

# TÍNH KHẢ DỤNG CỦA CÁC QUY TRÌNH TÍNH TOÁN SỨC KHÁNG UỐN CHO DẦM BỊ ĂN MÒN GIA CƯỜNG KHÁNG UỐN BẰNG TẤM BFRP

Đỗ Đại Thắng<sup>a</sup>, Chu Văn Tư<sup>b</sup>, Đinh Văn Thuật<sup>c</sup>, Nguyễn Minh Long<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup>Trung tâm Giáo dục Quốc phòng và An ninh, Đại học Quốc gia TP.Hồ Chí Minh,  
268 Lý Thường Kiệt, phường 14, quận 10, Tp. Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>b</sup>Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia TP.Hồ Chí Minh,  
268 Lý Thường Kiệt, phường 14, quận 10, Tp. Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>c</sup>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 19/5/2023, Sửa xong 08/8/2023, Chấp nhận đăng 14/8/2023

## Tóm tắt

Bài báo kiểm chứng khả năng áp dụng quy trình tính toán khả năng kháng uốn của dầm bê tông cốt thép (BTCT) được gia cường bằng tấm FRP trong các hướng dẫn thiết kế CNR-DT 200 R1/2013 và ACI 440.2R-17 cho trường hợp dầm BTCT có cốt thép chịu kéo bị ăn mòn được gia cường bằng tấm BFRP. Kết quả kiểm chứng cho thấy các quy trình tính nêu trên cho kết quả an toàn và có độ phân tán thấp. Mức độ an toàn của các hướng dẫn này đều tăng theo mức độ ăn mòn của cốt thép và số lớp BFRP gia cường. Thực tế này cho thấy các hướng dẫn thiết kế nêu trên có thể áp dụng được cho trường hợp dầm có cốt thép bị ăn mòn được gia cường bằng tấm BFRP. Một hiệu chỉnh thực nghiệm nhằm xét đến ảnh hưởng của sự ăn mòn cốt thép đến biến dạng hữu hiệu của tấm BFRP cũng được bổ sung vào quy trình dự đoán khả năng kháng uốn của dầm BTCT bị ăn mòn được gia cường bằng tấm BFRP. Kết quả kiểm chứng cho thấy khả năng kháng uốn của dầm BTCT bị ăn mòn được gia cường bằng tấm BFRP có thể dự đoán được theo quy trình hiệu chỉnh này với kết quả gần với thực nghiệm hơn so với các hướng dẫn thiết kế đã nêu.

*Từ khóa:* quy trình tính toán; kiểm chứng; dầm BTCT bị ăn mòn; gia cường kháng uốn; tấm BFRP.

## APPLICABILITY OF CALCULATION PROCEDURE OF FLEXURAL RESISTANCE FOR CORRODED REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED BY BFRP SHEETS

### Abstract

This paper presents a verification study on the applicability of the procedures for calculating the flexural resistance of reinforced concrete (RC) beams strengthened by FRP sheets in the current design standards and guidelines such as CNR-DT 200 R1/2013 and ACI 440.2R-17 for the case of RC beams with varying corrosion levels of reinforcement strengthened by BFRP sheets. The verification results show that the flexural resistance prediction procedure follows the guidelines CNR-DT 200 R1/2013 and ACI 440.2R-17 give safe results, close to experimental results with low dispersion. The verification results also show that the safety level of most of these guidelines increases with the corrosion levels of reinforcement and the number of BFRP layers. This fact shows that the procedures for calculating the flexural resistance of RC beams strengthened by FRP sheets in the design guidelines mentioned above are completely applicable to the case of corroded RC beams strengthened by BFRP sheets.

*Keywords:* calculation procedure of flexural resistance; verification; corroded reinforced concrete beam; flexural strengthening; BFRP sheets.

[https://doi.org/10.31814/stce.huice2023-17\(4V\)-03](https://doi.org/10.31814/stce.huice2023-17(4V)-03) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [nguyenminhlong@hcmut.edu.vn](mailto:nguyenminhlong@hcmut.edu.vn) (Long, N. M.)

## 1. Đặt vấn đề

Sự ăn mòn của cốt thép chịu lực trong kết cấu hay cấu kiện bê tông cốt thép (BTCT) bị ăn mòn là vấn đề nghiêm trọng và làm giảm mạnh tuổi thọ của công trình. Cốt thép chịu lực bị ăn mòn làm giảm khả năng chịu lực, tạo nên các vết nứt và giảm độ cứng của cấu kiện BTCT [1–3]. Để cải tạo và sửa chữa các kết cấu BTCT bị ăn mòn, một số giải pháp truyền thống thường được dùng trong thực tiễn như loại bỏ lớp bê tông bị ảnh hưởng bởi sự ăn mòn, đánh sạch lớp gỉ trên cốt thép bị ăn mòn, sau đó phủ lớp hóa chất chống gỉ và hoàn thiện lại tiết diện bằng vật liệu có tính chống thấm cao hoặc lớp bê tông mới [4]. Bên cạnh các giải pháp vừa nêu, hiện nay giải pháp dùng vật liệu sợi polyme gia cường (FRP) đã cho thấy hiệu quả cao do vật liệu FRP có các ưu điểm như không bị ăn mòn, có cường độ chịu kéo cao, trọng lượng bản thân nhẹ, không nhiễm từ và nhiễm điện, dễ thi công và lắp đặt, và không ảnh hưởng đến mỹ quan kiến trúc của công trình [5–11].

Việc sử dụng vật liệu CFRP gia cường kháng uốn cho dầm BTCT bị ăn mòn ở các mức độ khác nhau đã được các nghiên cứu thực hiện theo nhiều phương pháp thi công khác nhau như dán ngoài (EBR) [12–19] hoặc xẻ rãnh (NSM) [20–22]. Một số ít nghiên cứu đánh giá và so sánh hiệu quả gia cường của vật liệu CFRP theo cả hai phương pháp EBR và NSM cho dầm BTCT bị ăn mòn như của [23, 24]. Gần đây, ElGhazy và cs. [25] tiến hành so sánh hiệu quả gia cường dùng vật liệu CFRP và vật liệu mới P-FRCM theo phương pháp EBR. Tất cả các nghiên cứu vừa nêu đều chỉ ra hiệu quả cao của kỹ thuật gia cường dùng vật liệu CFRP trong việc giảm tốc độ ăn mòn của cốt thép, kiểm soát vết nứt, cải thiện khả năng chịu lực của dầm và mức độ cải thiện này có xu hướng phụ thuộc vào mức độ ăn mòn của cốt thép. So với tấm CFRP, tấm BFRP, mặc dù có cường độ và mô-đun đàn hồi thấp hơn, nhưng chúng lại có khả năng biến dạng tốt hơn và có giá thành thấp hơn đáng kể. Trong một số trường hợp, khi vấn đề gia cường không đòi hỏi sự gia tăng đáng kể về khả năng chịu lực hay khi chỉ dừng lại ở yêu cầu phục hồi khả năng chịu lực ban đầu và đòi hỏi khả năng biến dạng lớn của cấu kiện, tấm BFRP hoàn toàn có thể là giải pháp mang tính kinh tế hơn. Một số ít nghiên cứu gần đây cho thấy việc sử dụng tấm BFRP giúp cải thiện đáng kể khả năng kháng uốn cũng như độ dẻo của cấu kiện BTCT không bị ăn mòn như của [26–29]. Tuy nhiên, cho đến nay vẫn chưa có một nghiên cứu nào khảo sát hiệu quả của tấm BFRP trong việc gia cường kháng uốn cho dầm BTCT có cốt dọc chịu kéo đã bị ăn mòn ở bất kỳ mức độ nào ngoại trừ nghiên cứu của Do-Dai và cs. [30].

Các tiêu chuẩn hay hướng dẫn thiết kế gia cường kết cấu BTCT dùng vật liệu FRP hiện hành như CNR-DT 200 R1/2013 [31] và ACI 440.2R-17 [32] đều trình bày đầy đủ và tường minh các điều khoản và quy trình tính toán khả năng kháng uốn; tuy vậy, chúng đều được xây dựng trên các kết quả thí nghiệm chủ yếu trên các dầm BTCT chưa bị ăn mòn. Trong khi cốt thép bị ăn mòn có thể làm thay đổi sự phân bố ứng suất trong dầm do sự suy giảm bám dính giữa cốt thép chịu kéo và bê tông, và vì vậy nó có thể tác động đến sự làm việc của tấm FRP gia cường kháng uốn vốn được liên kết chặt với mặt dầm. Do đó, việc kiểm chứng phạm vi ứng dụng và mức độ chính xác của một số tiêu chuẩn thiết kế gia cường bằng vật liệu FRP hiện hành cho trường hợp dầm BTCT có cốt dọc chịu kéo đã bị ăn mòn ở các mức độ khác nhau, đặc biệt là với loại tấm mới và tiềm năng như BFRP thực sự là cần thiết để làm cơ sở cho việc ứng dụng an toàn và kinh tế trong thực tế.

Bài báo này trình bày một nghiên cứu kiểm chứng về khả năng áp dụng của các quy trình tính toán khả năng kháng uốn của dầm BTCT được gia cường bằng tấm FRP trong các tiêu chuẩn và hướng dẫn thiết kế hiện hành như CNR-DT 200 R1/2013 [31] và ACI 440.2R-17 [32] cho trường hợp dầm BTCT có cốt thép chịu kéo bị ăn mòn với các mức độ khác nhau được gia cường bằng tấm BFRP dựa trên kết quả thực nghiệm đã có của chính các tác giả.

## 2. Giới thiệu sơ lược về nghiên cứu thực nghiệm của Do-Dai và cs. [30]

### 2.1. Vật liệu

Các mẫu thí nghiệm sử dụng bê tông với cấp phối được trình bày ở Bảng 1. Các thông số cơ học của bê tông, tấm BFRP (Hình 1) và cốt thép được tổng hợp ở Bảng 2.

Bảng 1. Cấp phối bê tông cho mẫu thí nghiệm

Thành phần	Đơn vị	Số lượng
Xi măng PC40	kg/m <sup>3</sup>	435
Đá 1×2 (22 mm)	kg/m <sup>3</sup>	931
Cát sông (0÷4 mm)	kg/m <sup>3</sup>	516
Cát nghiền (0÷2 mm)	kg/m <sup>3</sup>	351
Phụ gia dẻo	l/m <sup>3</sup>	5,4

Bảng 2. Tính chất cơ học của bê tông, tấm gia cường BFRP và cốt thép

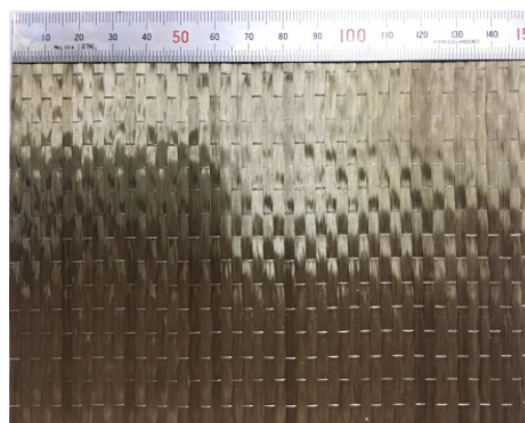
Bê tông		BFRP <sup>a</sup>			Cốt thép dọc		Cốt thép đai	
$f_{c,cube}$ (MPa)	$f_{sp,cube}$ (MPa)	$f_{uf}$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	$\varepsilon_{uf}$ (%)	$f_u$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$f_{uw}$ (MPa)	$f_{yw}$ (MPa)
47,1	5,5	1874	80	2,2	545	424	463	342

Ghi chú: <sup>a</sup> là giá trị được cung cấp bởi nhà sản xuất.

Trong Bảng 2,  $f_{c,cube}$ ,  $f_{sp,cube}$  lần lượt là cường độ chịu nén và kéo chế của bê tông mẫu lập phương, MPa;  $f_{uf}$  là cường độ kéo đứt của tấm sợi BFRP, MPa;  $E_f$  là mô đun đàn hồi của tấm sợi BFRP, MPa;  $\varepsilon_{uf}$  là biến dạng kéo đứt của tấm sợi BFRP, %;  $f_y$ ,  $f_u$  lần lượt là giới hạn chảy và giới hạn bền của cốt thép dọc, MPa;  $f_{uw}$ ,  $f_{yw}$  lần lượt là giới hạn chảy và giới hạn bền của cốt thép đai, MPa.

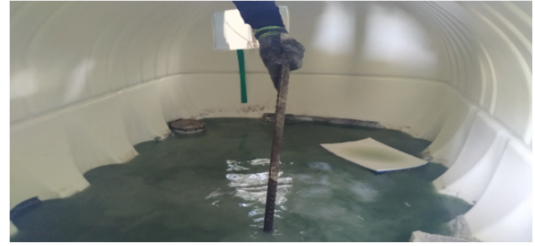
### 2.2. Quá trình tạo ăn mòn cho cốt thép

Cốt thép trong các mẫu đầm trong nghiên cứu này được tạo ăn mòn trước và không làm sạch gỉ ăn mòn nhằm mô phỏng sự giảm bám dính của cốt thép với bê tông tương tự như nghiên cứu [33, 34]. Trước khi tiến hành tạo ăn mòn trên số lượng lớn thanh cốt thép dùng để đúc các mẫu đầm, các thử nghiệm ăn mòn trên các mẫu thép nhỏ được thực hiện. Trước tiên, các mẫu thép nhỏ được ngâm trong dung dịch NaCl (với nồng độ 30% - gấp 10 lần độ mặn trung bình của nước biển) được gia nhiệt với nhiệt độ 70°C để đẩy nhanh tốc độ ăn mòn; tuy nhiên, kết quả ăn mòn của cốt thép là không đáng kể sau hơn một tháng. Sau đó, nghiên cứu này đã dùng dung dịch H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> thay cho NaCl nhằm đẩy nhanh tốc độ ăn mòn của cốt thép. Dung dịch H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> với các nồng độ 98%, 60%, 45% và 30% được thử nghiệm để tìm ra được nồng độ tạo ăn mòn cốt thép nhanh nhất. Kết quả cho thấy dung dịch H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> với nồng độ 45% đã tạo được mức độ ăn mòn cao nhất và tốc độ ăn mòn nhanh nhất; do vậy, dung dịch H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> với nồng độ 45% được dùng để tạo ăn mòn cho các thanh cốt thép của các mẫu đầm (Hình 2). Mức độ ăn mòn của cốt thép được kiểm



Hình 1. Vải sợi BFRP sử dụng trong gia cường

tra hàng tuần bằng cách lấy đoạn mẫu thép dài 200 mm có cùng đường kính được ngâm cùng với các thanh cốt thép của các mẫu dầm ra khỏi bồn ngâm; chúng được làm vệ sinh sạch và cân lại bằng cân tiểu li. Dựa trên khối lượng hao tổn do ăn mòn, mức độ ăn mòn của cốt thép được xác định (tính trung bình trên đoạn mẫu thép dài 200 mm). Các thanh cốt thép bị ăn mòn ở mức 15% sau 20 ngày được ngâm và bị ăn mòn ở mức 30% sau 55 ngày theo như thiết kế. Một số hình ảnh về cốt thép chịu lực bị ăn mòn được vớt ra khỏi bồn ngâm để kiểm tra được thể hiện trên Hình 3.



Hình 2. Hồ ngâm tạo ăn mòn cho cốt thép



(a) Ăn mòn 15%

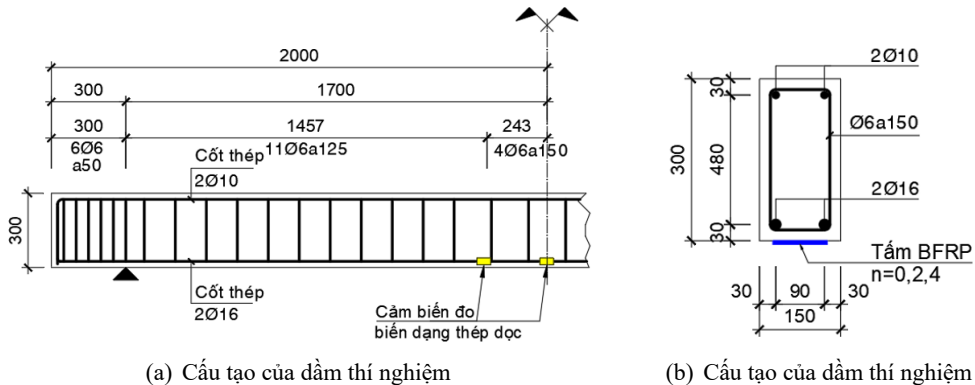


(b) Ăn mòn 30%

Hình 3. Cốt thép dọc bị ăn mòn

### 2.3. Dầm thí nghiệm

Chương trình thực nghiệm dựa trên 9 mẫu dầm BTCT có kích thước lớn với kích thước hình học  $150 \times 300 \times 4000$  mm và nhịp thử tải bằng 3400 mm (Hình 4), được thiết kế theo tỉ lệ 1:1,5 so với dầm thực. Các dầm được chia thành ba nhóm 0, 1 và 2 (Bảng 2), tương ứng với ba cấp độ ăn mòn cốt thép dọc khác nhau 0, 15 và 30% (tính theo khối lượng). Mỗi nhóm gồm có ba dầm, trong đó gồm một dầm không được gia cường (dùng làm dầm đối chứng) và hai dầm được gia cường kháng uốn bằng tấm BFRP dán dọc theo đáy dầm có số lớp thay đổi lần lượt là hai và bốn lớp và có sử dụng neo bằng tấm BFRP dạng dải U phân bố đều trong nhịp cắt của dầm để hạn chế sự bong tách sớm của tấm BFRP gia cường kháng uốn. Số lượng lớp tấm BFRP gia cường kháng uốn là 0, 2 và 4 được thiết kế sao cho khai thác được tối đa hiệu quả sử dụng của tấm (tấm bị bong tách và bê tông bị nén vỡ) theo tiêu chuẩn ACI 440.2R-17 [32]. Dầm sử dụng cốt dọc chịu kéo với đường kính 16 mm và cốt dọc cấu tạo



Hình 4. Cấu tạo của dầm thí nghiệm



có đường kính 10 mm. Cốt đai trong dầm sử dụng đường kính 6 mm, bước cốt đai 150 mm trong nhịp uốn và 125 mm trong nhịp cắt. Các dầm có cùng hàm lượng cốt dọc chịu kéo  $\rho_s = 0,89\%$  và cốt đai  $\rho_{sw} = 0,3\%$ . Đây là hàm lượng cốt thép thường được thiết kế trong các cầu kiện dầm trong thực tế. Các thông số kỹ thuật của dầm được thể hiện chi tiết trong Bảng 3 và Hình 4. Quá trình đúc mẫu dầm thí nghiệm được thể hiện từ Hình 5 đến Hình 7.

Bảng 3. Các thông số kỹ thuật của mẫu dầm thí nghiệm

Nhóm	Tên mẫu	Loại tấm	Kích thước (mm)	$L_s$ (%)	$\rho_s$ (%)	$\rho_{sw}$ (%)	$n_f$	$t_f$ (mm)	$w_f$ (mm)
0	B0-Cont	-	150×300×4000	0	0,89	0,30	0	-	-
	B0-2BB	BFRP					2	0,107	125
	B0-4BB	BFRP					4	0,107	125
1	B1-Cont	-		15	0,89	0,30	0	-	-
	B1-2BB	BFRP					2	0,107	125
	B1-4BB	BFRP					4	0,107	125
2	B2-Cont	-		30	0,89	0,30	0	-	-
	B2-2BB	BFRP					2	0,107	125
	B2-4BB	BFRP					4	0,107	125

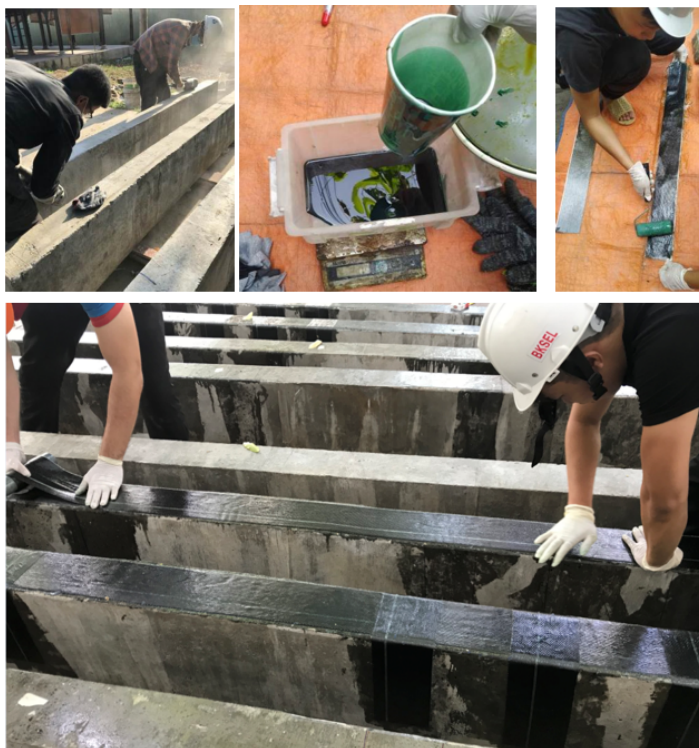
Ghi chú:  $L_s$  là mức độ ăn mòn cốt thép dọc, % (tính theo % khối lượng);  $n_f$  là số lớp tấm BFRP;  $t_f$  là chiều dày tấm BFRP, mm;  $w_f$  là bề rộng dải gia cường, mm;  $\rho_s$  là hàm lượng thép dọc, %;  $\rho_{sw}$  là hàm lượng thép đai, %.



Hình 5. Công tác lồng thép và cốp-pha dầm



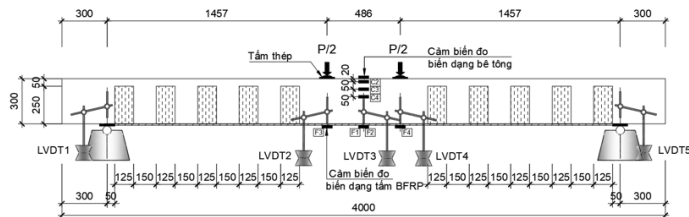
Hình 6. Công tác đổ bê tông các dầm



Hình 7. Công tác gia cường dầm bằng tấm BFRP

#### 2.4. Quy trình thí nghiệm và bố trí thiết bị đo

Dầm được thí nghiệm theo sơ đồ dầm đơn giản chịu uốn bốn điểm thể hiện ở Hình 8. Vị trí điểm đặt lực cách gối tựa gần nhất một khoảng 1457 mm. Biến dạng của tấm BFRP kháng uốn dọc theo nhịp dầm được xác định dựa trên bốn cảm biến điện trở (SG) dán trên bề mặt của tấm tại các vị trí giữa nhịp (hai cảm biến) và vị trí đặt lực (hai cảm biến). Biến dạng của cốt dọc trong thớ chịu kéo được xác định qua hai cảm biến dán tại vị trí giữa nhịp và hai cảm biến dán tại hai vị trí đặt lực. Biến dạng của bê tông được đo trên bốn cảm biến dán ở thớ chịu nén của dầm ở vị trí giữa nhịp dọc theo chiều cao dầm. Chuyển vị dầm được xác định dựa trên năm chuyển vị kế điện tử (LVDTs) bố trí tại giữa nhịp,



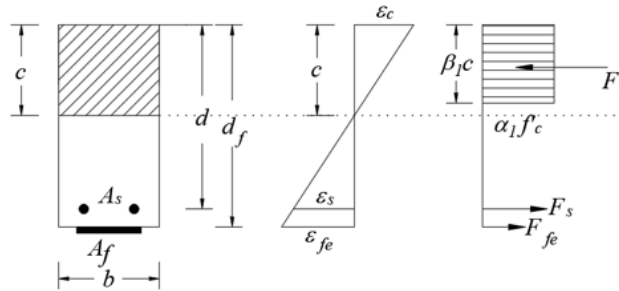
Hình 8. Sơ đồ thí nghiệm và bố trí thiết bị đo cho dầm

tại hai vị trí đặt lực và tại hai gối tựa. Các dầm được gia tải với cấp tải 2 kN trong giai đoạn trước khi vết nứt uốn xuất hiện, sau đó giá trị mỗi cấp tải được tăng lên 5-10 kN. Sau mỗi cấp tải, tải trọng được giữ trong thời gian khoảng ba phút để tiến hành đo chuyển vị, biến dạng của bê tông, thép dọc, tấm BFRP và bề rộng khe nứt. Tất cả các giá trị lực, chuyển vị và biến dạng đều được đo tự động thông qua thiết bị thu nhận số liệu. Sơ đồ và vị trí lắp đặt thiết bị đo được thể hiện trên Hình 5 và Hình 8.

### 3. Quy trình xác định khả năng kháng uốn của dầm BTCT được gia cường bằng tấm FRP theo một số hướng dẫn thiết kế gia cường hiện hành

#### 3.1. Theo hướng dẫn thiết kế của ACI 440.2R-17 [32]

Nguyên lý tính toán gia cường cấu kiện chịu uốn sử dụng tấm FRP dán ngoài trình bày trong ACI 440.2R-17 [32] về cơ bản dựa trên lý thuyết về trạng thái giới hạn, tương tự như cho trường hợp thiết kế kết cấu truyền thống (Hình 9). ACI 440.2R-17 [32] sử dụng các điều khoản tính toán hiện đang sử dụng cho kết cấu BTCT, trong đó có xét các giả thiết sau: (1) bê tông chịu nén và không tham gia chịu kéo; (2) sự phân bố của ứng suất nén trong bê tông vùng nén được quy thành phân bố đều theo dạng khối chữ nhật (Hình 9); (3) biến dạng nén tối đa trong bê tông được lấy bằng 0,003; (4) biến dạng của cốt thép và bê tông có tỉ lệ tuyến tính với khoảng cách từ trục trung hòa (giả thiết Bernoulli); (5) tấm FRP và bê tông được coi bám dính tuyệt đối với hệ số chiết giảm cường độ  $\psi_f = 0,85$  để kể đến trong tính toán do thực tế có tồn tại biến dạng trượt tương đối giữa tấm FRP và bê tông bởi sự biến dạng của lớp keo dính; (6) biến dạng trượt trong lớp keo được bỏ qua do lớp keo rất mỏng với sự thay đổi độ dày nhỏ; và (7) tấm FRP ứng xử đàn hồi tuyến tính cho đến khi phá hoại.



Hình 9. Sơ đồ phân bố ứng suất và biến dạng của tiết diện dầm được gia cường bằng tấm FRP chịu uốn theo ACI 440.2R-17 [32]

Khả năng kháng uốn danh định của tiết diện được gia cường bằng tấm FRP dán ngoài được xác định như sau:

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (1)$$

trong đó  $A_s$  và  $A_f$  lần lượt là diện tích mặt cắt ngang của thép dọc chịu kéo và của tấm FRP chịu kéo,  $\text{mm}^2$ ;  $d$  và  $d_f$  lần lượt là khoảng cách từ thớ chịu nén lớn nhất của mặt cắt đến trọng tâm của cốt thép chịu kéo và trọng tâm của tấm FRP chịu kéo, mm;  $c$  là chiều cao vùng bê tông chịu nén, mm;  $\beta_1$  là hệ số ứng suất khối bê tông xác định theo ACI 318-19 [35];  $\psi_f$  là hệ số chiết giảm cho phần đóng góp của tấm FRP (được lấy bằng 0,85).

Ứng suất trong thép dọc chịu kéo và ứng suất hữu hiệu của tấm FRP chịu kéo, được xác định như sau:

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (2)$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (3)$$

với  $E_s$  và  $E_f$  lần lượt là mô-đun đàn hồi chịu kéo của cốt thép và tấm FRP, MPa;  $f_y$  là giới hạn chảy của cốt thép, MPa;  $\varepsilon_s$  và  $\varepsilon_{fe}$  ( $\varepsilon_s \leq \varepsilon_{fe}$ ) là biến dạng của cốt thép dọc chịu kéo và biến dạng hữu hiệu của tấm FRP tại trạng thái giới hạn bền, được xác định dựa trên điều kiện tương thích về biến dạng. Biến dạng bong tách của tấm FRP dán ngoài,  $\varepsilon_{fd}$ , được xác định như sau:

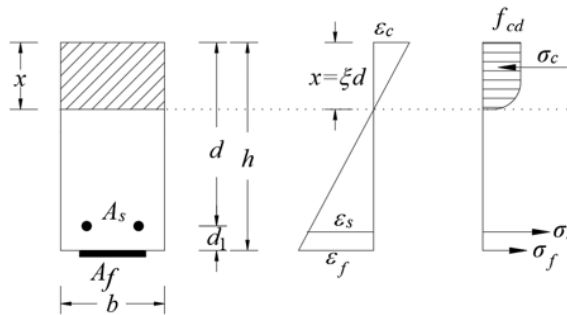
$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{n_f E_f t_f}} \leq 0,9 \varepsilon_{fu} = 0,9 C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (4)$$

với  $n_f$  là số lớp FRP gia cường kháng uốn;  $t_f$  là chiều dày mỗi lớp tấm FRP, mm;  $\varepsilon_{fu}$  là biến dạng chịu kéo tối đa của tấm FRP;  $\varepsilon_{fu}^*$  là biến dạng kéo tối đa của tấm FRP được cung cấp bởi nhà sản xuất; và  $f'_c$  là cường độ chịu nén của bê tông mẫu lăng trụ, MPa.  $C_E$  là hệ số ảnh hưởng môi trường (được lấy bằng 1).

Phương pháp tính toán được dựa trên quan hệ tương thích biến dạng của các thành phần tham gia chịu lực (bê tông, cốt thép và tấm FRP), phương trình cân bằng lực ứng với trạng thái giới hạn bền và giả định về kiểu phá hoại. Quy trình tính toán thử - sai được sử dụng. Theo đó, chiều cao vùng bê tông chịu nén  $c$  được giả định, từ đó biến dạng và ứng suất hữu hiệu của tấm FRP và cốt thép tương ứng được xác định. Sau đó, phương trình cân bằng lực được thiết lập lại và tính lại chiều cao vùng nén của bê tông  $c$ . Giá trị  $c$  giả định và tính toán được kiểm tra lại; nếu hai giá trị  $c$  này có sai khác trong khoảng chấp nhận được thì chiều cao vùng nén  $c$  được xác định, nếu không thì phải lặp lại quá trình tính toán với các giá trị  $c$  giả định khác nhau cho đến khi thỏa mãn phương trình cân bằng lực. Khi đã xác định được chiều cao vùng nén  $c$ , kiểu phá hoại tương ứng, ứng suất hữu hiệu của tấm FRP  $f_{fe}$  và ứng suất tính toán của cốt thép  $f_s$  tại trạng thái giới hạn bền cũng được xác định. Độ bền kháng uốn của dầm là tổng của khả năng kháng uốn của thép chịu kéo và của tấm FRP, được xác định theo công thức (1).

### 3.2. Theo hướng dẫn thiết kế CNR-DT 200 R1/2013 [31]

Nguyên lý tính toán gia cường cấu kiện BTCT chịu uốn sử dụng tấm FRP dán ngoài trình bày trong CNR-DT 200 R1/2013 [31] là tương tự như trường hợp thiết kế kết cấu BTCT truyền thống (Hình 7); trong đó, các công thức tính toán dựa trên các giả thuyết tương tự như của ACI 440.2R-17 [32].



Hình 10. Sơ đồ phân bố ứng suất và biến dạng của tiết diện dầm được gia cường bằng tấm FRP chịu uốn theo CNR-DT 200 R1/2013 [31]

Khả năng kháng uốn danh nghĩa của tiết diện được gia cường bằng tấm FRP dán ngoài được xác định như sau:

$$M_{Rk} = [\psi b x f_{ck} (d - \lambda x) + A_f \sigma_f d_1] \quad (5)$$

trong đó  $A_f$  là diện tích mặt cắt ngang của tấm FRP chịu kéo, mm<sup>2</sup>;  $f_{ck}$  là giá trị cường độ bê tông chịu nén danh nghĩa, MPa;  $d$  là khoảng cách từ thớ chịu nén lớn nhất của mặt cắt đến trọng tâm của



cốt thép chịu kéo, mm;  $b$  là bề rộng của tiết diện, mm;  $x$  là chiều cao vùng bê tông chịu nén, mm;  $\psi$  và  $\lambda$  là các hệ số không thứ nguyên, được lấy bằng 1 và 0,8.

Ứng suất của tấm FRP chịu kéo,  $\sigma_f$ , được xác định như sau:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad (6)$$

trong đó  $E_f$  là mô-đun đàn hồi chịu kéo của tấm FRP, MPa;  $f_y$  là giới hạn chảy của cốt thép, MPa;  $\varepsilon_f$  ( $\varepsilon_f \leq \varepsilon_{fd}$ ) là biến dạng của tấm FRP, được xác định dựa trên điều kiện tương thích về biến dạng.

Biến dạng bong tách của tấm FRP,  $\varepsilon_{fd}$ , được xác định như sau:

$$\varepsilon_{fd} = \frac{k_q}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\frac{2k_b k_{G,2}}{FC} \frac{\sqrt{f_{cm} f_{ctm}}}{n_f t_f E_f}} \leq \eta_a \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (7)$$

với  $n_f$  là số lớp FRP gia cường kháng uốn;  $t_f$  là chiều dày mỗi lớp tấm FRP, mm;  $k_{G,2}$  là hệ số hiệu chỉnh đã được hiệu chuẩn theo các kết quả thực nghiệm (bằng 0,32 mm cho giá trị trung bình của biến dạng tấm FRP tại thời điểm bong tách);  $k_q$  là hệ số xem xét dạng tải trọng (bằng 1,25 cho tải phân bố và 1 cho các tải còn lại);  $FC$  là hệ số tin cậy (bằng 1);  $\gamma_{f,d}$  là hệ số độ tin cậy của vật liệu FRP (bằng 1);  $f_{cm}$  và  $f_{ctm}$  lần lượt là cường độ chịu nén và kéo của bê tông mẫu lăng trụ, MPa;  $\eta_a$  là hệ số ảnh hưởng môi trường (bằng 1);  $\gamma_f$  là các hệ số an toàn riêng phần (bằng 1);  $\varepsilon_{fk}$  là biến dạng kéo tối đa của tấm FRP được cung cấp bởi nhà sản xuất.

Hệ số điều chỉnh hình học,  $k_b$ , được xác định như sau:

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - w_f/b}{1 + w_f/b}} \geq 1 \quad (8)$$

với  $w_f/b \geq 0,25$  (nếu  $w_f/b \leq 0,25$ ,  $k_b = 1$ ).

Phương pháp tính toán theo CNR-DT 200 R1/2013 [31] tương tự như theo ACI 440.2R-17 [32].

### 3.3. Quy trình hiệu chỉnh

Trong nghiên cứu của Do-Dai và cs. [30], biến dạng bong tách của tấm FRP,  $\varepsilon_{fd}$ , được hiệu chỉnh từ công thức tính biến dạng của CNR-DT 200 R1/2013 [31] (công thức (7)) dựa trên kết quả thực nghiệm để xét đến ảnh hưởng của yếu tố ăn mòn cốt thép:

$$\varepsilon_{fd} = \frac{k_q}{\gamma_{f,d}} (1 + 0,49L_s) \sqrt{\frac{2k_b k_{G,2}}{FC} \frac{\sqrt{f_{cm} f_{ctm}}}{n_f t_f E_f}} \leq \varepsilon_{fk} \quad (9)$$

trong đó  $L_s$  là mức độ ăn mòn cốt thép dọc và các đại lượng khác tương tự như trong công thức (7). Công thức hiệu chỉnh này được đưa vào quy trình tính toán như đã trình bày ở Mục 3.2 để tiến hành so sánh và kiểm chứng với kết quả thực nghiệm và quy trình tính toán.

## 4. Kiểm chứng

Để kiểm chứng với kết quả thực nghiệm, kết quả dự đoán theo các hướng dẫn thiết kế đều được tính ở dạng giá trị danh nghĩa với các hệ số an toàn về vật liệu và kết cấu được lấy bằng 1. Kết quả so sánh khả năng kháng uốn dự đoán theo các hướng dẫn và thực nghiệm của dầm BTCT được gia cường bằng tấm BFRP cho trường hợp dầm không bị ăn mòn và dầm có cốt thép dọc bị ăn mòn được tổng hợp trong Bảng 4 và Hình 11. Kết quả này cho thấy quy trình xác định khả năng kháng uốn của

Bảng 4. Khả năng kháng uốn theo dự đoán và thực nghiệm

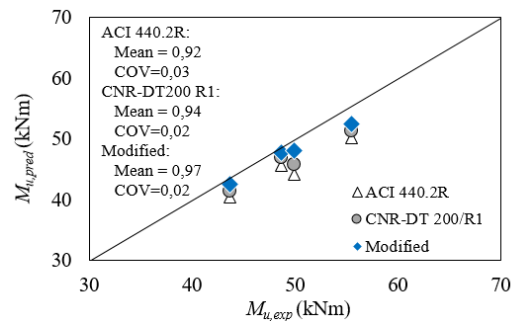
Nhóm dầm	Mẫu dầm	Loại tấm	$L_s$ (%)	$n_f$	$M_{u,exp}$ (kNm)	$M_{u,ACI}$ (kNm)	$M_{u,CNR}$ (kNm)	$M_{u,mod}$ (kNm)	$\frac{M_{u,ACI}}{M_{u,exp}}$	$\frac{M_{u,CNR}}{M_{u,exp}}$	$\frac{M_{u,mod}}{M_{u,exp}}$
0	B0-Cont	-	0	-	47,1	43,6	41,9	41,9			
	B0-2BB	BFRP		2	52,3	50,6	52,4	52,4			
	B0-4BB	BFRP		4	61,7	56,0	56,6	56,6			
1	B1-Cont	-	15	-	42,1	37,3	36,2	36,2			
	B1-2BB	BFRP		2	48,6	45,7	47,0	47,8	0,94	0,97	0,98
	B1-4BB	BFRP		4	55,5	50,2	51,3	52,4	0,91	0,92	0,94
2	B2-Cont	-	30	-	35,9	31,0	30,2	30,2			
	B2-2BB	BFRP		2	43,7	40,3	41,3	42,6	0,92	0,95	0,98
	B2-4BB	BFRP		4	49,9	44,2	45,8	48,0	0,89	0,92	0,96
Mean									0,92	0,94	0,97
COV									0,03	0,02	0,02

Ghi chú:  $L_s$  là mức độ ăn mòn cốt thép dọc, % (tính theo khối lượng);  $n_f$  là số lớp tấm FRP;  $M_{u,exp}$  là khả năng kháng uốn của dầm theo thực nghiệm, kNm;  $M_{u,ACI}$  là mô men kháng uốn dự đoán theo ACI 440.2R-17 [32], kNm;  $M_{u,CNR}$  là mô men kháng uốn dự đoán theo CNR-DT 200 R1/2013 [31], kNm;  $M_{u,mod}$  là mô men kháng uốn dự đoán theo quy trình hiệu chỉnh, kNm.

dầm BTCT có cốt thép chịu kéo bị ăn mòn được gia cường bằng tấm BFRP theo ACI 440.2R-17 [32] và CNR-DT 200 R1/2013 [31] đều dự đoán kết quả gần với thực nghiệm và vẫn đảm bảo được sự an toàn, thể hiện qua giá trị trung bình (Mean) và hệ số biến thiên (COV) của tỉ số giữa khả năng kháng uốn dự đoán theo hướng dẫn và thực nghiệm ( $M_{u,guid}/M_{u,exp}$ ) lần lượt là 0,92 và 0,03; 0,94 và 0,02. Ngoài ra, kết quả kiểm chứng cho thấy độ ổn định của kết quả dự đoán theo các hướng dẫn này đều rất tốt, thể hiện qua giá trị COV của tỉ số  $M_{u,guid}/M_{u,exp}$  đều nhỏ hơn 0,05 (dưới 5%).

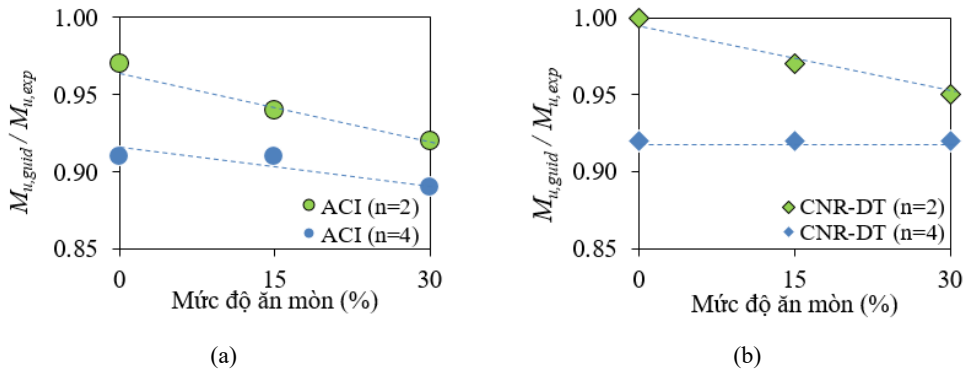
Quy trình hiệu chỉnh dự đoán khả năng kháng uốn của dầm BTCT có cốt thép chịu kéo bị ăn mòn được gia cường bằng tấm BFRP cho kết quả sát với thực nghiệm hơn so với kết quả tính theo CNR-DT 200 R1/2013 [31] và ACI 440.2R-17 [32], thể hiện qua giá trị trung bình (Mean) và hệ số biến thiên (COV) của tỉ số giữa khả năng kháng uốn dự đoán theo công thức đề xuất và thực nghiệm ( $M_{u,guid}/M_{u,exp}$ ) lần lượt là 0,97 và 0,02. Điều này là do công thức tính biến dạng bong tách đề xuất của tác giả có xét đến tương tác của yếu tố ăn mòn cốt thép. Cách tính này có thể giúp xác định được biến dạng của tấm FRP gần hơn với giá trị thực của chúng thay vì được tính bằng các công thức dựa trên các dầm BTCT chưa bị ăn mòn như của CNR-DT 200 R1/2013 [31] và ACI 440.2R-17 [32].

Kết quả kiểm chứng thể hiện trên Hình 12 cũng cho thấy các hướng dẫn thiết kế đều có xu hướng dự đoán khả năng kháng uốn của dầm BTCT có cốt thép chịu kéo bị ăn mòn được gia cường bằng tấm BFRP với mức độ an toàn tăng dần với sự gia tăng của mức độ ăn mòn của cốt thép, đặc biệt khi gia cường với hai lớp BFRP (tương ứng với hàm lượng gia cường bằng 0,06%); tuy nhiên, khi dầm được gia cường với bốn lớp BFRP (tương ứng với hàm lượng gia cường bằng 0,12%), mức độ an toàn



Hình 11. Khả năng kháng uốn của dầm bị ăn mòn được gia cường bằng tấm BFRP dự đoán theo các hướng dẫn và thực nghiệm

tuy có tăng nhưng không rõ nét. Bên cạnh đó, Hình 12 cũng cho thấy rõ mức độ an toàn tính theo các hướng dẫn thiết kế tăng đáng kể khi đầm được gia cường bằng bốn lớp BFRP thay vì hai lớp. Kết quả thực nghiệm của Do-Dai và cs. [30] cũng đã cho thấy điều này; theo đó, khi số lớp gia cường BFRP tăng từ hai lên bốn lớp, hiệu quả gia cường của tấm BFRP cho trường hợp đầm bị ăn mòn có xu hướng giảm.



Hình 12. So sánh khả năng kháng uốn của đầm gia cường được dự đoán theo các hướng dẫn thiết kế hiện hành và thực nghiệm theo các mức độ ăn mòn của cốt thép

## 5. Kết luận

Bài báo này trình bày một nghiên cứu kiểm chứng về tính khả dụng của quy trình tính khả năng kháng uốn của đầm BTCT bị ăn mòn được gia cường bằng tấm BFRP theo các hướng dẫn thiết kế của CNR-DT 200 R1/2013 [31] và ACI 440.2R-17 [32] dựa trên kết quả thực nghiệm đã có của các tác giả, bao gồm 9 đầm BTCT có kích thước lớn trong đó cốt thép chịu kéo bị ăn mòn với mức độ từ thấp đến cao (0%, 15% và 30% tính theo khối lượng) và số lớp BFRP gia cường thay đổi (0, 2 và 4). Một quy trình hiệu chỉnh kết quả thực nghiệm nhằm xét đến ảnh hưởng của sự ăn mòn cốt thép đến biến dạng hữu hiệu của tấm BFRP cũng được trình bày để dự đoán khả năng kháng uốn của đầm BTCT bị ăn mòn được gia cường tấm BFRP. Từ các kết quả đạt được trong nghiên cứu này, một số kết luận có thể được rút ra như sau:

- Quy trình dự đoán khả năng kháng uốn của đầm BTCT có cốt thép chịu kéo bị ăn mòn được gia cường bằng tấm BFRP theo CNR-DT 200 R1/2013 và ACI 440.2R-17 đều cho kết quả gần bằng và nhỏ hơn so với thực nghiệm và có xu hướng ổn định, thể hiện qua giá trị trung bình (Mean) và hệ số biến thiên (COV) của tỉ số giữa khả năng kháng uốn tính theo các hướng dẫn thiết kế và từ thực nghiệm lần lượt là Mean = 0,92 đến 0,94 và COV = 0,02 đến 0,03. Điều này cho thấy các hướng dẫn thiết kế đã nêu có thể áp dụng được cho trường hợp đầm BTCT có cốt thép bị ăn mòn được gia cường bằng tấm BFRP. Tuy vậy, trong bối cảnh số lượng các mẫu đầm thí nghiệm và các thông số nghiên cứu về ăn mòn cốt thép trong nghiên cứu này và cả các nghiên cứu đã có còn rất khiêm tốn và chưa được đầy đủ, cho nên vấn đề này nên được tiếp tục nghiên cứu và làm rõ hơn nữa để đảm bảo được an toàn cho công tác thiết kế trong thực tế.

- Các hướng dẫn thiết kế CNR-DT 200 R1/2013 và ACI 440.2R-17 đều có xu hướng dự đoán khả năng kháng uốn của đầm BTCT có cốt thép chịu kéo bị ăn mòn được gia cường bằng tấm BFRP với mức độ an toàn tăng dần cùng với sự gia tăng của mức độ ăn mòn của cốt thép và số lớp BFRP gia cường.

- Quy trình hiệu chỉnh được đề xuất trong nghiên cứu này dự đoán khả năng kháng uốn của đầm BTCT có cốt thép chịu kéo bị ăn mòn được gia cường bằng tấm BFRP gần với thực nghiệm hơn so

với kết quả tính theo CNR-DT 200 R1/2013 và ACI 440.2R-17.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số DN2022-76-01.

### Tài liệu tham khảo

- [1] Ting, S.-C., Nowak, A. S. (1991). [Effect of reinforcing steel area loss on flexural behavior of reinforced concrete beams](#). *ACI Structural Journal*, 88(3):309–314.
- [2] Li, C. Q. (2002). [Initiation of chloride-induced reinforcement corrosion in concrete structural members-prediction](#). *ACI Structural Journal*, 99(2):133–141.
- [3] Jang, B. S., Oh, B. H. (2010). [Effects of non-uniform corrosion on the cracking and service life of reinforced concrete structures](#). *Cement and Concrete Research*, 40(9):1441–1450.
- [4] Huynh-Xuan, T., Do-Dai, T., Ngo-Thanh, T., Pham, T. M., Nguyen-Minh, L. (2021). [Effect of Sulfate Attack on Reinforced Concrete Columns Confined with CFRP Sheets under Axial Compression](#). *Journal of Composites for Construction*, 25(6).
- [5] Nguyen-Minh, L., Rovňák, M. (2015). [Size effect in uncracked and pre-cracked reinforced concrete beams shear-strengthened with composite jackets](#). *Composites Part B: Engineering*, 78:361–376.
- [6] Nguyen-Minh, L., Vo-Le, D., Tran-Thanh, D., Pham, T. M., Ho-Huu, C., Rovňák, M. (2018). [Shear capacity of unbonded post-tensioned concrete T-beams strengthened with CFRP and GFRP U-wraps](#). *Composite Structures*, 184:1011–1029.
- [7] Nguyen-Minh, L., Phan-Vu, P., Tran-Thanh, D., Phuong Thi Truong, Q., Pham, T. M., Ngo-Huu, C., Rovňák, M. (2018). [Flexural-strengthening efficiency of CFRP sheets for unbonded post-tensioned concrete T-beams](#). *Engineering Structures*, 166:1–15.
- [8] Karimipour, A., Edalati, M. (2021). [Retrofitting of the corroded reinforced concrete columns with CFRP and GFRP fabrics under different corrosion levels](#). *Engineering Structures*, 228:111523.
- [9] Zhou, Y., Zheng, S., Huang, Z., Sui, L., Chen, Y. (2020). [Explicit neural network model for predicting FRP-concrete interfacial bond strength based on a large database](#). *Composite Structures*, 240:111998.
- [10] Phan-Vu, P., Tran, D. T., Pham, T. M., Dang, T. D., Ngo-Huu, C., Nguyen-Minh, L. (2021). [Distinguished bond behaviour of CFRP sheets in unbonded post-tensioned reinforced concrete beams versus single-lap shear tests](#). *Engineering Structures*, 234:111794.
- [11] Soudki, K. A., Sherwood, T. G. (2000). [Behaviour of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre reinforced polymer laminates subjected to corrosion damage](#). *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(5):1005–1010.
- [12] Tung, D. D., Tu, C. V., Phung, H. T. K., Long, N. M. (2022). [Effect of prestressing force on flexural behavior of unbonded prestressed concrete beams strengthened by CFRP sheets](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 16(1):1–18.
- [13] Masoud, S., Soudki, K., Topper, T. (2001). [CFRP-strengthened and corroded RC beams under monotonic and fatigue loads](#). *Journal of Composites for Construction*, 5(4):228–236.
- [14] Wang, C.-Y., Shih, C.-C., Hong, S.-C., Hwang, W.-C. (2004). [Rehabilitation of cracked and corroded reinforced concrete beams with fiber-reinforced plastic patches](#). *Journal of Composites for Construction*, 8(3):219–228.
- [15] El Maaddawy, T., Soudki, K. (2005). [Carbon-fiber-reinforced polymer repair to extend service life of corroded reinforced concrete beams](#). *Journal of Composites for Construction*, 9(2):187–194.
- [16] Badawi, M., Soudki, K. (2005). [Control of corrosion-induced damage in reinforced concrete beams using carbon fiber-reinforced polymer laminates](#). *Journal of composites for construction*, 9(2):195–201.
- [17] 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.
- [18] Al-Saidy, A. H., Al-Jabri, K. S. (2011). [Effect of damaged concrete cover on the behavior of corroded concrete beams repaired with CFRP sheets](#). *Composite Structures*, 93(7):1775–1786.
- [19] Xie, J.-h., Hu, R.-l. (2013). [Experimental study on rehabilitation of corrosion-damaged reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer](#). *Construction and Building Materials*, 38:708–716.



- [20] Kreit, A., Al-Mahmoud, F., Castel, A., François, R. (2010). [Repairing corroded RC beam with near-surface mounted CFRP rods](#). *Materials and Structures*, 44(7):1205–1217.
- [21] 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.
- [22] Almassri, B., Al Mahmoud, F., Francois, R. (2016). [Behaviour of corroded reinforced concrete beams repaired with NSM CFRP rods, experimental and finite element study](#). *Composites Part B: Engineering*, 92:477–488.
- [23] Triantafyllou, G. G., Rousakis, T. C., Karabinis, A. I. (2017). [Corroded RC beams patch repaired and strengthened in flexure with fiber-reinforced polymer laminates](#). *Composites Part B: Engineering*, 112: 125–136.
- [24] Triantafyllou, G. G., Rousakis, T. C., Karabinis, A. I. (2018). [Effect of patch repair and strengthening with EBR and NSM CFRP laminates for RC beams with low, medium and heavy corrosion](#). *Composites Part B: Engineering*, 133:101–111.
- [25] Elghazzy, M., El Refai, A., Ebead, U., Nanni, A. (2017). [Effect of corrosion damage on the flexural performance of RC beams strengthened with FRCM composites](#). *Composite Structures*, 180:994–1006.
- [26] Chen, Z. F., Wan, L. L., Lee, S., Ng, M., Tang, J. M., Liu, M., Lee, L. (2008). [Evaluation of CFRP, GFRP and BFRP Material Systems for the Strengthening of RC Slabs](#). *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27(12):1233–1243.
- [27] Huang, L., Li, Y., Wang, Y. (2013). Strengthening effects of BFRP on reinforced concrete beams. *Journal of Southeast University*, 29(2):182–186.
- [28] Duic, J., Kenno, S., Das, S. (2018). [Flexural Rehabilitation and Strengthening of Concrete Beams with BFRP Composite](#). *Journal of Composites for Construction*, 22(4).
- [29] Qin, Z., Tian, Y., Li, G., Liu, L. (2019). [Study on bending behaviors of severely pre-cracked RC beams strengthened by BFRP sheets and steel plates](#). *Construction and Building Materials*, 219:131–143.
- [30] Do-Dai, T., Chu-Van, T., Tran, D. T., Nassif, A. Y., Nguyen-Minh, L. (2022). [Efficacy of CFRP/BFRP laminates in flexurally strengthening of concrete beams with corroded reinforcement](#). *Journal of Building Engineering*, 53:104606.
- [31] CNR-DT 200 R1/2013 (2013). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*. In National Research Council (CNR).
- [32] ACI 440.2R-17 (2017). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. In American Concrete Institute.
- [33] Chung, L., Jay Kim, J.-H., Yi, S.-T. (2008). [Bond strength prediction for reinforced concrete members with highly corroded reinforcing bars](#). *Cement and Concrete Composites*, 30(7):603–611.
- [34] Ali, T. K. M. (2014). Flexural behavior of reinforced beams reinforced with corrosive rebar. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 5(1):64.
- [35] ACI 318 (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.