [8], tương ứng với tải trọng gây oằn tới hạn $P_{cr,a} = 214$ kN. Giá trị này nhỏ hơn tải trọng gây oằn xác định qua phân tích nhiễu loạn phi tuyến $P_{cr} = 219$ kN là 2.3% và nhỏ hơn 18.2% so với với giá trị khi phân tích ổn định phi tuyến. Như đã thảo luận ở trên, sự khởi phát oằn cục bộ không gây phá hoại cấu kiện, sau khi hiện tượng oằn xảy ra trên bản, phần bị oằn (phần biến dạng lượn sóng) không tiếp tục tham gia chịu tải, phần tải trọng này sẽ phân phối về phía hai biên của bản và bản tiếp tục chịu tải cho tới khi phần diện tích ở hai biên chảy dẻo hoàn toàn [9]. Điều này cũng thể hiện trên phân tích ổn định phi tuyến.



Hình 11. Quan hệ tải trọng và chuyển vị cột.

Hình 11 thể hiện quan hệ giữa tải trọng tác dụng và chuyển vị tại đầu cột. Điểm giá trị tải trọng được tô màu đỏ $P_{cr} = 253$ kN là giá trị gây oằn cho bản cánh dưới (đồng thời là điểm xác định oằn cục bộ của cột bắt đầu xảy ra). Nhận thấy rằng sau khi oằn, cột vẫn tiếp tục chịu tải, với quan hệ tải trọng – chuyển vị gần như tuyến tính cho đến khi tải trọng đạt $P_{max} = 421$ kN (điểm giá

trị tô vàng). Vùng sức kháng sau oằn của cột là tương đối lớn, tăng 66.4% so với tải trọng gây oằn ($P_{max} / P_{cr} = 166\%$). Như vậy, trong tính toán thiết kế, cần thiết phải có phương án tận dụng phần sức kháng sau oằn trong ứng xử tổng thể của kết cấu. Hình 12 cho thấy biến dạng của cột PFRP khi sức kháng đạt giá trị cực đại. Trên cột lúc này, các bản đều đã biến dạng lượn sóng (chẳng hạn bản bụng có bốn vùng biến dạng nửa bước sóng), cấu kiện sẽ không tiếp tục gia tăng sức kháng sau oằn.



Hình 12 Biến dạng của cột tại tải trọng đạt cực đại P_{max} .

5. Kết luận

Nghiên cứu này trình bày phương pháp xác định tải trọng gây oằn cục bộ của cột composite qua phân tích ổn định phi tuyến bằng ABAQUS. Các kết luận và kiến nghị được rút ra từ nghiên cứu như sau:

- Sử dụng phần tử tấm S8R và xem bản bụng, bản cánh như là các tấm laminar với 04 tính chất vật liệu (E_L , E_T , ν , G_{LT}) trong mô phỏng tuyến tính và phi tuyến bằng ABAQUS là phù hợp. Tác giả đề xuất sử dụng phương pháp này cho phân tích ứng xử của cấu kiện PFRP bằng ABAQUS;
- Việc xác định chính xác giá trị tải trọng gây oằn cần phải xem xét trên từng bản riêng biệt (bản bụng, bản cánh) vì tải trọng gây oằn của mỗi bản là khác nhau. Trong trường hợp này, do đặc thù khiếm khuyết vật liệu, bản cánh dưới là bản xảy ra oằn đầu tiên trên toàn bộ tiết diện. Tải trọng gây oằn là 253 kN, cao hơn 15.5% so với tải trọng gây oằn xác định bằng phân tích giá trị đặc trưng (phân tích nhiễu loạn tuyến tính);

- Có nhiều phương pháp xác định giá trị tải trọng khởi phát mất ổn định cục bộ của cột PFRP (có thể phân tích thay đổi ứng suất, biến dạng). Tuy nhiên tác giả nhận thấy phương pháp như trong nghiên cứu này là trực quan dễ áp dụng;

- Sức kháng sau oằn cục bộ của cột PFRP là tương đối lớn, tăng 66.4% so với giá trị tải trọng gây oằn cục bộ. Đối với vật liệu thép, phần thặng dư này là thấp hơn, khoảng 30 - 40%. Như vậy trong tính toán thiết kế vật liệu PFRP, cần thiết phải xem xét sử dụng phần sức kháng thặng dư nào vào chịu tải tổng thể của cấu kiện;

- Phân tích phi tuyến trong trường hợp này cho kết quả mô phỏng ổn định hội tụ được là do khiếm khuyết vật liệu. Nếu vật liệu là đẳng hướng và ứng xử vật liệu là tuyến tính, lực tác dụng là đúng tâm thì hội tụ không xảy ra và cần thiết phải đưa vào một loại khiếm khuyết (hình học hoặc tải trọng), để kích hoạt mất ổn định;

- Nghiên cứu này chưa tính đến ứng xử tương tác khi có từ hai loại khiếm khuyết trở lên xảy ra đồng thời (ví như khiếm khuyết vật liệu và khiếm khuyết hình học đồng thời tồn tại). Đó là hướng nghiên cứu trong tương lai được xem là cần thiết để đánh giá đầy đủ và cụ thể hơn ảnh hưởng của các khiếm khuyết lên ứng xử ổn định của cấu kiện.

Lời cảm ơn

Bài báo này là một phần kết quả nghiên cứu thuộc đề tài nghiên cứu khoa học cấp Cơ sở, Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, mã số “KHDN2301”.

Tài liệu tham khảo

[1] D. Kendall; “Developments in FRP bridge design”. Reinforced Plastics. 2010; 54(3):38–42. DOI:10.1016/S0034-3617(10)70111-9.

[2] ASCE; “Pre-standard for load and resistance factor design (LRFD) of pultruded fiber reinforced polymer (FRP) structures”; Arlington, VA, USA; 2010.

[3] L. Ascione et al.; “Prospect for New Guidance in the Design of FRP - Support to the implementation and further development of the Eurocodes”; Ispra, Italy: Joint Research Centre, European Commission; 2016.

[4] J. T. Mottram and J. Henderson; “FRP Bridges - Guidance for Designers”; London, UK: CIRIA; 2018.

[5] N. T. Thuy, N. T. Anh; “Experimental determination of longitudinal elastic modulus and major poisson’s ratio of GFRP material. Transport and Communications Science Journal. 2023; 74(2): 147–159.

[6] W. P. Stoddard; “Lateral-torsional buckling behavior of polymer composite I-shaped members”; Atlanta; USA: Georgia Institute of Technology; 1997.

[7] T. T. Nguyen, S. Selvaraj, T. -M. Chan, and J. T. Mottram; “Influence of Combined Imperfections on Lateral-torsional Buckling Behavior of Pultruded FRP Beams”. Composite Structures. 2023; 304:116385. DOI: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.116385.

[8] T. -T. Nguyen; “Local buckling resistance of Pultruded FRP columns: Theoretical predictions vs. Experimental study”. Journal of Transportation, Science and Technology. 2023; 12(1):33-43. DOI:10.55228/JTST.12(1).33-43.

[9] B. Åesson; “Plate Buckling in Bridges and Other Structures”; Florida, USA: CRC Press; 2014.

[10] W. F. Ragheb; “Development of Closed-Form Equations for Estimating the Elastic Local Buckling Capacity of Pultruded FRP Structural Shapes”. Journal of Composites for Construction. 2017; 21(4):4017015. DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000798.

[11] T. Liu, J. D. Vieira and K. A. Harries; “Predicting Flange Local Buckling Capacity of Pultruded GFRP I-Sections Subject to Flexure”. Journal of Composites for Construction. 2020; 24(4):4020025. DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001032.

[12] D. C. T. Cardoso, K. A. Harries, and E. de M. Batista; “Compressive Local Buckling of Pultruded GFRP I-Sections: Development and Numerical/Experimental Evaluation of an Explicit Equation”. Journal of Composites for Construction. 2015; 19(2):4014042. DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000501.

[13] J. T. Mottram; “Determination of critical load for flange buckling in concentrically loaded pultruded

- columns”. *Composites*. 2004; 35(1):35–47. DOI: 10.1016/j.compositesb.2003.08.006.
- [14] L. P. Kollár; “Local Buckling of Fiber Reinforced Plastic Composite Structural Members with Open and Closed Cross Sections”. *Journal of Structural Engineering*. 2003; 129(11):1503–1513. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:11(1503).
- [15] L. P. Kollár and G. S. Springer; “Mechanics of Composite Structures”; Cambridge, UK:Cambridge University Press; 2003.
- [16] T. -T. Nguyen, T. -M. Chan, and J. T. Mottram; “Reliable in-plane shear modulus for pultruded-fibre-reinforced polymer sections”. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*. 2017; 171(11):818–829. DOI:10.1680/jstbu.16.00194.
- [17] P. Qiao, G. Zou, and J. F. Davalos; “Flexural–torsional buckling of fiber-reinforced plastic composite cantilever I-beams”. *Compos Struct*. 2003; 60(2):205–217. DOI:10.1016/S0263-8223(02)00304-5.
- [18] L. Shan and P. Qiao; “Flexural–torsional buckling of fiber-reinforced plastic composite open channel beams”. *Compos Struct*. 2005; 68(2):211–224. DOI: 10.1016/j.compstruct.2004.03.015.
- [19] R. J. Brooks and G. J. Thrvey; “Lateral buckling of pultruded GRP I-section cantilevers”. *Compos Struct*. 1995; 32(1–4):203–215.