

Phân tích độ nhạy của modun cắt tới ổn định xoắn ngang của dầm PFRP

Sensitivity analysis of shear modulus on Lateral – Torsional Buckling of PFRP Beam

Nguyễn Tiên Thủy

Nhóm nghiên cứu Khoa học công nghệ ứng dụng cho sự Phát triển bền vững (STASD), Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Email liên hệ: thuy.nguyen@ut.edu.vn

Tóm tắt:

Hằng số đàn hồi của vật liệu polyme gia cường sợi sản xuất bằng phương pháp đúc kéo - PFRP biến thiên trong phổ tương đối rộng, đặc biệt modun cắt dao động từ 3 đến 5 GPa. Ổn định xoắn ngang là ổn định tổng thể trên dầm chịu uốn theo trục chính, mất ổn định xảy ra khi dầm đồng thời xoắn theo trục của dầm và uốn theo phương ngang. Nghiên cứu này phân tích độ nhạy của modun cắt lên ổn định xoắn ngang của dầm PFRP bằng phương pháp mô hình hóa trên ABAQUS. Nghiên cứu cho thấy tải trọng tới hạn của ổn định xoắn ngang tăng 17% khi modun cắt thay đổi từ 3 đến 5 GPa với dầm ngắn và tăng 27% với dầm dài. Ảnh hưởng của modun cắt lên tải trọng tới hạn giảm dần khi tải trọng di chuyển từ đỉnh tới đáy dầm. Việc xác định modun cắt phù hợp (cận trên, cận dưới) là đặc biệt quan trọng trong thiết kế và việc kiểm định tính tương thích giữa mô hình hóa với kết quả thí nghiệm cần xét đến yếu tố biến thiên của modun cắt.

Từ khóa: Hằng số đàn hồi; Ổn định xoắn ngang; Phân tích độ nhạy; ABAQUS.

Abstract:

Elastic constant of Pultruded Fiber Reinforced Polymer (PFRP) has a wide range of value, especially for the shear modulus which is generally ranging from 3 to 5 GPa. Lateral – torsional buckling (LTB) is a type of global buckling occurs when the beam is under bending about its major axis. The instability happens when the beam twists and moves laterally. This research analyses and evaluates the sensitivity of changing the shear modulus on the critical LTB load of PFRP beam using a numerical approach by ABAQUS. It is found that the critical LTB load increases 17% for short beam and 27% for long slender beam when shear modulus increases from 3 to 5 GPa. The influence of changing of shear modulus is reduced when load position moves from top to bottom flange. It is suggested that the determination of proper shear modulus (upper and lower bound of values) is of crucial in design and in validating the compatibility between experimental work and numerical or theoretical analysis.

Keywords: Elastic constant; Lateral-torsional buckling; Sensitivity analysis; ABAQUS.

1. Giới thiệu

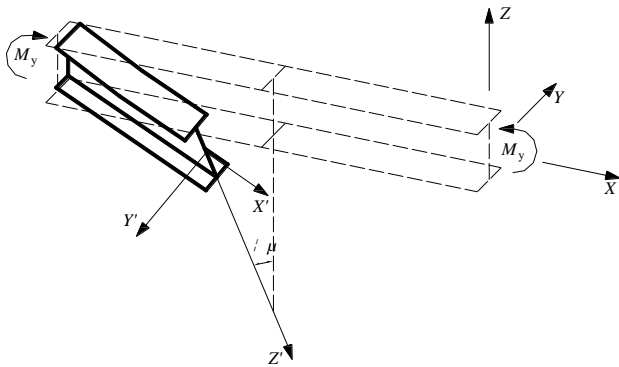
Vật liệu polyme gia cường sợi sản xuất bằng phương pháp đúc kéo - Pultruded Fiber Reinforced Polymer (PFRP) là vật liệu mới có nhiều ứng dụng trong lĩnh vực xây dựng (hình 1) do các ưu điểm như trọng lượng nhẹ, cường độ cao, khả năng chống ăn mòn, cách điện, cách từ tốt [1]. Ổn định xoắn ngang (Lateral-Torsional Buckling – LTB) là ổn

định tổng thể của dầm không bị ràng buộc theo phương ngang, chịu uốn trong mặt phẳng qua trục chính. Sự mất ổn định xảy ra với sự biến dạng đồng thời theo phương ngang và xoắn quanh trục dầm như hình 2. Ứng xử mất ổn định này của dầm chịu ảnh hưởng của điều kiện biên, điều kiện tải trọng (vị trí tải trọng, loại tải trọng), tiết diện hình học và tính chất vật liệu dầm. Các dầm có tiết diện mở (open-

section) thường dễ mất ổn định xoắn ngang hơn tiết diện đóng do độ cứng kháng uốn ngang và độ cứng kháng xoắn thấp. Các tiết diện đóng thường không xảy ra mất ổn định xoắn ngang bởi độ cứng kháng uốn theo phương chính lớn hơn phương ngang.



Hình 1. Sử dụng vật liệu PFRP vào cầu đường bộ (cung cấp bởi công ty Fiberline Building Profiles A/S).



Hình 2. Mất ổn định xoắn ngang của dầm.

Nghiên cứu về ổn định xoắn ngang đã bắt đầu từ gần 100 năm. Các nghiên cứu đã đề xuất biểu thức đóng xác định moment tới hạn gây oằn của kết cấu dầm đẳng hướng đối xứng quanh trục chính [2], [3]:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2}{(KL)^2} \left(\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_y} + \frac{(kL)^2 G I_t}{\pi^2 E I_y} + (C_2 Z_g)^2} - C_2 Z_g \right) \quad (1)$$

Trong đó L là chiều dài không giằng; C_1 là hệ số moment đồng nhất tương đương, liên quan đến phân bố moment trên dầm; C_2 là hệ số tính đến chiều cao đặt lực tương quan với vị trí tâm cắt; Z_g là chiều cao từ điểm đặt lực tới tâm cắt. I_z , I_w , I_t là moment kháng uốn theo trục phụ, độ cứng kháng công vênh và độ cứng kháng xoắn.

Dầm PFRP có thể được xem là tạo thành từ các tấm trực hướng, công thức (1) cho vật liệu đơn hướng được chấp nhận rộng rãi sử dụng cho dầm PFRP bằng cách thay thế modun đàn hồi E và

modun cắt G của vật liệu đơn hướng, bằng modun đàn hồi theo phương dọc E_L và modun cắt trong mặt phẳng G_{LT} của vật liệu PFRP.

Từ công thức (1) có thể thấy rằng các hằng số đàn hồi có ảnh hưởng chính tới sức kháng ổn định xoắn ngang của dầm. PFRP là vật liệu dị hướng và cách bố trí kiến trúc sợi thủy tinh trong cấu kiện, tạo nên vật liệu PFRP có hằng số đàn hồi không đồng nhất. Việc xác định giá trị modun cắt trong mặt phẳng G_{LT} đại diện cho vật liệu PFRP là tương đối khó và có độ biến thiên lớn. Kết quả từ các nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết của các tác giả trước đây cho thấy giá trị này thường nằm trong khoảng từ 3 đến 5 GPa [4]. Với một phổ giá trị rộng, sức kháng ổn định xoắn ngang của dầm PFRP cũng có một phổ giá trị lớn. Vì vậy, cần thiết phải phân tích độ nhạy của sự thay đổi giá trị G_{LT} lên sức kháng xoắn ngang của vật liệu PFRP. Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phương pháp mô hình hóa bằng ABAQUS.

2. Phương pháp mô hình hóa

Sự chính xác của phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (FEA) phụ thuộc vào việc lựa chọn phương pháp mô hình hóa, loại phần tử và mật độ chia lưới. ABAQUS cung cấp ba phương pháp để mô hình vật liệu tấm composite, bao gồm: (1) phương pháp “microscopic”, trong đó keo và vật liệu gia cường được mô hình riêng biệt; (2) phương pháp “macroscopic” trong đó tấm vật liệu được mô hình như vật liệu trực hướng một lớp và (3) phương pháp hỗn hợp (mixed method) trong đó tấm vật liệu được mô hình từ các tấm vật liệu trực hướng rời rạc ghép lại. Tác giả nhận thấy phương pháp 2 là phù hợp nhất do phương pháp 1 và 3 yêu cầu sự hiểu biết chi tiết về kiến trúc sợi cũng như tính chất cơ lý của keo và sợi gia cường, trong phạm vi nghiên cứu này không thể áp dụng.

Khi mô hình hóa vật liệu PFRP là các tấm trực hướng, cần có số liệu của bốn đặc tính vật liệu cơ bản, 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. Trong đó E_L và G_{LT} có ảnh hưởng lớn nhất đến ổn định xoắn ngang của PFRP theo công thức

(1). E_T có ảnh hưởng rất nhỏ đối với sự thay đổi của sức kháng (tăng hoặc giảm), với 30% giá trị của E_T chỉ ảnh hưởng 1% đến sức kháng mất ổn định xoắn ngang [5].

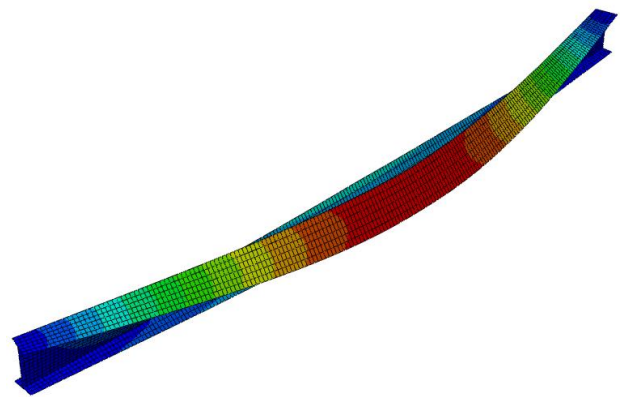
PFRP được xem là kết cấu tường mỏng, tác giả lựa chọn phần tử tấm để mô hình. Ba loại phần tử tấm thường sử dụng để mô phỏng mất ổn định của cấu kiện PFRP trong ABAQUS là S4R, S4R5 và S8R [6] – [8]. Phần tử tấm 04 nút S4R và S4R5 áp dụng các hàm tuyến tính để nội suy biến dạng giữa các nút, thích hợp cho phân tích cả tấm dày và mỏng. Phần tử tấm dày S8R sử dụng các hàm bậc 2 bằng cách dùng 08 nút cho mỗi phần tử. Công thức ma trận độ cứng áp dụng lý thuyết tấm Mindlin cho biến dạng cắt bậc nhất. Loại phần tử này có khả năng tương thích về chuyển vị, tránh sự đứt đoạn giữa cạnh phần tử.

Bảng 1 cung cấp kết quả phân tích phần tử hữu hạn (tải trọng gây mất ổn định xoắn ngang $P_{cr,FEA}$) trên các phần tử tấm khác nhau (S4R, S4R5 và S8R), với các kích thước cạnh phần tử để so sánh tính ổn định và phù hợp của từng loại phần tử. Phân tích thực hiện trên dầm dài 1.5 m, $E_L = 30.7$ GPa, $G_{LT} = 4.2$ GPa với lực tác dụng ở tấm cắt và ở giữa nhịp dầm giản đơn. Áp dụng vào công thức (1), $P_{cr} = M_{cr}/4L = 7.6$ KN. Lưu ý rằng đối với phần tử tấm, thông thường chia lưới với các tỉ lệ cạnh xấp xỉ bằng 1 để tăng độ tin cậy của kết quả do ảnh hưởng của biến dạng cắt. Bảng 1 cho thấy phần tử S8R đưa ra kết quả ổn định nhất với khác biệt khi sử dụng các kích thước cạnh phần tử khác nhau là rất nhỏ ($< 1\%$). Do đó, trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phần tử S8R với kích thước cạnh ≤ 15 mm.

Bảng 1. $P_{cr,FEA}$ trên các loại phần tử khác nhau.

Kích thước cạnh phần tử (mm)	Số phần tử/m	$P_{cr,FEA}$ (kN)	$P_{cr,FEA}$ (kN)	$P_{cr,FEA}$ (kN)
		S4R5	S4R	S8R
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
30	267	6.15	6.15	7.48
15	1067	7.16	7.15	7.45
10	2400	7.34	7.32	7.45
5	9200	7.42	7.41	7.44

Tải trọng tới hạn gây mất ổn định xoắn ngang được xác định bằng phương pháp phân tích tuyến tính giá trị đặc trưng (elastic eigenvalue analysis). Phương pháp này bỏ qua sự thay đổi hình học của dầm khi gia tăng tải trọng cho đến điểm phân nhánh gây phá hoại. Bằng cách đưa vào các nhiễu loạn lên tiết diện đã chia lưới của dầm chưa chịu tải và tìm kiếm các khiếm khuyết cục bộ hoặc tổng thể kích hoạt sự mất ổn định do hiệu ứng bậc 2, phương pháp tìm ra hệ số tải trọng (còn gọi là lời giải giá trị đặc trưng) của phá hoại do mất ổn định. Nhân hệ số tải trọng này với tải trọng ban đầu, sẽ có tải trọng gây mất ổn định xoắn ngang.



Hình 3. Mất ổn định xoắn ngang trên ABAQUS.

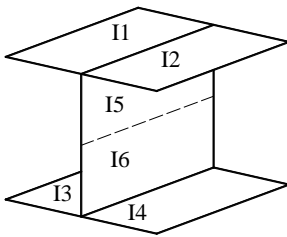
Mất ổn định xoắn ngang của phân tích tuyến tính này (hình 3), chỉ thể hiện hình dạng (mode shape) của sự mất ổn định, không có giá trị chuyển vị

thực tế của các nút. Chuyển vị thực tế chỉ có được khi thực hiện phân tích phi tuyến với tải trọng tăng dần với dữ liệu về khiếm khuyết ban đầu (về hình học, vật liệu, tải trọng,...) được nạp vào mô hình [9]. Về vị trí đặt lực, trong nghiên cứu này, lực được đặt tại giữa dầm với vị trí có thể di chuyển từ đỉnh dầm tới đáy dầm (hình 4).

Bằng cách giữ nguyên các hằng số đàn hồi khác, và chỉ thay đổi G_{LT} từ 3 đến 5 GPa với mỗi nhịp biến thiên 0.2 GPa, sẽ có 11 giá trị G_{LT} (chẳng hạn như 3 GPa, 3.2 GPa, 3.4 GPa,...), nghĩa là có 11 giá trị tải trọng tới hạn gây mất ổn định xoắn ngang – $P_{cr,FEA}$ cho mỗi vị trí đặt lực (đỉnh dầm, tâm cắt hoặc đáy dầm) trên một chiều dài nhịp.

Sự thay đổi 11 giá trị G_{LT} được đưa vào ABAQUS qua modul Python, trong đó, xem G_{LT} là biến số chạy từ 3 đến 5 GPa. Tiết diện dầm sử dụng trong phân tích phần tử hữu hạn là dầm I 120×60×6 với chiều cao 120 mm, bề rộng bản cánh trên và bản cánh dưới là 60 mm, bề dày của bản cánh và bản bụng là 6 mm. Tính chất vật liệu được trình bày trên bảng 2 là kết quả từ thí nghiệm xác định tính chất cơ lý vật liệu [10]. Từ bảng 2, có thể thấy modul đàn hồi của bản bụng thấp hơn nhiều so với bản cánh. Ngoài ra, bản cánh khác nằm khác phía so với bản bụng có giá trị modul đàn hồi khác nhau do phương pháp sản xuất dầm PFRP cũng như sự phân bố kiến trúc sợi [10].

Bảng 2. Các tham số tính chất vật liệu của dầm PFRP.

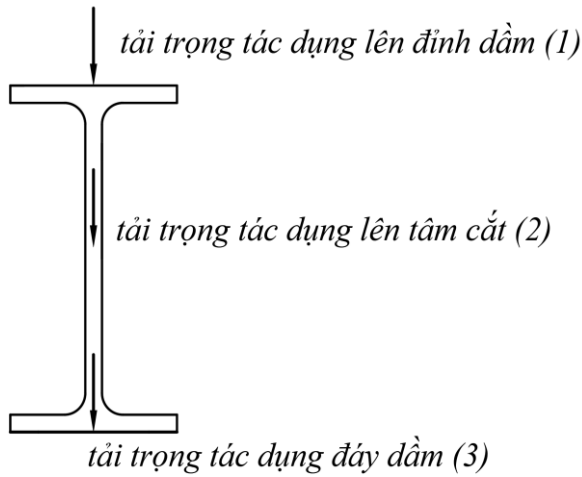
Tiết diện	Cánh I1	Cánh I2	Cánh I3	Cánh I4	Bụng I5	Bụng I6
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
E_T (GPa)	34.4	29.7	34.5	31.2	26.3	26.2
E_L (GPa)	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8
G_{LT} (GPa)	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
ν_{LT}	0.23	0.25	0.24	0.21	0.22	0.23

3. Phân tích độ nhạy của modul cắt

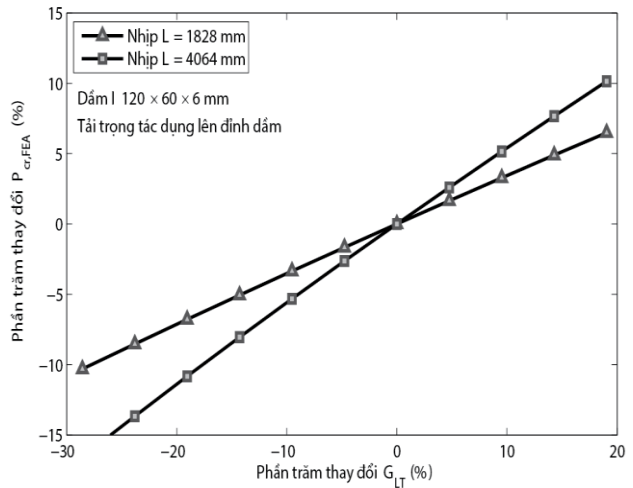
Phân tích độ nhạy của modul cắt đến ổn định xoắn ngang được thực hiện trên dầm I, tiết diện 120×60×6 mm trên hai chiều dài nhịp đại diện cho dầm ngắn ($L = 1828$ mm) và dầm mảnh ($L = 4064$ mm). Modul cắt thay đổi từ 3 đến 5 GPa với bước tăng 0.2 GPa. Tải trọng được đặt tại

giữa nhịp với 03 vị trí đặt lực theo phương dọc bao gồm vị trí đỉnh dầm (1), đáy dầm (3) và tâm cắt (2), như trên hình 4.

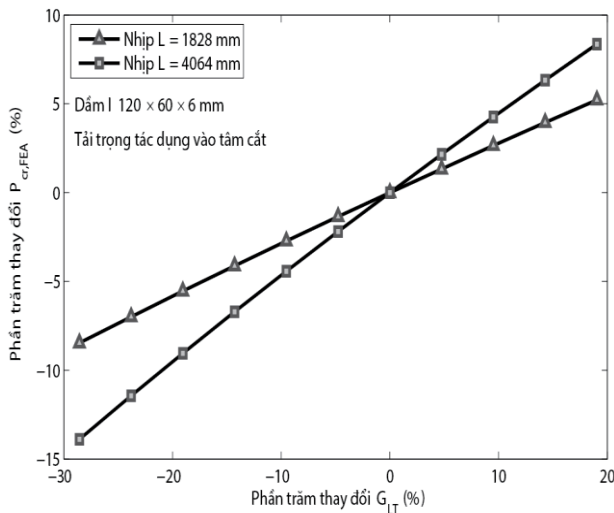
Như vậy, tổng số giá trị $P_{cr,FEA}$ trong nghiên cứu này là 66 giá trị, trong đó mỗi vị trí đặt lực có 22 giá trị (11 giá trị cho mỗi chiều dài dầm với modul cắt thay đổi từ 3-5 GPa).



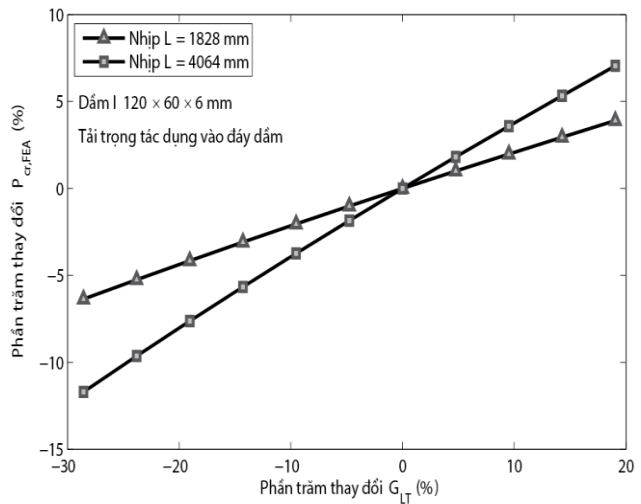
Hình 4. Các vị trí đặt tải trọng.



Hình 5. Mối quan hệ giữa sự thay đổi G_{LT} với sự thay đổi $P_{cr,FEA}$ khi tải trọng tác dụng lên đỉnh dầm.



Hình 6. Mối quan hệ giữa sự thay đổi G_{LT} với sự thay đổi $P_{cr,FEA}$ khi tải trọng tác dụng lên tâm cắt.



Hình 7. Mối quan hệ giữa sự thay đổi G_{LT} với sự thay đổi $P_{cr,FEA}$ khi tải trọng tác dụng lên đáy dầm.

Hình 5 - 7 thể hiện phần trăm sự thay đổi của tải trọng gây oằn tới hạn $P_{cr,FEA}$ khi G_{LT} thay đổi 3 - 5 GPa, so với giá trị nền $P_{cr,FEA,base}$ là tải trọng tới hạn khi $G_{LT} = 4.2$ GPa, qua công thức: $(P_{cr,FEA}/P_{cr,FEA,base}) \times 100\%$. $G_{LT} = 4.2$ GPa là giá trị modun cắt trung bình qua thí nghiệm xác định modun cắt của PFRP [4]. Qua đó, có thể thấy rằng với dầm ngắn, sự thay đổi giá trị G_{LT} ảnh hưởng đến tải trọng tới hạn gây oằn nhiều hơn so với dầm mảnh. Khi modun cắt tăng 3 - 5 GPa, tải trọng tới hạn gây oằn xác định bởi phương pháp phần tử hữu hạn $P_{cr,FEA}$ tăng tối đa 17% với nhịp ngắn $L = 1828$ mm và tăng tối đa 27% với nhịp dài $L = 4064$ mm.

Khi tải trọng tác dụng lên đỉnh dầm, sự thay đổi này là -10% đến 7% với chiều dài nhịp $L = 1828$ mm, và là -17% đến 10% với chiều dài nhịp $L = 4064$ mm. Khi tải trọng tác dụng tại tâm cắt (shear centre), thay đổi này là -9% đến 5% (với $L = 1828$ mm) và -14% đến 8% ($L = 4064$ mm); đối với tải trọng tác dụng ở đáy dầm, tỉ lệ này là -6% đến 4% ($L = 1828$ mm) và 12% đến 7% ($L = 4064$ mm). Ngoài ra, khi tải trọng thay đổi vị trí từ đỉnh dầm tới đáy dầm, tải trọng tới hạn gây oằn cũng thay đổi nhiều hơn.

Qua nghiên cứu này, có thể thấy rằng tải trọng tới hạn gây oằn chịu ảnh hưởng rất lớn bởi sự biến thiên của modun cắt G_{LT} . Lưu ý rằng giá trị modun cắt G_{LT} là rất khó xác định chính xác trong

thực tế. Và thông thường, giá trị này nằm trong khoảng 3 - 5 GPa. Các nhà sản xuất cấu kiện [11] đề xuất một giá trị modun cắt thấp (thông thường là 3 GPa) để đảm bảo việc thiết kế luôn “an toàn”.

4. Kết luận

Bài báo nghiên cứu độ nhạy của modun cắt đến tải trọng tới hạn gây mất ổn định xoắn ngang của dầm polyme gia cường sợi (PFRP) chịu tải trọng tập trung tại giữa dầm bằng phương pháp phần tử hữu hạn bằng ABAQUS. Từ kết quả nghiên cứu, tác giả có kết luận như sau:

- Phương pháp mô hình hóa trên ABAQUS, sử dụng phần tử tấm S8R và xem PFRP được tạo thành từ các tấm vật liệu trục hướng, là phù hợp với vật liệu PFRP, cho kết quả có độ tin cậy cao;
- Modun cắt ảnh hưởng lớn tới tải trọng tới hạn gây mất ổn định xoắn ngang. Do đó, việc xác định một giá trị phù hợp của modun cắt G_{LT} là cần thiết khi so sánh kết quả thí nghiệm với mô phỏng bằng phần tử hữu hạn hoặc lý thuyết.
- Sự thay đổi của G_{LT} có ảnh hưởng nhiều hơn trên dầm ngắn so với dầm dài;
- Đối với vị trí đặt lực, sự thay đổi của G_{LT} có ảnh hưởng lớn hơn khi lực tác dụng ở đỉnh dầm và ảnh hưởng giảm dần khi lực di chuyển xuống đáy dầm;
- Tác giả đề xuất sử dụng các giá trị cận trên và cận dưới của modun cắt khi thiết kế với vật liệu PFRP bởi ảnh hưởng của modun này lên ổn định xoắn ngang dầm PFRP sẽ lớn và việc xác định chính xác modun cắt chưa thể đạt độ tin cậy.

Tài liệu tham khảo

- [1] L. C. Bank, “Composites for Construction”. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [2] S. Timoshenko, “Theory of elastic stability”. New York: McGraw-Hill, 1936.
- [3] N. Trahair, “Flexural-Torsional Buckling of Structures”. Florida, USA: CRC Press, 1993.
- [4] T. T. Nguyen, T. M. Chan, and J. T. Mottram, “Reliable in-plane shear modulus for pultruded-fibre-reinforced polymer sections”, in Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings. 2017, 171(11):818–829. DOI:10.1680/jstbu.16.00194.
- [5] W. P. Stoddard, “Lateral-torsional buckling behavior of polymer composite I-shaped members”. PhD Thesis, Civil Engineering Georgia Institute of Technology, Georgia, USA, 1997.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] R. J. Brooks and G. J. Thrvey, “Lateral buckling of pultruded GRP I-section cantilevers”. Compos. Struct. 1995, 32(1–4):203–215. DOI:10.1016/0263-8223(95)00018-6Get.
- [9] T. T. Nguyen, T. M. Chan, and J. T. Mottram, “Influence of boundary conditions and geometric imperfections on lateral-torsional buckling resistance of a pultruded FRP I-beam by FEA”. Compos. Struct. 2013, 100:233–242. DOI:10.1016/J.COMPSTRUCT.2012.12.023.
- [10] N. T. Thủy, “Lateral-torsional buckling resistance of pultruded fibre reinforced polymer shapes”. Ph.D dissertation, University of Warwick, West Midlands, UK, 2014.
- [11] Anon, “Fiberline Design Manual”. Middelfart, Denmark, 2014.