

KHẢO SÁT CÁC THAM SỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CỦA DẦM BÊ TÔNG KHÔNG CỐT THÉP ĐAI ĐƯỢC GIA CƯỜNG CHỊU CẮT BẰNG TẤM CFRP

Phạm Thị Nhung^a, Đặng Xuân Nhân^a, Nguyễn Khắc Anh Vũ^a, Trần Nguyễn Thanh Tùng^a,
Nguyễn Xuân Tùng^a, Nguyễn Ngọc Tân^{a,*}, Dư Đức Hiếu^a

^a*Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 15/4/2023, Sửa xong 22/5/2023, Chấp nhận đăng 23/5/2023

Tóm tắt

Vật liệu tấm CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Polymer) được sử dụng phổ biến để gia cường các kết cấu thực tế bằng bê tông cốt thép. Do có tính chất cơ học vượt trội so với thép, nên vật liệu này mang lại hiệu quả gia cường cao đối với các cấu kiện chịu uốn và chịu cắt. Cho đến nay, số lượng nghiên cứu trên dầm bê tông không cốt đai được gia cường chịu cắt vẫn còn hạn chế. Do đó, trong nghiên cứu này, các mô hình phần tử hữu hạn đã được xây dựng và kiểm chứng trên sáu dầm thực nghiệm, gồm một dầm đối chứng và năm dầm gia cường bằng các tấm CFRP trên $\frac{1}{2}$ chiều cao dầm. Các mô hình số cho phép mô phỏng chính xác khả năng chịu cắt, sơ đồ vết nứt và cơ chế phá hoại của các dầm thí nghiệm. Từ đó, các mô hình dầm đã được phát triển nhằm khảo sát các tham số thiết kế ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của dầm bê tông gia cường bằng CFRP, bao gồm: (i) cường độ chịu nén của bê tông; (ii) hàm lượng cốt thép dọc; (iii) sơ đồ dán CFRP; (iv) số lớp CFRP. Những kết quả thu được chỉ ra rằng, cường độ chịu nén của bê tông và hàm lượng cốt thép ảnh hưởng lớn đến khả năng chịu cắt của các dầm gia cường. Trong khi đó, sơ đồ dán CFRP và số lớp CFRP ảnh hưởng lớn đến độ dẻo, sơ đồ vết nứt và cơ chế phá hoại của dầm gia cường chịu cắt.

Từ khóa: bê tông cốt thép; dầm bê tông; không cốt đai; gia cường cắt; tấm sợi CFRP.

INVESTIGATING PARAMETERS AFFECTING THE LOAD-CARRYING CAPACITY OF CONCRETE BEAMS WITHOUT SHEAR REINFORCEMENT STRENGTHENED WITH CFRP SHEETS

Abstract

CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Polymer) sheets have been commonly used to strengthen existing structures in reinforced concrete. Due to its superior mechanical properties compared to steel, this material provides high retrofitting efficiency for structural members in flexure and shear. Until now, the number of studies on shear-strengthened concrete beams without shear reinforcement (stirrups) is still limited. Therefore, in the present study, finite element models have been built and verified on six experimental concrete beams, including one control beam and five strengthened beams externally bonded with CFRP sheets over $\frac{1}{2}$ beam height. The numerical models allow for the simulation of the shear capacity, cracking pattern, and failure mechanisms of the tested beams with good agreement. Since then, numerical models have been developed to investigate design-oriented parameters affecting the shear capacity of CFRP-strengthened concrete beams, including (i) compressive strength of concrete; (ii) longitudinal reinforcement ratio; (iii) CFRP bonding schemes; (iv) multiple CFRP layers. The obtained results show that the compressive strength of concrete and longitudinal steel reinforcement ratio significantly affect the shear capacity of strengthened beams. Meanwhile, the CFRP bonding scheme and the number of CFRP layers considerably affect the ductility, cracking pattern, and failure mechanism of shear-critical strengthened beams.

Keywords: reinforced concrete; concrete beams; without shear reinforcement; shear strengthening; CFRP sheets.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(3V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(3V)-02) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: tannn@huce.edu.vn (Tân, N. N.)

1. Giới thiệu

Trong số các loại vật liệu gia cường bằng sợi tổng hợp, thì vật liệu CFRP được sử dụng phổ biến để gia cường kết cấu bê tông cốt thép (BTCT), vì có các tính chất cơ học rất cao (cường độ chịu kéo, mô đun đàn hồi), khối lượng thể tích nhỏ, độ bền chống ăn mòn cao và kỹ thuật thi công đơn giản, nên có thể giảm các chi phí liên quan đến vận chuyển vật tư và thi công tại hiện trường [1–3]. Từ đó, tiến độ thi công gia cường kết cấu được thực hiện nhanh chóng, ít ảnh hưởng đến quá trình khai thác và sử dụng công trình thực tế. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện nhằm đánh giá ứng xử cơ học, cơ chế phá hoại, cũng như đề xuất các kỹ thuật mới nhằm cải thiện tính hiệu quả khi gia cường dầm BTCT bằng CFRP [4, 5]. Phần lớn nghiên cứu trước đây được tiến hành trên các mẫu dầm gia cường chịu uốn, có kích thước nhỏ và trong phạm vi phòng thí nghiệm [6–8]. So với gia cường chịu uốn, các nghiên cứu về gia cường chịu cắt cho dầm BTCT thì có số lượng ít hơn và chủ yếu được tiến hành trên các mẫu dầm có tiết diện chữ nhật hoặc chữ T, với kích thước hạn chế [9–15]. Cho đến nay, nghiên cứu về khả năng chịu cắt của dầm gia cường bằng CFRP vẫn là một chủ đề được các nhà khoa học quan tâm, đặc biệt đối với dầm bê tông không cốt thép đai [16–20].

Theo lý thuyết, khả năng chịu cắt của dầm được tính toán bằng tổng khả năng chịu cắt của các vật liệu thành phần, gồm có bê tông, cốt thép chịu cắt và vật liệu gia cường. Tuy nhiên, khả năng chịu cắt của dầm gia cường CFRP có thể mâu thuẫn với giả thuyết về sự độc lập khả năng chịu cắt của từng vật liệu. Bê tông và CFRP đều là vật liệu giòn, sự đóng góp khả năng chịu cắt tối đa cho dầm không thể đạt được đồng thời. Sau khi gia cường, sự đóng góp của vật liệu CFRP vào khả năng chịu lực của kết cấu thường bị hạn chế do xảy ra phá hoại bong tách sớm hoặc hư hỏng do ứng suất cắt cục bộ. Điều này là do sự phân bố không đồng nhất của ứng suất trong tấm CFRP dọc theo mặt phẳng của vết nứt cắt [9, 10]. Mức độ cải thiện khả năng chịu cắt của dầm không chỉ phụ thuộc vào tính chất cơ học của các vật liệu (bê tông, thép, CFRP), mà còn phụ thuộc vào hàm lượng CFRP, kỹ thuật và sơ đồ dán gia cường. Do phạm vi rộng của các tham số này, cũng như sự đa dạng của các loại kết cấu dầm, việc xác định ảnh hưởng của từng tham số đối với ứng xử cơ học của mỗi loại dầm vẫn cần được nghiên cứu và thảo luận nhiều hơn.

Số liệu thu được từ nghiên cứu thực nghiệm có vai trò rất quan trọng trong việc đề xuất và hiệu chỉnh các công thức thực nghiệm, các mô hình dự báo khả năng chịu lực và sự phá hoại do bong tách CFRP hoặc bê tông bảo vệ. Tuy nhiên, nghiên cứu thực nghiệm yêu cầu một nguồn lực lớn để thực hiện. Hơn nữa, kết quả thực nghiệm có thể không chính xác do ảnh hưởng tỷ lệ kích thước hình học của mẫu thử so với kết cấu thực tế, do sai số đến từ thiết bị thí nghiệm hoặc nhân viên thử nghiệm. Đó là lý do vì sao phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) ngày càng trở thành một công cụ hữu ích để phân tích kết cấu, cũng như nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số thiết kế đến ứng xử cơ học của cấu kiện nói chung, và cấu kiện gia cường bằng FRP nói riêng. Gần đây, Tân và cs. [18] đã thiết lập các mô hình PTHH để phân tích ứng xử cắt của dầm BTCT được gia cường bằng các tấm CFRP hình chữ U. Nghiên cứu này chỉ ra rằng, đối với dầm bê tông có cốt đai, bê tông có cường độ chịu nén thấp làm giảm đáng kể khả năng chịu cắt và độ cứng ban đầu của dầm gia cường, do bê tông vùng nén bị vỡ sớm trước khi huy động tối đa khả năng làm việc của CFRP. Trong trường hợp này, sử dụng nhiều lớp tấm CFRP (tăng hàm lượng CFRP) trở nên không hiệu quả khi thiết kế gia cường. Trong khi đó, sơ đồ gia cường bằng các tấm CFRP hình chữ U dán vuông góc với trục dầm kết hợp với các dải CFRP dán dọc ở cuối tấm cải thiện đáng kể khả năng chịu cắt và độ dẻo của dầm. Cần lưu ý rằng, những nhận xét ở trên chỉ được phát hiện trên dầm bê tông có cốt đai và chiều cao của các tấm CFRP tương đương với chiều cao dầm. Do đó, trong bài báo này, đối tượng nghiên cứu được xem xét là dầm bê tông có tiết diện chữ nhật, chỉ được bố trí cốt thép dọc và chỉ gia cường trên $\frac{1}{2}$ chiều cao dầm (nửa dưới tiết diện dầm), để phù hợp với thực tế là nửa trên tiết diện dầm thường nằm trong sàn nên không

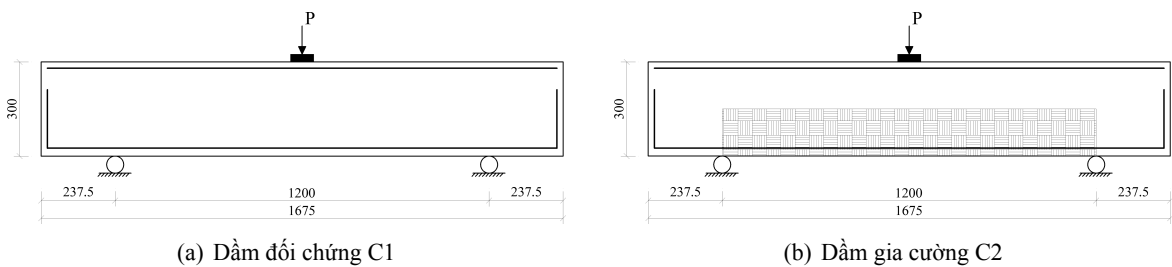
thể tiếp cận. Kết quả thu được nhằm phản ánh chính xác hơn ảnh hưởng của tấm CFRP đến khả năng chịu cắt của dầm bê tông.

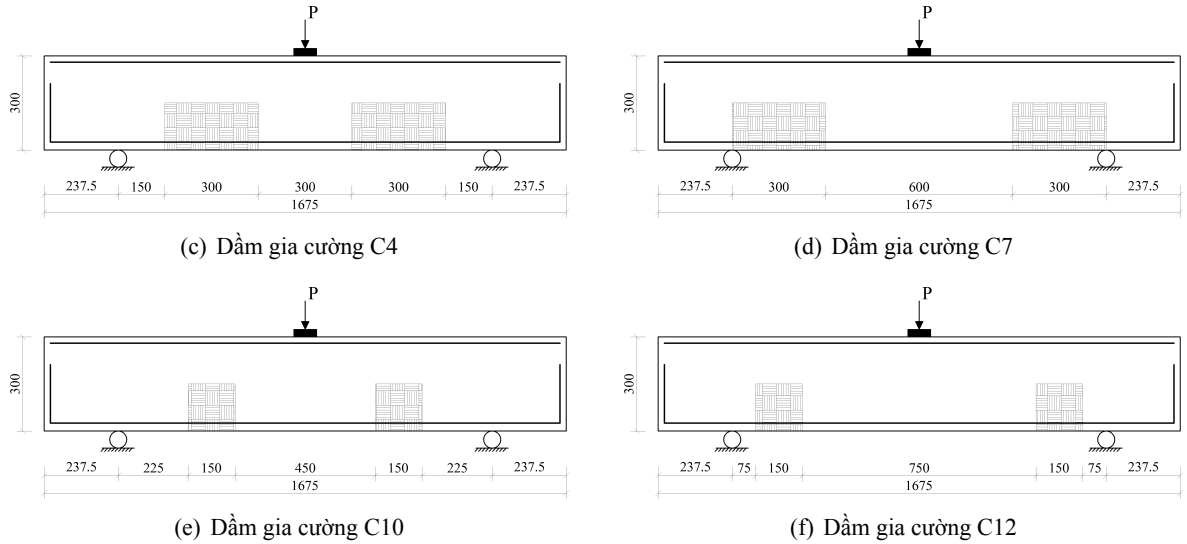
Trong nghiên cứu này, các mô hình PTHH 3D (ba chiều) đã được thiết lập và kiểm chứng độ tin cậy trên tổng số sáu dầm bê tông có kích thước $150 \times 300 \times 1675$ mm, bao gồm: một dầm đối chứng và năm dầm gia cường bằng CFRP. Các tham số về vật liệu và các kết quả đặc trưng cho ứng xử cơ học của dầm như biểu đồ tải trọng – chuyển vị, sơ đồ vết nứt và dạng phá hoại được thu thập từ một nghiên cứu thực nghiệm của Bukhari và cs. [14]. Việc so sánh giữa kết quả mô hình và kết quả thực nghiệm cho phép khẳng định rằng các mô hình PTHH có khả năng dự báo chính xác khả năng chịu cắt của dầm đối chứng và các dầm gia cường, cũng như cho phép mô phỏng sơ đồ vết nứt bê tông và các dạng phá hoại xảy ra (phá hoại cắt, bong tách tấm CFRP, hư hỏng tấm CFRP). Sau đó, tổng cộng 16 mô hình đã được phát triển nhằm khảo sát các tham số chính ảnh hưởng đến khả năng chịu lực của dầm bê tông không cốt đai được gia cường bằng tấm CFRP, bao gồm: (i) cường độ chịu nén của bê tông; (ii) hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo; (iii) sơ đồ dán CFRP; (iv) số lớp CFRP.

2. Dầm thực nghiệm và mô hình vật liệu

2.1. Dầm thực nghiệm

Trong nghiên cứu này, sáu mẫu dầm thực nghiệm trong nghiên cứu của Bukhari và cs. [14] đã được sử dụng để thiết lập và kiểm chứng độ tin cậy của mô hình số. Hình 1 minh họa cấu tạo của các mẫu dầm thực nghiệm, có tiết diện 150×300 mm và chiều dài dầm là 1675 mm. Dầm đối chứng, ký hiệu C1, được cấu tạo bởi hai thanh thép có đường kính danh nghĩa $\phi 19$ mm ở lớp dưới và hai thanh thép có đường kính danh nghĩa $\phi 10$ mm ở lớp trên và không bố trí cốt thép đai. Trong khi đó, năm mẫu dầm gia cường, ký hiệu lần lượt là C2, C4, C7, C10 và C12, được chế tạo cùng loại bê tông và bố trí cốt thép dọc hoàn toàn tương tự giống như dầm đối chứng. Do các dầm này không được bố trí cốt đai nên được dán gia cường bằng tấm CFRP trên hai mặt bên của dầm (không dán gia cường ở đáy dầm). Chiều cao của các tấm CFRP được sử dụng là như nhau, bằng 150 mm, tương ứng với $\frac{1}{2}$ chiều cao của dầm. Dầm C2 được dán gia cường bằng hai tấm CFRP có bề rộng 1200 mm, tương ứng với chiều dài nhịp dầm. Dầm C4 được dán gia cường bằng hai tấm CFRP ở giữa gối tựa và điểm đặt lực, mỗi tấm có bề rộng bằng 300 mm. Dầm C7 cũng được dán gia cường bằng hai tấm CFRP có bề rộng 300 mm, nhưng các vị trí dán ở sát với hai gối tựa. Hai dầm C10 và C12 có sơ đồ dán gia cường tương tự như hai dầm C4 và C7, nhưng bề rộng mỗi tấm dán được giảm xuống là 150 mm. Tất cả các mẫu dầm đã được thí nghiệm theo sơ đồ uốn ba điểm, chịu tác dụng của một tải trọng tập trung (P), khoảng cách giữa hai gối tựa là 1200 mm, như minh họa trên Hình 1. Bảng 1 tóm tắt các thông số cơ bản của từng dầm thí nghiệm, bao gồm: kích thước hình học; tỷ số giữa chiều dài nhịp cắt và chiều cao hiệu quả của dầm (a/d); cường độ chịu nén trung bình của bê tông (f_{cm}); giới hạn chảy dẻo của thép (f_y); chiều dày tấm CFRP (t_f), chiều dài tấm CFRP (l_f), giới hạn bền kéo của CFRP (f_{fu}) và mô đun đàn hồi của CFRP.





Hình 1. Kích thước và cấu tạo của các dầm thực nghiệm

Bảng 1. Thông số hình học và vật liệu cấu tạo của các dầm thí nghiệm [14]

Dầm	Kích thước (mm×mm×mm)	a/d	f_{cm} (MPa)	f_y (MPa)	t_f (mm)	l_f (mm)	f_{fu} (MPa)	E_f (GPa)
C1	150×300×1675	2,0	49,13	494	-	-	-	-
C2	150×300×1675	2,0	49,10	494	0,34	1200	3450	234,5
C4	150×300×1675	2,0	49,10	494	0,34	300	3450	234,5
C7	150×300×1675	2,0	48,97	494	0,34	300	3450	234,5
C10	150×300×1675	2,0	51,38	494	0,34	150	3450	234,5
C12	150×300×1675	2,0	48,41	494	0,34	150	3450	234,5

2.2. Mô hình vật liệu

a. Mô hình bê tông

Trong nghiên cứu này, chương trình DIANA FEA [21] đã được sử dụng để thiết lập mô hình 3D của các mẫu dầm, như minh họa trên Hình 2. Dầm bê tông được mô phỏng bằng cách sử dụng các phần tử khối đẳng hướng CHX60 có 20 nút. Lưới phần tử bê tông được lựa chọn là $25 \times 25 \times 25$ mm, để số lượng phần tử được rời rạc hóa trên mỗi cạnh của dầm luôn là số chẵn. Hơn nữa, một khảo sát về ảnh hưởng của kích thước lưới phần tử bê tông đã được thực hiện với các kích thước từ 20 mm đến 60 mm, tương ứng với ba lần kích thước lớn nhất của hạt cốt liệu thô ($d_{\max} = 19$ mm). Kết quả cho thấy lưới phần tử $25 \times 25 \times 25$ mm có độ chính xác tương đương với lưới phần tử $20 \times 20 \times 20$ mm, nhưng cho phép tiết kiệm thời gian và tài nguyên máy tính hơn. Đường cong parabol như minh họa trên Hình 2(a) được sử dụng để mô tả quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông. Khi bê tông chịu kéo, quan hệ ứng suất - biến dạng được mô phỏng bằng mô hình đề xuất bởi Hordijk & Reinhardt [22], đặc trưng bởi các tham số như cường độ chịu kéo (f_t), năng lượng phá hoại kéo (G_t) và dải bề rộng vết nứt ($h = \sqrt[3]{V}$), với V là thể tích của phần tử khối. Khi bê tông chịu nén, quan hệ ứng suất - biến dạng được đặc trưng bởi các tham số như: cường độ chịu nén đặc trưng (f_{ck}); mô đun đàn hồi (E_c) tương ứng với giai đoạn ứng suất nén nhỏ hơn $0,3 f_{ck}$; biến dạng nén cực hạn (ϵ'_u); năng lượng phá hoại nén (G_c); dải bề rộng vết nứt (h).

Ở nghiên cứu này đầm thí nghiệm được chế tạo bằng bê tông có cường độ chịu nén trung bình (f_{cm}) trên mẫu hình trụ ở 28 ngày bằng 49,2 MPa [14]. Dựa trên các công thức đề xuất bởi *fib* Model Code 1990 [23], cường độ chịu nén đặc trưng (f_{ck}) và cường độ chịu kéo trung bình (f_{ctm}) của bê tông được xác định lần lượt là 41,2 MPa và 3,6 MPa. Mô đun đàn hồi của bê tông lấy bằng 35 GPa. Năng lượng phá hoại kéo (G_F) của bê tông lấy bằng 0,107 Nmm/mm, được tính toán theo công thức (1), trong đó G_{Fo} là giá trị cơ bản của năng lượng phá hoại, được lấy bằng 0,035 đối với cốt liệu có $d_{max} = 19$ mm và f_{cmo} lấy bằng 10 MPa. Trong khi đó, năng lượng phá hoại nén (G_C) của bê tông được tính toán theo công thức (2), đề xuất bởi Nakamura & Higai [24], lấy bằng 26,69 Nmm/mm².

$$G_F = G_{Fo} \left(\frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right)^{0,7} \quad (1)$$

$$G_C = 250G_F \quad (2)$$

b. Mô hình cốt thép

Các thanh cốt thép dọc được mô phỏng dưới dạng các phần tử thanh nhúng trong các phần tử bê tông. Ứng xử kéo của cốt thép được mô phỏng bởi mối quan hệ tuyến tính giữa ứng suất và biến dạng như minh họa trên Hình 2(b), trong đó giới hạn chảy của thép (f_y) lấy bằng 494 MPa cho cả hai loại đường kính cốt thép, $\phi 10$ mm và $\phi 19$ mm, từ nghiên cứu của Bukhari và cs. [14]. Do thiếu các thông số khác, nên giới hạn bền (f_u) của thép được lấy bằng 620 MPa và mô đun đàn hồi (E_s) lấy bằng 200 GPa. Sau khi cốt thép đạt đến giới hạn chảy, giai đoạn tái bền của thép được đặc trưng bởi mô đun tiếp tuyến, lấy bằng 1/100 giá trị mô đun đàn hồi. Trong các mô hình đầm, giả thiết liên kết hoàn hảo (good bond) được áp dụng để mô tả bám dính giữa cốt thép và bê tông.

c. Mô hình tấm CFRP

Các tấm sợi gia cường CFRP được mô phỏng bằng cách sử dụng phần tử CQ40S, là phần tử vỏ cong đẳng hướng hình tứ giác có tám nút. Ứng xử cơ học của CFRP được mô hình bởi mối quan hệ tuyến tính giữa ứng suất và biến dạng khi chịu kéo, như minh họa trên Hình 2(c). Trong nghiên cứu này, các thông số của tấm CFRP [14] bao gồm: chiều dày (t_f) là 0,34 mm; giới hạn bền kéo (f_{fu}) bằng 3450 MPa; mô đun đàn hồi (E_f) bằng 234,5 GPa. Trong tính toán lý thuyết, khả năng chịu lực của đầm gia cường phụ thuộc vào biến dạng hiệu quả của CFRP. Do đó, trong phân tích PTHH, biến dạng kéo trong tấm CFRP được tính toán cho mỗi bước tải cho đến khi đạt đến giá trị biến dạng cực hạn, lấy bằng 0,015.

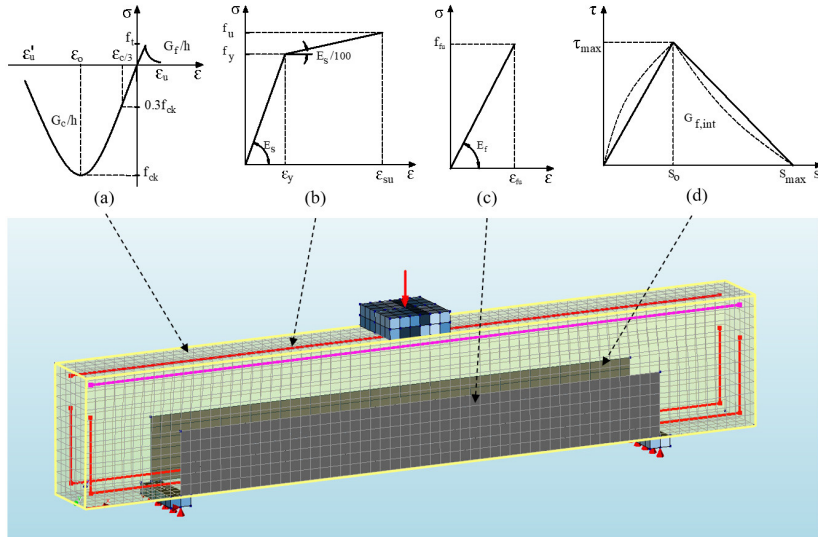
d. Mô hình bám dính giữa CFRP và bê tông

Trong mô hình PTHH, phần tử CQ48I được sử dụng để mô phỏng sự bám dính giữa hai mặt phẳng, tấm CFRP và bê tông, có độ dày bằng không. Trong nghiên cứu này, cường độ bám dính giữa CFRP và bê tông được mô phỏng bằng cách áp dụng mô hình giữa ứng suất cắt (τ) và độ trượt (S), được đề xuất bởi Lu và cs. [25], như minh họa trên Hình 2(d). Ứng suất cắt tại mặt tiếp xúc giữa CFRP và bê tông được xác định theo các công thức (3) và (4), tương ứng với các giai đoạn trước và sau khi CFRP bị bong tách khỏi bê tông.

$$\tau = \tau_{max} \sqrt{\frac{S}{S_o}} \text{ nếu } S \leq S_o \quad (3)$$

$$\tau = \tau_{max} \exp \left[-\alpha \left(\frac{S}{S_o} - 1 \right) \right] \text{ nếu } S \geq S_o \quad (4)$$

trong đó, ứng suất cắt lớn nhất (τ_{max}) phụ thuộc vào tỷ số β_w giữa bề rộng tấm CFRP (b_f), bề rộng bê tông (b_c) và cường độ chịu kéo của bê tông (f_t), được tính toán theo các công thức (5) và (6). Do các



Hình 2. Mô hình phần tử hữu hạn cho dầm gia cường CFRP

tấm CFRP được dán trên hai mặt bên của dầm bê tông, nên bề rộng b_f lấy bằng 150 mm, bề rộng b_c lấy bằng 300 mm, tương ứng với chiều cao của dầm. Do đó, ứng suất cắt lớn nhất có giá trị bằng 4,08 MPa. Khi ứng suất kéo tại bề mặt tiếp xúc giữa CFRP và bê tông vượt quá ứng suất cắt lớn nhất thì hiện tượng bong tách tấm dán bắt đầu xảy ra.

$$\tau_{\max} = 1,5\beta_w f_t \quad (5)$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{\left(2,25 - \frac{b_f}{b_c}\right)}{\left(1,25 + \frac{b_f}{b_c}\right)}} \quad (6)$$

Trong khi đó, độ trượt S_o tương ứng với ứng suất cắt lớn nhất cũng phụ thuộc vào tỷ số β_w và cường độ chịu kéo của bê tông (f_t), được xác định theo công thức (7). Hệ số α được tính toán dựa theo năng lượng phá hoại bề mặt (G_f), ứng suất cắt lớn nhất và độ trượt tương ứng, như thể hiện trong các công thức (8) và (9). Quá trình bong tách tấm dán sẽ kết thúc khi độ trượt đạt đến giá trị lớn nhất (S_{\max}), được tính toán theo công thức (10).

$$S_o = 0,0195\beta_w f_t \quad (7)$$

$$\alpha = 1 / \left[\frac{G_f}{\tau_{\max} S_o} - \frac{2}{3} \right] \quad (8)$$

$$G_f = 0,308\beta_w^2 \sqrt{f_t} \quad (9)$$

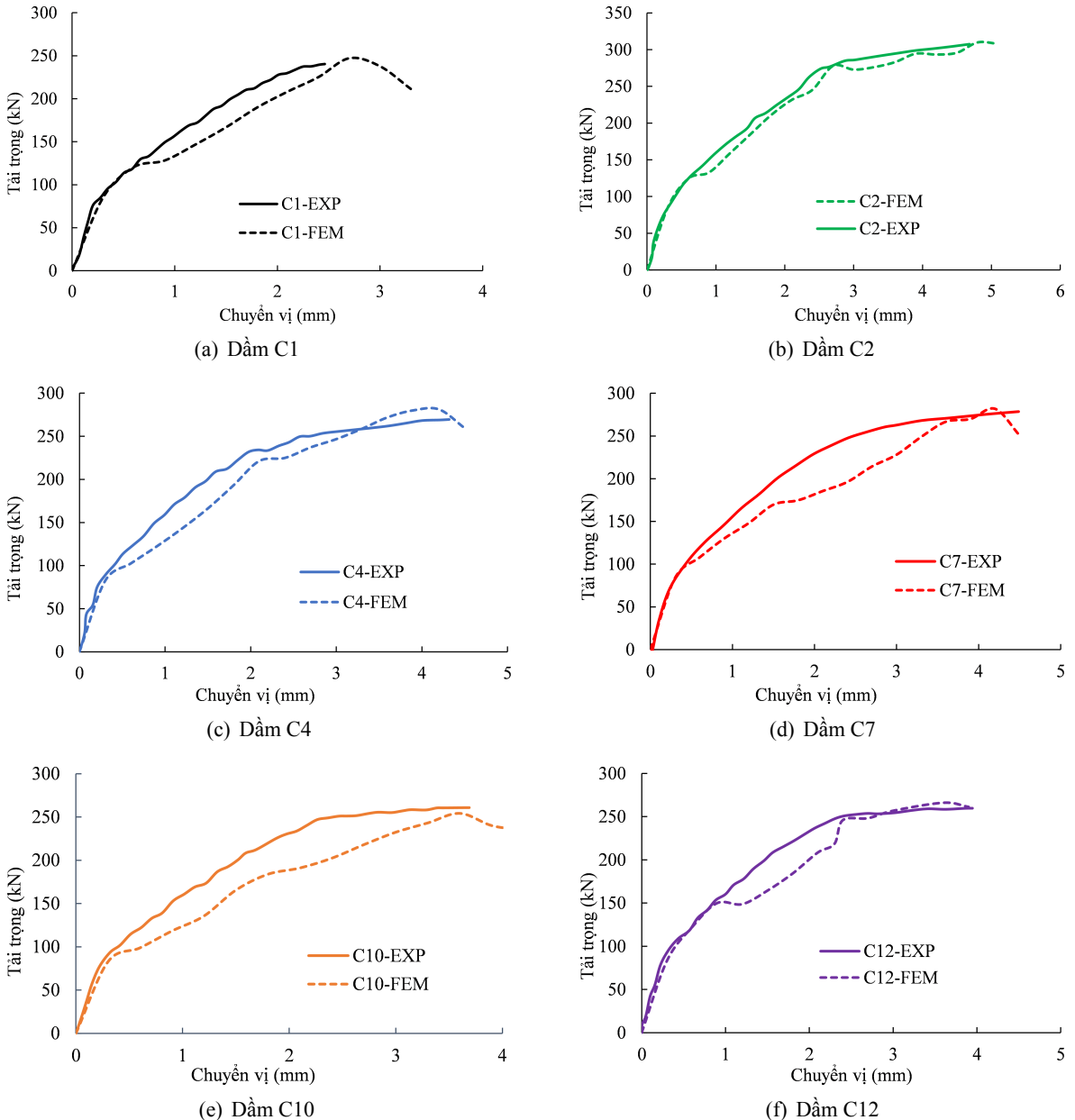
$$S_{\max} = \frac{2G_f}{\tau_{\max}} \quad (10)$$

e. Mô hình điểm đặt lực và các gối đỡ

Tương tự như dầm bê tông, các phần tử CHX60 cũng được sử dụng để mô hình cho điểm đặt lực và hai gối đỡ được làm bằng tấm thép. Mô hình vật liệu của các tấm thép được sử dụng tương tự như cốt thép, với mô đun đàn hồi lấy bằng 200 GPa và hệ số Poisson lấy bằng 0,2.

3. Kiểm chứng mô hình dầm gia cường

Để kiểm chứng độ chính xác của mô hình PTHH, sáu mẫu dầm giới thiệu trong mục 2.1 đã được mô phỏng và phân tích, nhằm so sánh với các kết quả thu được từ thí nghiệm. Các kết quả phân tích mô hình được so sánh với các kết quả thực nghiệm, dựa trên các tham số chính bao gồm: (i) biểu đồ tải trọng – chuyển vị (tải trọng lớn nhất, chuyển vị tương ứng); (ii) sơ đồ vết nứt bê tông; (iii) dạng phá hoại. Trong nghiên cứu này, sự phá hoại của sáu mẫu dầm thực nghiệm được chia làm ba dạng phá hoại khác nhau. Dầm đối chứng C1 bị phá hoại cắt, đặc trưng bởi sự hình thành và mở rộng của vết nứt nghiêng nổi gồ gề tựa và điểm đặt lực. Các dầm gia cường C2, C4 và C7 bị phá hoại do hư hỏng



Hình 3. So sánh biểu đồ tải trọng – chuyển vị thu được từ kết quả thực nghiệm (EXP) và kết quả mô hình (FEM)

tấm CFRP xảy ra tại điểm giao nhau giữa vết nứt cắt và tấm CFRP. Trong khi đó, dạng phá hoại của các dầm gia cường C10 và C12 là sự bong tách tấm CFRP. Do đó, mô hình PTHH phải có khả năng mô phỏng được các dạng phá hoại này của dầm đối chứng và dầm gia cường.

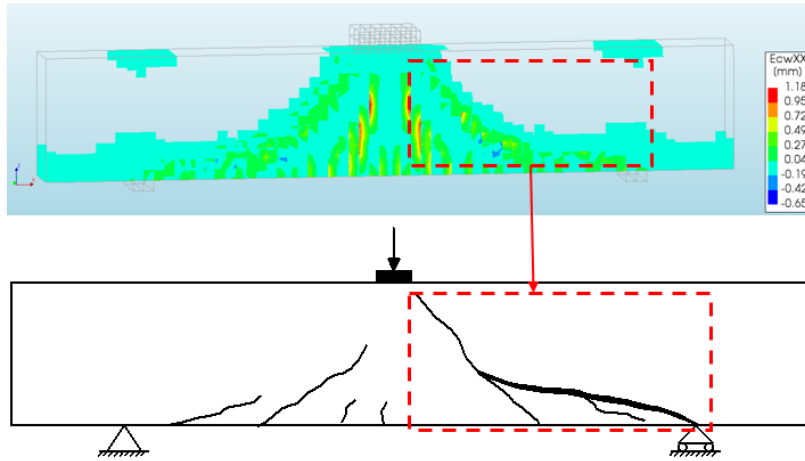
Đối với từng mẫu dầm, biểu đồ tải trọng – chuyển vị thu được từ phân tích mô hình số được so sánh với biểu đồ thực nghiệm, như chỉ ra trên Hình 3. Kết quả này cho thấy, khi tải trọng tác dụng lên dầm nhỏ hơn 100 kN, thì các mô hình PTHH đều mô phỏng rất chính xác ứng xử cơ học của tất cả mẫu dầm. Trong giai đoạn này, biểu đồ tải trọng – chuyển vị thu được từ mô hình số gần như trùng khớp với biểu đồ thực nghiệm. Đối với dầm đối chứng C1 và dầm gia cường C2, kết quả phân tích mô hình tiếp tục mô tả chính xác ứng xử của dầm thực nghiệm khi tải trọng tăng đến khoảng 125 kN. Trong giai đoạn tiếp theo, độ chênh lệch giữa biểu đồ mô hình và biểu đồ thực nghiệm có xu hướng tăng, nhưng có thể chấp nhận được. Hơn nữa, cả hai mô hình này đều cho phép dự đoán chính xác tải trọng lớn nhất của hai dầm C1 và C2. Trong khi đó, đối với các dầm gia cường C4, C7 và C10, khi tải trọng lớn hơn 100 kN, độ dốc của biểu đồ mô hình lớn hơn độ dốc của biểu đồ thực nghiệm. Kết quả này chỉ ra rằng độ cứng của dầm mô hình bị giảm nhiều hơn sau khi vết nứt cắt xuất hiện. Cũng cần lưu ý rằng, trong mô hình PTHH, chuyển vị của dầm được đo tại vị trí điểm đặt lực. Trong khi, chuyển vị của dầm thực nghiệm thường được đo tại vị trí giữa nhịp ở đáy dầm. Điều này có thể dẫn đến sự chênh lệch về chuyển vị giữa mô hình số và thí nghiệm, đặc biệt đối với dầm bê tông không cốt thép đai làm việc chịu cắt. Mô hình PTHH mô tả khá chính xác ứng xử cơ học của dầm gia cường C12, ngoại trừ giai đoạn tải trọng từ 150 đến 250 kN, thì chuyển vị của dầm mô hình lớn hơn so với dầm thực nghiệm. Ngược lại với kết quả thực nghiệm, kết quả phân tích mô hình dầm C10 và dầm C12 cho thấy vị trí dán tấm CFRP có thể ảnh hưởng đến khả năng chịu lực và ứng xử chịu cắt của dầm gia cường.

Thực tế, việc hiệu chỉnh biểu đồ tải trọng – chuyển vị của mô hình dầm chịu cắt phức tạp hơn rất nhiều so với mô hình dầm chịu uốn. Do đó, trong nghiên cứu này, mục đích của quá trình mô hình là thu được kết quả chính xác nhất cho tham số khả năng chịu lực, đồng thời mô tả chính xác sơ đồ vết nứt và dạng phá hoại của các mẫu dầm. Với mục đích đó, đối với từng mẫu dầm, các giá trị tải trọng lớn nhất (P_u) thu được từ thực nghiệm ($P_{u,EXP}$) và mô hình ($P_{u,FEM}$) được so sánh với nhau, thông qua tỷ số $P_{u,FEM}/P_{u,EXP}$ như chỉ ra trong Bảng 2. Tỷ số này có giá trị trong khoảng từ 0,98 đến 1,04. Kết quả này chỉ ra rằng các mô hình PTHH được xây dựng trong nghiên cứu này có khả năng mô phỏng chính xác khả năng chịu lực của dầm đối chứng và dầm gia cường chịu cắt bằng CFRP, với sai số trong phạm vi 4% so với kết quả thực nghiệm.

Bảng 2. So sánh kết quả giữa thực nghiệm và mô hình

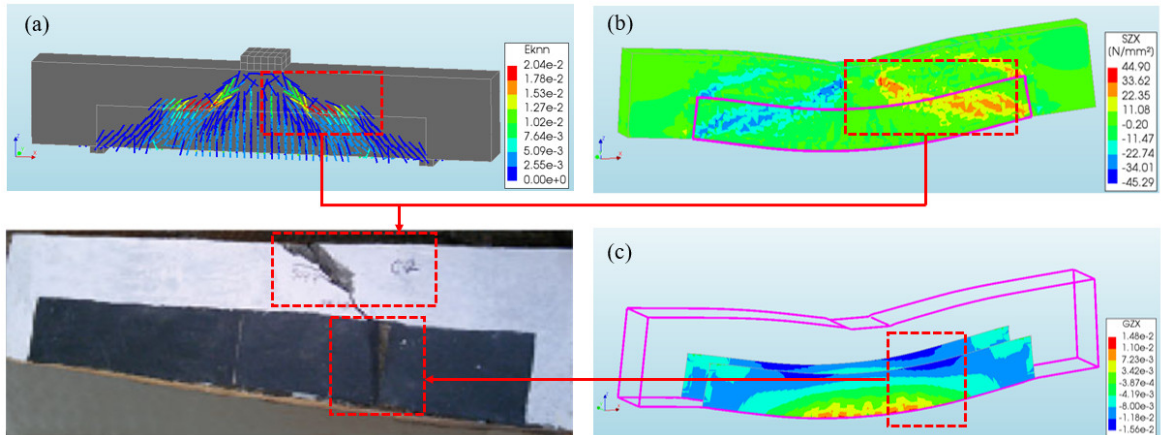
Dầm	Tải trọng lớn nhất		Tỷ số $P_{u,FEM}/P_{u,EXP}$	Dạng phá hoại
	$P_{u,EXP}$ (kN)	$P_{u,FEM}$ (kN)		
C1	242,3	247,2	1,02	Phá hoại cắt
C2	307,7	309,8	1,01	Hư hỏng CFRP
C4	269,3	281,2	1,04	Hư hỏng CFRP
C7	279,0	281,8	1,01	Hư hỏng CFRP
C10	259,7	254,3	0,98	Bong tách CFRP
C12	259,7	266,1	1,02	Bong tách CFRP

Một ưu điểm của phương pháp mô phỏng so với phương pháp thực nghiệm đó là dễ dàng phân tích sự phân bố ứng suất và biến dạng của vật liệu (bê tông, cốt thép, CFRP). Như một kết quả, Hình 4 so sánh sơ đồ vết nứt bê tông của dầm mô hình so với dầm đối chứng C1. Có thể nhận xét rằng, vết nứt



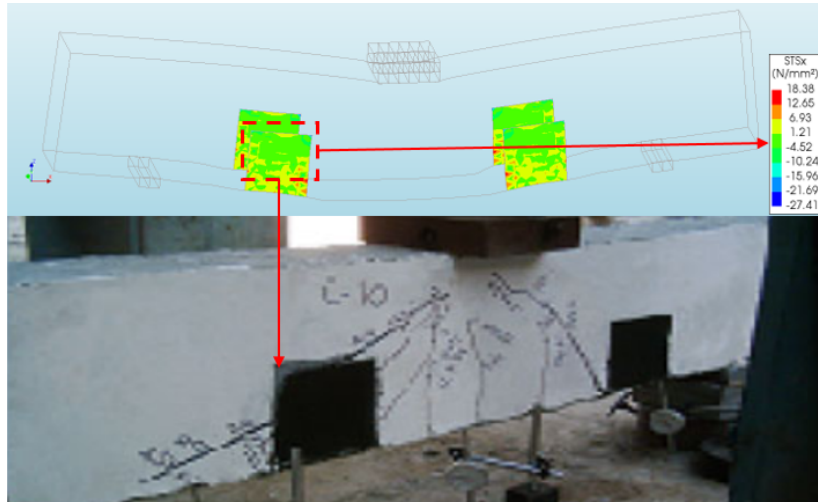
Hình 4. Dạng phá hoại của dầm đối chứng C1 quan sát từ mô hình và thực nghiệm

cắt của dầm mô hình phản ánh chính xác dạng phá hoại cắt của dầm thực nghiệm, do hình thành vết nứt nghiêng từ gối tựa đến điểm đặt lực. Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng, các dầm gia cường C2, C4 và C7 có cùng dạng phá hoại, là hư hỏng tấm CFRP tại vị trí giao giữa vết nứt cắt và tấm CFRP. Do đó, kết quả của mô hình dầm C2 được chọn để phân tích. Hình 5(a) giới thiệu sơ đồ phân bố biến dạng nứt thu được từ mô hình, cho phép mô phỏng vết nứt cắt trên dầm thực nghiệm. Do tính đối xứng của mô hình, nên vết nứt cắt xuất hiện trên hai phía của điểm đặt lực, trong khi đó vết nứt cắt chỉ xuất hiện trên một phía của dầm thí nghiệm do tính không đồng nhất của bê tông. Sơ đồ vết nứt được khẳng định thêm khi quan sát sự phân bố ứng suất trong dầm bê tông, như thể hiện trên Hình 5(b). Trong khi đó, Hình 5(c) giới thiệu biến dạng trong tấm CFRP, đã vượt quá biến dạng cực hạn có giá trị bằng 0,015.



Hình 5. Dạng phá hoại của dầm gia cường C2 quan sát từ mô hình và thực nghiệm

Tiếp theo, dạng phá hoại của mô hình dầm C10 và dầm C12 cũng được so sánh với dạng phá hoại quan sát từ thực nghiệm. Do dạng phá hoại của dầm C10 và dầm C12 giống nhau, nên kết quả của mô hình dầm C10 được chọn để giới thiệu. Hình 6 thể hiện kết quả phân bố ứng suất cắt tại mặt tiếp xúc giữa CFRP và bê tông. Kết quả chỉ ra rằng, ứng suất cắt đã vượt quá cường độ bám dính giữa CFRP và bê tông ($\tau_{\max} = 4,08 \text{ MPa}$), nghĩa là tấm CFRP bị bong tách khỏi dầm bê tông. Như vậy, các mô hình PTHH xây dựng trong nghiên cứu này có khả năng mô phỏng các dạng phá hoại xảy ra trên các mẫu dầm thực nghiệm.

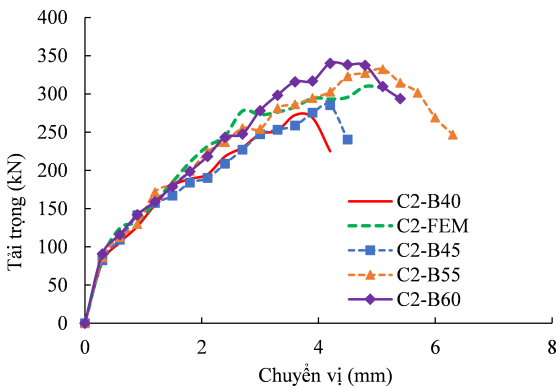


Hình 6. Dạng phá hoại của dầm gia cường C10 quan sát từ mô hình và thực nghiệm

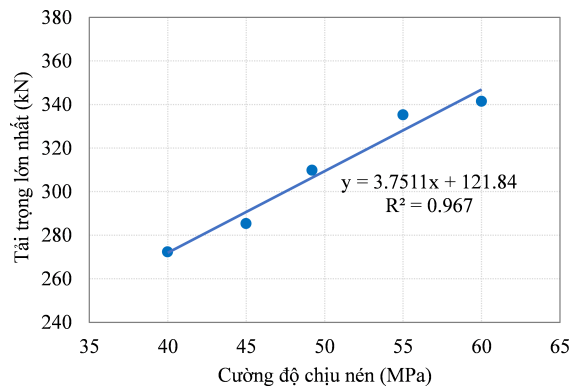
4. Khảo sát tham số ảnh hưởng

Dựa trên các biểu đồ tải trọng – chuyển vị, có thể nhận xét rằng mô hình PTHH của dầm gia cường C2 có độ tin cậy cao, với sai số chỉ 1% khi dự báo khả năng chịu lực của dầm, cũng như cho phép mô phỏng sơ đồ vết nứt bê tông và dạng phá hoại tấm CFRP. Do đó, trong phần này, mô hình dầm C2 được sử dụng để phát triển tổng cộng 16 mô hình, nhằm khảo sát các tham số chính ảnh hưởng đến khả năng chịu lực của dầm gia cường chịu cắt bằng tấm CFRP, bao gồm: (i) cường độ chịu nén của bê tông; (ii) hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo; (iii) sơ đồ dán CFRP; (iv) số lớp CFRP.

4.1. Ảnh hưởng của cường độ chịu nén bê tông



(a) Biểu đồ tải trọng - chuyển vị

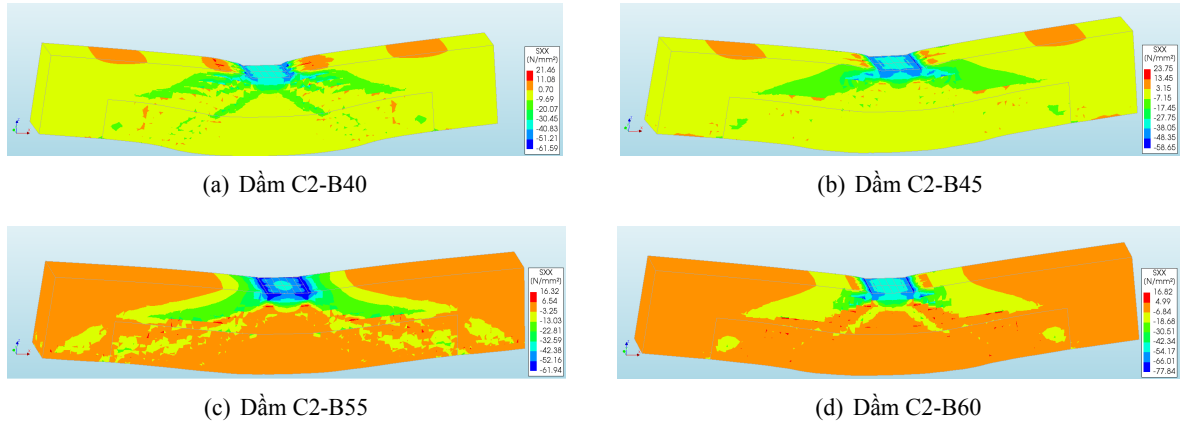


(b) Biểu đồ tải trọng – cường độ bê tông

Hình 7. Khả năng chịu lực của dầm gia cường khi thay đổi cường độ chịu nén của bê tông

Đối với dầm bê tông không cốt thép đai, dán gia cường tấm CFRP trên hai mặt bên, như minh họa trên Hình 1(b), thì khả năng chịu cắt phụ thuộc chủ yếu vào cường độ chịu cắt của bê tông và CFRP. Do đó, để khảo sát ảnh hưởng của bê tông đến khả năng chịu lực của dầm gia cường C2, bốn mô hình dầm đã được phát triển, ký hiệu C2-B40, C2-B45, C2-B55 và C2-B60, tương ứng với cường độ chịu nén lần lượt là 40 MPa, 45 MPa, 55 MPa và 60 MPa. Hình 7(a) giới thiệu các biểu đồ tải trọng – chuyển vị thu được từ phân tích mô hình số. Kết quả cho thấy, khi giảm cường độ chịu nén của bê tông từ 49 MPa xuống 45 MPa và 40 MPa, thì tải trọng lớn nhất của dầm giảm lần lượt 7,9%

và 12,1%. Ngược lại, đối với tải trọng lớn nhất của dầm C2-B55 và dầm C2-B60 tăng 8,2% và 10,2% khi so sánh với dầm C2. Do đó, khi cường độ chịu nén tăng từ 40 MPa đến 60 MPa thì tải trọng lớn nhất của dầm gia cường tăng 25%. Hơn nữa, Hình 7(b) chỉ ra rằng, mối quan hệ giữa tải trọng lớn nhất và cường độ chịu nén của bê tông là gần như tuyến tính, với một hệ số xác định $R^2 = 0,967$.

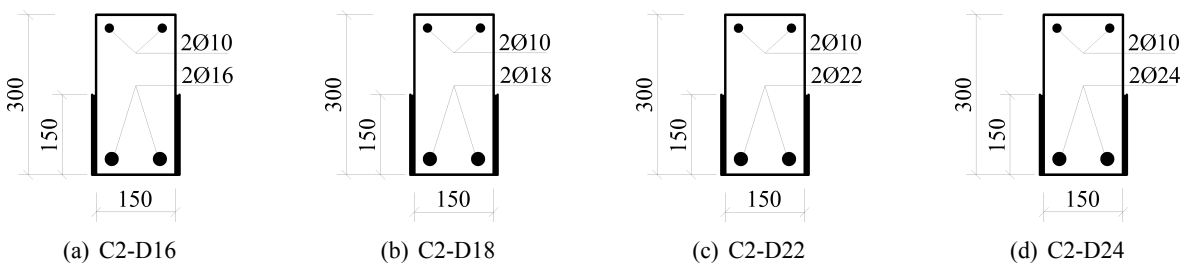


Hình 8. Ứng suất trong bê tông của dầm gia cường khi thay đổi cường độ chịu nén

Kết quả phân tích mô hình PTHH cho phép quan sát sự phân bố ứng suất trong bê tông, như thể hiện trên Hình 8. Kết quả chỉ ra rằng, dầm C2-B40 bị phá hoại do vỡ bê tông vùng nén vì giá trị ứng suất nén lớn hơn 40 MPa tại vị trí điểm đặt lực. Trong khi đó, các dầm gia cường sử dụng bê tông có cường độ nén lớn hơn, từ 45 đến 60 MPa, thì sự phá hoại xảy ra do hư hỏng tấm CFRP, trước khi bê tông vùng nén bị vỡ. Có thể nhận xét rằng, cường độ chịu nén của bê tông không những ảnh hưởng đến khả năng chịu lực, mà còn chi phối đến dạng phá hoại của dầm gia cường. Bê tông có cường độ chịu nén thấp có thể làm giảm hiệu quả của việc gia cường chịu cắt bằng tấm CFRP, do bê tông vùng nén bị vỡ trước khi tấm CFRP bị phá hoại.

4.2. Ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép dọc

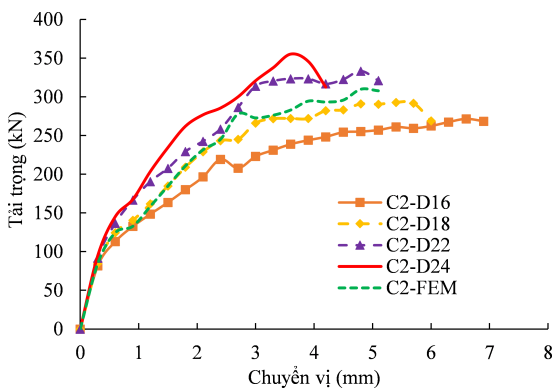
Đối với dầm gia cường C2, hai tấm CFRP dán trên hai mặt bên của dầm làm việc như cốt thép chịu cắt. Trong khi, cốt thép dọc chịu kéo tham số ảnh hưởng quan trọng đến khả năng chịu lực và độ dẻo của dầm. Trong phần này, bốn mô hình đã được phát triển trên cơ sở mô hình dầm C2, nhằm khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép dọc đến khả năng chịu lực của dầm gia cường. Bốn mô hình dầm, ký hiệu C2-D16, C2-D18, C2-D22 và C2-D24, sử dụng cùng loại bê tông với dầm C2 và được bố trí hai thanh cốt thép dọc chịu kéo có đường kính danh nghĩa lần lượt là $\phi 16$ mm, $\phi 18$ mm, $\phi 22$ mm và $\phi 24$ mm, như minh họa trên Hình 9. Bốn mô hình này cùng được bố trí hai thanh cốt thép dọc chịu nén có đường kính danh nghĩa $\phi 10$ mm.



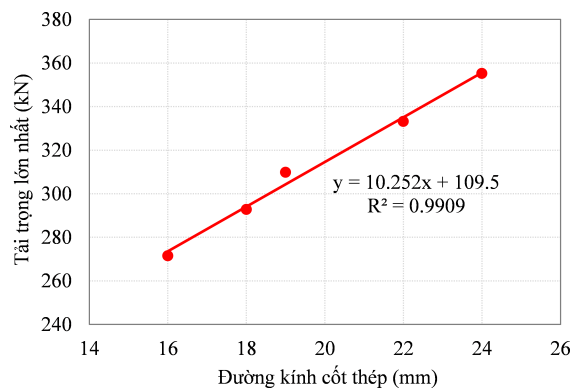
Hình 9. Tiết diện của dầm gia cường khi thay đổi đường kính cốt thép dọc chịu kéo

Các biểu đồ tải trọng - chuyển vị thu được từ phân tích mô hình số được giới thiệu trên Hình 10(a), cho phép so sánh khả năng chịu lực và ứng xử cơ học giữa các dầm khi thay đổi tham số hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo. Tải trọng lớn nhất của dầm C2-D16 giảm đến 12,4% khi so sánh với dầm C2. Hơn nữa, biểu đồ tải trọng – chuyển vị của dầm C2-D16 có độ dốc thấp hơn so với các dầm còn lại, đồng thời chuyển vị cũng lớn nhất. Kết quả này cho thấy, độ dẻo của dầm tăng lên đáng kể khi giảm đường kính cốt thép dọc. Trong khi đó, ứng xử chịu cắt của dầm C2-D18 gần như tương tự dầm C2, do đường kính cốt thép dọc không thay đổi đáng kể. Ngược lại, khi tăng đường kính cốt thép dọc, khả năng chịu lực của dầm C2-D22 và dầm C2-D24 được cải thiện so với dầm C2, tăng lần lượt 7,5% và 14,6% tải trọng lớn nhất. Do đó, khi đường kính cốt thép dọc tăng từ $\phi 16$ mm đến $\phi 24$ mm thì tải trọng lớn nhất của dầm gia cường tăng khoảng 31%. Hơn nữa, Hình 10(b) chỉ ra rằng, mối quan hệ giữa tải trọng lớn nhất và đường kính cốt thép dọc là tuyến tính, với một hệ số xác định $R^2 = 0,9909$.

Bên cạnh đó, với đường kính cốt thép dọc lớn nhất được khảo sát, thì độ dẻo của dầm C2-D24 giảm đáng kể so với các dầm còn lại. Chuyển vị tương ứng với tải trọng lớn nhất ($P_u = 355$ kN) của dầm này giảm 45% so với chuyển vị của dầm C2-D16 (3,6 mm so với 6,6 mm), và giảm 25% so với chuyển vị của dầm C2-FEM (3,6 mm so với 4,8 mm).

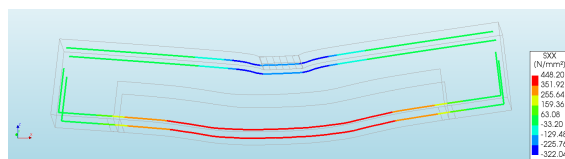


(a) Biểu đồ tải trọng - chuyển vị

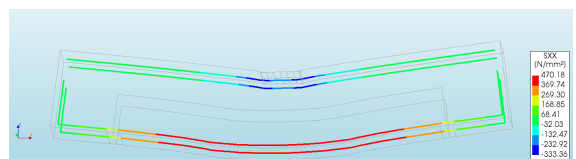


(b) Biểu đồ tải trọng – đường kính cốt thép

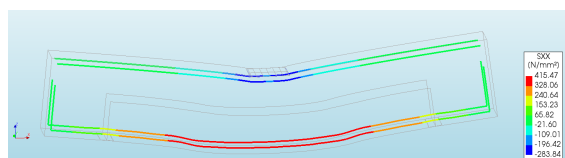
Hình 10. Khả năng chịu lực của dầm gia cường khi thay đổi hàm lượng cốt thép dọc



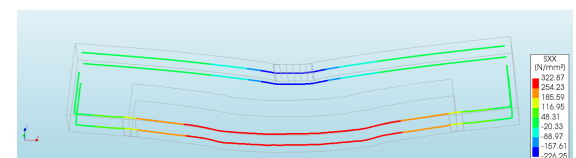
(a) Dầm C2-D16



(b) Dầm C2-D18



(c) Dầm C2-D22



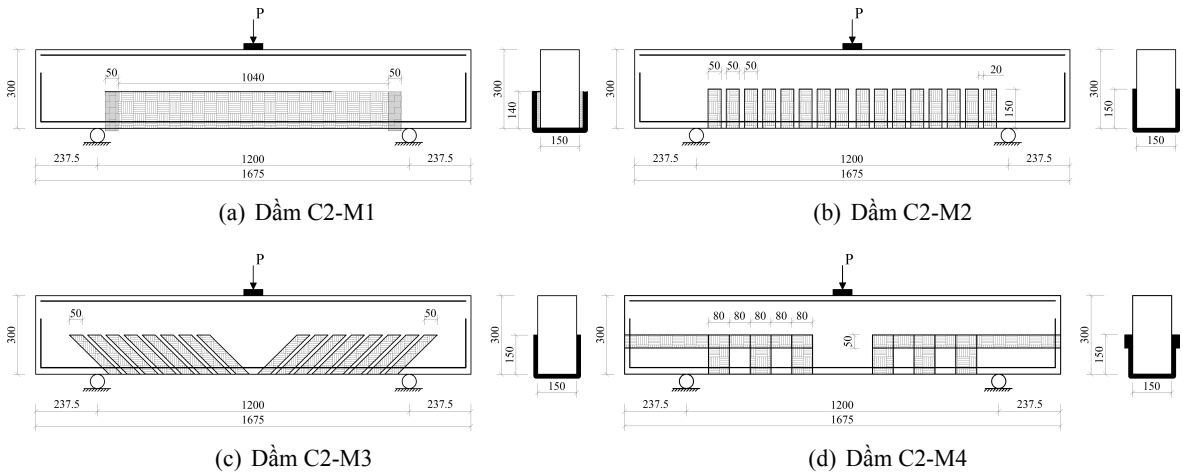
(d) Dầm C2-D24

Hình 11. Ứng suất trong cốt thép dọc của các dầm gia cường

Khi các mẫu dầm bị phá hoại, kết quả phân tích mô hình số cho phép quan sát sự phân bố ứng suất trong các thanh cốt thép dọc, như thể hiện trên Hình 11. So sánh với giới hạn chảy của thép là

494 MPa (xem mục 2.2), thì thấy rằng hai thanh cốt thép dọc ở lớp dưới chưa bị chảy dẻo. Kết quả này chứng minh rằng, tất cả các mẫu dầm đều bị phá hoại do hình thành vết nứt cắt và hư hỏng tấm CFRP.

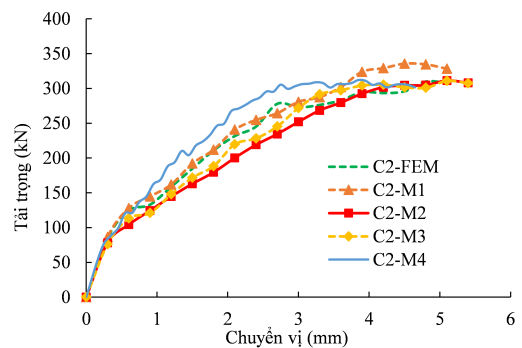
4.3. Ảnh hưởng của sơ đồ dán CFRP



Hình 12. Sơ đồ dán CFRP gia cường chịu cắt

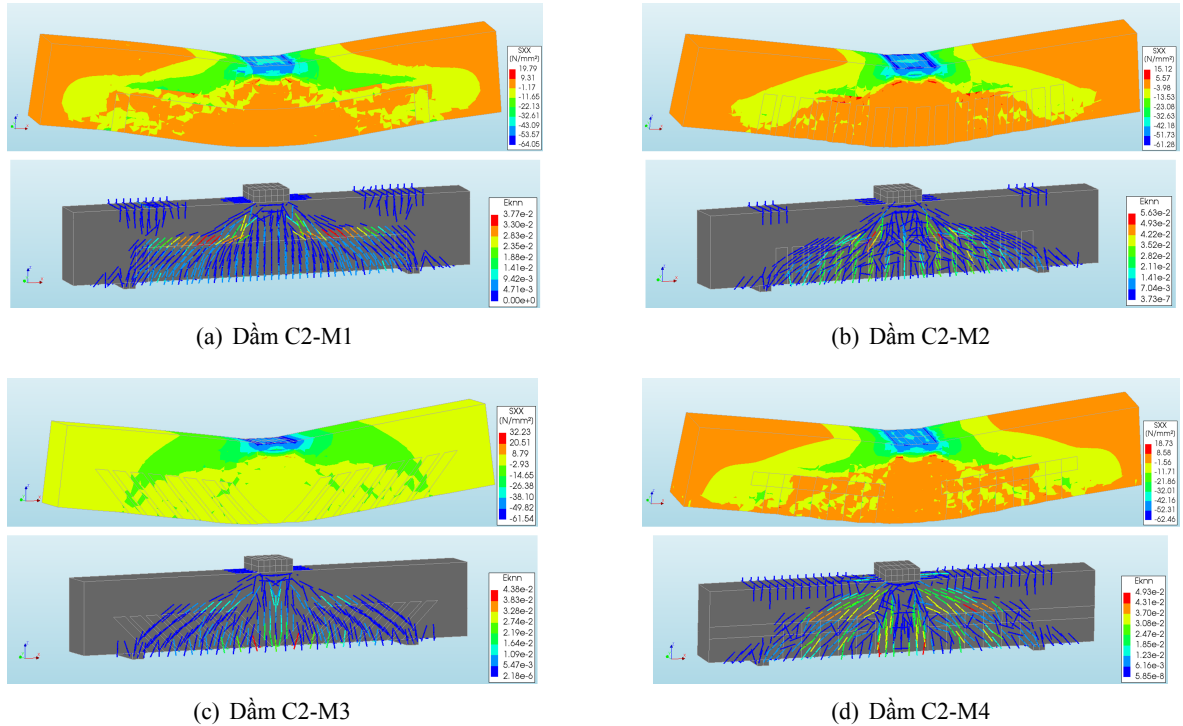
Trong thực tế, với cùng một khối lượng (diện tích) vật liệu CFRP, sơ đồ dán có thể được tiến hành theo các phương án khác nhau và trở thành một tham số ảnh hưởng đến hiệu quả gia cường, đặc biệt đối với dầm gia cường chịu cắt. Trong phần này, bốn mô hình dầm đã được thiết lập, sử dụng cùng một diện tích tấm CFRP bằng $0,36 \text{ m}^2$, nhằm khảo sát một số sơ đồ dán điển hình, như minh họa trên Hình 12. Các mẫu dầm này được mô hình với bê tông và cấu tạo cốt thép hoàn toàn tương tự như dầm C2. Chiều cao của các tấm CFRP bằng $\frac{1}{2}$ chiều cao tiết diện dầm. Trong đó, dầm C2-M1 được dán hai tấm CFRP có kích thước $140 \times 1200 \text{ mm}$ trên hai mặt bên của dầm và bổ sung hai neo chữ U có kích thước $50 \times 430 \text{ mm}$ ở hai cuối tấm. Dầm C2-M2 được gia cường bằng 16 neo chữ U có kích thước $50 \times 450 \text{ mm}$, dán cách đều nhau với khoảng cách 70 mm từ tâm đến tâm (20 mm giữa hai tấm liên kế). Dầm C2-M3 được gia cường bằng 12 neo chữ U có kích thước $50 \times 600 \text{ mm}$, dán theo phương chéo, tạo một góc 45° với trục dọc của dầm. Dầm C2-M4 được gia cường bằng 6 neo chữ U có kích thước $80 \times 450 \text{ mm}$ dán vuông góc với trục dọc của dầm, dán cách đều nhau với khoảng cách 80 mm giữa hai tấm liên kế, và dán bốn tấm CFRP (2 tấm/mặt dầm) có kích thước $50 \times 720 \text{ mm}$ nhằm hạn chế sự bong tách tấm của các neo chữ U sử dụng.

Các biểu đồ tải trọng – chuyển vị của bốn mô hình dầm được thể hiện trên Hình 13 và so sánh với kết quả của dầm C2. Dầm C2-M1 có khả năng chịu lực cao nhất, với tải trọng lớn nhất bằng 334,4 kN, tăng 7,9% so với dầm C2 ($P_u = 309,8 \text{ kN}$). Kết quả này cho thấy vai trò quan trọng của các neo chữ U dán ở hai cuối tấm CFRP, cho phép cải thiện khả năng chịu lực, làm chậm quá trình bong tách tấm CFRP, trong khi vẫn duy trì độ dẻo của dầm. Ngược lại, các sơ đồ dán trên các dầm C2-M2, C2-M3 và C2-M4 không cải thiện khả năng chịu lực



Hình 13. Biểu đồ tải trọng - chuyển vị của dầm gia cường khi thay đổi sơ đồ dán

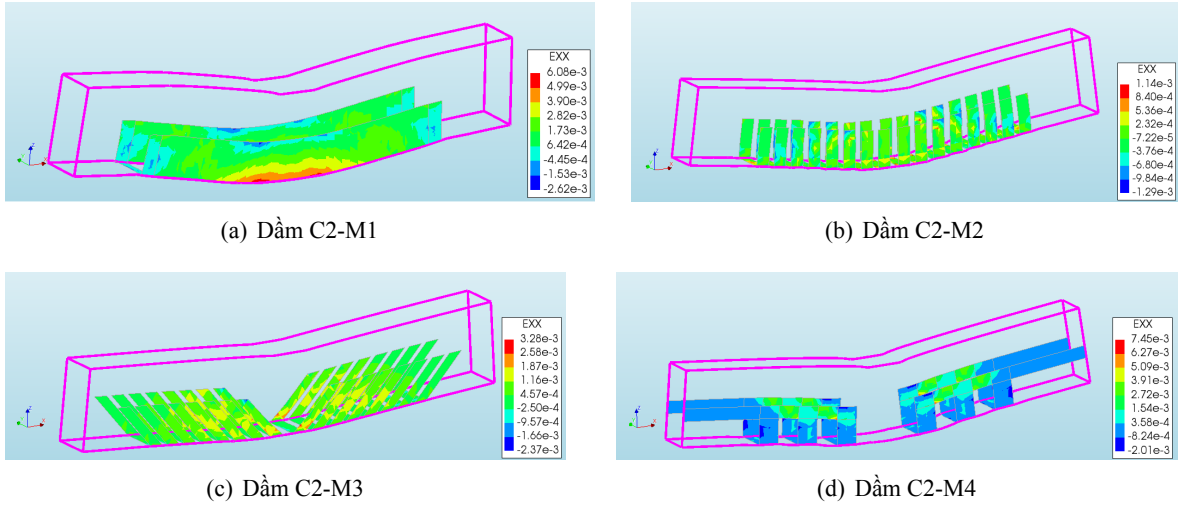
so với dầm C2. Tuy nhiên, khi sử dụng nhiều neo chữ U có bề rộng nhỏ thay thế cho sơ đồ dán toàn bộ chiều dài nhịp dầm, thì độ dẻo của dầm C2-M2 và dầm C2-M3 tăng lên so với dầm C2. Trong khi đó, độ dẻo của dầm C2-M4 bị giảm (độ cứng tăng) so với dầm C2, do ảnh hưởng của các tấm CFRP dán dọc theo trục trung hòa của dầm.



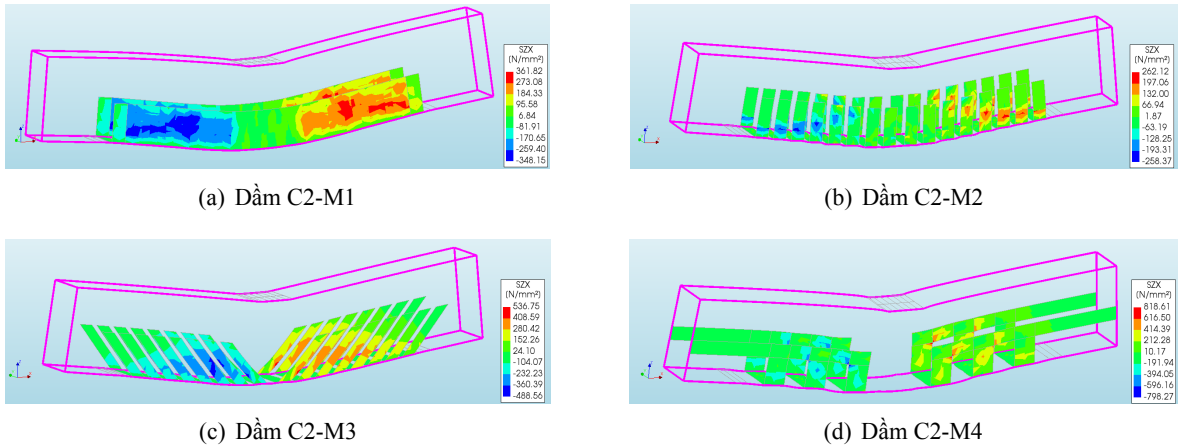
Hình 14. Phân bố ứng suất và biến dạng của bê tông khi thay đổi sơ đồ dán CFRP

Ngoài ra, cần quan tâm đến dạng phá hoại của dầm khi thay đổi sơ đồ dán gia cường. Mô hình PTHH cho phép phân tích sự phân bố ứng suất và biến dạng của dầm bê tông, như thể hiện trên Hình 14. Kết quả thu được chỉ ra rằng, các mẫu dầm bị phá hoại do bê tông vùng nén bị vỡ, ứng suất nén vượt quá cường độ chịu nén của bê tông. Do đó, việc bổ sung các neo chữ U ở hai cuối tấm CFRP dán trên mặt bên, hoặc thay thế bằng nhiều neo chữ U có bề rộng nhỏ với tổng diện tích tương đương, thì có thể làm thay đổi dạng phá hoại của dầm, từ hư hỏng tấm CFRP thành phá hoại cốt kết hợp bê tông vùng nén bị vỡ.

Một kết quả khác cũng có thể được phân tích, là biến dạng của các tấm CFRP, như thể hiện trên Hình 15. Đối với dầm C2-M1, tấm CFRP bị biến dạng lớn nhất ở vùng giữa nhịp sát với đáy dầm, do thớ dưới dầm làm việc chịu kéo dưới tác dụng của tải trọng. Ở phần trên của tấm CFRP, biến dạng tấm xuất hiện lớn nhất tại các vị trí giao nhau giữa vết nứt cắt và mép tấm, như chỉ ra trên Hình 15(a). Đối với dầm C2-M2 và dầm C2-M3, các neo chữ U giao nhau với vết nứt cắt thì có biến dạng lớn hơn so với các neo còn lại. Trong khi đó, biến dạng CFRP trên dầm C2-M4 tập trung chủ yếu trong các tấm dọc ở vị trí cuối các neo chữ U. Tuy nhiên, biến dạng của tấm CFRP chưa vượt quá giá trị cực hạn, nên chưa xảy ra sự phá hoại do hư hỏng tấm CFRP. Nhận định này được khẳng định một lần nữa nhờ kết quả phân tích ứng suất trong các tấm CFRP, chưa vượt quá ứng suất kéo lớn nhất, như minh họa trên Hình 16.



Hình 15. Phân bố biến dạng của tấm CFRP khi thay đổi sơ đồ dán

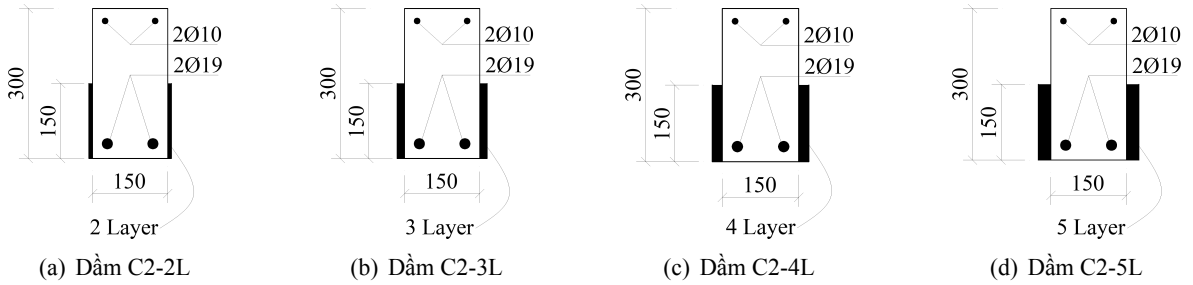


Hình 16. Phân bố ứng suất của tấm CFRP khi thay đổi sơ đồ dán

4.4. Ảnh hưởng của số lớp CFRP

Trong các phần trên, các mô hình đều được xây dựng với một lớp CFRP với mỗi sơ đồ gia cường. Trong nhiều trường hợp, việc dán một lớp vật liệu gia cường có thể không đáp ứng được yêu cầu về khả năng chịu lực. Tăng hàm lượng CFRP bằng cách tăng số lớp là một lựa chọn khi tính toán nhằm đạt được mục đích gia cường. Tuy nhiên, khả năng chịu lực của dầm gia cường không tăng tuyến tính khi tăng số lớp CFRP. Do đó, trong nghiên cứu này, bốn mô hình dầm gia cường với nhiều lớp CFRP, ký hiệu C2-2L, C2-3L, C2-4L và C2-5L tương ứng với hai, ba, bốn và năm lớp CFRP, đã được phát triển để khảo sát ảnh hưởng của tham số này đến ứng xử chịu cắt của dầm bê tông không cốt đai. Tất cả tấm CFRP có cùng kích thước 150×1200 mm, dán trên hai mặt bên của dầm, như minh họa trên Hình 17. Bê tông và cấu tạo cốt thép của các dầm mô hình hoàn toàn tương tự như dầm C2.

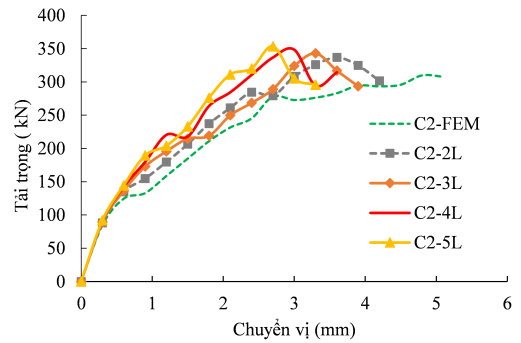
Hình 18 giới thiệu các biểu đồ tải trọng – chuyển vị thu được từ phân tích PTHH của năm dầm mô hình, với số lượng tấm CFRP tăng từ một đến năm lớp. Kết quả chỉ ra rằng, khi tăng số lớp CFRP thì tải trọng lớn nhất của dầm gia cường tăng lần lượt là 8,7%, 10,7%, 12,5% và 14,1% so với dầm C2 (336,9 kN, 342,9 kN, 348,5 kN và 353,5 kN so với 309,8 kN). Hơn nữa, khi tăng số tấm CFRP từ ba



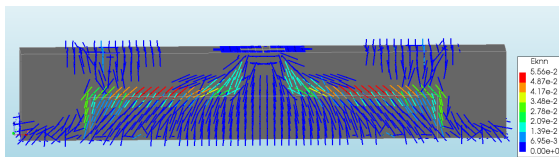
Hình 17. Cấu tạo dầm sử dụng số lớp dán tấm CFRP khác nhau

lên năm lớp, tải trọng lớn nhất không tăng đáng kể, với chênh lệch lớn nhất khoảng 3,4%. Trong khi đó, độ dẻo của dầm gia cường có thể bị giảm đáng kể khi tăng quá mức số lớp CFRP. Tại thời điểm tải trọng đạt giá trị lớn nhất, chuyển vị giữa nhịp của dầm C2-5 giảm 43,8% so với dầm C2 (2,7 mm so với 4,8 mm). Do đó, khi gia cường chịu cắt của dầm bê tông không cốt đai bằng phương pháp dán toàn bộ $\frac{1}{2}$ chiều cao dầm trên phần dưới dầm, thì số lớp CFRP được kiến nghị sử dụng không quá ba lớp.

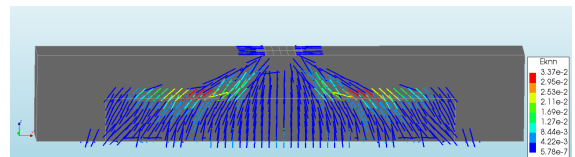
Ngoài ra, tăng số lớp CFRP trong trường hợp này cũng ảnh hưởng đến sự phát triển của các vết nứt cắt, như thể hiện trên Hình 19. Khi sử dụng một lớp gia cường, vết nứt cắt phát triển xuyên qua tấm CFRP, gây ra hư hỏng tấm CFRP khi vết nứt mở rộng quá mức cho phép, như minh họa trên Hình 5(a). Trong khi đó, tăng số lớp CFRP làm giảm biến dạng tại mép trên của tấm CFRP, dẫn đến cản trở hiệu quả sự phát triển của vết nứt cắt xuyên qua lớp gia cường. Kết quả trên Hình 19 cho thấy, khi vết nứt cắt phát triển đến mép trên của tấm CFRP, thì tiếp tục phát triển theo phương ngang, dọc theo mép trên của tấm CFRP. Như vậy, số lớp CFRP không những ảnh hưởng đến khả năng chịu lực và độ dẻo của dầm gia cường, mà còn thay đổi hình dạng vết nứt cắt do tải trọng.



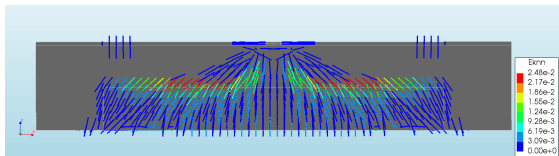
Hình 18. Biểu đồ tải trọng - chuyển vị của dầm gia cường khi thay đổi số lớp CFRP



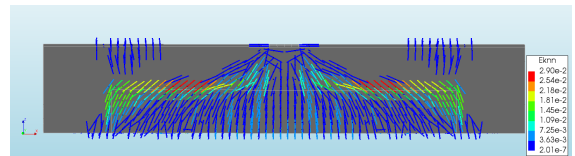
(a) Dầm C2-2L



(b) Dầm C2-3L



(c) Dầm C2-4L



(d) Dầm C2-5L

Hình 19. Phân bố vết nứt trong các dầm có số lớp dán khác nhau

5. Kết luận

Mô hình PTHH 3D đã được xây dựng và kiểm chứng dựa trên số liệu thực nghiệm của sáu dầm bê tông cốt thép đai (một dầm đối chứng và năm dầm gia cường CFRP), bao gồm biểu đồ tải trọng – chuyển vị, sơ đồ vết nứt và cơ chế phá hoại dầm. Từ đó, 16 mô hình dầm đã được phát triển nhằm khảo sát các tham số thiết kế chính ảnh hưởng đến khả năng chịu lực và ứng xử chịu cắt của dầm không cốt thép đai gia cường bằng tấm CFRP (gọi tắt là dầm gia cường). Nghiên cứu này đã thu được một số kết luận chính dưới đây:

- Khả năng chịu cắt của dầm gia cường tăng gần như tuyến tính khi tăng cường độ chịu nén của bê tông. Khả năng chịu lực của dầm tăng 25% khi cường độ chịu nén tăng 1,5 lần, từ 40 MPa đến 60 MPa. Nếu cường độ bê tông đủ lớn thì cơ chế phá hoại dầm xảy ra do hư hỏng tấm CFRP. Ngược lại, nếu cường độ bê tông thấp thì có thể làm giảm hiệu quả gia cường chịu cắt, do bê tông vùng nén bị vỡ trước khi tấm CFRP bị hư hỏng.

- Khả năng chịu cắt của dầm gia cường tăng tỷ lệ thuận với đường kính cốt thép dọc chịu kéo. Khi đường kính cốt thép dọc tăng 1,5 lần, từ $\phi 16$ mm đến $\phi 24$ mm, thì khả năng chịu lực tăng 31%. Hơn nữa, độ dẻo của dầm gia cường cũng giảm đáng kể khi tăng đường kính cốt thép dọc và ngược lại.

- Sơ đồ dán CFRP ảnh hưởng lớn đến độ dẻo và cơ chế phá hoại của dầm. Khi sử dụng các tấm CFRP có diện tích lớn dán toàn bộ chiều dài nhịp dầm, thì kiến nghị bổ sung các neo chữ U dán ở cuối tấm để tăng khả năng chịu lực và làm chậm quá trình hư hỏng tấm dán. Ngược lại, sử dụng nhiều neo chữ U riêng rẽ và có bề rộng nhỏ khi muốn cải thiện độ dẻo của dầm.

- Khi tăng số lượng lớp CFRP làm giảm biến dạng tại mép trên của tấm CFRP, cản trở sự phát triển của vết nứt cắt xuyên qua lớp gia cường, dẫn đến thay đổi hình dạng vết nứt cắt do tải trọng. Số lớp CFRP được kiến nghị sử dụng không quá ba lớp nhằm cân bằng giữa mục tiêu cải thiện khả năng chịu lực và duy trì độ dẻo cần thiết của dầm gia cường.

Tài liệu tham khảo

- [1] Amran, Y. H. M., Alyousef, R., Rashid, R. S. M., Alabduljabbar, H., Hung, C.-C. (2018). [Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review](#). *Structures*, 16:208–238.
- [2] Naser, M. Z., Hawileh, R. A., Abdalla, J. A. (2019). [Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review](#). *Engineering Structures*, 198:109542.
- [3] Siddika, A., Mamun, M. A. A., Ferdous, W., Alyousef, R. (2020). [Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs – A state-of-the-art review](#). *Engineering Failure Analysis*, 111:104480.
- [4] Siddika, A., Mamun, M. A. A., Alyousef, R., Amran, Y. H. M. (2019). [Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review](#). *Journal of Building Engineering*, 25:100798.
- [5] Elsanadedy, H. M., Abbas, H., Almusallam, T. H., Al-Salloum, Y. A. (2019). [Organic versus inorganic matrix composites for bond-critical strengthening applications of RC structures – State-of-the-art review](#). *Composites Part B: Engineering*, 174:106947.
- [6] Tan, N. N., Kien, N. T., Giang, N. H. (2021). [Numerical study on the flexural performance of RC beams with externally bonded CFRP sheets](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 15(4):182–196.
- [7] Anh, T. H., Giang, N. H., Tân, N. N. (2021). [Nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường kháng uốn của dầm bê tông cốt thép bị ăn mòn bằng tấm sợi composite CFRP](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCVND) - ĐHXD*, 15(1V):1–16.
- [8] Nguyen, N. T., Nguyen, T. K., Du, D. H., Nguyen, D. N., Kieu, T. S. (2023). [Nonlinear finite element analysis of FRP-strengthened full-size reinforced concrete beams](#). *Innovative Infrastructure Solutions*, 8 (5).
- [9] Chen, J. F., Teng, J. G. (2003). [Shear Capacity of Fiber-Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete Beams: Fiber Reinforced Polymer Rupture](#). *Journal of Structural Engineering*, 129(5):615–625.

- [10] Chen, J. F., Teng, J. G. (2003). [Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding](#). *Construction and Building Materials*, 17(1):27–41.
- [11] Cao, S. Y., Chen, J. F., Teng, J. G., Hao, Z., Chen, J. (2005). [Debonding in RC Beams Shear Strengthened with Complete FRP Wraps](#). *Journal of Composites for Construction*, 9(5):417–428.
- [12] Bousselham, A., Chaallal, O. (2008). [Mechanisms of Shear Resistance of Concrete Beams Strengthened in Shear with Externally Bonded FRP](#). *Journal of Composites for Construction*, 12(5):499–512.
- [13] Chen, G., Chen, J., Teng, J. (2012). [On the finite element modelling of RC beams shear-strengthened with FRP](#). *Construction and Building Materials*, 32:13–26.
- [14] Bukhari, I. A., Vollum, R., Ahmad, S., Sagaseta, J. (2012). [Shear Strengthening of Short Span Reinforced Concrete Beams with CFRP Sheets](#). *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(3):523–536.
- [15] Foster, R. M., Brindley, M., Lees, J. M., Ibell, T. J., Morley, C. T., Darby, A. P., Evernden, M. C. (2017). [Experimental Investigation of Reinforced Concrete T-Beams Strengthened in Shear with Externally Bonded CFRP Sheets](#). *Journal of Composites for Construction*, 21(2).
- [16] Dias, S. J. E., Silva, J. R. M., Barros, J. A. O. (2021). [Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams with a hybrid CFRP solution](#). *Composite Structures*, 256:113004.
- [17] Jin, L., Jiang, X., Lu, K., Du, X. (2022). [Tests on shear failure and size effect of CFRP-wrapped RC beams without stirrups: Influence of CFRP ratio](#). *Composite Structures*, 291:115613.
- [18] Nguyen, N. T., Nguyen, T. K., Du, D. H., Nguyen, D. N. (2022). [Finite-Element Analysis of RC Beams Strengthened With CFRP U-Wraps](#). *Mechanics of Composite Materials*, 58(4):567–584.
- [19] AlHamaydeh, M., Markou, G., Bakas, N., Papadrakakis, M. (2022). [AI-based shear capacity of FRP-reinforced concrete deep beams without stirrups](#). *Engineering Structures*, 264:114441.
- [20] Elghandour, B., Eltahawy, R., Shedid, M., Abdelrahman, A. (2023). [Prediction of shear strength for CFRP reinforced concrete beams without stirrups](#). *Engineering Structures*, 284:115946.
- [21] Ferreira, D., Manie, J. (2020). *DIANA Documentation release 10.3*. DIANA FEA bv.
- [22] Hordijk, D. A., Reinhardt, H. W. (1993). [Numerical and experimental investigation into the fatigue behavior of plain concrete](#). *Experimental Mechanics*, 33(4):278–285.
- [23] fib (1993). *Model Code 1990, Design code*. Thomas Telford House, London.
- [24] Nakamura, H. (2001). Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete. *Modeling of inelastic behavior of RC structures under seismic loads*, ASCE, 471–487.
- [25] Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P., Jiang, J. J. (2005). [Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete](#). *Engineering Structures*, 27(6):920–937.