

ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP. HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

NGUYỄN NGUYỄN VŨ

GIA CƯỜNG FRP CHO DẦM BTCT BỊ CHÁY

Ngành : Kỹ thuật xây dựng
Mã số ngành : 9580201

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH - NĂM 2023

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM**

Người hướng dẫn 1: PGS.TS. CAO VĂN VUI

Người hướng dẫn 2: PGS.TS. LƯƠNG VĂN HẢI

Phản biện độc lập 1:

Phản biện độc lập 2:

Phản biện: PGS. TS. Nguyễn Duy Liêm

Phản biện: PGS. TS. Nguyễn Văn Hiếu

Phản biện: PGS. TS. Hồ Đức Duy

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án họp tại

.....
.....

vào lúc giờ ngày tháng năm 2023

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM
- Thư viện Đại học Quốc gia Tp.HCM
- Thư viện Khoa học Tổng hợp Tp.HCM

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

Tạp chí quốc tế

1. Nguyễn Nguyên Vũ, và Cao Văn Vui, "Experimental and analytical study on postfire reinforced concrete beams retrofitted with CFRP in flexure and shear," *Civil Engineering Journal (ISI, Q1)*, vol. 9, no. 07, p. 1610–1629, 2023, doi: <http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-07-05>.
2. Nguyễn Nguyên Vũ, và Cao Văn Vui, "Performance of Postfire Reinforced Concrete Beams Retrofitted with External Bonded and Near-Surface Mounted CFRP: Experiments and Analyses," *Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE, ISI, Q2)*, vol. 37, no. 3, p.04023016, 2023, doi: <https://doi.org/10.1061/JPCFEV.CFENG-4297>.
3. Nguyễn Nguyên Vũ, và Cao Văn Vui, "NSM GFRP Strengthening of Reinforced Concrete Beams after Exposure to Fire: Experiments and Theoretical Model," *Journal of Composites for Construction (ASCE, ISI, TOP20, Q1)*, vol. 27, no. 1, p. 04022086, 2023, doi: <https://doi.org/10.1061/JCCOF2.CCENG-3933>.
4. Cao Văn Vui, và Nguyễn Nguyên Vũ, "Flexural Performance of Postfire Reinforced Concrete Beams: Experiments and Theoretical Analysis," *Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE, ISI, Q1)*, vol. 36, no. 3, p. 04022029, 2022, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001739](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001739).

Tạp chí trong nước

1. Tạ Hoàng Duy Hào, Nguyễn Nguyên Vũ*, và Cao Văn Vui, "Effect of concrete cover thickness on deflection of reinforced concrete beams exposed to fire," *VNUHCM Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 1549-1557, 2022, doi: <https://doi.org/10.32508/stdjet.v5i2.1006>. (*Corresponding author).

CHƯƠNG 1 GIỚI THIỆU

1.1 Đặt vấn đề

Gần đây, vật liệu FRP được dùng phổ biến hơn [7] và đã trở thành vật liệu ưu tiên gia cường kết cấu. Số vụ hỏa hoạn ngày càng tăng và tác động của hỏa hoạn đến công trình thì phức tạp. Tiêu chuẩn hiện hành còn thiếu những quy định chi tiết cho thiết kế kết cấu BTCT chịu lửa. Việc sửa chữa nâng cấp kết cấu BTCT bị cháy là cần thiết đối với công trình bị hỏa hoạn. Do đó, đề tài “Gia cường FRP cho dầm BTCT bị cháy” nhằm góp phần làm sáng tỏ các vấn đề nêu trên.

1.2 Sự cần thiết, ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Hỏa hoạn làm kết cấu bị cháy hư hại và có thể sụp đổ. Gia cường là cần thiết và FRP là một vật liệu thích hợp. Tuy nhiên, vẫn còn nhiều vấn đề cần được giải quyết để giúp hiểu sâu hơn về sự làm việc của kết cấu BTCT bị cháy gia cường FRP, như cộng đồng khoa học khuyến khích [8] [9] [10] [11] [12]. Đây là vấn đề mà luận án hướng đến giải quyết.

1.3 Mục tiêu và phạm vi

Luận án này nghiên cứu đánh giá và gia cường FRP dầm BTCT bị cháy. Để đạt được mục tiêu này, cả phương pháp thực nghiệm và phương pháp lý thuyết đồng thời được sử dụng. Mục tiêu cụ thể chia thành 4 giai đoạn: Giai đoạn 1 nghiên cứu ứng xử chịu uốn của dầm BTCT bị cháy; Giai đoạn 2 nghiên cứu gia cường NSM GFRP cho dầm BTCT bị cháy; Giai đoạn 3 nghiên cứu gia cường EB và NSM CFRP cho dầm BTCT bị cháy. Giai đoạn 4 nghiên cứu gia cường EB CFRP sử dụng U-wrap cho dầm BTCT bị cháy. Phạm vi nghiên cứu của luận án là dầm BTCT bị cháy không có và có gia cường FRP theo kỹ thuật EB và NSM.

CHƯƠNG 2 TỔNG QUAN

Về dầm BTCT bị cháy không gia cường FRP: Cháy làm suy giảm các đặc trưng cơ học của vật liệu BT và cốt thép. Từ đó, khả năng chịu tải của dầm BTCT giảm và biến dạng tăng. Dầm BTCT bị cháy có độ cứng và độ dẻo giảm nhiều hơn so với tải trọng và cường độ. Bề mặt dầm BTCT có màu sắc thay đổi và bị nứt ở các mức độ khác nhau. Tải trọng hiện hữu có ảnh hưởng không đáng kể đến khả năng chống cháy của dầm. Chiều dày lớp BT bảo vệ, hàm lượng cốt thép dọc, thời gian

cháy, mặt bị cháy, và phương pháp bảo dưỡng dầm BTCT sau khi bị cháy là các yếu tố ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu tải. Có thể sử dụng phương pháp đường đẳng nhiệt 500°C để phân tích dầm BTCT bị cháy.

Về các kỹ thuật gia cường FRP cho dầm BTCT: Kỹ thuật gia cường EB đã được nghiên cứu từ thập niên 90. Kỹ thuật gia cường NSM mới được các tác giả chú ý khoảng từ năm 2004. Mãi đến năm 2018, thì kỹ thuật SNSM mới được nghiên cứu. Nhìn chung, hiệu quả chống cháy của gia cường NSM tốt hơn so với gia cường EB. Kỹ thuật EB thường có dạng phá hoại là bong tách lớp FRP. Kỹ thuật NSM thường có dạng phá hoại là bong tách lớp BT. Sử dụng chất kết dính gốc epoxy sẽ đạt khả năng chịu tải tốt hơn khi dùng chất kết dính gốc xi măng. Khi dùng chất kết dính gốc xi măng sẽ có lợi về biến dạng hơn là về khả năng chịu tải. Khả năng chịu nhiệt của chất nền polyme càng cao thì khả năng chịu nhiệt của FRP càng cao.

Về dầm BTCT bị cháy có gia cường FRP: Gia cường FRP cho dầm BTCT bị cháy làm tăng khả năng chịu tải, tăng độ cứng, nhưng làm giảm độ dẻo. Chiều dài liên kết FRP càng dài thì càng tăng khả năng chịu tải. Có thể tăng cường khả năng chống cháy cho dầm bằng cách gia cường thanh FRP chịu nhiệt. Các giải pháp neo, chiều dài liên kết ảnh hưởng rất nhiều đến dạng phá hoại. Dạng phá hoại của dầm BTCT bị cháy được gia cường FRP thường là bong tách lớp BT. Nếu hai đầu thanh FRP được neo tốt, hoặc được gia cường cách nhiệt tốt, thì khả năng chịu tải và khả năng chống cháy cho dầm BTCT tăng.

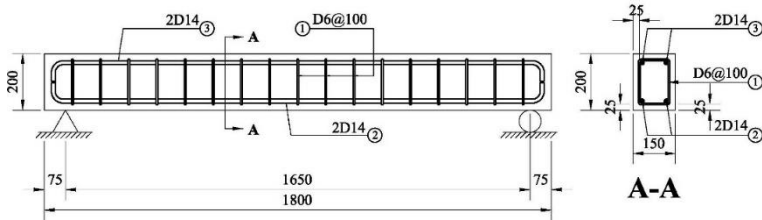
Tổng quan nghiên cứu về dầm BTCT bị cháy, kỹ thuật gia cường FRP, và gia cường dầm BTCT bị cháy đã được trình bày như trên. Các tiêu chuẩn hiện hành còn thiếu những quy định chi tiết cho thiết kế kết cấu chịu lửa của dầm BTCT cũng như gia cường FRP cho dầm BTCT bị cháy. Do những hạn chế của các tiêu chuẩn, quy định về phương pháp sử dụng khả năng chịu lửa, nên cộng đồng nghiên cứu đã chuyển sự chú ý sang phương pháp thiết kế dựa trên tính năng đã quy định rõ hơn. Do đó, nghiên cứu để bổ sung thêm cho cơ sở dữ liệu, tạo tiền đề biên soạn các tiêu chuẩn hướng dẫn thiết kế theo phương pháp sử dụng khả năng chống cháy.

Một số lượng lớn các công bố về gia cường FRP cho kết cấu hoặc sửa chữa kết cấu bị xuống cấp hư hỏng ở nhiệt độ thường. Tuy nhiên, các nghiên cứu về gia cường FRP cho các kết cấu BTCT bị cháy hiện nay còn khá hạn chế. Nhiều vấn đề vẫn còn bỏ ngõ và cần được nghiên cứu làm sáng tỏ. Thật vậy, nghiên cứu về các vấn đề nêu trên đã được cộng đồng khoa học khuyến khích [8] [9] [10] [11] [12], nhằm giúp hiểu sâu hơn về sự làm việc của kết cấu BTCT bị cháy gia cường bằng FRP.

CHƯƠNG 3 CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

3.1 Vật liệu và mẫu thí nghiệm

Hình 3.3 mô tả các dầm thiết kế theo ACI 318-19 [83]. Bảng 3.2–3.5 mô tả các dầm theo từng giai đoạn thí nghiệm.



Hình 3.3. Thiết kế dầm BTCT thí nghiệm (đơn vị: mm).

Bảng 3.2. Dầm BTCT bị cháy không gia cường thí nghiệm giai đoạn 1.

STT	Dầm	Nhóm	Cháy (phút)	BT	Cốt thép dọc D14		Cốt thép đai D6	
					f'_c (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_y (MPa)
1	B-0-1	B-0	0	25,5	363,6	517,2	361,9	487,2
2	B-0-2							
3	B-0-3							
4	B-30-1	B-30	30	25,5	363,6	517,2	361,9	487,2
5	B-30-2							
6	B-30-3							
7	B-45-1	B-45	45	25,5	363,6	517,2	361,9	487,2
8	B-45-2							
9	B-45-3							
10	B-60-1	B-60	60	25,5	363,6	517,2	361,9	487,2
11	B-60-2							
12	B-60-3							
13	B-75-1	B-75	75	25,5	363,6	517,2	361,9	487,2

STT	Dầm	Nhóm	Cháy (phút)	BT f'_c (MPa)	Cốt thép dọc D14		Cốt thép đai D6	
					f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
14	B-75-2							
15	B-75-3							

Bảng 3.3. Dầm BTCT bị cháy gia cường GFRP thí nghiệm giai đoạn 2.

N	Dầm	Nhóm	Cháy (phút)	Gia cường FRP	Cốt thép dọc D14		Cốt thép đai D6		
					f'_c (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
1	B1	A	0	Không	25,5	363,6	517,2	36 1,9	487,2
2	B2	B	30	Không	25,5	363,6	517,2	36 1,9	487,2
3	B3			1D10					
4	B4			2D10					
5	B5			3D10					
6	B6	C	60	Không	25,5	363,6	517,2	36 1,9	487,2
7	B7			1D10					
8	B8			2D10					
9	B9			3D10					

Bảng 3.4. Dầm BTCT bị cháy gia cường CFRP thí nghiệm giai đoạn 3.

N	Dầm	Nhóm	Cháy (phút)	Gia cường FRP	Cốt thép dọc D14		Cốt thép đai D6		
					f'_c (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
1	B-30-R1	B-30	30	R1	25,5	363,6	517,2	361,9	487,2
2	B-30-R2			R2					
3	B-30-R3			R3					
4	B-30-R4			R4					
5	B-45-R1	B-45	45	R1	25,5	363,6	517,2	361,9	487,2
6	B-45-R2			R2					
7	B-45-R3			R3					
8	B-45-R4			R4					
9	B-60-R1	B-60	60	R1	25,5	363,6	517,2	361,9	487,2
10	B-60-R2			R2					
11	B-60-R3			R3					
12	B-60-R4			R4					
13	B-75-R1	B-75	75	R1	25,5	363,6	517,2	361,9	487,2

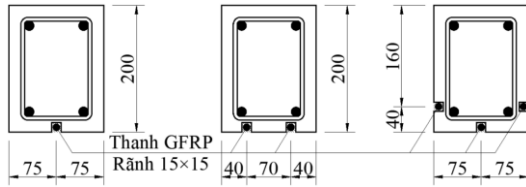
N	Dầm	Nhóm	Cháy (phút)	Gia cường FRP	Cốt thép dọc D14			Cốt thép đai D6	
					f'_c (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
14	B-75-R2			R2					
15	B-75-R3			R3					
16	B-75-R4			R4					

Bảng 3.5. Dầm BTCT bị cháy gia cường CFRP thí nghiệm giai đoạn 4.

N	Dầm	Nhóm	Cháy (phút)	Gia cường FRP	Cốt thép dọc D14			Cốt thép đai D6	
					f'_c (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
1	B0	B0	0	Không	24,3	443,6	535,4	334,9	466,4
2	B30	B30	30	Không	24,3	443,6	535,4	334,9	466,4
3	B30-U1			U1					
4	B30-U2			U2					
5	B30-U3			U3					
6	B30-U4			U4					
7	B60	B60	60	Không	24,3	443,6	535,4	334,9	466,4
8	B60-U1			U1					
9	B60-U2			U2					
10	B60-U3			U3					
11	B60-U4			U4					

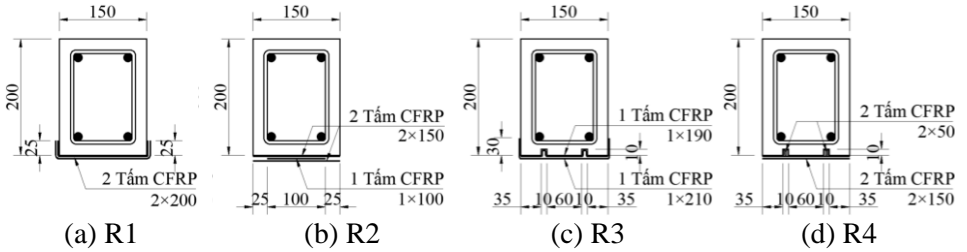
3.2 Gia cường FRP

Hình 3.7 mô tả gia cường NSM GFRP của giai đoạn 2. Hình 3.8 mô tả gia cường EB và NSM CFRP của giai đoạn 3. Hình 3.12 mô tả gia cường tấm mỏng CFRP có sử dụng U-wrap. Thanh vằn GFRP D10 với đường kính ngoài 10 mm được gia cường NSM ở thí nghiệm giai đoạn 2. Giá trị trung bình diện tích mặt cắt ngang thực và đường kính thực lần lượt là 56,36 mm² và 8,47 mm. Giá trị cường độ chịu kéo tới hạn của GFRP là 807,8 MPa. Tấm CFRP dày 0,131 mm được sử dụng trong các thí nghiệm giai đoạn 3. Cường độ chịu kéo trung bình là 2825,6 MPa. Keo epoxy có mô đun đàn hồi là 2,76 GPa, cường độ chịu kéo là 40,08 MPa, và cường độ chịu nén là 128 MPa.



(a) Dầm B3 và B7 (b) Dầm B4 và B8 (c) Dầm B5 và B9

Hình 3.7. Cấu hình gia cường thanh GFRP.



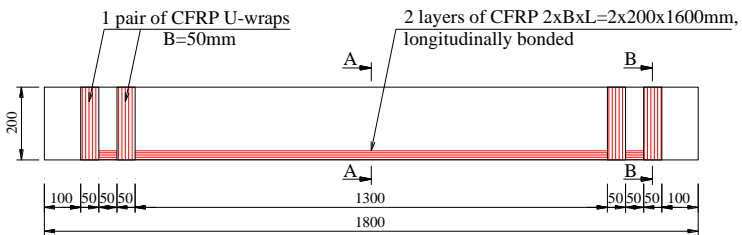
(a) R1

(b) R2

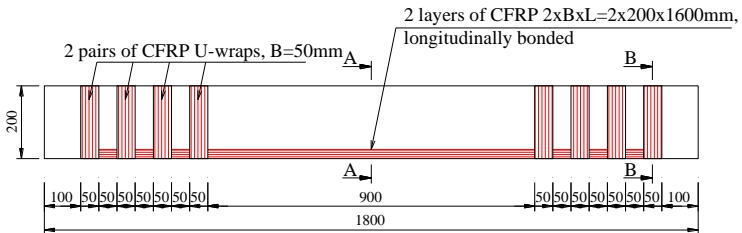
(c) R3

(d) R4

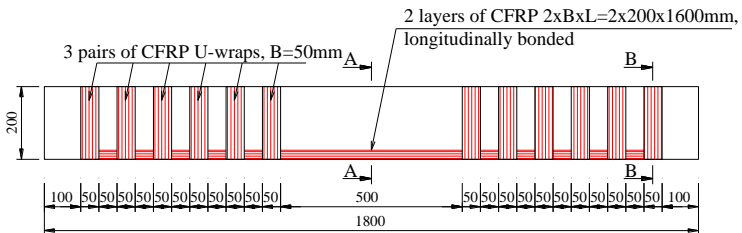
Hình 3.9. Cấu hình gia cường tấm mỏng CFRP.



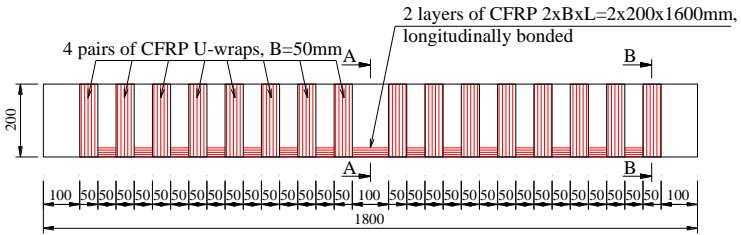
(a) Cấu hình gia cường U1



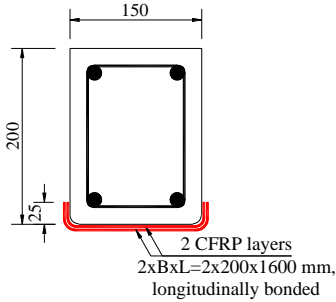
(b) Cấu hình gia cường U2



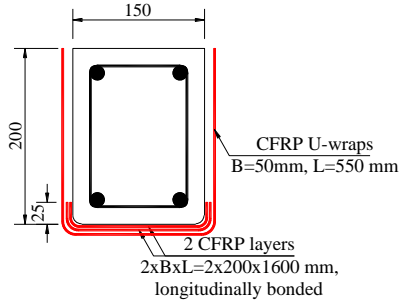
(c) Cấu hình gia cường U3



(d) Cấu hình gia cường U4



(e) Mặt cắt A-A



(f) Mặt cắt B-B



(g) Các dầm bị cháy sau khi gia cường CFRP có sử dụng U-wrap

Hình 3.12. Gia cường tấm mỏng CFRP có sử dụng U-wrap (đơn vị: mm).

CHƯƠNG 4 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN DÀM BTCT BỊ CHÁY

4.1 Dạng phá hoại

Hình 4.4 thể hiện dạng phá hoại điển hình của các dầm. Dạng phá hoại của dầm đối chứng B-0 (Hình 4.4a) là phá hoại uốn. Góc của vết nứt khoảng 45° so với trục dầm. Nhóm B-30 (Hình 4.4b) và B-45 là phá hoại uốn nhưng vết nứt mở rộng trên diện tích lớn hơn và góc của các vết nứt gần 30° so với trục dầm. Cho thấy liên kết giữa BT và thép trong vùng chịu kéo giảm đáng kể do sự suy giảm cường độ BT. Dạng phá hoại của B-60 (Hình 4.4d) và B-75 là phá hoại uốn-cắt.

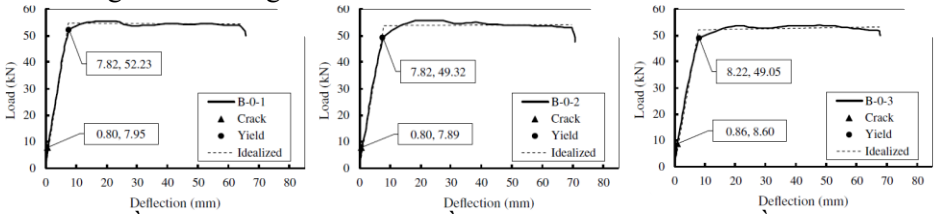


(a) Cháy 0 phút (b) Cháy 30 phút (c) Cháy 60 phút

Hình 4.4. Dạng phá hoại điển hình của thí nghiệm giai đoạn 1.

4.2 Đường cong tải trọng–độ võng

Những đường cong này thể hiện rõ vùng thềm dẻo (plastic plateau) rất dài sau khi thép chảy. Bằng cách bỏ qua điểm bắt đầu nứt, đường cong tải trọng–độ võng có thể được lý tưởng hóa bằng đường song tuyến [85], như được thể hiện bằng các đường nét đứt trong các Hình 4.5–Hình 4.9.

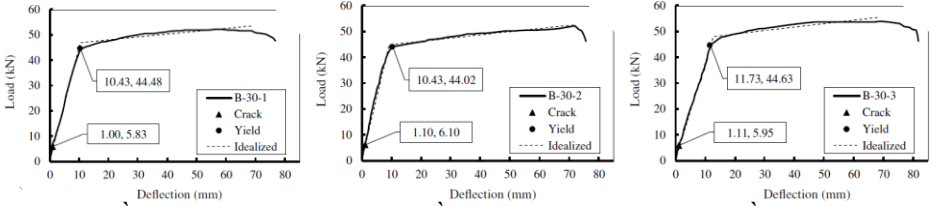


(a) Dầm B-0-1

(b) Dầm B-0-2

(c) Dầm B-0-3

Hình 4.5. Đường cong tải trọng–độ võng nhóm B-0.

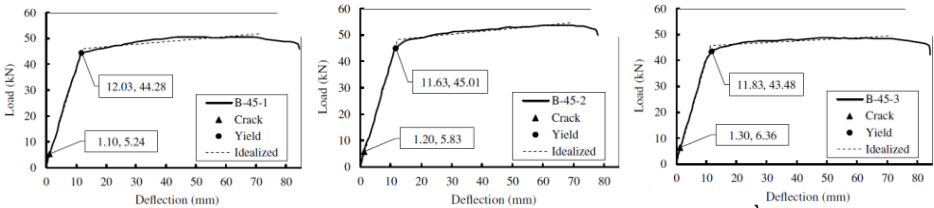


(a) Dầm B-30-1

(b) Dầm B-30-2

(c) Dầm B-30-3

Hình 4.6. Đường cong tải trọng–độ võng nhóm B-30.

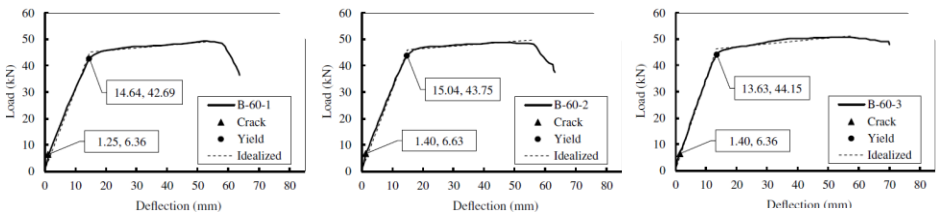


(a) Dầm B-45-1

(b) Dầm B-45-2

(c) Dầm B-45-3

Hình 4.7. Đường cong tải trọng–độ võng nhóm B-45.

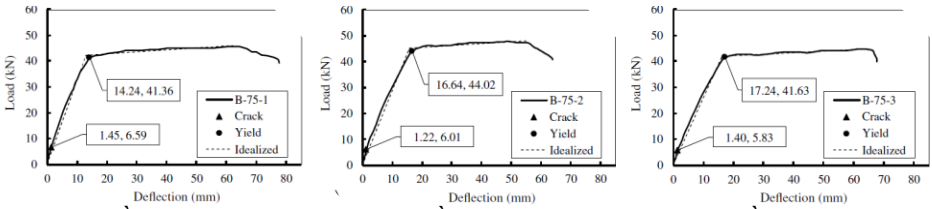


(a) Dầm B-60-1

(b) Dầm B-60-2

(c) Dầm B-60-3

Hình 4.8. Đường cong tải trọng–độ võng nhóm B-60.



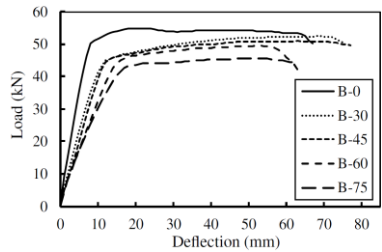
(a) Dầm B-75-1

(b) Dầm B-75-2

(c) Dầm B-75-3

Hình 4.9. Đường cong tải trọng–độ võng nhóm B-75.

Đường cong tải trọng–độ võng trung bình được xác định từ 3 đường cong tải trọng–độ võng của 3 dầm trong mỗi nhóm. Hình 4.10 cho thấy thời gian cháy càng tăng thì đường cong càng dịch chuyển xuống dưới và qua phải, nghĩa là càng giảm khả năng chịu tải và càng tăng độ võng. Điều này gây ra những thay đổi đáng kể đối với các đặc tính của dầm BTCT bị cháy.



Hình 4.10. Đường cong tải trọng–độ võng trung bình.

4.3 Kết luận

Màu sắc và vết nứt li ti trên bề mặt dầm BTCT thay đổi khi thời gian cháy thay đổi, đây là dấu hiệu cho thấy sự suy giảm khả năng chịu tải của dầm BTCT. Dầm không bị cháy có dạng phá hoại uốn và góc vết nứt 45° so với trục dầm. Dầm bị cháy 30, 45 phút vẫn có dạng phá hoại uốn nhưng góc vết nứt 30° so với trục dầm, các vết nứt mở rộng trên diện tích lớn hơn. Khi thời gian cháy lâu hơn 60 phút thì vết nứt nghiêng lớn dẫn đến phá hoại uốn–cắt. Cho thấy, cháy làm giảm cường độ BT và giảm liên kết giữa BT và thép. Thời gian cháy càng tăng thì càng giảm khả năng chịu tải của dầm BTCT.

Tải trọng chảy giảm nhẹ khi thời gian cháy tăng, mức độ giảm tải trọng chảy là rất ít so với các đặc tính khác, chỉ giảm 15,7% đối với thời gian cháy 75 phút. Tải trọng chảy phụ thuộc không chỉ vào cường độ chịu nén của BT mà còn phụ thuộc vào cường độ chịu kéo của thép. Mức độ giảm ít của tải trọng chảy cho thấy sau khi dầm BTCT trở về nhiệt độ bình thường sau cháy thì cốt thép dường

như đã khôi phục cường độ hoàn toàn mặc dù BT đã bị giảm cường độ và lực dính vĩnh viễn. Lửa làm tăng đáng kể độ võng chảy 36.5%–101,7%. Nhìn chung, độ võng chảy có xu hướng tăng tỷ lệ thuận với thời gian cháy. Độ võng chảy của các dầm không bị cháy cho kết quả khá giống nhau trong khi độ võng chảy của các nhóm dầm bị cháy cho kết quả khá phân kì rời rạc. Điều này cho thấy rằng, ở các thí nghiệm giai đoạn sau, mẫu đối chứng không bị cháy sẽ không cần làm 3 mẫu, trong khi các nhóm bị cháy vẫn phải làm 3 mẫu vì tính chất phức tạp khó lường của lửa tự nhiên.

Tải trọng tới hạn có xu hướng giảm khi thời gian cháy tăng, nhóm dầm cháy 75 phút giảm (giảm 16,2%) nhiều hơn so với thời gian cháy 30, 45, và 60 phút (giảm 4,2%–9,9%). Dầm BTCT bị cháy dưới 60 phút có mức độ giảm thấp và khá đều khi so sánh với nhóm cháy 75 phút. Độ võng tới hạn của các nhóm dầm bị cháy có dạng phá hoại uốn (B-30 và B-45) có mức độ tăng so với nhóm đối chứng, ngược lại nhóm có dạng phá hoại uốn-cắt (B-60 và B-75) có độ võng tới hạn giảm so với nhóm đối chứng. Việc giảm độ võng tới hạn của các dầm cháy trên 60 phút làm cho độ dẻo giảm đáng kể. Nhận thấy, dạng phá hoại của dầm BTCT bị cháy có ảnh hưởng rất quan trọng đến độ võng tới hạn và độ dẻo.

Độ cứng chảy của dầm BTCT bị cháy giảm mạnh (36,5%–57,5%) khi thời gian cháy tăng. Khi cháy 30 phút thì độ cứng chảy giảm 36,5%. Cháy làm giảm độ cứng trung bình 47,5%, sự giảm này là do cường độ BT giảm và liên kết giữa BT và thép giảm. Độ cứng chảy là đại lượng có mức độ giảm nhiều khi dầm BTCT bị cháy. Do đó, đây là đại lượng cần được quan tâm. Thời gian cháy càng lâu thì độ dẻo giảm càng nhiều, đây cũng là đại lượng có mức độ giảm nhiều (giảm đáng kể 33,1%–61,1%). Độ dẻo giảm 35,3% đối với các nhóm có dạng phá hoại uốn, tuy nhiên mức độ giảm cao hơn nhiều (60,45%) đối với có dạng phá hoại uốn-cắt.

Nhìn chung tải trọng, độ cứng, độ dẻo của dầm BTCT bị cháy giảm khi thời gian cháy tăng. Khi thời gian cháy tăng, độ võng chảy có xu hướng tăng. Trong khi, độ võng tới hạn có xu hướng giảm khi thời gian cháy lâu hơn 60 phút. Những đặc tính cần quan tâm chú ý khi đánh giá dầm BTCT bị cháy là: Độ cứng chảy,

độ võng chảy, và độ dẻo.

CHƯƠNG 5 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN GIA CƯỜNG FRP CHO DẦM BTCT BỊ CHÁY

Từ các kết quả nghiên cứu thực nghiệm giai đoạn 2 về gia cường NSM GFRP, giai đoạn 3 về gia cường EB và NSM CFRP, và giai đoạn 4 về gia cường EB CFRP sử dụng U-wrap cho dầm BTCT bị cháy, một số kết luận được rút ra như sau:

Dầm đối chứng và dầm bị cháy thời gian dưới 60 phút không gia cường bị phá hoại do cốt thép chịu kéo đạt giới hạn chảy, xác nhận dạng phá hoại uốn. Thời gian cháy càng tăng thì các vết nứt nghiêng xuất hiện càng nhiều và càng mở rộng trên diện tích lớn hơn ở giữa nhịp của các dầm không gia cường. Dầm bị cháy gia cường NSM GFRP có dạng phá hoại là bong tách lớp BT. Dạng phá hoại thay đổi đáng kể do sự phát triển của các vết nứt nghiêng. Sự kéo đứt GFRP không xảy ra trong các thí nghiệm. Các vết nứt nghiêng và sự bong tách lớp BT của dầm cháy 60 phút rõ ràng hơn của dầm cháy 30 phút. Cấu hình và số lượng gia cường NSM GFRP rất quan trọng đối với dạng phá hoại và sự phát triển các vết nứt. Các dầm gia cường NSM GFRP bị uốn cong đồng đều. Nén vỡ BT vùng chịu nén đã không xảy ra. Các dầm BTCT bị cháy gia cường EB và NSM CFRP bị phá hoại ở dạng bong tách lớp BT. CFRP không bị kéo đứt. Nén vỡ BT vùng chịu nén cũng không xảy ra. Dạng phá hoại là bong tách lớp BT là tương tự vì lửa làm suy giảm cường độ BT. Chiều dày của lớp BT bong tách ở trạng thái phá hoại tỷ lệ thuận với chiều cao gia cường EB ở cạnh bên của dầm và chiều sâu cắt rãnh NSM. Các dầm gia cường CFRP bị uốn cong tương đối nhỏ. Vết nứt nghiêng chủ yếu xuất hiện giữa CFRP và thép chịu kéo. Dầm bị cháy gia cường EB CFRP sử dụng U-wrap có dạng phá hoại là bong tách lớp BT giữa CFRP (bắt đầu từ U-wrap CFRP và lan dần xuống CFRP chịu uốn) và cốt thép, có xảy ra hiện tượng nén vỡ BT nhỏ. Dầm bị cháy gia cường EB CFRP sử dụng U-wrap có độ cong và độ dẻo thấp. Sự kéo đứt các tấm CFRP không xảy ra.

Hiệu quả của gia cường FRP càng giảm khi thời gian cháy càng tăng. NSM GFRP đã khôi phục thành công hoặc tăng khả năng chịu tải. Cháy làm giảm đáng kể độ cứng nhưng gia cường NSM GFRP không thể phục hồi hoàn toàn. Khác với gia cường NSM GFRP, việc gia cường EB và NSM CFRP đã thay đổi đáng kể ứng xử của dầm BTCT bị cháy. Các đường cong tải trọng–độ võng là tuyến tính cho đến điểm cháy, tiếp theo là một đoạn rất ngắn phi tuyến, và cuối cùng là phá hoại giòn. Phi tuyến xảy ra ở cuối các đường cong đối với một số dầm, trong khi một số dầm khác không thể hiện phần phi tuyến. Sự bong tách lớp BT diễn ra nhanh chóng và tải trọng giảm mạnh khi dầm bị phá hoại. Hiệu quả tương tự của bốn cấu hình gia cường; do (1) chiều cao làm việc của CFRP trong hai phương pháp gia cường EB và NSM là xấp xỉ nhau, (2) sự phá hoại là do bong tách lớp BT chứ không phải do bong tách lớp FRP, và (3) lớp BT bảo vệ đã bị suy giảm tính chất cơ học do bị cháy. Đường cong tải trọng–độ võng của dầm bị cháy gia cường EB CFRP sử dụng U-wrap có một đoạn tuyến tính đến điểm giới hạn cháy, sau đó là một đoạn phi tuyến rất ngắn, và cuối cùng là phá hoại do bong tách lớp BT. Tải trọng giảm mạnh sau khi xảy ra bong tách lớp BT. Thời gian cháy càng lâu thì giai đoạn phi tuyến càng ngắn, và dạng phá hoại bong tách lớp BT xảy ra càng sớm hơn. Số lượng U-wrap càng tăng thì ứng xử của đường cong tải trọng–độ võng thể hiện hiệu quả càng tốt hơn. Sự khác biệt chính của gia cường bằng kỹ thuật NSM khi so sánh với gia cường bằng kỹ thuật EB là giai đoạn ứng xử phi tuyến sau khi đạt điểm giới hạn cháy.

Gia cường NSM GFRP có thể phục hồi hoặc tăng tải trọng cháy của dầm BTCT bị cháy so với dầm BTCT không bị cháy. Mức tăng tối đa là 26,5% đối với cháy 30 phút và 21,3% đối với cháy 60 phút. Gia cường EB và NSM CFRP làm tăng tải trọng cháy lên 27,5%–40,9% đối với dầm BTCT cháy 30–60 phút. Đối với dầm cháy 75 phút thì chỉ có thể khôi phục khả năng chịu tải, chứ không tăng đáng kể tải trọng cháy như các trường hợp cháy dưới 60 phút. Bởi vì, cháy 75 phút đã làm suy giảm nghiêm trọng cường độ BT, lực dính giữa BT và thép. Gia cường EB CFRP sử dụng U-wrap làm cho tải trọng cháy tăng đáng kể đối với các dầm bị cháy 30 phút, tăng 15,3–19,7% khi so sánh với dầm đối chứng. Trong khi đó,

hiệu quả giảm đối với các dầm bị cháy 60 phút. Khi tăng số lượng U-wrap sẽ có tác dụng tăng nhẹ tải trọng chảy. Khả năng chịu tải của các dầm BTCT gia cường tấm CFRP giảm khi tăng thời gian cháy.

Số lượng gia cường NSM GFRP ảnh hưởng đến độ võng chảy là không rõ ràng, không cải thiện khi so sánh với dầm bị cháy không gia cường. Đối với dầm cháy 60 phút, độ võng chảy của dầm bị cháy gia cường NSM GFRP tăng cao nhất 160,2% trong khi dầm bị cháy không gia cường chỉ tăng 95,2% so với dầm đối chứng không bị cháy. Gia cường EB và NSM CFRP làm tăng độ võng chảy của dầm BTCT bị cháy lên 97,9%–133,6% so với dầm không bị cháy. Việc gia cường EB CFRP sử dụng U-wrap vẫn làm tăng độ võng chảy, tuy nhiên khi số lượng U-wrap càng tăng thì độ võng chảy có xu hướng giảm nhẹ, vì các U-wrap này đã ngăn chặn, làm chậm trễ sự bong tách tại vị trí CFRP chịu uốn. Sự gia tăng độ võng chảy có thể là kết quả của tính chất đàn hồi cho đến khi kéo đứt của vật liệu FRP; ngoài ra, cháy đã làm giảm tính chất cơ học của vật liệu BT và thép, giảm liên kết giữa thép và BT.

Gia cường NSM GFRP phục hồi hoàn toàn hoặc tăng khả năng chịu tải lên đến 39% so với dầm không bị cháy. Gia cường tấm CFRP làm tăng 16,2%–45,9% đối với dầm cháy dưới 60 phút so với tải trọng tới hạn của dầm đối chứng. Sự gia tăng này có thể xác nhận sự thành công của việc gia cường CFRP trong việc cải thiện tải trọng tới hạn của các dầm cháy dưới 60 phút. Tuy nhiên, tải trọng tới hạn của dầm cháy 75 phút không hồi phục hoàn toàn, chỉ có cấu hình gia cường R3 có tải cực hạn cao hơn 23,5% điều này cho thấy tầm quan trọng của đoạn neo đối với các dầm BTCT có cường độ BT và độ kết dính giữa BT và thép giảm đi nhiều do bị cháy 75 phút. Gia cường EB CFRP sử dụng U-wrap có khả năng phục hồi và tăng cường tải trọng tới hạn của các dầm BTCT bị cháy, số lượng U-wrap càng nhiều thì hiệu quả này càng tăng. Việc gia cường FRP có thể làm tăng đáng kể khả năng chịu tải tới hạn, mức độ tăng phụ thuộc vào cấu hình gia cường CFRP và thời gian cháy. Thời gian cháy càng lâu thì hiệu quả của việc gia cường NSM GFRP càng giảm. Tải trọng tới hạn có xu hướng giảm khi thời gian cháy tăng lên

Khi thời gian cháy càng lâu thì dạng phá hoại bong tách lớp BT ở dầm gia cường NSM GFRP xảy ra càng sớm, làm cho độ võng tới hạn của các dầm gia cường sau cháy 60 phút giảm 33,9%, đây là mức độ giảm cao vì dầm gia cường sau cháy 30 phút chỉ giảm 22,8%. Nhìn chung độ võng của các dầm gia cường NSM GFRP sau cháy là giảm đáng kể. Gia cường với hai thanh NSM dưới đáy dẫn đến độ võng tới hạn thấp hơn một ít so với gia cường với một thanh NSM dưới đáy. Việc gia cường NSM GFRP ở dưới đáy kết hợp bên hông dẫn đến độ võng tới hạn cao hơn. Cấu hình gia cường EB và NSM CFRP không thể hiện ảnh hưởng rõ ràng đến độ võng tới hạn. Độ võng tới hạn của dầm BTCT bị cháy gia cường CFRP thấp hơn nhiều so với các dầm đối chứng (70,7%). Gia cường EB CFRP sử dụng U-wrap làm cho độ võng tới hạn của dầm BTCT bị cháy đã giảm hơn nữa khi so sánh với dầm bị cháy không gia cường. Độ võng tới hạn thấp hơn nhiều của dầm BTCT bị cháy gia cường FRP là do sự bong tách lớp BT giữa CFRP và thép chịu kéo; và do sự thay đổi tiêu cực của tính chất cơ học của vật liệu sau khi bị cháy.

Việc gia cường NSM GFRP chỉ cải thiện một phần độ cứng và không thể phục hồi về độ cứng ban đầu. Lượng GFRP càng nhiều thì mức độ phục hồi càng cao. Độ cứng của dầm bị cháy 60 phút gia cường chỉ phục hồi ~ 50% so với dầm đối chứng. Độ cứng của dầm BTCT bị cháy gia cường CFRP thấp hơn nhiều so với dầm không bị cháy. Mức độ giảm độ cứng của dầm BTCT bị cháy được gia cường EB và NSM CFRP từ 35,6% đến 53,8%. Gia cường EB CFRP sử dụng U-wrap có thể làm tăng độ cứng, sự gia tăng này tỷ lệ thuận với việc tăng số lượng U-wrap. Tuy nhiên, độ cứng này chỉ tăng nhẹ khi so sánh với dầm bị cháy không gia cường, chứ không phục hồi được hoàn toàn độ cứng khi so sánh với dầm đối chứng. Xu hướng giảm độ cứng khi tăng thời gian cháy đối với các dầm gia cường FRP.

Việc gia cường NSM GFRP làm tăng không đáng kể độ võng chảy và làm giảm đáng kể độ võng tới hạn. Do đó, từ độ dẻo cao của dầm đối chứng giảm đáng kể xuống độ dẻo thấp của dầm BTCT bị cháy gia cường GFRP. Khi các dầm BTCT bị cháy gia cường tám CFRP độ dẻo xấp xỉ bằng 1, cũng được phân loại là độ

đeo thấp. Số lượng U-wrap không có tác dụng đáng kể đến việc cải thiện độ dẻo cho dầm BTCT bị cháy gia cường EB CFRP sử dụng U-wrap. Sự phá hoại dầm bị chi phối bởi dạng phá hoại bong tách lớp BT xảy ra sau khi thép chịu kéo đạt giới hạn chảy. Độ dẻo thấp được coi là một hạn chế của kỹ thuật gia cường này và cần được cải thiện.

CHƯƠNG 6 PHÂN TÍCH LÝ THUYẾT

6.1 Phân bố nhiệt độ trong tiết diện BTCT

6.1.1 Mô hình Wickström [91]

Khoảng cách từ đường đẳng nhiệt 500°C ra ngoài biên mặt cắt tiết diện, x_{500} (m) được tính bằng công thức (6.3), theo khuyến nghị của Purkiss và Li [93]. Trong đó, α_r là tỷ số của độ khuếch tán nhiệt chia cho giá trị tham chiếu $0.417 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [94]; t_w (h) là thời gian bị cháy, n_w là tỷ số giữa nhiệt độ bề mặt với nhiệt độ BT, được tính theo công thức (6.4); và T ($^{\circ}\text{C}$) là nhiệt độ lò, được tính theo công thức (6.5) theo ISO 834 [84]. Độ khuếch tán nhiệt được khuyến nghị $0.417 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [93]; do đó $\alpha_r = 1$.

$$x_{500} = \sqrt{\frac{\alpha_r t}{\exp\left(4,5 + \frac{480}{0,18 n_w T}\right)}} \quad (6.3)$$

$$n_w = 1 - 0,0616 t_w^{-0,88} \quad (6.4)$$

$$T = 20 + 345 \times \log(8 \times 60 \times t_w + 1) \quad (6.5)$$

6.1.2 Mô hình Desai [92]

Công thức (6.6) diễn tả sự phân bố nhiệt độ trên mặt cắt tiết diện, từ công thức này giải phương trình bậc ba ta sẽ tìm được x ($x_{500} = x$). Các tham số A , B , C , và D được tính lần lượt bằng công thức (6.7)–(6.10); t (phút) là thời gian cháy, b là chiều rộng của tiết diện, h là chiều cao của tiết diện, r là tỷ số chiều cao tiết diện chia cho chiều rộng tiết diện, $r = h/b$. Các công thức này chỉ áp dụng được khi $100 \text{ mm} < b < 300 \text{ mm}$ và $1 < r < 3$.

$$T = \frac{D - Ax + Bx^2 - Cx^3}{r^{0,25}} \quad (6.6)$$

$$A = 3,33 \left(3 + 0,0033t + \frac{100-t}{b} \right) \quad (6.7)$$

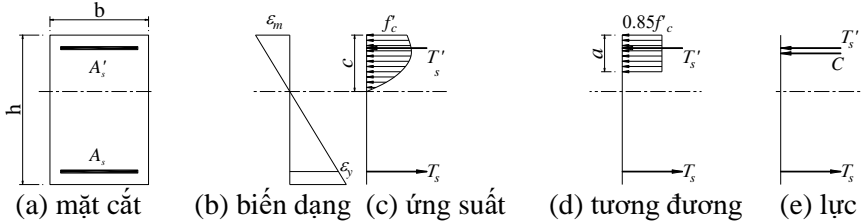
$$B = 0,085 \quad (6.8)$$

$$C = 0,000221 \quad (6.9)$$

$$D = 475r^{\frac{7}{12}} - \left(b - 105t^{\frac{1}{3}} \right) \quad (6.10)$$

6.2 Khả năng chịu uốn của dầm BTCT bị cháy

Phương pháp đẳng nhiệt 500°C được lựa chọn để tính mô men uốn do tính đơn giản. Điểm chính của phương pháp này là xác định đường 500°C trong mặt cắt. Sau đó, mặt cắt được tách thành hai vùng, vùng bên trong đường 500°C có cường độ BT $f_{cT} = f'_c$ và vùng bên ngoài có cường độ BT $f_{cT} = 0$.



Hình 6.1. Sơ đồ phân tích dầm BTCT bị cháy.

Công thức (6.17) được sử dụng để xác định mô men uốn, M_y của tiết diện dầm bị cháy. Trong đó, A_s là diện tích của cốt thép chịu kéo và f_y là ứng suất chịu kéo của cốt thép tại điểm chảy, cánh tay đòn Z của cốt thép chịu kéo có thể lấy gần đúng bằng chiều sâu làm việc của thép chịu kéo.

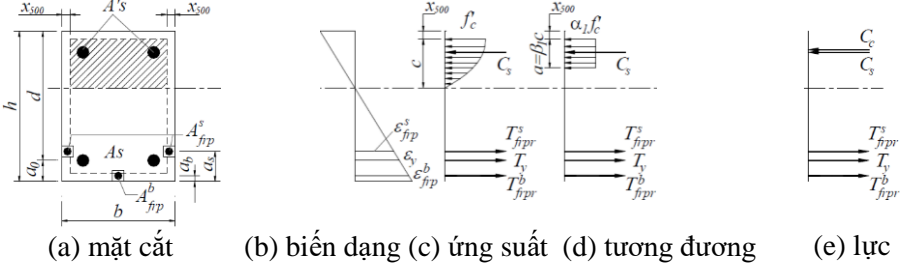
$$M_y \approx A_s f_y Z \quad (6.17)$$

Bảng 6.1: So sánh mô men chảy của dầm bị cháy.

Dầm	Mô men phân tích (kNm)	Mô men thí nghiệm (kNm)	So sánh (%)
B-0	18,5	20,71	-10,8
B-30	16,3	18,31	-11,0
B-45	15,6	18,26	-14,5
B-60	15,0	17,96	-16,7
B-75	14,6	17,46	-16,7

Nhìn chung, tính toán cung cấp các kết quả an toàn hợp lý có thể áp dụng phù hợp trong thiết kế.

6.3 Khả năng chịu uốn của dầm BTCT bị cháy gia cường NSM GFRP



Hình 6.2. Sơ đồ phân tích dầm BTCT bị cháy gia cường thanh FRP.

Công thức (6.41) được sử dụng để tính mô men uốn tại điểm giới hạn chảy của dầm BTCT bị cháy được gia cường NSM GFRP. Trong đó, các tham số được mô tả chi tiết ở Hình 6.2.

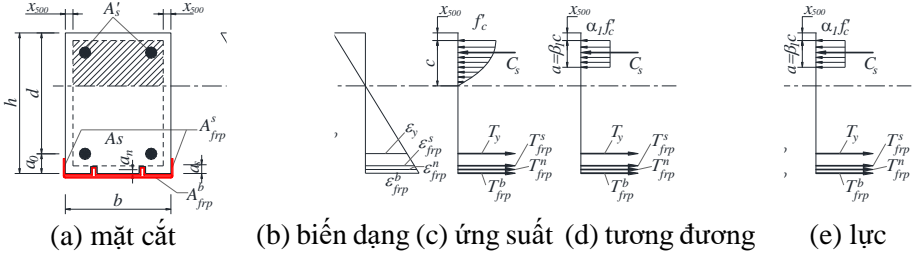
$$\begin{aligned}
 M_y = & A_s f_y (d - 0.5a - x_{500}) + (f_{frp}^b A_{frp}^b + f_r^b A_r^b)(h - 0.5a - a_b - x_{500}) \\
 & + (f_{frp}^s A_{frp}^s + f_r^s A_r^s)(h - 0.5a - a_s - x_{500})
 \end{aligned}
 \tag{6.41}$$

Bảng 6.2: So sánh mô men chảy của dầm bị cháy gia cường thanh GFRP.

Dầm	Nhóm	Mô men phân tích (kNm)	Mô men thí nghiệm (kNm)	So sánh (%)
B1	A		20,5	
B2	B	17,2	29,3	-10,9
B3		19,1	22,0	-13,2
B4		21,0	25,1	-16,3
B5		21,9	26,0	-15,8
B6	C	16,1	18,9	-14,8
B7		17,9	21,3	-16,0
B8		19,6	24,4	-19,7
B9		20,4	24,9	-18,1

Bảng 6.2 cho thấy kết quả so sánh các mô men chảy thu được từ mô hình lý thuyết và thực nghiệm. Ngoài việc giá trị thấp hơn do phương pháp đẳng nhiệt 500°C, nó chỉ chênh lệch 4,9% khi phạm vi 15.8%–19.7% so với phạm vi 10.9%–14.8%, cho thấy dự đoán tốt về mô hình đối với các dầm được gia cường GFRP. Nhìn chung, mô hình an toàn, thích hợp cho các mục đích thiết kế.

6.4 Khả năng chịu uốn của dầm BTCT bị cháy gia cường tấm CFRP



Hình 6.3. Sơ đồ phân tích dầm BTCT bị cháy gia cường tấm FRP.

Công thức (6.68) dự đoán khả năng chịu mô men uốn của dầm bị cháy được gia cường EB và NSM CFRP. Trong đó, các tham số được mô tả chi tiết ở Hình 6.3.

$$\begin{aligned}
 M_y = & A_s f_y (d - 0.5a - x_{500}) + A_{FRP}^b f_{FRP}^b (h - 0.5a - x_{500}) \\
 & + A_{FRP}^s f_{FRP}^s (h - 0.5a - a_s - x_{500}) + A_{FRP}^n f_{FRP}^n (h - 0.5a - a_n - x_{500})
 \end{aligned}
 \tag{6.70}$$

Bảng 6.3: So sánh mô men chảy của dầm bị cháy gia cường tấm CFRP.

Dầm	Nhóm	Mô men phân tích (kNm)	Mô men thí nghiệm (kNm)	So sánh(%)
B0	B-0	18.5	20.7	-10.6
B-30-R1	B-30	24.3	28.5	-14.7
B-30-R2		24.7	28.5	-13.5
B-30-R3		24.3	27.1	-10.5
B-30-R4		24.5	29.2	-16.0
B-45-R1	B-45	23.4	28.1	-16.7
B-45-R2		23.8	28.3	-16.0
B-45-R3		23.4	28.4	-17.7
B-45-R4		23.6	27.3	-13.4
B-60-R1	B-60	22.6	26.4	-14.3
B-60-R2		23.0	28.0	-17.9
B-60-R3		22.6	27.7	-18.4
B-60-R4		22.9	26.7	-14.4
B-75-R1	B-75	21.9	23.4	-6.3
B-75-R2		22.3	21.9	1.7
B-75-R3		21.9	24.5	-10.7
B-75-R4		22.1	21.3	3.9

Bảng 6.3 cho thấy so sánh mô men chảy từ mô hình lý thuyết với mô men chảy từ thực nghiệm giai đoạn 3. Mô men chảy của dầm B-0 đối chứng được tính là 18,5 kNm, thấp hơn 10,6% so với giá trị thực nghiệm 20,7 kNm. Mô hình lý thuyết cho kết quả thấp một chút, có thể là do không tính đến sự giảm liên kết giữa thép và BT.

6.5 Khả năng chịu uốn của dầm BTCT bị cháy gia cường tấm CFRP

Để đơn giản hóa, có thể giả định rằng CFRP chịu uốn đóng góp vào khả năng chống uốn trong khi U-wrap góp phần vào khả năng chống cắt. Do đó, trong trường hợp cụ thể này ta có thể tính toán mô men chảy của tiết diện dầm BTCT bằng cách bỏ qua ảnh hưởng của các U-wrap, và công thức dự đoán khả năng chịu mô men uốn của dầm BTCT bị cháy gia cường tấm CFRP có sử dụng U-wrap sẽ được tính toán giống như công thức (6.70), công thức này được xây dựng theo mô hình của mục 6.5.

Mô men chảy được dự đoán bởi mô hình lý thuyết và các thử nghiệm đã được trình bày và so sánh trong Bảng 6.4. Bởi vì mô hình không tính đến tác động của U-wrap; do đó, các giá trị dự đoán của mô men chảy đối với bốn trường hợp gia cường với số lượng U-wrap khác nhau là như nhau. Đây là một hạn chế của mô hình vì rất khó để tính đến ảnh hưởng của U-wrap. Tuy nhiên, thật thú vị khi kiểm tra chặt chẽ các giá trị thử nghiệm, chúng thay đổi từ 25,5 kNm đến 26,5 kNm đối với nhóm B30-U và từ 21,2 kNm đến 23,1 kNm đối với nhóm B60-U. Hiệu số của các giá trị này của dầm nhóm B30 chỉ là $(26,5-25,5)/25,5 \times 100\% = 3,9\%$. Tương tự, độ chênh của dầm nhóm B60 là khoảng $(23,1-21,2)/21,2 \times 100\% = 9\%$. Những điều này cho thấy ảnh hưởng không đáng kể của U-wrap đối với khả năng chịu tải của các dầm bị cháy được gia cường FRP.

Bảng 6.4: So sánh mô men chảy của dầm BTCT bị cháy gia cường tấm CFRP có sử dụng U-wrap.

Dầm	Nhóm	x_{500} (mm)	a (mm)	Mô men (kNm)		So sánh (%)
				Phân tích	Thí nghiệm	
B0	B0	0	6.5	22.1	22.2	-0.5
B30		12.5	0.0	20.8	21.4	-2.8
B30-U1		12.5	14.2	26.5	25.5	3.9
B30-U2	B30	12.5	14.2	26.5	26.5	0.0
B30-U3		12.5	14.2	26.5	26.4	0.4
B30-U4		12.5	14.2	26.5	26.4	0.4
B60		23.4	0.0	19.3	17.4	10.9

B60-U1		23.4	15.7	24.6	21.2	16.0
B60-U2	B60	23.4	15.7	24.6	21.4	15.0
B60-U3		23.4	15.7	24.6	21.7	13.4
B60-U4		23.4	15.7	24.6	23.1	6.5

CHƯƠNG 7 KẾT LUẬN

Luận án đã sử dụng cả phương pháp thực nghiệm và phương pháp lý thuyết để nghiên cứu đánh giá và gia cường FRP dầm BTCT bị cháy. Từ 3 giai đoạn nghiên cứu, các kết luận được rút ra như sau:

Giai đoạn 1 nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết về ứng xử chịu uốn của dầm BTCT bị cháy. Các dầm đối chứng phá hoại uốn với việc nén vỡ BT vùng chịu nén. Các dầm bị cháy 30 và 45 phút cũng có dạng phá hoại uốn, nhưng vết nứt mở rộng trên diện tích lớn hơn. Các dầm bị cháy 60 và 75 phút cũng trải qua quá trình tương tự cho đến điểm chảy, nhưng lượng BT bị nén vỡ nhiều hơn, dẫn đến dạng phá hoại uốn-cắt. Thời gian cháy tăng, đường cong tải trọng–độ võng sẽ có xu hướng chuyển dịch xuống dưới và qua phải, làm suy giảm các đặc tính cơ học của dầm BTCT. Lửa làm giảm đáng kể độ cứng chảy từ 36,5%–57,8%, trong khi nó làm giảm tải trọng chảy và tải tới hạn từ 4,2%–16,2%. Lửa làm tăng đáng kể độ võng chảy từ 36,5%–101,7%. Độ dẻo của các dầm bị cháy giảm đến 61,1%, được phân loại là độ dẻo vừa theo ASCE/SEI 41-17 [93]. Những thay đổi đáng kể về độ cứng chảy, độ võng chảy, và độ dẻo cho thấy những thông số này cần được chú ý trong việc đánh giá dầm BTCT bị cháy. Một mô hình tính toán đơn giản được xây dựng và đề xuất. Mô hình này sử dụng kết hợp giữa 1) mô hình phân bố nhiệt độ và đường đẳng nhiệt 500°C và 2) thời gian cháy (đại lượng khả thi thu được từ các vụ cháy thực tế). Mô hình này đơn giản, thực tế và có độ chính xác phù hợp sẽ là công cụ hữu ích trong việc xác định khả năng chịu tải của dầm BTCT bị cháy.

Giai đoạn 2 nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết về gia cường NSM GFRP cho dầm BTCT bị cháy. Dầm đối chứng và dầm bị cháy không gia cường bị phá hoại do cốt thép chịu kéo bị chảy. Trong khi đó, các dầm bị cháy gia cường GFRP bị phá hoại do bong tách lớp BT xung quanh các thanh GFRP. Quá trình dẫn đến

phá hoại của dầm bị cháy gia cường NSM GFRP đã bị thay đổi đáng kể do sự phát triển của các vết nứt nghiêng. Sự kéo đứt GFRP không xảy ra trong các thí nghiệm. Sự bong tách lớp BT và các vết nứt nghiêng rõ ràng hơn trên các dầm bị cháy 60 phút. Điều này được giải thích do thời gian cháy lâu hơn nên cường độ BT giảm nhiều hơn. Khả năng chịu tải tới hạn và tải cháy của dầm BTCT bị cháy giảm nhẹ. Trong khi đó, chúng phục hồi hoàn toàn hoặc tăng đáng kể nhờ gia cường NSM GFRP. So với dầm đối chứng, việc gia cường NSM GFRP tăng khả năng chịu tải lên đến 39%. Thời gian cháy càng lâu thì hiệu quả của việc gia cường NSM GFRP càng giảm. Lửa làm tăng đáng kể độ võng chảy và giảm nhẹ độ võng tới hạn của các dầm bị cháy. Việc gia cường NSM GFRP làm tăng không đáng kể độ võng chảy. Trong khi đó, nó làm giảm đáng kể độ võng tới hạn. Do đó, từ độ dẻo cao của dầm đối chứng giảm đáng kể xuống độ dẻo vừa và thấp (theo ASCE/SEI 41-17 [93]) của dầm bị cháy tương ứng với dầm BTCT bị cháy không có và có gia cường GFRP. Lửa làm giảm đáng kể độ cứng chảy 45,9%–55,3%. Việc gia cường NSM GFRP chỉ cải thiện một phần độ cứng chảy và không hoàn toàn phục hồi về độ cứng của dầm đối chứng. Một mô hình phân tích để ước tính khả năng chịu mô men uốn của dầm BTCT bị cháy gia cường NSM GFRP được đề xuất bằng cách sử dụng những thông tin hạn chế có thể thu thập được từ các vụ cháy thực, ví dụ như thời gian cháy. Mô hình đề xuất có độ chính xác phù hợp so với kết quả thí nghiệm. Vì thế, mô hình này có thể là một công cụ hữu ích cho các kỹ sư làm việc trong lĩnh vực gia cường FRP cho kết cấu BTCT bị cháy.

Giai đoạn 3 nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết về gia cường EB và NSM CFRP cho dầm BTCT bị cháy. Các dầm BTCT bị cháy gia cường CFRP bị phá hoại ở dạng bong tách lớp BT, trong khi đó CFRP không bị kéo đứt. Sự bong tách lớp BT của các dầm là tương tự vì lửa làm suy giảm cường độ của BT. Việc gia cường CFRP đã thay đổi đáng kể ứng xử của dầm BTCT bị cháy. Các đường cong tải trọng–độ võng là tuyến tính cho đến điểm chảy, tiếp theo là một đoạn ngắn phi tuyến, và cuối cùng là phá hoại. Độ dẻo xấp xỉ bằng 1, được phân loại là độ dẻo thấp (theo ASCE/SEI 41-17 [93]). Sự phá hoại dầm bị chi phối bởi

dạng phá hoại bong tách lớp BT xảy ra sau khi thép chịu kéo đạt giới hạn chảy. Độ dẻo thấp được coi là một hạn chế của kỹ thuật gia cường này và cần được cải thiện. Hiệu quả gia cường bằng kỹ thuật EB và NSM CFRP là tương tự nhau. Điều này là do (1) chiều cao làm việc của CFRP trong hai phương pháp gia cường NSM và EB là xấp xỉ nhau, (2) sự phá hoại là do bong tách lớp BT chứ không phải do bong tách lớp FRP, và (3) lớp BT bảo vệ đã bị suy giảm tính chất cơ học do bị cháy. Hiệu quả của việc gia cường CFRP giảm khi thời gian cháy tăng lên. Việc gia cường CFRP làm tăng đáng kể tải trọng chảy lên 27,5%–40,9% đối với dầm BTCT cháy sau 30–60 phút và khôi phục hoàn toàn khả năng chịu tải cho dầm BTCT bị cháy 75 phút. Việc gia cường CFRP làm tăng độ võng chảy của dầm BTCT bị cháy lên gấp 2,0–2,3 lần. Việc gia cường CFRP làm tăng đáng kể khả năng chịu tải tới hạn, mức độ tăng phụ thuộc vào cấu hình gia cường CFRP, và phụ thuộc vào thời gian cháy. Mô hình tính khả năng chịu mô men uốn của dầm BTCT bị cháy gia cường CFRP được đề xuất. Thời gian cháy (đại lượng thu được trong trường hợp cháy thực) được sử dụng như là một tham số chính của mô hình tính này. Đặc điểm này làm cho mô hình trở nên hữu ích cho ứng dụng thực tế. Mô hình có độ chính xác và an toàn hợp lý nên nó có thể được sử dụng để thiết kế gia cường CFRP cho dầm BTCT bị cháy.

Giai đoạn 4 nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết về gia cường EB CFRP có sử dụng U-wrap cho dầm BTCT bị cháy. Hỏa hoạn đã chuyển dạng phá hoại uốn của dầm đối chứng thành dạng phá hoại uốn-cắt của dầm BTCT bị cháy. Thời gian cháy càng dài thì sự thay đổi này càng rõ rệt hơn. Dầm BTCT bị cháy được gia cường CFRP có dạng phá hoại bong tách lớp BT giữa FRP U-wrap và BT, trong khi cả FRP chịu uốn và FRP chịu cắt của (U-wrap) không xảy ra bất kỳ sự kéo đứt FRP nào. U-wrap đã ngăn chặn thành công dạng phá hoại cắt và trì hoãn dạng phá hoại bong tách lớp BT. Sự bong tách lớp BT bắt đầu ở một U-wrap và dần dần lan sang U-wrap liền kề. Sự chậm trễ của việc bong tách lớp BT rõ rệt hơn khi số lượng U-wrap tăng lên. Những đặc điểm về dạng phá hoại này có thể là do sự giảm đáng kể cường độ của lớp BT bên ngoài của dầm do bị cháy. Lựa làm dịch chuyển các đường cong tải trọng–độ võng xuống dưới và qua phải,

trong khi việc gia cường FRP làm dịch chuyển các đường cong này lên trên và qua trái. So với dầm đối chứng và dầm bị cháy, dầm BTCT bị cháy được gia cường CFRP có giai đoạn đàn hồi dài hơn, nhưng vùng thềm dẻo ngắn hơn rất nhiều. Giai đoạn đàn hồi dài hơn được giải thích là do CFRP làm chậm quá trình đạt giới hạn chảy của cốt thép bằng cách chia sẻ lực kéo; trong khi, vùng thềm dẻo ngắn hơn nhiều được giải thích là do dạng phá hoại bong tách lớp BT. Cháy lâu hơn dẫn đến bong tách lớp BT sớm hơn do cường độ BT giảm nhiều hơn. Việc gia cường CFRP làm tăng đáng kể độ võng chảy 58,2–97,3% nhưng giảm độ võng tới hạn 43,0–55,5% so với dầm đối chứng. Do đó, độ dẻo của dầm BTCT bị cháy được gia cường CFRP giảm 69,7–74,7% so với độ dẻo của dầm đối chứng và độ dẻo gần bằng 1, được phân loại là độ dẻo thấp và gần với ứng xử giòn. Trạng thái tới hạn (giới hạn bền) của các dầm được thử nghiệm bị chi phối bởi dạng phá hoại bong tách lớp BT xảy ra ngay sau khi cốt thép chịu kéo đạt giới hạn chảy. Dạng phá hoại bong tách lớp BT và sự bong tách càng nhiều của nó đã gây ra sự giảm mạnh về tải trọng. Việc gia cường CFRP có thể phục hồi khả năng chịu tải đã bị mất đi sau khi bị cháy 60 phút và nó đã thành công trong việc tăng khả năng chịu tải của các dầm bị cháy 30 phút lên tới 23,1% so với khả năng chịu tải của dầm đối chứng. Hỏa hoạn làm giảm đáng kể độ cứng của dầm bị cháy 46,4–49,2% so với dầm đối chứng. Việc gia cường CFRP không phục hồi hoàn toàn độ cứng của dầm bị cháy 30 phút, ví dụ: thấp hơn ít nhất 21,9% so với độ cứng của dầm đối chứng, trong khi nó đã phục hồi được một ít độ cứng bị mất của dầm bị cháy trong 60 phút. Thời gian cháy ảnh hưởng quan trọng đến các tính chất cơ học của dầm và hiệu quả của việc gia cường FRP, thông qua việc giảm cường độ của lớp BT bên ngoài do tiếp xúc với lửa. Có thể dự đoán khả năng chịu tải của dầm bị cháy được gia cường CFRP bằng cách sử dụng mô hình phân tích được phát triển chỉ dựa trên thời gian cháy và mô hình phân bố nhiệt độ trong BT. Trong các vụ cháy thực, việc thu thập sự phân bố nhiệt độ trong BT là điều không khả thi, tuy nhiên thời gian cháy là thông số có thể dễ dàng thu thập được, chính điều này đã làm cho mô hình trở nên hữu ích để áp dụng vào thực tế. Mô hình này đơn giản và độ chính xác hợp lý có thể sẽ là một công cụ hữu ích cho các kỹ sư.