



A NUMERICAL STUDY ON THE EFFECT OF ADHESIVES ON THE BEHAVIOR OF GFRP-FLEXURAL STRENGTHENED WIDE FLANGE STEEL BEAMS

Pham Van Phe^{1,2}, Nguyen Xuan Huy^{2,3*}

¹Faculty of Civil Engineering, University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

²Research and Application center for technology in Civil Engineering (RACE), University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

³Faculty of Construction Engineering, University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 21/4/2020

Revised: 15/5/2020

Accepted: 26/5/2020

Published online: 28/6/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.5.7>

* Corresponding author

Email: phe.phamvan@utc.edu.vn; Tel: 086-565-1184

Abstract. A numerical study is conducted in the present study to investigate the mechanical properties of adhesive materials on the behavior of GFRP-flexural strengthened wide flange steel beams. The numerical study is based on a commercial structure analysis software. Nonlinear materials are included and Riks-based analyses are conducted in the numerical models. The effects of the adhesive rupture strength and modulus of elasticity on the system ultimate moment capacity and the adhesive stresses are investigated. Key observations are obtained through the investigations, those include (i) The higher the adhesive rupture strength is, the higher the adhesive stresses at the GFRP plate end areas and at the mid-span are. When the adhesive rupture strength is small enough, the adhesive shear and peeling stresses only concentrate at the plate end areas, (ii) the adhesive shear stresses are higher for smaller adhesive modulus of elasticity, (iii) the ultimate moment capacity of GFRP-strengthened beams increases with higher adhesive rupture strength. When the adhesive rupture strength is big enough, the system failure mode is switched from adhesive failure mode to GFRP rupture mode. And (iv), the system ultimate moment capacity is inversely proportional to adhesive modulus of elasticity. This may be explained by the fact that the adhesive layer with lower modulus carries more shear stresses.

Keywords: Steel beam, GFRP, adhesive, shear stresses, peeling stresses, ultimate moment capacity.



MỘT NGHIÊN CỨU SỐ VỀ ẢNH HƯỞNG ĐẶC TRƯNG LỚP KẾT DÍNH TỚI SỰ LÀM VIỆC CỦA DẦM THÉP CÁNH RỘNG CHI UỐN GIA CƯỜNG GFRP

Phạm Văn Phê^{1,2*}, Nguyễn Xuân Huy^{2,3}

¹Khoa Công trình, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

²Trung tâm nghiên cứu và ứng dụng công nghệ xây dựng (RACE), Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

³Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 21/4/2020

Ngày nhận bài sửa: 15/5/2020

Ngày chấp nhận đăng: 26/5/2020

Ngày xuất bản Online: 28/6/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.5.7>

* Tác giả liên hệ

Email: phe.phamvan@utc.edu.vn; Tel: 086-565-1184

Tóm tắt. Một nghiên cứu số được thực hiện trong nghiên cứu hiện tại để nghiên cứu ảnh hưởng đặc trưng cơ học của lớp kết dính tới sự làm việc của dầm thép cánh rộng gia cường uốn bằng tấm dán GFRP. Dựa trên một phần mềm phân tích kết cấu, một mô hình mô phỏng kết cấu dầm thép gia cường GFRP bằng các phần tử ba chiều được xây dựng. Các thông số vật liệu phi tuyến được nhập vào mô hình và các phân tích phi tuyến dựa trên phương pháp Riks được tiến hành. Các ảnh hưởng của sức kháng phá hoại và mô đun đàn hồi của lớp kết dính tới mô men uốn tối đa của hệ kết cấu và sự phân bố của các trường ứng suất trong lớp kết dính được nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu cho thấy: (i) Khi sức kháng phá hoại của chất kết dính cao lên, thì lớp kết dính sẽ chịu nhiều ứng suất cắt và ứng suất pháp hơn ở vùng biên và cả ở khu vực giữa nhịp. Bên cạnh đó, khi sức kháng phá hoại này đủ nhỏ, các ứng suất cắt và ứng suất pháp theo phương đứng (peeling) chỉ tập trung cao ở khu vực nhỏ ở biên (đầu tấm GFRP). (ii) Khi có cùng một sức kháng phá hoại, vật liệu kết dính có mô đun đàn hồi nhỏ hơn chịu nhiều ứng suất cắt hơn. (iii) Với lớp kết dính có sức kháng phá hoại lớn hơn thì mô men kháng của kết cấu cũng tăng lên. Khi sức kháng phá hoại của lớp kết dính đủ lớn, dạng phá hoại sẽ chuyển từ kiểu phá hoại lớp kết dính sang phá hoại tấm GFRP. Và (iv) Mô men tối đa của kết cấu tỉ lệ nghịch với giá trị mô đun đàn hồi của lớp kết dính, có thể do lớp kết dính có mô đun đàn hồi nhỏ hơn chịu nhiều ứng suất cắt hơn.

Từ khóa: Dầm thép, GFRP, chất kết dính, ứng suất cắt, ứng suất peeling, sức kháng uốn tối đa.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Gia cường dầm thép bằng tấm sợi thủy tinh GFRP (Glass Fiber-Reinforce Polymer) là một giải pháp đang được nghiên cứu sử dụng nhiều nhằm tăng khả năng ổn định cục bộ của dầm thép. Ưu điểm của giải pháp này là việc thi công thuận tiện, giá thành thấp, không bị ăn mòn cũng như không làm thay đổi kích thước dầm ban đầu. Ngoài sức kháng uốn và kéo, tấm GFRP dày còn sở hữu cả sức kháng nén [1,2]. Đã có một số nghiên cứu về ứng xử của dầm thép gia cường FRP ở trong và ngoài nước. El Damatty và Abushagur [1], El Damatty và cộng sự [2] đã thực hiện các nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng đánh giá sự thay đổi của ứng suất cắt và ứng suất pháp tại bề mặt dính bám giữa tấm GFRP và dầm thép của dầm cầu. Youssef [3] phát triển mô hình giải tích nhằm đánh giá sự ảnh hưởng của chiều dày tấm GFRP tới sức kháng uốn tới hạn của dầm thép được gia cường. Harries et al. [4] phân tích khả năng tăng cường ổn định cục bộ của một cột thép được gia cường bằng GFRP. Siddique and El Damatty [5,6] đề xuất công thức xác định dạng phá hoại của dầm thép được gia cường GFRP. Theo đó, có 3 dạng phá hoại được phân tích gồm phá hoại do mất ổn định cục bộ của bản cánh nén, do sự phá hoại cắt của lớp dính bám và do phá hoại kéo của tấm GFRP. Pham et al [7] phát triển một mô hình phần tử hữu hạn để dự đoán ứng suất cắt và ứng suất pháp ở bề mặt dính kết vật liệu của các dầm gia cường bằng tấm dán GFRP. Dù vậy, chưa cho nghiên cứu về ảnh hưởng của đặc trưng cơ học của lớp kết dính tới ứng xử của dầm thép được gia cường bằng tấm GFRP ở trạng thái tới hạn. Mỗi loại chất kết dính khác nhau ảnh hưởng rất nhiều tới sự làm việc cục bộ cũng như tổng thể của dầm được gia cường. Bài báo này thực hiện một nghiên cứu số thông qua việc xây dựng mô hình phân tích phần tử hữu hạn ba chiều (3D FEA) trong phần mềm phân tích kết cấu Abaqus. Mô hình sau đó được sử dụng để khảo sát ảnh hưởng của một số đặc trưng cơ học của lớp kết dính tới sức kháng uốn tối đa của kết cấu và sự thay đổi của các trường ứng suất trong lớp kết dính.

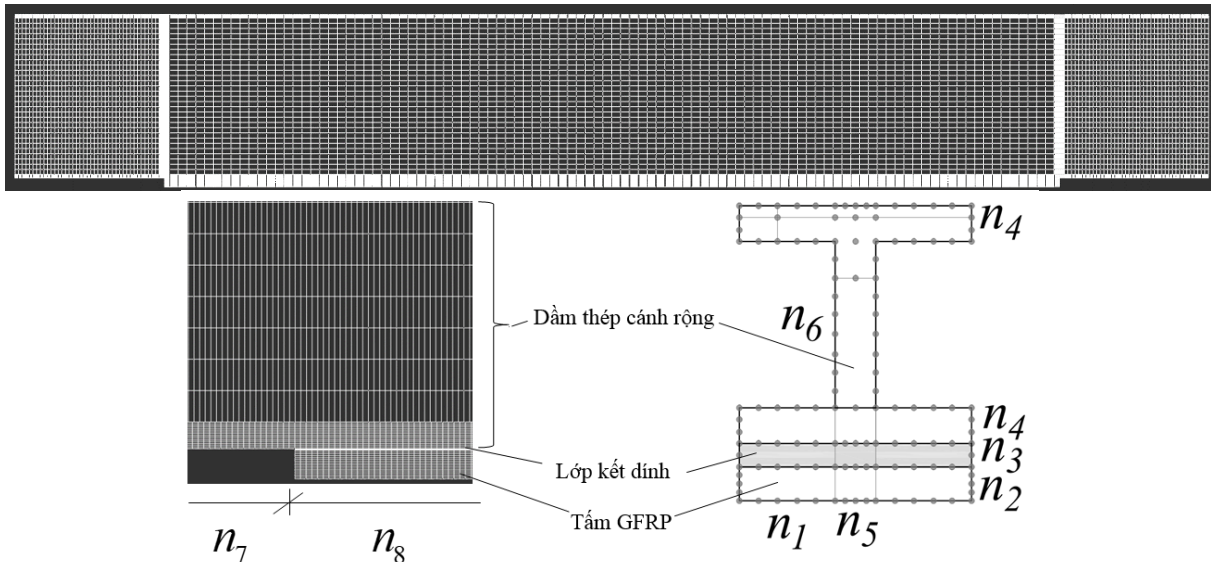
2. THIẾT LẬP MÔ HÌNH MÔ PHỎNG

2.1. Giới thiệu mô hình

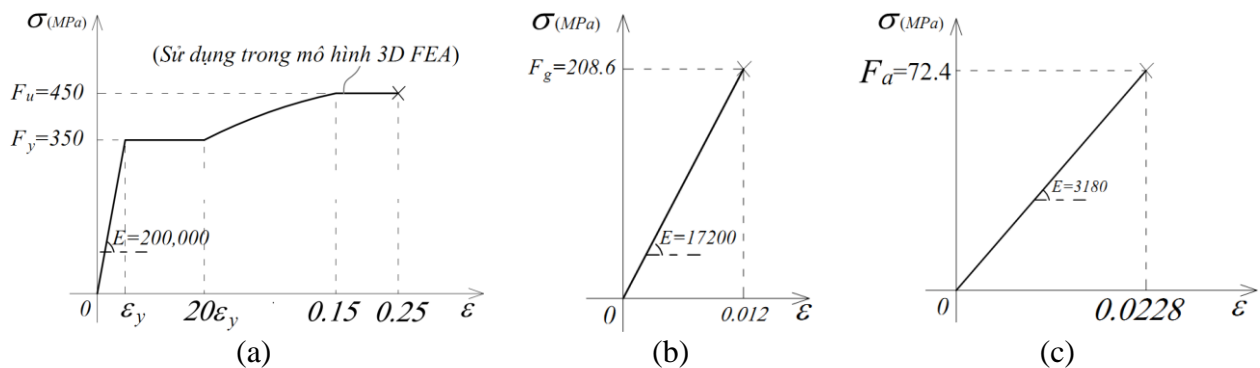
Mô hình mô phỏng ứng xử kết cấu dầm gia cường bằng tấm dán GFRP được đề xuất dựa trên phần mềm ABAQUS. Dầm thép có mặt cắt hình chữ I với các kích thước chung được kí hiệu như trên Hình 1. Phần tử khối C3D8R trong thư viện được lựa chọn trong đó mỗi phần tử có 8 nút, mỗi nút có 3 bậc tự do. Lưới PTHH của kết cấu phụ thuộc và được kiểm soát bởi 8 thông số n_i ($i=1,2,\dots,8$), trong đó n_1 là số phần tử dọc theo phần cánh hẫng dầm thép, n_2 là số phần tử dọc theo chiều dày tấm GFRP, n_3 là số phần tử dọc theo chiều dày lớp kết dính, n_4 là số phần tử chiều dày bản cánh, n_5 là số phần tử dọc theo chiều dày bụng, n_6 là số phần tử dọc theo chiều cao tổng của bản bụng, n_7 là số phần tử dọc theo chiều dài dầm không gia cường, và n_8 là số phần tử dọc theo chiều dài dầm gia cường tấm GFRP.

Mô hình mô phỏng sự làm việc của dầm gia cường GFRP có xét đến sự phi tuyến vật liệu. Để xử lý bài toán phân tích phi tuyến, thuật toán (arc-length) của phương pháp Riks được sử dụng với các thông số Initial time increment = 0.1; Total arc length scale factor associated with this step = 1.0 và minimum arc length increment = 1e-10. Hình 2 giới thiệu các mô hình về vật liệu (thép, GFRP, chất kết dính) được lựa chọn, trong đó mô hình của thép có xét đến sự làm việc chảy dẻo phi tuyến. Các thông số này được lấy theo catalog của nhà sản xuất [9,10]. Thông số vật liệu được nhập vào một tài liệu Microsoft Excel Comma Separated Values File. Tài liệu này được đặt tên là "steel.csv". và được đưa vào mô hình thông qua các dòng lệnh *Plastic, *INCLUDE, INPUT=steel.csv. Để thống nhất với đơn vị trong

các phần mềm, nghiên cứu hiện tại sử dụng dấu chấm“.” thay cho dấu phẩy“,” cho các số thập phân.



Hình 1. Lưới PTHH của dầm thép gia cường tấm dán GFRP.



Hình 2. Mối quan hệ ứng suất - biến dạng của (a) thép, (b) GFRP, và (c) chất kết dính.

2.2. Mô hình phá hoại của dầm thép gia cường tấm GFRP được xem xét

Kết cấu dầm thép gia cường tấm GFRP bằng chất kết dính có thể bị phá hoại dưới nhiều dạng khác nhau, bao gồm: Mất ổn định cục bộ của bản bụng/ bản cánh [5]; mất ổn định tổng thể [8]; sức kháng uốn của các mặt cắt dầm bậc 3 (hoặc mặt cắt sub-compact) và các ứng suất cắt/ tách có thể xảy ra ở mặt phân cách vật liệu [5]. Những mô hình phá hoại này đã được trình bày trong các nghiên cứu [5-8]. Nghiên cứu hiện tại bổ sung vào các nghiên cứu trước bằng việc tập trung vào một mô hình phá hoại khác, đó là sức kháng uốn tối đa của các dầm gia cường tấm GFRP trong đó dầm được phân loại là mặt cắt bậc 2 (hoặc mặt cắt compact). Các xem xét được tập trung vào sự phá hoại của vật liệu (thép, chất kết dính và GFRP).

Mặc dù phá hoại của thép có thể dựa trên một mặt cắt chảy dẻo hoàn toàn, tuy nhiên điều này hiếm khi xảy ra vì phá hoại của các vật liệu khác (GFRP hoặc chất kết dính) có thể sẽ xảy ra trước. Phá hoại của thép có thể xảy ra do các sức kháng ổn định tổng thể hoặc do mất ổn định cục bộ (ví dụ [5, 8]). Tấm GFRP được xem là bị phá hoại khi ứng suất có hiệu von Mises lớn nhất trong tấm vượt quá cường độ phá hoại (kéo hoặc nén) của GFRP. Đối với chất kết dính, Kadam [9] đã nghiên cứu một số tiêu chí phá hoại có thể áp dụng cho vật liệu kết dính, bao gồm tiêu chí von-Mises, Drucker Prager, ứng suất chính lớn nhất, ứng suất cắt

lớn nhất, ứng suất tách (peeling) lớn nhất, ứng suất cắt phẳng, ứng suất trung bình, và mô hình Mohr-Column. Giữa các mô hình này, tiêu chí Drucker Prager được xem là gần với kết quả thí nghiệm shear lap nhất. Tuy nhiên, do thiếu các thông tin thực nghiệm về góc ma sát trong cho các loại vật liệu kết dính dùng để dán GFRP vào thép, nghiên cứu hiện tại giả thiết một cách thận trọng rằng góc ma sát trong bằng không, điều này dẫn đến một lời giải đơn giản hóa và sự phá hoại của chất kết dính sẽ dựa trên tiêu chí ứng suất von-Mises.

2.3. Kiểm tra mô hình

Trên các tài liệu nghiên cứu đã công bố hiện nay, chưa thấy có nghiên cứu thực nghiệm nào về một kết cấu dầm thép giản đơn gia cường một tấm dán GFRP. Tuy nhiên, có lời giải số của Siddique và El Damatty [5,6] cho các mặt cắt dầm thuộc lớp 3 (non-compact sections) gia cường tấm GFRP để tăng ổn định cục bộ cho bản cánh dầm. Mặc dù mô hình số của nghiên cứu hiện tại tập trung vào việc phân tích sức kháng uốn tối đa cho các mặt cắt lớp 2 (compact sections), nó cũng có thể áp dụng được cho các mặt cắt dầm thuộc lớp 3 nhằm mục đích kiểm tra mô hình. Do vậy, mô hình số được phát triển trong nghiên cứu hiện tại sẽ được chạy thử nghiệm và so sánh kết quả sức kháng mô men tối đa của mô hình với kết quả đã được báo cáo trong nghiên cứu của Siddique and El Damatty [5,6].

Một dầm thép có nhịp 2.0 m và có mặt cắt ký hiệu là B1 trong [6] với các kích thước ($b = 150\text{mm}$, $t_f = 7.5\text{mm}$, $h_w = 150\text{mm}$, $t_w = 7.5\text{mm}$) được gia cường với tấm GFRP có chiều dày thay đổi từ 0; 6.35 và 15.5mm. Thép dầm có ứng suất chảy dẻo là 350 Mpa, mô đun đàn hồi là 200 GPa. GFRP có sức kháng phá hoại (kéo hoặc nén) là 208.6 MPa và mô đun đàn hồi 17.2 GPa. Vật liệu dính bám có sức kháng cắt là 35 MPa. Dựa trên tiêu chí von Mises, sức kháng có hiệu của chất kết dính tính được là $F_u = F_a = 35\sqrt{3} = 60.6\text{MPa}$. Hai sơ đồ dầm được so sánh gồm dầm conson chịu lực tập trung ở đầu tự do (ký hiệu là dầm CF1 trong [6]) và dầm giản đơn chịu hai lực tập trung ở giữa nhịp (ký hiệu là dầm SS2 trong [6]). Lưới phần tử được lựa chọn với $n_1 = 20$, $n_2 = 8$; $n_3 = n_4 = n_6 = 4$; $n_5 = 4$; $n_6 = 40$, $n_7 = 100$ và $n_8 = 360$.

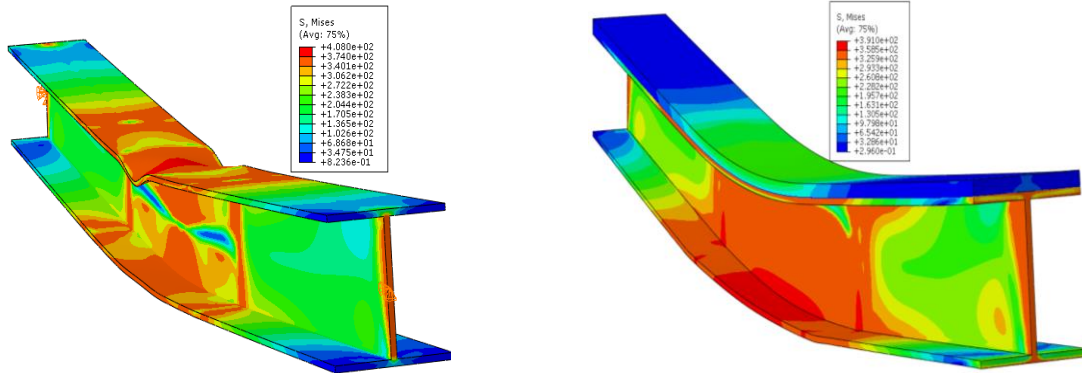
Bảng 1 thể hiện giá trị lực tới hạn từ mô hình mô phỏng ở các trường hợp khác nhau cũng như so sánh với kết quả nghiên cứu của Siddique and El Damatty [6] (lấy từ kết quả trong các hình 8a và 9a trong [6]). Bảng so sánh cho thấy mô hình mô phỏng khá sát với kết quả trong [5,6] với sai số lớn nhất chỉ là 0.4%. Điều này khẳng định tính chính xác của mô hình đề xuất và sự tin cậy của mô hình cho việc khảo sát ảnh hưởng của chất kết dính tới sự làm việc chung của dầm thép gia cường GFRP.

Bảng 1: So sánh kết quả lực tới hạn (kN) của mô hình hiện tại với các nghiên cứu đã công bố [5,6].

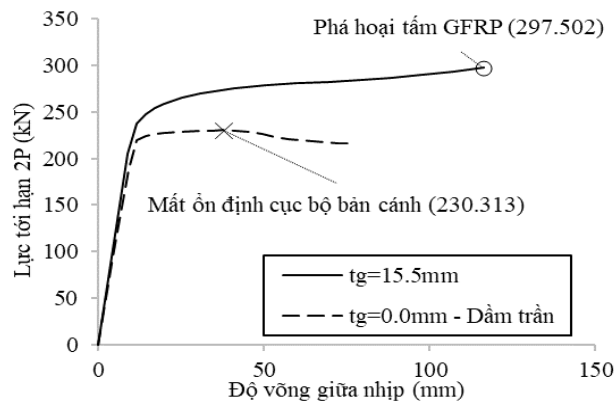
Sơ đồ làm việc [1]	Chiều dày tấm GFRP (mm) [2]	Kết quả mô hình mô phỏng [3]	Kết quả của Siddique and El Damatty (2013) [4]	Sai số (%) [4-3]/[4]
Dầm conson CF1	0	41.0	41.0	0.0
	6.35	46.1	46.3	0.4
	15.5	51.8	51.9	0.2
Dầm giản đơn SS2	0	230.3	230.3	0.0
	6.35	273.0	273.8	0.3
	15.5	297.5	298.0	0.2

Để minh họa kết quả lời giải số của nghiên cứu hiện tại, các Hình 3, 4, 5 thể hiện biến dạng, mối quan hệ lực- độ võng giữa nhịp, và các ứng suất có hiệu trong tấm GFRP và lớp kết dính của dầm thép giản đơn SS2 với các chiều dày tấm GFRP $t_g = 0.0$; $t_g = 15.5$ mm. Trong đó dầm trần (Hình 3a) bị phá hoại theo dạng mất ổn định cục bộ bản cánh. Từ đường cong lực

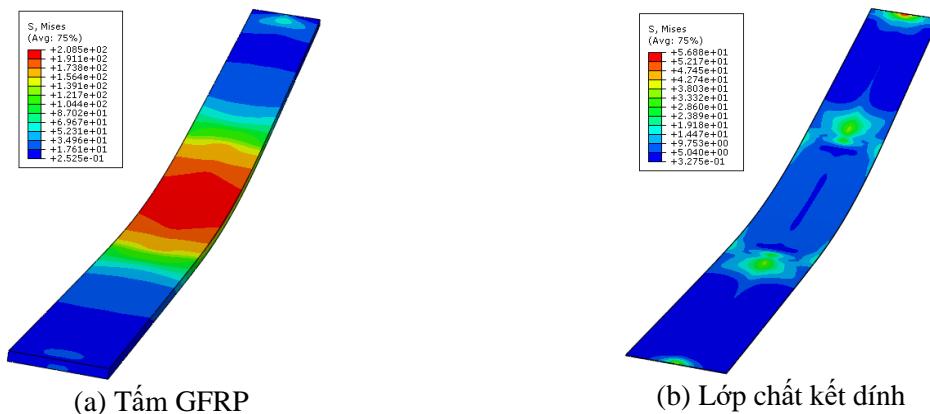
tác dụng - độ võng giữa nhịp (Hình 4), ta xác định được giá trị lực tới hạn (230.3 kN). Trong dầm gia cường tấm GFRP với chiều dày 15.5mm (Hình 3b), do bản cánh chịu nén được gia cường tấm GFRP, nên mất ổn định cục bộ trong dầm thép không xảy ra. Khi ứng suất có hiệu trong tấm GFRP đạt tới sức kháng phá hoại 208.6 Mpa, ứng suất có hiệu trong lớp kết dính mới đạt tới 56.9 Mpa và nhỏ hơn sức kháng phá hoại 60.6 Mpa của nó. Do vậy, kết cấu được xem như bị phá hoại theo dạng phá hoại tấm GFRP và giá trị lực tới hạn là 297.5 kN (Hình 4).



(a) Dầm thép trần giản đơn ($t_g=0$) (b) Dầm thép gia cường GFRP ($t_g =15.5$ mm)
 Hình 3. Biến dạng các dầm SS2 với mặt cắt B1 [6] được mô hình hóa lại bằng lời giải số trong nghiên cứu hiện tại.



Hình 4. Mối quan hệ lực tới hạn (kN) và độ võng giữa nhịp của dầm SS2 với mặt cắt B1 [6] được lấy từ lời giải số trong nghiên cứu hiện tại.

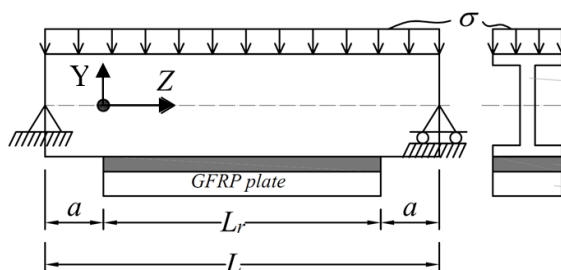


(a) Tấm GFRP (b) Lớp chất kết dính
 Hình 5. Ứng suất có hiệu von Mises (MPa) trong tấm GFRP và lớp kết dính tại thời điểm ứng suất có hiệu trong tấm GFRP đạt tới cường độ phá hoại, dự đoán bởi nghiên cứu hiện tại.

3. PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA LỚP KẾT DÍNH TỚI ỨNG XỬ DÀM THÉP GIA CƯỜNG GFRP

3.1. Mô tả kết cấu

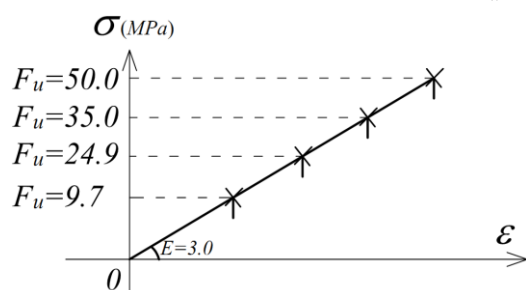
Hai mẫu dầm đối chứng được sử dụng nhằm khảo sát sự ảnh hưởng của lớp kết dính tới ứng xử của dầm thép gia cường GFRP (Hình 6). Dầm thứ nhất có nhịp 2.5m, mặt cắt ngang W150x18 được gia cường bằng tấm GFRP dày 15.5mm, dài 1.5m. Dầm thứ hai có nhịp 6.5m, mặt cắt ngang W410x46, chiều dài và chiều dày tấm GFRP gia cường lần lượt là 4.0m và 15.5mm. Vật liệu được cho như trong Hình 2.



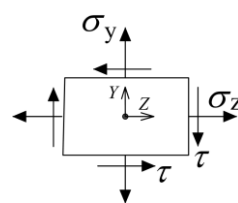
Hình 6. Dầm thép cánh rộng gia cường tấm dán GFRP.

3.2. Ảnh hưởng sức kháng phá hoại của chất kết dính

Khảo sát đầu tiên xét tới tham số sức kháng phá hoại chất kết dính. Chất kết dính Spabond 345 ở 40°C [9,10,11] có mô đun đàn hồi $E_a=3.0\text{GPa}$ được lựa chọn với 4 giá trị khác nhau của sức kháng phá hoại ($F_u=9.7; 24.9; 35; 50\text{MPa}$) (Hình 7a).



(a) Mô hình sức kháng phá hoại



(b) Các ứng suất trong lớp kết dính, τ : ứng suất tiếp; σ_z là ứng suất pháp dọc trục; và σ_y ứng suất pháp thẳng đứng (ở bề mặt lớp kết dính sẽ được gọi là peeling).

Hình 7. Khảo sát ảnh hưởng của sức kháng phá hoại lớp kết dính tới các ứng suất trong lớp kết dính.

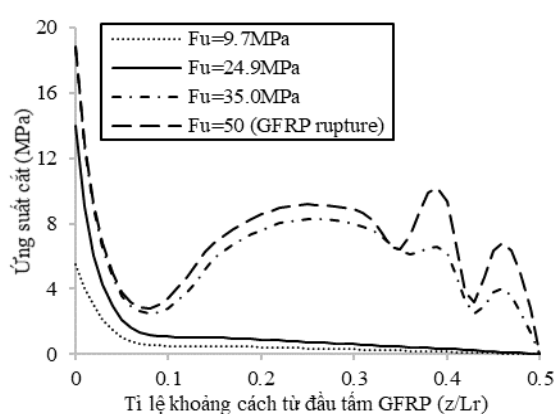
Bảng 2 tổng hợp giá trị sức kháng uốn mô men tối đa cũng như dạng phá hoại của dầm với các loại lớp kết dính khác nhau. Ta nhận thấy ở cả 2 dầm, với lớp kết dính có sức kháng phá hoại lớn hơn thì mô men kháng cũng tăng lên. Khi sức kháng phá hoại của lớp dính bám đủ lớn (ví dụ trường hợp $F_u=50\text{MPa}$), dạng phá hoại sẽ chuyển từ vị trí lớp kết dính (như ba trường hợp đầu tiên) sang phá hoại ở tấm GFRP.

Bảng 2. Ảnh hưởng của sức kháng phá hoại lớp kết dính F_u tới sức kháng mô men của kết cấu.

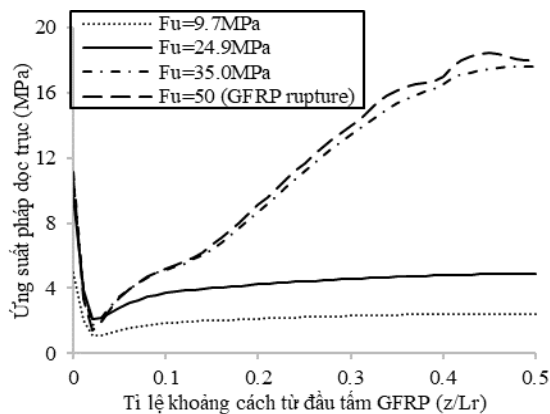
Ea (GPa)	Fu (MPa)	Dầm W150x18		Dầm W410x46	
		Dạng phá hoại	Mu (kNm)*	Dạng phá hoại	Mu (kNm)
3.0	9.7	Lớp kết dính	22.6	Lớp kết dính	184.6
3.0	24.9	Lớp kết dính	52.3	Lớp kết dính	373.2
3.0	35.0	Lớp kết dính	63.4	Lớp kết dính	385.8
3.0	50.0	GFRP	65.0	GFRP	392.5

* Mô men tải trọng tối đa được xác định từ phản lực gối và tải trọng tương ứng lúc phá hoại.

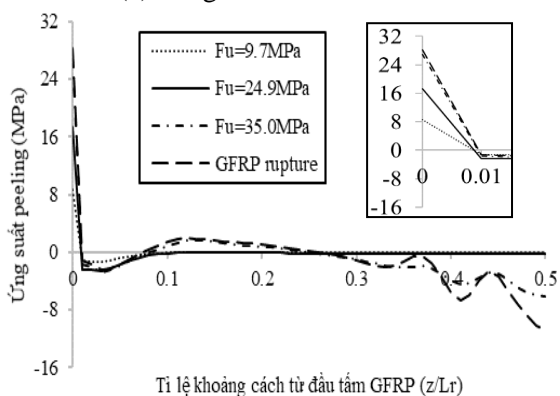
Hình 8 trình bày sự thay đổi ứng suất cắt, ứng suất pháp dọc trục và ứng suất pháp theo phương đứng (peeling) trên lớp kết dính tại các vị trí khác nhau. Các thành phần ứng suất còn lại được bỏ qua vì chúng rất nhỏ. Một số quan sát có được như sau: (i) Các ứng suất đều tập trung rất cao ở khu vực đầu tấm GFRP. (ii) Ứng suất cắt tại lớp kết dính có sự khác biệt giữa các sức kháng phá hoại của lớp kết dính (Hình 8a, 8d). Với lớp kết dính có F_u nhỏ (9.7 MPa và 24.9 MPa), ứng suất cắt rất cao ở biên và giảm mạnh trong khoảng z/L_r từ 0 đến khoảng 0.1, và giảm dần từ biên vào giữa nhịp trong khoảng z/L_r từ 0.1 đến 0.5. Tuy nhiên với các lớp kết dính có F_u lớn bằng 35 MPa và 50 MPa, sự thay đổi ứng suất không đi theo quy luật này. Sau khi giảm từ biên đến vị trí khoảng $z/L_r=0.1$, ứng suất cắt lại tăng và thay đổi liên tục trước khi đạt giá trị bằng 0 ở giữa nhịp. Các giá trị ứng suất ở khu vực z/L_r từ 0.3 đến 0.5 này khá cao để cân bằng với độ dốc các ứng suất pháp dọc trục trong hình 5b (theo điều kiện cân bằng ứng suất vi mô). (iii) Sự phân bố của các ứng suất pháp (Hình 8b,c,e,f) khá giống với sự phân bố của các ứng suất cắt đã thảo luận. (iv) Các ứng suất peeling chủ yếu tập trung rất cao ở khu vực đầu tấm GFRP (trong khoảng $z/L_r = 0.01$) (Hình 8c,f). Ở đây ta nhận thấy rằng khi sức kháng phá hoại của chất kết dính cao lên, thì lớp kết dính sẽ chịu nhiều ứng suất cắt và các ứng suất pháp hơn ở đầu dầm và cả ở khu vực giữa nhịp. Ngược lại, khi sức kháng phá hoại nhỏ, các ứng suất cắt và peeling chỉ tập trung cao ở khu vực đầu dầm.



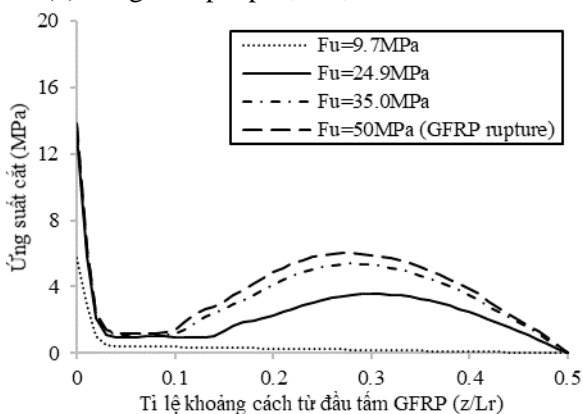
(a) Ứng suất cắt dầm W150x18



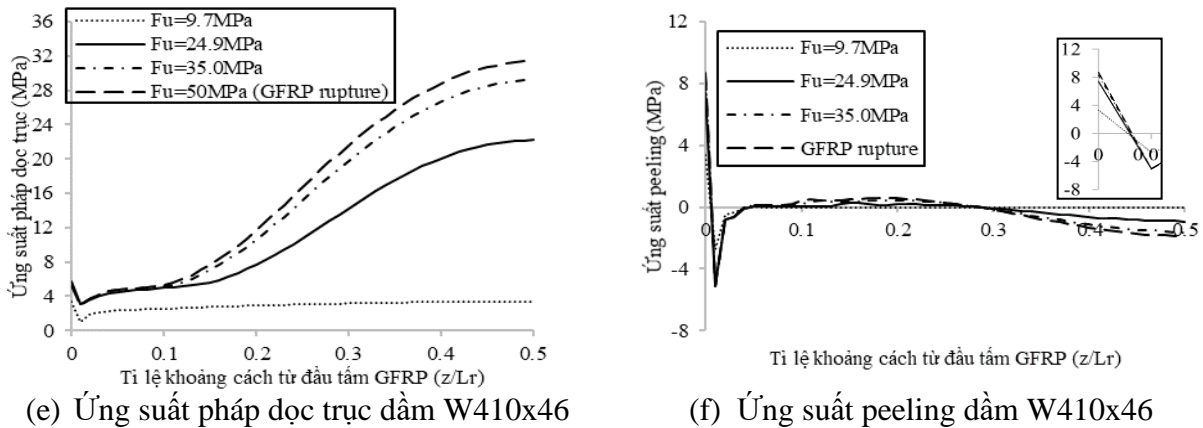
(b) Ứng suất pháp dọc trục dầm W150x18



(c) Ứng suất peeling dầm W150x18



(d) Ứng suất cắt dầm W410x46



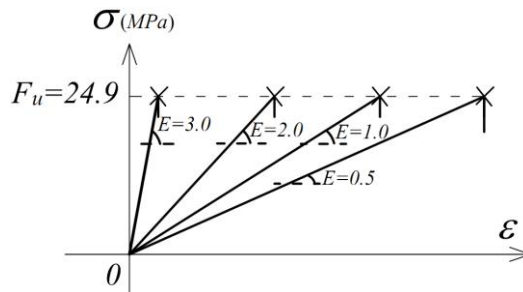
(e) Ứng suất pháp dọc trục dầm W410x46

(f) Ứng suất peeling dầm W410x46

Hình 8. Ảnh hưởng của sức kháng tối đa của lớp kết dính tới ứng suất trong lớp kết dính khi phá hoại.

3.3. Ảnh hưởng của mô đun đàn hồi chất kết dính

Trong phần này, 4 loại chất kết dính với các giá trị mô đun đàn hồi khác nhau $E_a = 0.5$ GPa, 1.0 GPa, 2.0 GPa và 3.0 GPa được lấy làm tham số khảo sát (Hình 9). Trong khi đó, cả 4 loại cùng có sức kháng phá hoại $F_u = 24.9$ MPa.



Hình 9. Khảo sát ảnh hưởng của mô đun đàn hồi lớp kết dính.

Dạng phá hoại và giá trị mô men kháng của các trường hợp khảo sát được tổng hợp tại bảng 3. Như ta thấy, giá trị mô men kháng tỉ lệ nghịch với giá trị mô đun đàn hồi lớp kết dính, có thể do lớp kết dính có mô đun đàn hồi nhỏ hơn chịu nhiều ứng suất cắt hơn (sẽ được thảo luận thêm trong Hình 10). Tuy nhiên, sự thay đổi về mô men kháng là không nhiều đối với cả 2 loại dầm (chênh lệch lớn nhất là 17% với dầm W150x18). Sự thay đổi giá trị mô đun đàn hồi lớp kết dính cũng không làm thay đổi dạng phá hoại của dầm khi tất cả các trường hợp đều phá hoại ở lớp kết dính.

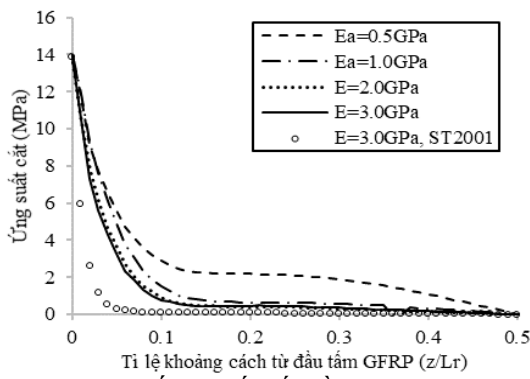
Nhận xét trên cũng hoàn toàn logic với sự phân bố của ứng suất cắt và các ứng suất pháp trong lớp kết dính như thể hiện trong Hình 10. Quy luật biến thiên của các giá trị ứng suất này đều giống nhau đối với tất cả các dạng lớp kết dính được khảo sát, tương đồng với cả 2 loại dầm.

Bảng 3. Ảnh hưởng của mô đun đàn hồi lớp kết dính E tới sức kháng uốn tối đa của kết cấu.

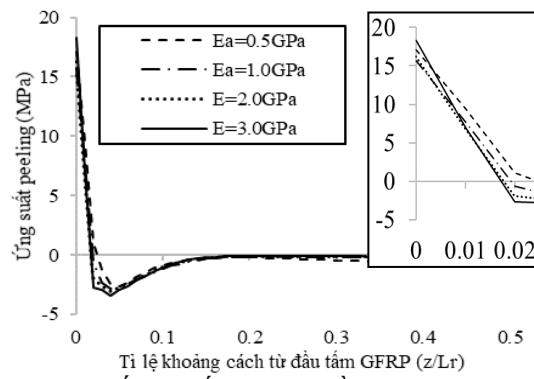
E _a (GPa)	F _u (MPa)	Dầm W150x18		Dầm W410x46	
		Dạng phá hoại	Mu (kNm)	Dạng phá hoại	Mu (kNm)
0.5	24.9	Lớp kết dính	63.0	Lớp kết dính	395.0
1.0	24.9	Lớp kết dính	62.5	Lớp kết dính	386.0
2.0	24.9	Lớp kết dính	52.5	Lớp kết dính	374.0
3.0	24.9	Lớp kết dính	52.3	Lớp kết dính	373.2

Với một sức kháng phá hoại 24.9 MPa, ta có được quan sát được từ Hình 10 như sau: (i) Lớp kết dính chịu nhiều ứng suất cắt hơn với vật liệu kết dính có mô đun đàn hồi nhỏ hơn, điều này được thể hiện qua sự phân bố thoải hơn của ứng suất cắt dọc theo chiều dài dính kết (Hình 10a,d). (ii) Ứng suất cắt rất cao ở biên và giảm mạnh trong khoảng z/L_r từ 0 đến khoảng 0.1. (iii) Các ứng suất peeling chủ yếu tập trung cao ở khu vực đầu tấm GFRP (trong khoảng $z/L_r = 0.05$) (Hình 10b,e). Như vậy các ứng suất cắt và peeling chỉ chủ yếu tập trung ở khu vực biên. Trong khảo sát này, các ứng suất pháp dọc trục (Hình 10c,f) cũng tập trung khá cao ở vùng biên. Tuy nhiên, ở khu vực giữa dầm, các ứng suất pháp dọc trục là khá thoải và nhỏ hơn các giá trị ở biên.

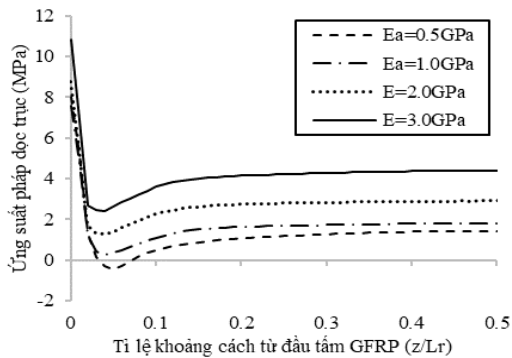
Trong các Hình 10a và 10d, ứng suất cắt dự đoán bởi mô hình phân tích của Smith and Teng [12] cũng được trình bày. Các ứng suất này được xây dựng dựa trên giả thiết vật liệu đàn hồi. Các ứng suất cắt dựa trên nghiên cứu [12] là dốc hơn nhiều so với các ứng suất trong nghiên cứu hiện tại. Nghiên cứu hiện tại có xét đến yếu tố phi tuyến vật liệu và phân tích kết cấu phi tuyến.



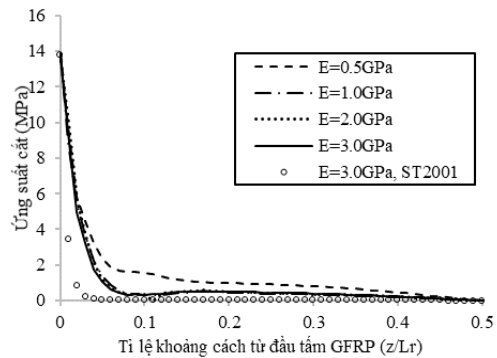
(a) Ứng suất cắt dầm W150x18



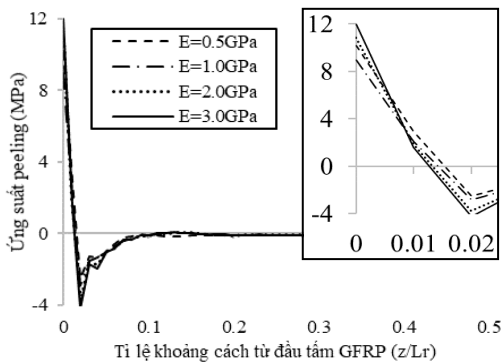
(b) Ứng suất peeling dầm W150x18



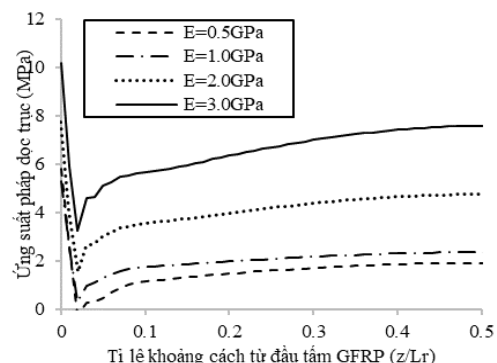
(c) Ứng suất pháp dọc trục dầm W150x18



(d) Ứng suất cắt dầm W410x46



(e) Ứng suất peeling dầm W410x46



(f) Ứng suất pháp dọc trục dầm W410x46

Hình 10. Ảnh hưởng của mô-đun đàn hồi của lớp kết dính tới ứng suất trong lớp kết dính khi phá hoại.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo đã giới thiệu một nghiên cứu số dựa trên phần mềm Abaqus nhằm đánh giá ứng xử của dầm thép cánh rộng gia cường uốn bằng tấm GFRP. Mô hình số cho phép xác định sức kháng mô men uốn tối đa của dầm cũng như sự thay đổi các trường ứng suất trong lớp kết dính. Dựa trên mô hình đề xuất, các khảo sát về ảnh hưởng của lớp kết dính được thực hiện. Các kết quả khảo sát chính bao gồm: (i) Khi sức kháng phá hoại của chất kết dính cao lên, thì lớp kết dính sẽ chịu nhiều ứng suất cắt và ứng suất pháp hơn ở vùng biên và cả ở khu vực giữa nhịp. Bên cạnh đó, khi sức kháng phá hoại này nhỏ, các ứng suất cắt và ứng suất pháp theo phương đứng (peeling) chỉ tập trung cao ở khu vực nhỏ ở biên (đầu tấm GFRP). (ii) Khi có cùng một sức kháng phá hoại, lớp kết dính chịu nhiều ứng suất cắt hơn đối với vật liệu kết dính có mô đun đàn hồi nhỏ hơn. (iii) Với lớp kết dính có sức kháng phá hoại lớn hơn thì mô men kháng của kết cấu cũng tăng lên. Khi sức kháng phá hoại của lớp dính bám đủ lớn, dạng phá hoại sẽ chuyển từ vị trí lớp kết dính sang phá hoại ở tấm GFRP. (iv) Giá trị mô men kháng tỉ lệ nghịch với giá trị mô đun đàn hồi lớp kết dính, có thể do lớp kết dính có mô đun đàn hồi nhỏ hơn chịu nhiều ứng suất cắt hơn.

Nghiên cứu trình bày trong bài báo là một bước trong quá trình nghiên cứu đề xuất chiều dài phát triển của tấm GFRP. Như quan sát được, các ứng suất cắt và ứng suất pháp peeling chủ yếu tập trung trong khu vực chiều dài z/L_r từ 0 tới 0.1. Như vậy một chiều dài phát triển có thể tạm đề xuất là $L_d = 0.1L_r$. Tuy nhiên, nghiên cứu này cần được mở rộng để xem xét thêm ảnh hưởng của chiều dài và độ dày của tấm GFRP, cũng như các loại dầm và vật liệu kết dính với các đặc trưng, kích thước khác nhau, và bề mặt liên kết giữa các vật liệu để đề xuất một chiều dài phát triển hợp lý hơn. Dựa trên một công thức hợp lý của chiều dài phát triển, ta có thể được xây dựng được một mô hình đơn giản hóa để tính toán sức kháng uốn tối đa của kết cấu thép gia cường tấm GFRP.

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả chân thành cảm ơn Quỹ phát triển Khoa học và Công nghệ quốc gia đã tài trợ cho nghiên cứu này trong khuôn khổ đề tài mã số 107.02-2019.12.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A.A. El Damatty, M. Abushagur, Testing and modeling of shear and peel behavior for bonded steel/FRP connections, Thin-Walled Structures, 41 (2003) 987-1003. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(03\)00051-X](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(03)00051-X)
- [2]. A. El Damatty, M. Abushagur, M. A. Youssef, Experimental and analytical investigation of steel beams rehabilitated using GFRP sheets, Steel&Comp, 3 (2005) 421-438. <https://doi.org/10.12989/scs.2003.3.6.421>
- [3]. E. Accord, C.J.Earls, Use of fiber-reinforced polymer composite elements to enhance structural steel member ductility, J. of comp. for const., 10 (2006) 337-344. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2006\)10:4\(337\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:4(337))
- [4]. M. Youssef, Analytical Prediction of the Linear and Nonlinear Behaviour of Steel Beams Rehabilitated using FRP Sheets, Engineering Structures, 28 (2006) 903-911. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.10.018>
- [5]. K.A. Harries, A.J. Peck, E.J. Abraham, Enhancing stability of structural steel sections using FRP, Thin-walled structures, 47 (2009) 1092 - 1101. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.10.007>

- [6]. M.A.A.Siddique, A.A. El Damatty, Enhancement of buckling capacity of steel plates strengthened with GFRP plates, Thin-Walled Structures, 60 (2012) 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.06.013>
- [7]. M.A.A. Siddique, A.A. El Damatty, Improvement of local buckling behaviour of steel beams through bonding GFRP plates, Composite Structures, 96 (2013) 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.08.042>
- [8]. P.V. Pham, M. Mohareb, A. Fam, Finite element formulation for the analysis of multilayered beams based on the principle of stationary complementary strain energy, Engineering Structures, 167C (2018) 287 -307. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.014>
- [9]. P.V. Pham, M. Mohareb, A. Fam, Lateral torsional buckling of steel beams strengthened with GFRP plate, Thin-walled structures, 131 (2018) 55-75. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.06.025>
- [10]. S. Kadam, Failure criteria for evaluating Strength of Adhesive joints, Master thesis, Technische University Delft. 2014.
- [11]. FYFE, Tyfo S Saturant Epozy, Link: <http://www.fyfeasia.com/-/media/Files/Fyfe/2013-Products/Tyfo-S-Epoxy.ashx?la=en>, Date: December 20th 2019.
- [12]. Gurit, Spabond 345 Epoxy adhesive systems, Link: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/Sp345%20Datasheet.pdf>, Date: December 20th 2019.
- [13]. Smith, S.T., Teng, J.G., Interfacial stresses in plated beams, Eng. Structs, 2001 (23) 857 - 871. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00090-0)