Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2025, 19 (1V): 94–108

KHẢO SÁT MÔ HÌNH SỐ CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP TIẾT DIỆN CHỮ T ĐƯỢC GIA CƯỜNG UỐN-CẮT BẰNG CFRP

Nguyễn Đăng Nguyên[a], Đặng Tùng Lâm[a], Nguyễn Ngọc Tân[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 16/09/2024, Sửa xong 09/12/2024, Chấp nhận đăng 27/12/2024

Tóm tắt

Bài báo giới thiệu phương pháp mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) ba chiều cho dầm bê tông cốt thép (BTCT) chữ T chịu tải không đối xứng được gia cường uốn-cắt đồng thời bằng các dải CFRP ở đáy dầm và các dải CFRP chữ U dán trên bụng dầm. Mô hình PTHH dự đoán chính xác biểu đồ tải trọng–chuyển vị, sơ đồ vết nứt và dạng phá hủy (cắt, bong tách) của bốn dầm thí nghiệm (2 dầm đối chứng và 2 dầm gia cường). Một số tham số như cường độ chịu nén của bê tông, hàm lượng cốt thép dọc, hàm lượng cốt thép đai, số lượng lớp dán của CFRP chữ U và bề rộng cánh chữ T đã được khảo sát trong một nghiên cứu trước của chính tác giả. Trong nghiên cứu này, khảo sát tham số được mở rộng nhằm đánh giá đầy đủ hơn các yếu tố ảnh hưởng đến sự làm việc của dầm BTCT chữ T được gia cường bằng CFRP, bao gồm: sơ đồ gia cường CFRP, số lượng dải CFRP chữ U, góc dán của dải CFRP chữ U, và tính chất cơ học của CFRP (cường độ chịu kéo, mô đun đàn hồi).

Từ khoá: bê tông cốt thép; dầm chữ T; tải trọng không đối xứng; gia cường CFRP; phân tích phần tử hữu hạn.

INVESTIGATION OF NUMERICAL MODEL OF FLEXURE- AND SHEAR-STRENGTHENED RE-INFORCED CONCRETE T-BEAMS USING CFRP

Abstract

The paper presents a three-dimensional finite element method (FEM) model for reinforced concrete (RC) T-beams subjected to asymmetric loading that are simultaneously strengthened in bending and shear using near-surface mounted (NSM) CFRP strips applied to the bottom of the beam and externally bonded CFRP U-wraps. The FEM model accurately predicts the load-displacement curves, crack patterns, and failure modes (e.g., shear failure, debonding) of four experimental beams (two control beams and two strengthened beams). Several parameters, including the compressive strength of concrete, longitudinal reinforcement ratio, transverse reinforcement ratio, number of CFRP U-wrap layers, and width of the T-beam flange, were investigated in a previous study by the authors. In this study, the parameter investigation is extended to more comprehensively evaluate the factors influencing the performance of CFRP-strengthened RC T-beams, including the CFRP strengthening configuration, number of CFRP U-wraps, bonding angle of CFRP U-wraps, and mechanical properties of CFRP (e.g., tensile strength, elastic modulus).

Keywords: reinforced concrete; T-beams; asymmetric loading; carbon fiber-reinforced polymer strengthening; finite element analysis.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(1V)-09

1. Mở đầu

Kết cấu BTCT được sử dụng rộng rãi trong xây dựng cơ sở hạ tầng, bao gồm các công trình xây dựng, giao thông và thủy lợi, không chỉ ở Việt Nam mà còn trên toàn thế giới, nhờ vào các ưu điểm như khả năng thi công linh hoạt, hiệu quả về chi phí và độ bền vững cao. Tuy nhiên, trong quá trình sử dụng, các kết cấu BTCT thường gặp phải tình trạng xuống cấp và hư hỏng do tác động của tải trọng,

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

các yếu tố môi trường (như nhiệt độ, độ ẩm), sự xâm thực của ion clorua và khí CO_2 gây ăn mòn cốt thép, hoặc do các hiện tượng thiên tai như gió bão, động đất [1]. Những yếu tố này dẫn đến sự suy giảm khả năng chịu lực, độ ổn định và độ an toàn của công trình theo thời gian. Vì vậy, để đảm bảo tuổi thọ và độ bền vững của các công trình BTCT, công tác bảo trì, sửa chữa và gia cường kết cấu là cần thiết và phải được thực hiện định kỳ hoặc thường xuyên. Trong những thập kỷ gần đây, các phương pháp sửa chữa và gia cường cho kết cấu BTCT đã được nghiên cứu và phát triển, trong đó phương pháp gia cường bằng vật liệu FRP (Fibre-Reinforced Polymer) đang ngày càng trở nên phổ biến và được ứng dụng rộng rãi trong các công trình BTCT [2–4].

Tuy nhiên, cho đến nay, việc ứng dụng vật liệu gia cường FRP trong các công trình BTCT tại Việt Nam vẫn chưa phổ biến, chủ yếu do thiếu các tiêu chuẩn thiết kế, tiêu chuẩn kỹ thuật cho thi công và nghiệm thu. Vật liệu FRP trong xây dựng rất đa dạng về chủng loại, được sản xuất từ các loại sợi tổng hợp như: các bon, thủy tinh, aramid và basalt. Chính vì vậy, FRP sở hữu nhiều đặc tính ưu việt, như cường độ chịu kéo cao, trọng lượng nhẹ, khả năng chống ăn mòn vượt trội, thi công nhanh chóng và ít ảnh hưởng đến kiến trúc (như chiều cao thông thủy và tiết diện kết cấu) [5–7]. Hơn nữa, việc sử dụng vật liệu FRP có thể cải thiện đáng kể khả năng chịu tải trọng tĩnh và động của nhiều loại cấu kiện BTCT, bao gồm cột, dầm, sàn và nút khung sau khi gia cường [5–7]. Gần đây, nhiều nghiên cứu tiếp tục được tiến hành nhằm cải tiến phương pháp gia cường FRP, bằng cách thử nghiệm các kỹ thuật mới như sử dụng neo để hạn chế sự bong tách giữa FRP và bê tông [8], kết hợp kỹ thuật dán bề mặt và kỹ thuật dán rãnh gần bề mặt NSM (Near-Mounted Surface) [9–12]. Những kỹ thuật mới này cho phép cải thiện đồng thời ứng xử uốn và ứng xử cắt của kết cấu sau khi gia cường [9–12].

Trong thực tế, số lượng nghiên cứu thực nghiệm về chủ đề trên vẫn còn hạn chế, do đòi hỏi một nguồn lực lớn để chế tạo mẫu thử và thực hiện thí nghiệm. Kết quả thí nghiệm chỉ phản ánh chính xác ứng xử của từng mẫu thử và có thể bị ảnh hưởng bởi kích thước mẫu, điều kiện thử nghiệm và sai số của thiết bị sử dụng. Ngày nay, sự phát triển nhanh chóng của máy tính và sự đóng góp của các mô hình vật liệu, phương pháp số trở thành một công cụ hữu hiệu trong mô phỏng và tính toán kết cấu BTCT. Mô hình số cho phép thực hiện việc nghiên cứu các tham số một cách dễ dàng, nhằm xác định mức độ ảnh hưởng của chúng đến khả năng chịu lực và ứng xử cơ học của kết cấu BTCT. Kết quả thu được giúp cho người sử dụng tối ưu việc thiết kế gia cường kết cấu BTCT bằng FRP. Một số nghiên cứu gần đây áp dụng mô hình phần tử hữu hạn để mô phỏng dầm BTCT gia cường bằng FRP [13–15] cho kết quả tốt về kiểm chứng khả năng chịu lực, độ cứng ban đầu, và các dạng phá hủy, nhưng các kết quả đạt được vẫn chưa đầy đủ để cung cấp một cơ sở vững chắc cho việc áp dụng rộng rãi trong thực tế. Nguyên và cs. [16] đã xây dựng các mô hình PTHH để phân tích kết cấu dầm BTCT tiết diện chữ T được gia cường uốn-cắt bằng FRP. Sự chính xác của các mô hình số được kiểm chứng bằng cách so sánh kết quả phân tích PTHH với các kết quả thực nghiệm, bao gồm: (i) biểu đồ tải trọng–chuyển vị; (ii) sơ đồ vết nứt; (iii) dạng phá hủy. Dạng phá hủy bong tách của tấm CFRP được mô phỏng thông qua ứng suất cắt tại bề mặt tiếp xúc giữa FRP và bê tông [16]. Nghiên cứu này tiếp tục được mở rộng, nhằm đánh giá đầy đủ hơn các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chịu lực và ứng xử cơ học của dầm BTCT tiết diện chữ T được gia cường uốn-cắt đồng thời bằng CFRP, bao gồm: (i) Sơ đồ gia cường CFRP; (ii) Số lượng dải CFRP chữ U, (iii) Góc dán của dải CFRP chữ U, và (iv) Tính chất cơ học của CFRP.

2. Mô phỏng ứng xử của dầm BTCT tiết diện chữ T

2.1. Dầm thí nghiệm

Hai tổ mẫu dầm BTCT tiết diện chữ T được sử dụng trong nghiên cứu số này, lấy từ một nghiên cứu thực nghiệm thực hiện bởi Dias và cs. [17]. Tổ mẫu thứ nhất gồm dầm đối chứng REF-I và dầm gia cường SFS-I, như minh họa trên Hình 1(a). Tổ mẫu thứ hai gồm dầm đối chứng REF-II và dầm

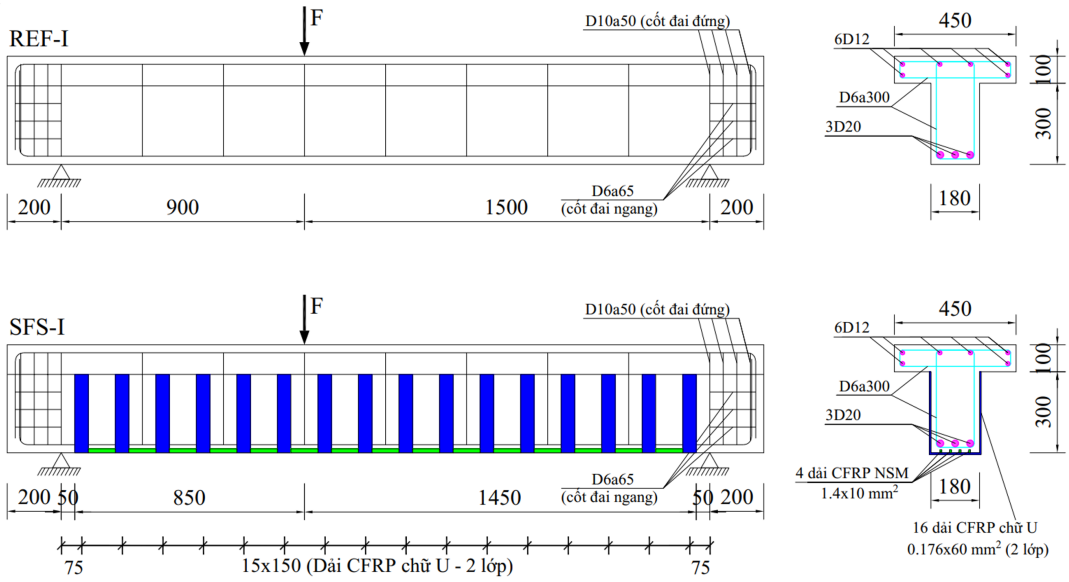
gia cường SFS-II, như minh họa trên Hình 1(b). Sự khác nhau giữa hai tổ mẫu là hàm lượng cốt thép dọc, khoảng cách cốt thép đai và số lớp dán của dải CFRP chữ U. Các dầm gia cường được dán các dải CFRP dạng chữ U vuông góc 90° so với trục dầm, dọc theo chiều dài dầm với khoảng cách đều 150 mm từ tâm tới tâm để cải thiện khả năng chịu cắt. Trong khi đó, các dải CFRP NSM có tiết diện 1,4×10 mm được dán vào các rảnh ở mặt dưới của dầm để cải thiện khả năng chịu uốn.

Bảng 1. Thông tin chung về các dầm khảo sát

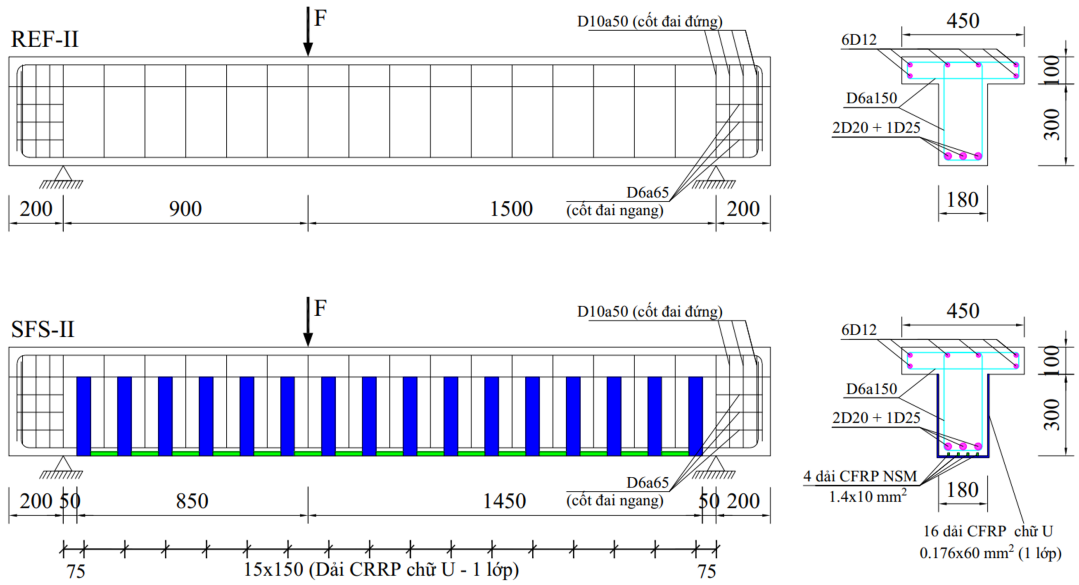
STT	Tên dầm	Hàm lượng cốt thép			Hàm lượng CFRP		
		ρ_{sl} (%)	ρ_{sw} (%)	ρ_{fl} (%)	s_f (mm)	θ_f (°)	ρ_{fw} (%)
Nhóm I	REF-I	1,46	0,10	-	-	-	-
	SFS-I	(3D20)	(D6a300)	0,08[a]	150[b]	90	0,16
Nhóm II	REF-II	1,74	0,21	-	-	-	-
	SFS-II	(2D20+1D25)	(D6a150)	0,08[a]	150[c]	90	0,08

(a) Dải CFRP NSM; (b) Dải CFRP chữ U – 2 lớp; (c) Dải CFRP chữ U – 1 lớp.

Dầm thí nghiệm có tiết diện bản cánh là 450×100 mm và tiết diện bản bụng là 180×300 mm. Chiều dài tổng thể của dầm là 2800 mm, với khoảng cách giữa hai gối tựa cố định là 2400 mm. Cấu tạo cốt thép và sơ đồ gia cường CFRP được mô tả chi tiết trong các nghiên cứu của Nguyên và cs. [16] và Dias và cs. [17]. Bảng 1 giới thiệu các tham số của bốn dầm thí nghiệm: hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo (ρ_{sl}); hàm lượng cốt thép đai (ρ_{sw}); hàm lượng CFRP NSM (ρ_{fl}); hàm lượng CFRP chữ U (ρ_{fw}). Trong khi đó, Bảng 2 giới thiệu các đặc trưng chính của vật liệu sử dụng, bao gồm: bê tông, cốt thép, CFRP NSM và CFRP chữ U. Mỗi dầm thí nghiệm được kiểm tra theo sơ đồ uốn ba điểm và chịu tải trọng tập trung không đối xứng, với khoảng cách từ điểm đặt lực đến hai gối tựa lần lượt là 900 mm và 1500 mm, như minh họa trên Hình 1.



(a) Nhóm I: Dầm REF-I và SFS-I



(b) Nhóm II: Dầm REF-II và SFS-II

Hình 1. Kích thước hình học và cấu tạo hai nhóm dầm thí nghiệm [17]

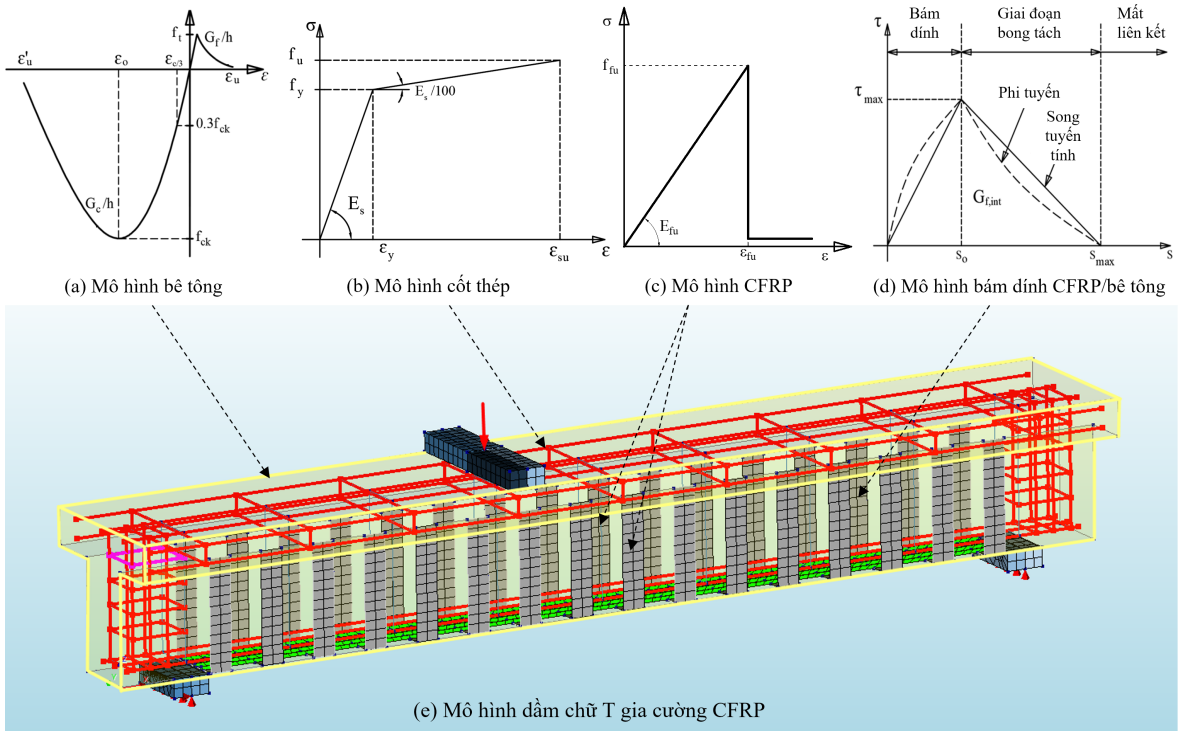
Bảng 2. Các đặc trưng của vật liệu sử dụng [17]

Vật liệu	Tính chất		Ký hiệu (đơn vị)	Giá trị
Bê tông	Cường độ chịu nén		f_{cm} (MPa)	44,3
	Mô đun đàn hồi		E_{cm} (GPa)	34,1
Cốt thép	Giới hạn chảy	D6 mm	f_y (MPa)	641
		D20 mm		636
		D25 mm		657
	Giới hạn bền	D6 mm	f_u (MPa)	737
		D20 mm		767
		D25 mm		790
CFRP NSM	Tiết diện		A (mm×mm)	1,4×10
	Cường độ chịu kéo		f_{fu} (MPa)	3165
	Mô đun đàn hồi		E_{fu} (GPa)	175
	Biến dạng giới hạn		ε_{fu} (‰)	18,0
CFRP chữ U	Chiều dày tấm		t_f (mm)	0,176
	Cường độ chịu kéo		f_{fu} (MPa)	3096
	Mô đun đàn hồi		E_{fu} (GPa)	245
	Biến dạng giới hạn		ε_{fu} (‰)	12,6

2.2. Xây dựng và kiểm chứng mô hình phần tử hữu hạn ba chiều

Kỹ thuật mô phỏng dầm BTCT tiết diện chữ T bằng phần mềm DIANA FEA [18] được giới thiệu chi tiết trong nghiên cứu của Nguyên và cs. [16] cho hai trường hợp: không gia cường và gia cường uốn-cắt bằng FRP. Trong mô hình số, dầm bê tông được rời rạc hóa sử dụng lưới phần tử có kích thước là 50×50×50 mm, như minh họa trên Hình 2. Độ chính xác của các mô hình số được kiểm chứng bằng

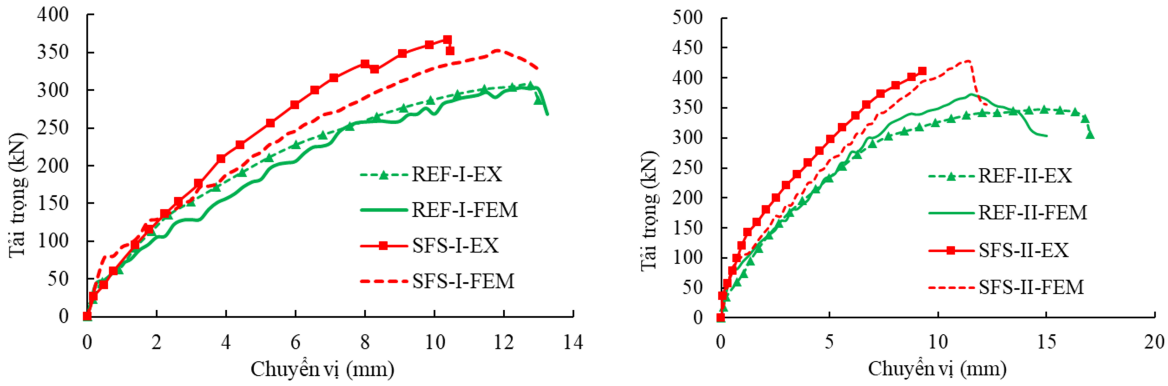
cách so sánh kết quả phân tích PTHH và số liệu thực nghiệm của từng mẫu dầm. Hình 3 so sánh các biểu đồ tải trọng–chuyển vị thu được từ thí nghiệm và mô phỏng của hai tổ mẫu dầm (xem Bảng 1). Có thể nhận xét rằng, biểu đồ tải trọng–chuyển vị của các mô hình số thể hiện rất trùng khớp với kết quả thí nghiệm của các mẫu dầm. Tải trọng lớn nhất dự đoán bởi mô hình số có sự chênh lệch nhỏ so với số liệu thí nghiệm, trong khoảng từ 2,1% đến 6,7% (xem Bảng 3). Hơn nữa, các mô hình số có thể dự đoán các dạng phá hủy (cắt, bong tách FRP) tương tự như quan sát từ thí nghiệm. Thảo luận về sơ đồ vết nứt, tiêu chí phá hủy và đặc điểm nhận dạng phá hủy của các mẫu dầm có thể được tham khảo thêm trong nghiên cứu Nguyên và cs. [16].



(a) Mô hình bê tông (b) Mô hình cốt thép (c) Mô hình CFRP (d) Mô hình bám dính CFRP/bê tông

(e) Mô hình dầm chữ T gia cường CFRP

Hình 2. Mô hình PTHH ba chiều dầm chữ T gia cường CFRP [16]



(a) Tổ mẫu I (b) Tổ mẫu II

Hình 3. So sánh các biểu đồ tải trọng–chuyển vị giữa thí nghiệm và mô hình số

Bảng 3. So sánh tải trọng giới hạn giữa thí nghiệm và mô hình số [16]

Tên dầm	Tải trọng lớn nhất		Chênh lệch[(a)] (%)	Dạng phá huỷ
	$P_{u,EXP}$ (kN)	$P_{u,FEM}$ (kN)		
REF-I	310,3	303,7	−2,1	Cắt
SFS-I	365,1	352,7	−3,4	Bong tách FRP và Cắt
REF-II	349,5	372,9	6,7	Cắt
SFS-II	411,4	426,9	3,7	Bong tách FRP và Cắt

(a) Chênh lệch (%) = $[(P_{u,FEM} - P_{u,EXP})/P_{u,EXP}]\times 100$.

3. Nghiên cứu tham số và thảo luận

Mô hình PTHH của dầm SFS-I được sử dụng để phát triển các mô hình mới bằng cách thay đổi giá trị của từng tham số khảo sát, trong khi giữ nguyên giá trị của các tham số còn lại. Nghiên cứu này tập trung khảo sát các tham số sau đây: (i) Sơ đồ gia cường CFRP; (ii) Số lượng dải CFRP chữ U; (iii) Góc dán của dải CFRP chữ U; (iv) Các tính chất cơ học của CFRP. Sơ đồ gia cường được thay đổi bằng cách thử nghiệm các sơ đồ dán khác nhau đối với CFRP chữ U, sử dụng cùng một tổng diện tích CFRP là 1,6 m^2. Số lượng dải CFRP chữ U thay đổi từ 8 dải đến 20 dải. Góc dán dải CFRP chữ U thay đổi từ 450 đến 900. Và ảnh hưởng của các tính chất vật liệu CFRP với hai tham số khảo sát là cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi. Mỗi tham số khảo sát được thay đổi từ ba đến bốn giá trị. Một số chỉ dẫn cấu tạo, sơ đồ gia cường thực tế, và tính chất vật liệu CFRP có thể được tìm thấy ở các tài liệu tham khảo [14, 15, 19–23]. Bảng 4 tóm tắt các kết quả phân tích PTHH trong phần này.

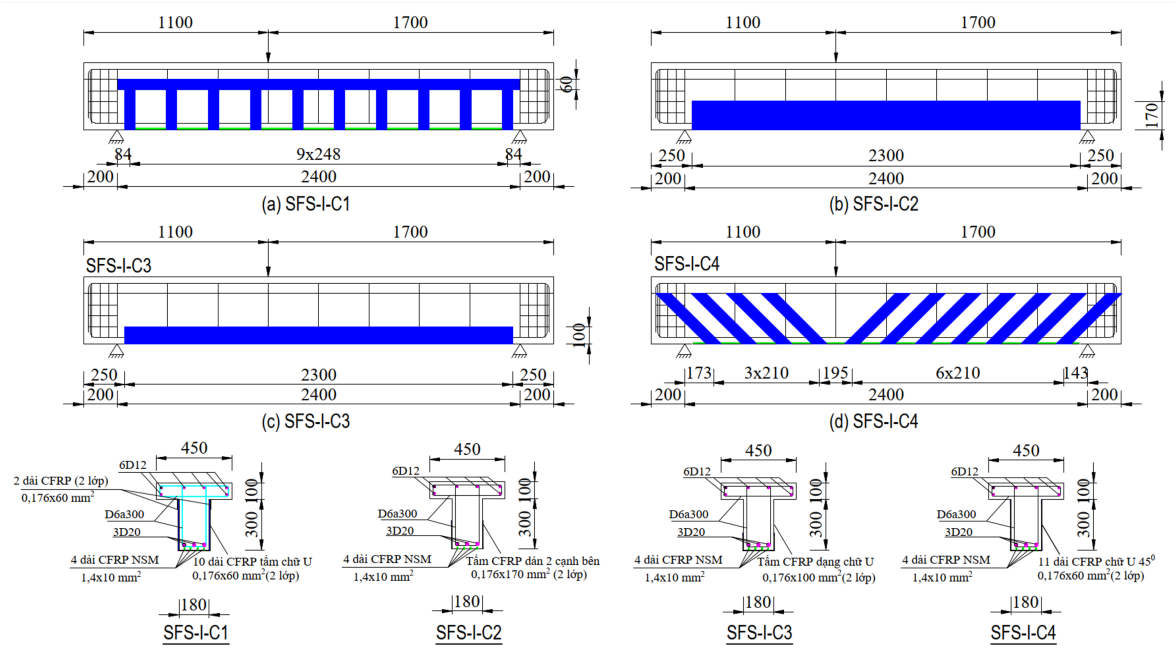
Bảng 4. Tổng hợp kết quả từ mô hình PTHH

STT	Tên dầm	Tải trọng lớn nhất P_{max} (kN)	Chuyển vị* (mm)	Dạng phá huỷ
1	SFS-I-C1	349,3	13,0	Bong tách/Cắt
2	SFS-I-C2	293,7	13,0	Bong tách/Cắt
3	SFS-I-C3	330,9	9,5	Bong tách/Cắt
4	SFS-I-C4 (SFS-I-a45)	389,4	11,3	Bong tách/Cắt
5	SFS-I-8U	321,5	10,3	Bong tách/Cắt
6	SFS-I-12U	332,2	10,5	Bong tách/Cắt
7	SFS-I (SFS-I-16U/SFS-I-a90)	352,7	11,7	Bong tách/Cắt
8	SFS-I-20U	360,7	11,7	Bong tách/Cắt
9	SFS-I-a60	387,7	12,5	Bong tách/Cắt
10	SFS-I-a75	350,7	10,3	Bong tách/Cắt
11	SFS-I-e370	371,5	13,3	Bong tách/Cắt
12	SFS-I-e440	377,6	13,3	Bong tách/Cắt
13	SFS-I-e580	375,8	12,8	Bong tách/Cắt
14	SFS-I-2400	349,2	11,3	Bong tách/Cắt
15	SFS-I-3400	347,8	11,3	Bong tách/Cắt
16	SFS-I-3700	349,9	11,3	Bong tách/Cắt
17	SFS-I-4000	348,8	11,3	Bong tách/Cắt

*Chuyển vị của dầm khi đạt đến tải trọng lớn nhất.

3.1. Sơ đồ gia cường CFRP chữ U

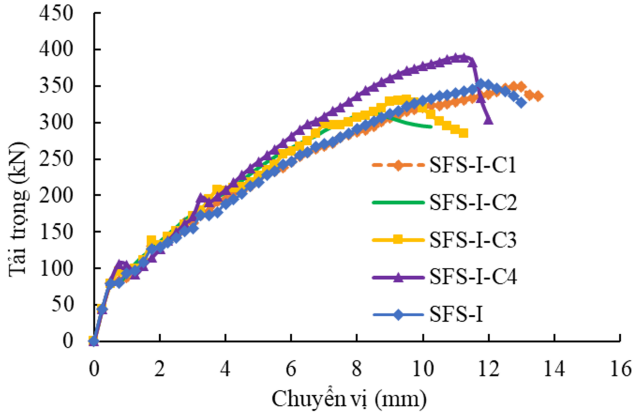
Trong nghiên cứu này, để xác định ảnh hưởng của sơ đồ dán CFRP đến hiệu quả gia cường chịu cắt của dầm BTCT sử dụng dải CFRP chữ U và dải CFRP NSM, bốn mô hình PTHH đã được phát triển và phân tích. Hình 4 minh họa bốn mẫu dầm, ký hiệu lần lượt là SFS-I-C1, SFS-I-C2, SFS-I-C3 và SFS-I-C4, sử dụng các sơ đồ gia cường khác nhau. Trong đó, dầm SFS-I-C1 được gia cường bằng 10 dải CFRP chữ U và tấm CFRP ngang (2 lớp) dán dọc dầm với mục đích tăng hiệu quả liên kết của các dải CFRP chữ U. Dầm SFS-I-C2 được gia cường hai mặt bên với chiều cao dán 170 mm trên toàn bộ nhịp nhưng không dán dưới đáy dầm. Dầm SFS-I-C3 được dán hai lớp tấm CFRP chữ U trên toàn bộ nhịp dầm với chiều cao dán trên cạnh bên là 100 mm. Dầm SFS-I-C4 được dán hai lớp tấm CFRP chữ U với góc nghiêng 45° so với phương ngang. Hơn nữa, để nghiên cứu tính hiệu quả và tính kinh tế khi gia cường, các sơ đồ dán khác nhau sử dụng cùng một diện tích vật liệu gia cường CFRP là 1,6 m^2. Tất cả các mô hình dầm đều có bê tông và cấu tạo cốt thép giống như dầm SFS-I. Kết quả phân tích PTHH thu được các biểu đồ tải trọng–chuyển vị như trên Hình 5.



Hình 4. Kích thước hình học và cấu tạo của dầm khi thay đổi sơ đồ dán CFRP chữ U

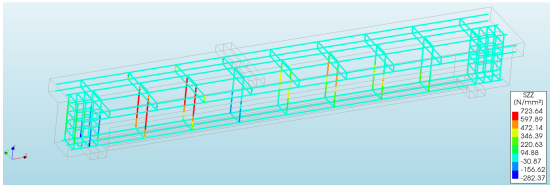
Khi so sánh kết quả giữa năm mô hình, Hình 5 chỉ ra rằng SFS-I-C2 có khả năng chịu lực nhỏ nhất (P_{max} = 293,7 kN), trong khi đó dầm SFS-I-C4 có khả năng chịu lực lớn nhất (P_{max} = 389,4 kN). So sánh với dầm SFS-I có tải trọng lớn nhất là 352,7 kN thì chỉ có dầm SFS-I-C4 cho khả năng chịu lực tốt hơn. Ba sơ đồ gia cường còn lại tỏ ra kém hiệu quả hơn so với sơ đồ gia cường được áp dụng trên dầm SFS-I. Các sơ đồ đều cho độ cứng ban đầu tương đối giống nhau. Dầm SFS-I-C1 đạt được độ dẻo lớn nhất, có thể thấy việc bố trí thêm hai dải CFRP theo phương ngang (ngay mép dưới cánh chữ T) không chỉ tăng khả năng liên kết giữa các dải CFRP chữ U với bề mặt bê tông mà còn tăng độ dẻo của dầm.

Dạng phá hủy của dầm SFS-I-C2 và dầm SFS-I-C3 có thể phân tích bởi các kết quả trên Hình 6. Đó là sự bong tách của các tấm CFRP dán ngoài trên hai mặt bên của dầm, đồng thời một số cốt thép đai đạt đến trạng thái bị chảy dẻo, dẫn đến phá hủy cắt. Vết nứt cắt hình thành từ phía mặt trên của dầm và mở rộng dần xuống phía dưới. Sơ đồ gia cường của dầm SFS-I-C2 và dầm SFS-I-C3 sử dụng

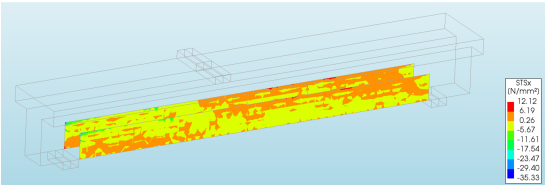


Hình 5. Ảnh hưởng của sơ đồ dán gia cường đến biểu đồ tải trọng–chuyển vị

các tấm CFRP dán mặt bên và trên một phần trên chiều cao dầm, vì vậy khả năng ngăn chặn việc mở rộng vết nứt rất hạn chế. Có thể thấy, việc gia cường toàn bộ bề mặt dầm không hiệu quả bằng việc gia cường tại một số vị trí trên toàn bộ chiều cao (so sánh trên cùng một tổng diện tích vật liệu gia cường CFRP). Dầm SFS-I-C4 có các dải CFRP chữ U dán trên toàn bộ chiều cao với góc nghiêng 45° cho khả năng chịu lực tốt nhất.



(a) Phân bố ứng suất trong cốt thép đai



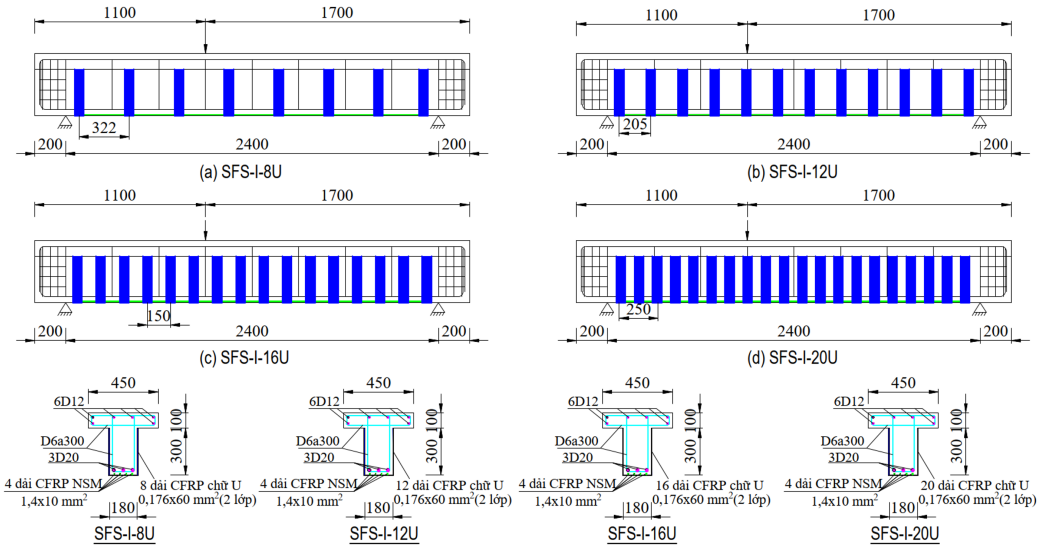
(b) Phân bố ứng suất cắt tại mặt tiếp xúc giữa CFRP và bê tông

Hình 6. Minh họa dạng phá huỷ của dầm SFS-I-C2

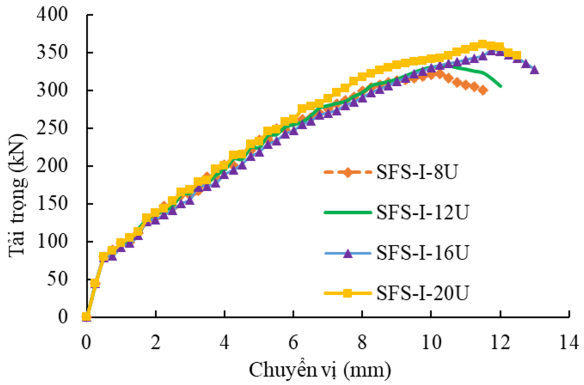
3.2. Số lượng CFRP chữ U

Trong mục này, bốn mô hình dầm với số lượng CFRP chữ U tăng dần từ 8 dải (8U), 12 dải (12U), 16 dải (16U), và 20 dải (20U), như minh họa trên Hình 7, để xác định ảnh hưởng của số lượng CFRP chữ U dán trên nhịp chịu cắt ảnh hưởng như thế nào đến sự cải thiện khả năng chịu cắt của dầm. Hình 8 thể hiện các biểu đồ tải trọng–chuyển vị của các dầm khảo sát. Kết quả thu được Hình 8 và Bảng 4 cho thấy khả năng chịu lực của các mẫu dầm tăng dần khi số lượng CFRP chữ U tăng lên. Khi tăng số lượng dải CFRP từ 8U lên 20U, tải trọng lớn nhất của dầm tăng 12,2% từ 321,5 kN lên 360,7 kN. Độ dẻo của dầm gia cường tăng lên khi tăng số lượng CFRP chữ U. Với các dầm khảo sát, khi số lượng dải CFRP được tăng từ 8U lên 20U, khả năng chịu cắt của dầm được cải thiện do sự gia tăng đóng góp của các dải CFRP trong việc cải thiện khả năng chịu cắt của dầm [19, 20]. Khi khả năng chịu cắt của dầm tăng lên sẽ làm tăng khả năng huy động ứng suất suất kéo trong cốt thép dọc, do đó làm cho khả năng chịu lực và chuyển vị (độ dẻo) của dầm tăng lên.

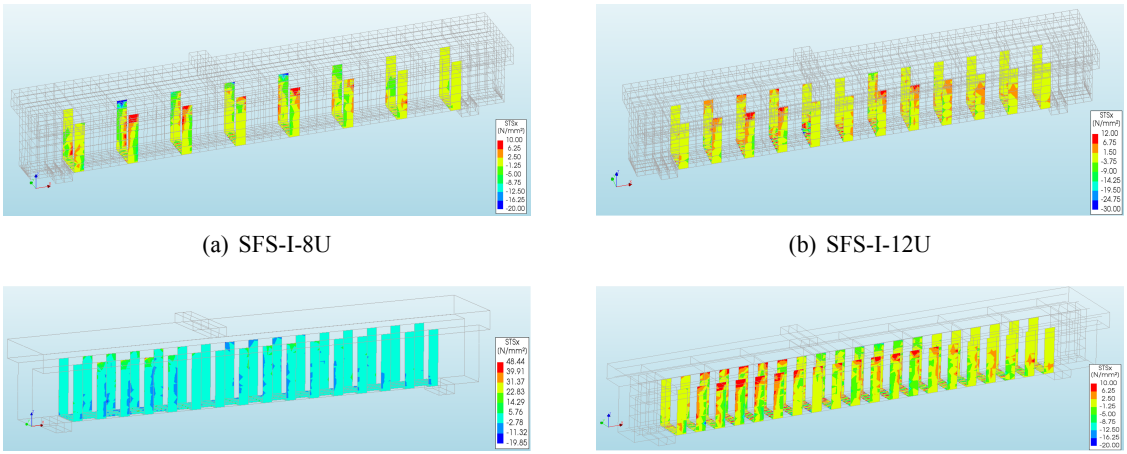
Hình 9 thể hiện sự phân bố ứng suất cắt tại bề mặt tiếp xúc giữa CFRP chữ U và bê tông của bốn mô hình dầm gia cường. Kết quả này chỉ ra rằng ứng suất cắt đã vượt quá cường độ bám dính giữa CFRP và bê tông. Do đó, có thể nhận xét rằng dạng phá huỷ của cả bốn mô hình dầm đều do bong tách CFRP chữ U, kết hợp với sự xuất hiện vết nứt cắt điển hình trên mặt bê tông do lực cắt gây ra.



Hình 7. Kích thước hình học và cấu tạo của dầm khi thay đổi số lượng CFRP chữ U



Hình 8. Ảnh hưởng của số lượng CFRP chữ U đến biểu đồ tải trọng–chuyển vị



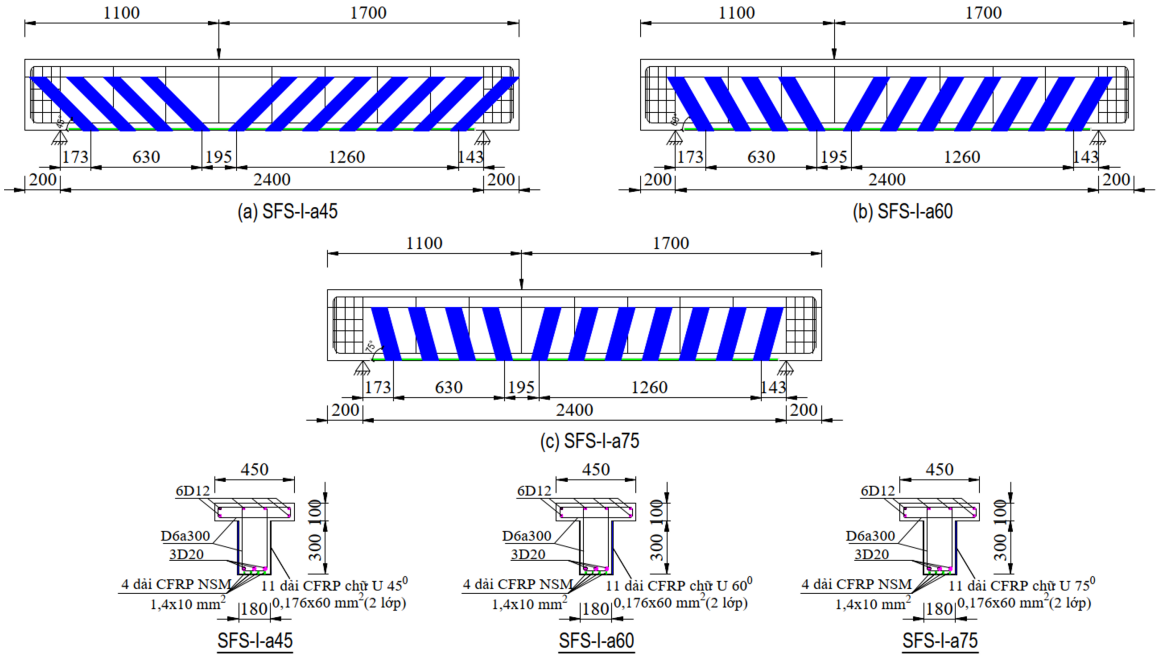
(a) SFS-I-8U (b) SFS-I-12U

(c) SFS-I-16U (d) SFS-I-20U

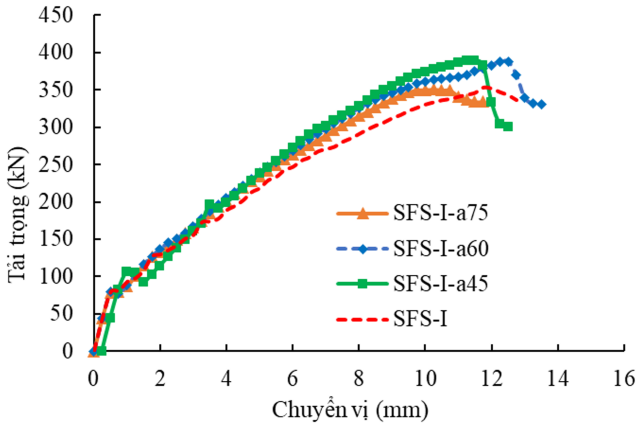
Hình 9. Phân bố ứng suất cắt tại bề mặt tiếp xúc giữa CFRP và bê tông

3.3. Góc dán CFRP chữ U

Kết quả thu được trong mục 3.1 đã chỉ ra rằng sơ đồ dán CFRP ảnh hưởng đến hiệu quả hiệu quả gia cường. Do đó, ảnh hưởng của góc dán CFRP chữ U đến khả năng chịu lực của dầm BTCT chữ T cần được khảo sát chi tiết hơn, nhằm tìm ra góc dán hiệu quả nhất. Nghiên cứu được thực hiện bằng cách phát triển mô hình PTHH của dầm gia cường SFS-I, chỉ thay đổi góc dán của các dải CFRP chữ U. Khảo sát được thực hiện trên ba mô hình dầm, ký hiệu SFS-I-a45 (hoàn toàn tương tự SFS-I-C4), SFS-I-a60 và SFS-I-a75, với góc dán lần lượt là 45°, 60° và 75° (so với phương ngang). Dầm SFS-I có góc nghiêng của dải CFRP chữ U là 90°. Kích thước hình học và vị trí các dải CFRP chữ U dán trên mỗi dầm được minh họa như trên Hình 10. Kết quả phân tích PTHH thu được các biểu đồ tải trọng–chuyển vị của bốn mô hình dầm, như trên Hình 11.

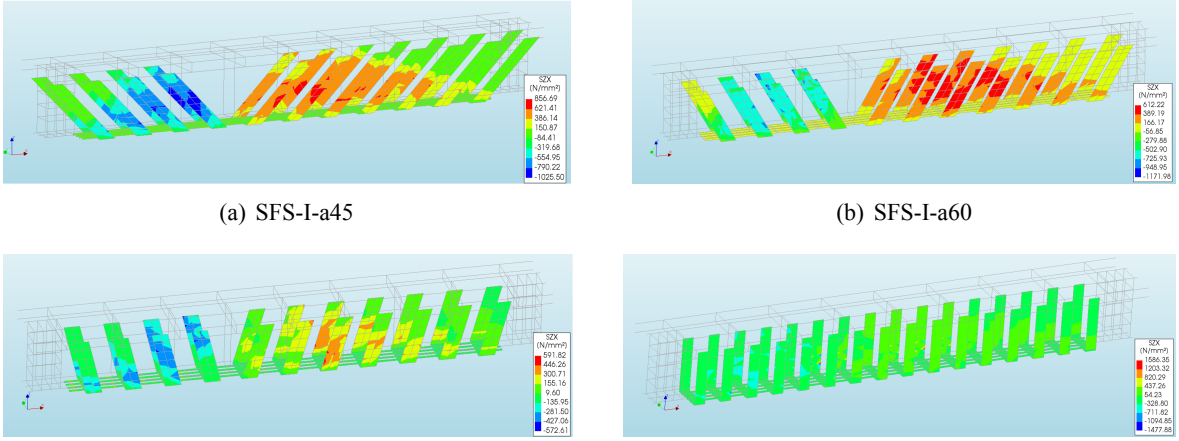


Hình 10. Kích thước hình học và cấu tạo của dầm khi thay đổi góc dán CFRP chữ U



Hình 11. Ảnh hưởng của góc dán CFRP chữ U đến biểu đồ tải trọng–chuyển vị

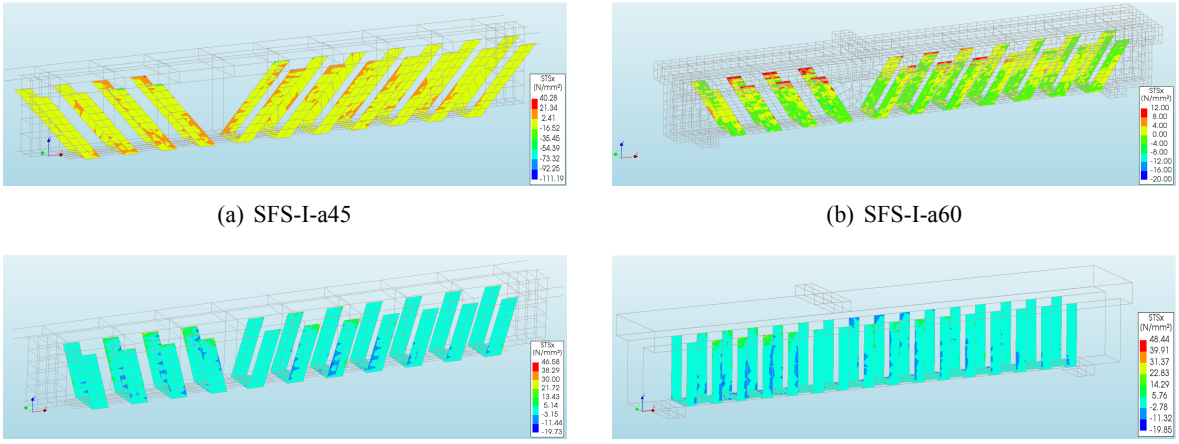
Kết quả trên Hình 11 chỉ ra rằng khả năng chịu lực của dầm SFS-I-a75 (P_{max} = 350,7 kN) và dầm SFS-I (P_{max} = 352,7 kN) là thấp nhất và tương đương nhau. Dầm SFS-I-a45 có khả năng chịu lực lớn nhất với tải trọng là 389,4 kN. Quan sát thấy khi thay đổi góc dán các dải CFRP chữ U, độ cứng ban đầu của dầm gần như không thay đổi. So với sơ đồ dán thẳng đứng trên dầm SFS-I, tải trọng lớn nhất của dầm SFS-I-a45 với góc dán nghiêng 45° tăng 10,4% và chuyển vị tại tải trọng lớn nhất giảm 3,4% (11,3 mm so với 11,7 mm). Với cùng diện tích vật liệu gia cường, góc dán nghiêng 45° cho thấy sự hiệu quả về cải thiện khả năng chịu lực như được quan sát thấy trong các thực nghiệm của Diagana và cs. [21], Jayaprakash và cs. [22], và Emara và cs. [23]. Hình 12 và Hình13 lần lượt thể hiện sự phân bố ứng suất trong các dải CFRP chữ U và phân bố ứng suất cắt giữa CFRP và bê tông ở thời điểm dầm đạt đến tải trọng lớn nhất. Hình 12 cho thấy ứng suất trong các dải đều nhỏ hơn cường độ chịu kéo của CFRP, do đó các dải CFRP chữ U chưa bị đứt.



(a) SFS-I-a45 (b) SFS-I-a60

(c) SFS-I-a75 (d) SFS-I

Hình 12. Phân bố ứng suất trong các dải CFRP chữ U



(a) SFS-I-a45 (b) SFS-I-a60

(c) SFS-I-a75 (d) SFS-I

Hình 13. Phân bố ứng suất cắt tại bề mặt tiếp xúc giữa CFRP và bê tông

Dạng phá huỷ của các dầm quan sát trên Hình 13 là sự bong tách các dải CFRP chữ U, chứng minh bởi ứng suất cắt giữa CFRP và bê tông vượt quá giá trị cực đại τ_{max} = 4,56 MPa. Khi các dải CFRP chữ U bị bong tách, các vết nứt cắt phát triển nhanh chóng và gây phá hủy cắt. Kết quả mô phỏng cho

thấy khi thay đổi góc dán của CFRP chữ U từ thẳng đứng sang nghiêng 45° thì độ cứng của dầm tăng lên, sự mở rộng của các vết nứt cắt bị hạn chế nhiều hơn. Với góc dán nghiêng 45° thì dải CFRP có chiều dài bám dính trên mặt bê tông lớn nhất so với các góc dán khác, do đó khả năng chịu lực của dầm gia cường được cải thiện đáng kể.

3.4. Tính chất cơ học của CFRP

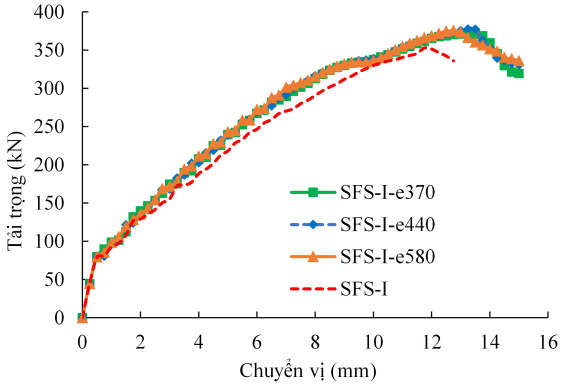
Trong mục này, bảy mô hình dầm được phát triển từ mô hình của dầm SFS-I, để khảo sát các tính chất cơ học đặc trưng của vật liệu CFRP, cụ thể là cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi, đến khả năng chịu lực và ứng xử của dầm BTCT chữ T được gia cường uốn-cắt bằng CFRP. Các giá trị của hai tham số khảo sát được tổng hợp trong Bảng 5. Các giá trị của hai tham số khảo sát này nằm trong phạm vi phổ biến của các loại tấm CFRP có trên thị trường [20].

Các mô hình dầm, ký hiệu là SFS-I-e370, SFS-I-e440, và SFS-I-e580 có cấu tạo hoàn toàn tương tự dầm SFS-I, được gia cường bằng CFRP có cùng cường độ chịu kéo bằng 3096 MPa, nhưng mô đun đàn hồi thay đổi lần lượt là 370, 440, và 580 GPa. Đồng thời, biến dạng dài giới hạn của CFRP cũng được thay đổi, giảm từ 12,6‰ xuống 8,4‰, 7,0‰, và 5,3‰. Các biểu đồ tải trọng–chuyển vị được thể hiện trên Hình 14, cho thấy độ cứng ban đầu của các dầm này không thay đổi đáng kể. Dạng phá hủy của các dầm này không đổi khi thay đổi mô đun đàn hồi của CFRP (xem Bảng 4). Mặc dù vậy, khả năng chịu lực của dầm có thể tăng lên 6,5% từ 352,7 kN trên dầm SFS-I lên 375,8 kN trên dầm SFS-I-e580. Khi mô đun đàn hồi tăng thì ứng suất trong dải CFRP chữ U được huy động sớm hơn dẫn đến ngăn cản việc mở rộng vết nứt tốt hơn nhờ đó tăng khả năng chịu lực. Khi tăng mô đun đàn hồi của CFRP, chuyển vị của dầm ứng với vị trí tải trọng lớn nhất có xu hướng tăng lên (Xem Bảng 4). Tuy nhiên, khi tăng mô đun đàn hồi từ 440 GPa tới 580 GPa thì chuyển vị của dầm giảm đi 3,8% (từ 13,3 mm xuống 12,8 mm).

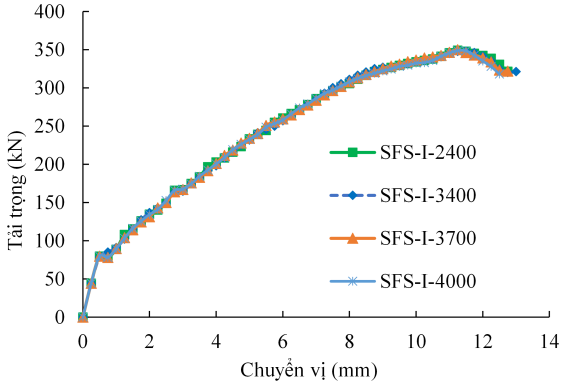
Bảng 5. Cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của CFRP trong dầm khảo sát

Tên dầm	Cường độ chịu kéo f_{fu} (MPa)	Mô đun đàn hồi E_{fu} (GPa)	Biến dạng giới hạn $\varepsilon_{fu} = f_{fu}/E_{fu}$ (‰)
SFS-I	3096	245	12,6
SFS-I-e370	3096	370	8,4
SFS-I-e440	3096	440	7,0
SFS-I-e580	3096	580	5,3
SFS-I-2400	2400	245	9,8
SFS-I-3400	3400	245	13,9
SFS-I-3700	3700	245	15,1
SFS-I-4000	4000	245	16,3

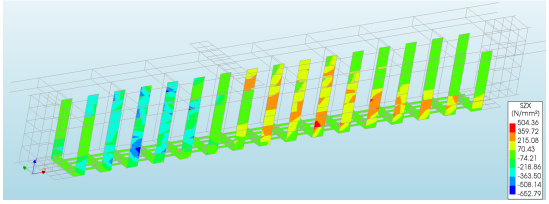
Tương tự, bốn mô hình dầm, ký hiệu là SFS-I-2400, SFS-I-3400, SFS-I-3700 và SFS-I-4000, cũng được phát triển dựa trên mô hình của dầm SFS-I, để khảo sát cường độ chịu kéo của CFRP, thay đổi từ 2400 đến 4000 MPa. Đồng thời, biến dạng dài tới hạn của CFRP cũng được thay đổi lần lượt là 9,8‰, 13,9‰, 15,1‰ và 16,3‰. Các biểu đồ tải trọng–chuyển vị được thể hiện trên Hình 15, chỉ ra rằng ứng xử và khả năng chịu lực của các dầm này không thay đổi đáng kể so với dầm gia cường SFS-I. Kết quả này được giải thích bởi khi chưa đạt đến cường độ chịu kéo của CFRP (xem Hình 16) thì dầm đã bị phá hủy do sự bong tách CFRP khỏi bề mặt bê tông. Do đó, khi gia cường dầm bằng CFRP thì kiến nghị ưu tiên sử dụng CFRP có mô đun đàn hồi lớn hơn, thay vì sử dụng dải CFRP có cường độ chịu kéo cao hơn.



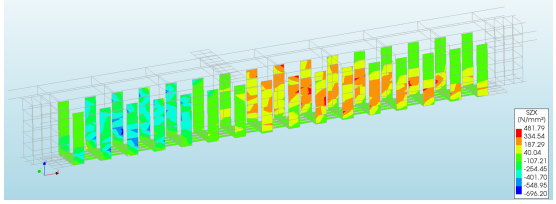
Hình 14. Ảnh hưởng của mô đun đàn hồi CFRP đến biểu đồ tải trọng–chuyển vị



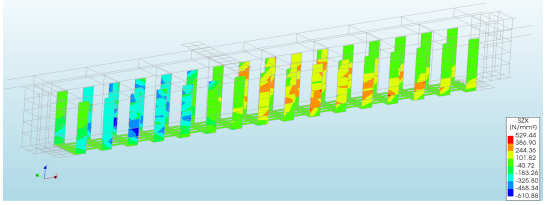
Hình 15. Ảnh hưởng của cường độ chịu kéo CFRP đến biểu đồ tải trọng–chuyển vị



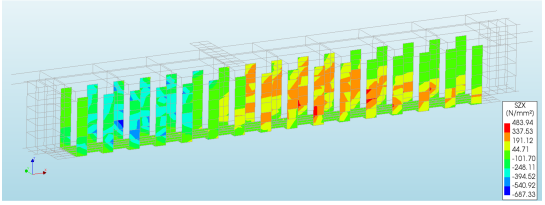
(a) SFS-I-2400



(b) SFS-I-3400



(c) SFS-I-3700



(d) SFS-I-4000

Hình 16. Phân bố ứng suất trong các dải CFRP chữ U

4. Kết luận

Nghiên cứu này sử dụng mô hình PTHH đã được phát triển để mô phỏng và kiểm chứng xử của dầm BTCT tiết diện chữ T được gia cường uốn-cắt đồng thời bằng các dải CFRP NSM ở đáy dầm và các dải CFRP chữ U dán ở bụng dầm. Một số tham số như cường độ chịu nén của bê tông, hàm lượng cốt thép dọc, hàm lượng cốt thép đai, số lượng lớp dán của CFRP chữ U và bề rộng cánh chữ T đã được khảo sát trong một nghiên cứu trước [16]. Nghiên cứu này tiếp tục được mở rộng, nhằm đánh giá đầy đủ hơn các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng chịu lực và ứng xử cơ học của dầm BTCT chữ T được gia cường uốn-cắt đồng thời bằng CFRP, bao gồm: (i) Sơ đồ gia cường CFRP; (ii) Số lượng dải CFRP chữ U, (iii) Góc dán của dải CFRP chữ U; và (iv) Tính chất cơ học của CFRP (cường độ chịu kéo, mô đun đàn hồi). Từ kết quả phân tích của các mô hình dầm gia cường khảo sát rút ra các kết luận chính như sau:

- Sơ đồ dán các dải CFRP chữ U nghiêng góc 45° kết hợp các dải CFRP NSM ở đáy dầm cải thiện tốt nhất khả năng chịu lực của dầm tiết diện chữ T khi so sánh với các sơ đồ dán còn lại.

- Tăng số lượng CFRP chữ U cải thiện khả năng chịu cắt, cho phép huy động hiệu quả ứng suất suất kéo trong cốt thép dọc, cuối cùng làm cho khả năng chịu lực và chuyển vị của dầm gia cường

tăng lên.

- Khi sử dụng cùng một diện tích vật liệu gia cường, CFRP chữ U dán góc nghiêng 45° (vuông góc với vết nứt cắt) là hiệu quả nhất khi so với các góc dán nghiêng 60°, 75° và 90°.

- Cường độ chịu kéo của CFRP ảnh hưởng không đáng kể đến khả năng chịu lực của dầm, vì dạng phá hủy bị chi phối bởi sự bong tách CFRP. Ngược lại, mô đun đàn hồi của CFRP tăng lên sẽ cải thiện khả năng chịu lực và chuyển vị của dầm gia cường. Do đó, khi gia cường dầm bằng CFRP có thể kiến nghị ưu tiên sử dụng vật liệu FRP có mô đun đàn hồi lớn hơn, thay vì có cường độ chịu kéo lớn hơn.

Cần lưu ý rằng, mặc dù mô hình PTHH đã được kiểm chứng với bốn dầm thí nghiệm (hai dầm đối chứng và hai dầm gia cường), nhưng số lượng mẫu thử nghiệm còn hạn chế. Vì vậy để tăng cường tính chính xác và độ tin cậy, các nghiên cứu tiếp theo cần kiểm chứng với nhiều mẫu thí nghiệm hơn. Bên cạnh đó, các kết quả nghiên cứu tham số trong nghiên cứu này cũng có thể được kiểm tra lại thông qua nghiên cứu thực nghiệm.

Tài liệu tham khảo

[1] Nguyen, T. K., Nguyen, N. T., Tran, H. A., Nguyen, H. G., Tran, P. (2024). Three-dimensional nonlinear finite element analysis of corroded reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 28(10):2217–2243.

[2] 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 (KHCNXD) - ĐHXD*, 15(1V):1–16.

[3] 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.

[4] Tran, C. T. N., Nguyen, X. H., Nguyen, H. C., Le, D. D. (2021). Shear performance of short-span FRP-reinforced concrete beams strengthened with CFRP and TRC. *Engineering Structures*, 242:112548.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] Godat, A., Hammad, F., Chaallal, O. (2020). State-of-the-art review of anchored FRP shear-strengthened RC beams: A study of influencing factors. *Composite Structures*, 254:112767.

[9] Al-Saidy, A. H., Al-Harthy, A. S., Al-Jabri, K. S., Abdul-Halim, M., Al-Shidi, N. M. (2010). Structural performance of corroded RC beams repaired with CFRP sheets. *Composite Structures*, 92(8):1931–1938.

[10] Ke, Y., Zhang, S. S., Smith, S. T., Yu, T. (2023). Novel Embedded FRP Anchor for RC Beams Strengthened in Flexure with NSM FRP Bars: Concept and Behavior. *Journal of Composites for Construction*, 27(1).

[11] Almassri, B., Kreit, A., Mahmoud, F. A., François, R. (2014). Mechanical behaviour of corroded RC beams strengthened by NSM CFRP rods. *Composites Part B: Engineering*, 64:97–107.

[12] Askar, M. K., Hassan, A. F., Al-Kamaki, Y. S. S. (2022). Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams using FRP composites: A state of the art. *Case Studies in Construction Materials*, 17: e01189.

[13] Haddad, R. H., Obaidat, Y. T. (2018). A nonlinear finite element model for shear deficient heat-damaged concrete beams repaired using NSM CFRP strips. *Construction and Building Materials*, 170:314–325.

[14] Hawileh, R. A., Abdalla, J. A., Naser, M. Z. (2018). Modeling the shear strength of concrete beams reinforced with CFRP bars under unsymmetrical loading. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 26(15):1290–1297.

[15] 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.

[16] Nguyen, N. D., Lam, D. T., Tan, N. N. (2023). Flexural-shear strengthening of reinforced concrete T-beams subjected to asymmetric loading using CFRP system combined by NSM strips and U-wraps. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 17(4):48–65.

[17] 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.

[18] Ferreira, D., Manie, J. (2020). *DIANA Documentation release 10.3*. DIANA FEA bv.

[19] ACI 440.2R-02 (2002). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

[20] Bank, L. C. (2006). *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. Wiley.

[21] Diagana, C., Li, A., Gedalia, B., Delmas, Y. (2003). Shear strengthening effectiveness with CFF strips. *Engineering Structures*, 25(4):507–516.

[22] Jayaprakash, J., Abdul Samad, A. A., Anvar Abbasovich, A., Abang Ali, A. A. (2008). Shear capacity of precracked and non-precracked reinforced concrete shear beams with externally bonded bi-directional CFRP strips. *Construction and Building Materials*, 22(6):1148–1165.

[23] Emara, M., Salem, M. A., Mohamed, H. A., Shehab, H. A., El-Zohairy, A. (2023). Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Engineered Cementitious Composites and Carbon Fiber-Reinforced Polymer Sheets. *Fibers*, 11(11):98.