

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

PHAN VŨ PHƯƠNG

**HIỆU NĂNG GIA CƯỜNG KHÁNG UỐN CỦA TẤM CFRP
CHO DÀM BÊ TÔNG CĂNG SAU DỪNG
CÁP KHÔNG BÁM DÍNH**

Ngành: Kỹ Thuật Xây Dựng Công Trình Dân Dụng và Công Nghiệp
Mã số ngành: 62580208

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH - NĂM 2022

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

Người hướng dẫn 1: PGS. TS. Nguyễn Minh Long

Người hướng dẫn 2: PGS. TS. Ngô Hữu Cường

Phản biện độc lập 1:

Phản biện độc lập 2:

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

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

.....
.....

vào lúc giờ ngày tháng năm

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

Tạp chí quốc tế

1. **Phan-Vu, P.**, Tran, D. T., Pham, T. M., Dang, T. D., Ngo-Huu, C., and 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 (Corresponding author: Nguyen-Minh Long).

2. Tran, D. T., **Phan-Vu, P.**, Pham, T. M., Dang, T. D., and Nguyen-Minh, L. (2020). “Repeated and post-repeated flexural behavior of unbonded post-tensioned concrete T-beams strengthened with CFRP sheets.” *Journal of Composites for Construction*, American Society of Civil Engineers (ASCE), 24(2), 04019064 (Corresponding author: Nguyen-Minh Long).

3. Nguyen-Minh, L., **Phan-Vu, P.**, Tran-Thanh, D., Phuong Thi Truong, Q., Pham, T. M., Ngo-Huu, C., and Rovňák, M. (2018). “Flexural-strengthening efficiency of CFRP sheets for unbonded post-tensioned concrete T-beams.” *Engineering Structures*, 166, 1–15 (Corresponding author: Nguyen-Minh Long).

Sách tham khảo

1. Nguyễn Minh Long, Đặng Đăng Tùng, Trần Thanh Dương và Phan Vũ Phương. (2021). *Gia cường kết cấu bê tông cốt thép - Sử dụng vật liệu FRP: Thiết kế và thi công*. Đại học Quốc gia TP. HCM, Việt Nam.

Tạp chí trong nước

1. **Phan Vũ Phương** và Nguyễn Minh Long. (2020). “So sánh ứng xử bong tách của tấm CFRP trong dầm UPC chịu uốn và mẫu kéo trượt một mặt.” *Tạp chí Xây dựng Việt Nam*, 623, 105–112.

2. **Phan Vũ Phương** và Nguyễn Minh Long. (2020). “Kiểm chứng các công thức dự đoán cường độ bám dính của liên kết tấm CFRP-bê tông hiện có cho dầm UPC.” *Tạp chí Xây dựng Việt Nam*, 625, 182–189.

3. **Phan Vũ Phương**, Trần Thanh Dương, Ngô Hữu Cường và Nguyễn Minh Long. (2018). “Ứng xử uốn của dầm bê tông căng sau dùng cáp không bám dính gia cường tấm CFRP chịu tải trọng lặp.” *Tạp chí Xây dựng Việt Nam*, 604, 144–150.

4. **Phan Vũ Phương**, Trần Thanh Dương, Ngô Hữu Cường và Nguyễn Minh Long. (2018). “Tương tác giữa tấm gia cường CFRP kháng uốn và cáp không bám dính trong dầm bê tông căng sau: thực nghiệm và công thức.” *Tạp chí Xây dựng Việt Nam*, 603, 38–43.

5. **Phan Vũ Phương**, Trương Thị Phương Quỳnh, Đặng Đăng Tùng và Nguyễn Minh Long. (2016). “Hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP trong dầm chữ T ứng suất trước có và không có hệ neo CFRP dạng dải U.” *Tạp chí Khoa học Đại học Mở TP. HCM*, 51(6), 1–13.

Kỹ yếu hội nghị quốc tế

1. **Phan-Vu, P.**, Tran, D. T., Cuong, N.-H., Tung, Dang. D., and Long, N.-M. (2018). “Flexural behaviour of unbonded post-tensioned concrete T-beams strengthened with CFRP sheets under repeated loading.” *Protection of Structures against Hazards*, CI-PREMIER PTE LTD, Ha Noi, Viet Nam, 469–478.

2. P.T.Truong, Q., Phuong, **P.-V.**, **Duong**, T.-T., and Long, N.-M. (2017). “Flexural Behavior of Unbonded Post-Tensioned Concrete T-Beams Externally Bonded With CFRP Sheets Under Static Loading.” *The International Conference on Advances in Computational Mechanics 2017. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer Nature Singapore Pte Ltd, Phu Quoc, Viet Nam.

Kỹ yếu hội nghị trong nước

1. Tran-Thanh, D., **Phan-Vu, P.**, Ngo, H. C., and Nguyen-Minh, L. (2017). “Interactions between CFRP sheets and unbonded tendons in the post-tensioned concrete beams: experiment and formula.” *Proceedings of the 3rd Conference on Advanced Technology in Civil Engineering Towards Sustainable Development*, DUT, Da Nang, Viet Nam.

2. **Phan-Vu, P.**, Truong, T. P. Q., Dang, D. T., and Nguyen-Minh, L. (2016). “Flexural-strengthening efficiency of CFRP sheets in post-tensioned concrete T-Beams with and without U-strip CFRP anchorage system.” *Proceedings of the 1st Conference on Construction and Architecture*, HCMCOU, Ho Chi Minh, Viet Nam.

3. **Phan-Vu, P.**, Truong, T. P. Q., Ngo, H. C., and Nguyen-Minh, L. (2016). “Effect of end-anchorage system using CFRP U-strips on flexural behavior of post-tensioned concrete T-beam strengthening by CFRP sheets.” *Proceedings of*

the 2nd Conference on Advanced Technology in Civil Engineering Towards Sustainable Development, DUT, Da Nang, Viet Nam.

Đề tài nghiên cứu khoa học

1. Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Nhà nước: “Nghiên cứu ứng dụng các giải pháp kỹ thuật để sửa chữa và gia cường bằng lưới sợi basalt (BRFP) và cac-bon (CFRP) nhằm tăng cường hiệu quả sử dụng và tuổi thọ cho các công trình cầu ở ĐBSCL”. Đã nghiệm thu năm 2021. (Thành viên)

2. Đề tài nghiên cứu khoa học cấp tỉnh: “Nghiên cứu giải pháp sửa chữa và cải thiện khả năng chịu tải của cầu bê tông cốt thép bằng vật liệu gia cường TYFO FIBRWRAP tại Đồng Tháp”. Đã nghiệm thu 2019. (Thành viên)

3. Đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường (ĐH Mở TP.HCM): “Phân tích ứng xử và khả năng kháng uốn của dầm chữ T bê tông ứng suất trước gia cường tấm sợi cac-bon chịu tải trọng tĩnh”. Đã nghiệm thu 2019. (Chủ nhiệm đề tài)

4. Đề tài nghiên cứu khoa học quỹ NAFOSTED: “Ảnh hưởng của một số yếu tố chính đến sức kháng cắt của dầm bê tông tiết diện chữ T ứng suất trước gia cường bằng lưới sợi composite”. Đã nghiệm thu năm 2018. (Thành viên)

5. Đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường (ĐHBK): “Phân tích hiệu quả gia cường kháng uốn của dầm bê tông ứng suất trước gia cường tấm sợi cac-bon chịu tải trọng lặp”. Đã nghiệm thu năm 2018. (Đồng chủ nhiệm đề tài)

ĐẶT VẤN ĐỀ

Cấu kiện bê tông ứng suất trước (BTUST) dùng cáp không bám dính với những ưu điểm như tính kinh tế cao (do không phải tốn chi phí và thời gian cho công tác bơm vữa), có tổn hao ứng suất căng do ma sát thấp, khả năng thay thế và quan trắc ứng suất cáp trong suốt thời gian sử dụng, đã cho thấy là một giải pháp kết cấu hiệu quả bên cạnh cấu kiện BTUST dùng cáp bám dính và đã được sử dụng từ những năm 1960s ở USA, Úc, Châu Âu và Châu Á. Sau một thời gian dài sử dụng, sự xuống cấp của vật liệu, sự xuất hiện của vết nứt làm suy yếu độ cứng của tiết diện và sự suy giảm lực căng trước (do cáp bị ăn mòn và tổn hao ứng suất dài hạn) hay nhu cầu nâng cấp của công trình đòi hỏi chúng cần được gia cường để kéo dài thời gian phục vụ. Nhờ vào các đặc tính kỹ thuật ưu việt của vật liệu CFRP như có cường độ cao, trọng lượng riêng nhẹ, không dẫn điện, không nhiễm từ, không bị ăn mòn, thi công đơn giản, giải pháp sử dụng vật liệu CFRP cho công tác sửa chữa hoặc gia cường cấu kiện bê tông cốt thép (BTCT) và BTUST đã cho thấy được tính hiệu quả cao của nó bên cạnh các giải pháp truyền thống hiện hữu.

Tuy vậy, các nghiên cứu hiện nay về hiệu quả gia cường kháng uốn bằng vật liệu FRP cho cấu kiện BTUST dùng cáp không bám dính rất hạn chế. Các nghiên cứu hiện có chưa đề cập tường minh và lượng hóa rõ ràng ảnh hưởng của tình trạng dầm trước khi gia cường (còn nguyên hay đã nứt), ảnh hưởng của tải trọng lặp, kiểu neo U-CFRP đến biên dạng của cáp và hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP cho dầm. Bên cạnh đó, hiệu quả gia cường của tấm CFRP được quyết định bởi ứng xử bám dính của tấm CFRP với bề mặt bê tông của cấu kiện BTUST nhưng chưa thấy một nghiên cứu nào đề cập đầy đủ đến vấn đề này. Các vấn đề vừa nêu dẫn đến sự thiếu vắng của các điều khoản thiết kế cho trường hợp cấu kiện hay dầm BTUST dùng cáp không bám dính trong các hướng dẫn thiết kế gia cường hiện hành bằng vật liệu FRP.

Luận án này nghiên cứu về đặc tính bám dính của tấm CFRP với bê tông và hiệu năng gia cường kháng uốn của tấm CFRP cho dầm BTUST dùng cáp không bám dính. Các mục tiêu chính của luận án bao gồm: (1) phân tích thực nghiệm đặc tính bám dính của tấm CFRP với bê tông trên dầm BTUST dùng cáp không bám dính và làm rõ sự khác biệt với đặc tính bám dính của tấm CFRP với bê tông trên các mẫu kéo trượt thông dụng hiện nay một cách có hệ thống; (2) phân tích thực nghiệm ứng xử và định lượng hóa hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP cho dầm BTUST dùng cáp không bám dính; và (3) xây dựng một mô hình bám dính - trượt của liên kết tấm CFRP – bê tông cho dầm BTUST dùng cáp không bám dính và đề xuất một công thức mới tính biên dạng của cáp trong dầm BTUST dùng cáp không bám dính có kể đến ảnh hưởng của tấm gia cường kháng uốn CFRP phục vụ cho quy trình thiết kế gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP cho dầm BTUST dùng cáp không bám dính.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN, MỤC TIÊU VÀ NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

1.1. Tổng quan nghiên cứu

1.1.1. Đặc tính bám dính giữa tấm CFRP và bê tông trong dầm bê tông

Nhiều nghiên cứu cho rằng hiệu quả gia cường của tấm CFRP bị giới hạn đáng kể bởi sự bong tách của tấm và làm cho ưu điểm về cường độ chịu kéo cao của tấm không được phát huy đầy đủ cũng như làm cho dầm ứng xử giòn hơn so với trường hợp dầm không gia cường [33]. Để hạn chế và làm chậm sự bong tách, nhằm tăng hiệu quả gia cường của tấm từ đó cải thiện hơn nữa khả năng chịu lực cũng như tính dai của dầm gia cường, các hệ neo cơ học hoặc neo CFRP dạng U được sử dụng và đã cho thấy được tính hiệu quả của chúng cho cả dầm BTCT truyền thống [33]–[38] và dầm BTUST [18], [21], [23], [26]. Tuy vậy, hiệu quả của hệ neo này và vùng bố trí của nó trong việc cải thiện hiệu năng làm việc của tấm CFRP gia cường kháng uốn cho dầm BTUST dùng cáp không bám dính, đặc biệt khi chịu ảnh hưởng của tải trọng lặp như thế nào vẫn chưa được trình bày tường minh.

Thực tế, sự bong tách sớm hay muộn của tấm CFRP và hiệu quả gia cường kháng uốn của nó được quyết định bởi ứng xử bám dính của tấm CFRP với bề mặt bê tông của cấu kiện được gia cường. Tuy vậy, hiện nay các hiểu biết về ứng xử bám dính của liên kết CFRP-bê tông trên các cấu kiện gia cường hầu hết đều dựa trên các nghiên cứu liên quan đến thí nghiệm kéo trượt một mặt [39]–[48] và một số ít dựa trên thí nghiệm kéo uốn trên mẫu dầm thuần bê tông [49], [50]. Kết quả là công thức xác định biến dạng bong tách tấm CFRP trong các hướng dẫn tính toán thiết kế gia cường kết cấu sử dụng vật liệu CFRP dán ngoài hiện nay như [1], [2], [51], [52] đều được xây dựng dựa trên các nghiên cứu của thí nghiệm kéo trượt thuần túy một hoặc hai mặt và được hiệu chỉnh thêm bằng hệ số xét đến sự khác biệt giữa bong tách do kéo trượt và bong tách IC từ tính toán hồi qui của nghiên cứu của [4], [53] để dự đoán giá trị biến dạng bong tách tấm CFRP khi tính toán cho cấu kiện BTCT chịu uốn. Một số nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến tấm CFRP gia cường kháng uốn trên các dầm BTCT như [17], [54], trên các dầm BTUST dùng cáp bám dính như [19], [21], [23], [25], [32], [55] và trên các dầm BTUST dùng cáp không bám dính như [28], [29] đều cho thấy biến dạng bong tách tấm CFRP của các dầm BTCT, đặc biệt là của dầm BTUST lớn hơn rất nhiều so với của mẫu thí nghiệm kéo trượt, có thể là do ảnh hưởng của ứng suất kéo do uốn và sự xuất hiện của các vết nứt uốn trong cấu kiện. Sự thiếu vắng của các dữ liệu nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến đặc tính bám dính của tấm FRP gia cường kháng uốn ở cấp độ cấu kiện có kích thước lớn, đặc biệt là cấu kiện BTUST, làm cho vấn đề dự đoán biến dạng hữu hiệu của tấm CFRP có thể trở nên sai lệch, kém chính xác và không mang tính kinh tế.

1.1.2. Ứng xử uốn của dầm BTUST gia cường tấm CFRP

Tuy nhiên, cho đến thời điểm hiện tại, các nghiên cứu về hiệu quả gia cường kháng uốn bằng vật liệu CFRP cho cấu kiện BTUST có số lượng không nhiều, đa số chỉ tập trung vào phân tích hiệu quả gia cường của vật liệu CFRP cho dầm BTUST sử dụng cáp bím dính [18]–[26]. Đặc biệt, đối với các dầm BTUST dùng cáp không bím dính chỉ có một vài nghiên cứu [27]–[30] và tất cả đều chưa đề cập đầy đủ, tường minh và chưa lượng hóa rõ ràng ảnh hưởng của hàm lượng tấm CFRP gia cường đến biến dạng của cáp và hiệu quả gia cường kháng uốn cho dầm. Hơn nữa, các nghiên cứu trên chỉ mới dừng lại ở việc phân tích và đánh giá hiệu quả gia cường của tấm CFRP trên dầm dưới tác dụng của tải trọng tĩnh đơn điệu và trên các cấu kiện chưa có sự cố trước khi được gia cường. Khác với tải trọng tĩnh đơn điệu, ảnh hưởng của tải trọng lặp gây ra hiện tượng từ biến trong bê tông và sự bong tách sớm giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông [31]. Hiện tượng này có thể diễn ra ở mức độ lớn hơn một khi cấu kiện chịu tác dụng bởi tải trọng lặp có biên độ cao với số lượng vòng lặp đủ lớn, làm suy giảm hiệu quả gia cường của tấm CFRP, độ cứng của dầm, và ảnh hưởng đến ứng xử cũng như khả năng chịu lực của dầm ở giai đoạn sau lặp theo như nghiên cứu của [32] trên dầm BTUST dùng cáp bím dính. Trong khi đó, trong dầm BTUST dùng cáp không bím dính, cáp không làm việc đồng thời và biến dạng của cáp cũng không tương thích với biến dạng của bê tông và tấm CFRP. Sự khác nhau về cơ chế làm việc này có thể dẫn đến sự khác biệt đáng kể về ứng xử của hai dạng cấu kiện này dưới tác dụng của tải trọng lặp, từ đó ảnh hưởng đến ứng xử và hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP. Việc làm rõ ứng xử của loại cấu kiện này trong điều kiện chịu ảnh hưởng bởi tải trọng lặp, vì vậy, thật sự rất cần thiết.

1.1.3. Mô hình và phương pháp xác định khả năng kháng uốn của dầm BTUST gia cường tấm CFRP

Hiện nay, phương pháp xác định khả năng kháng uốn cho dầm BTUST dùng cáp bím dính gia cường bằng tấm FRP đã được trình bày chi tiết trong một số hướng dẫn thiết kế gia cường hiện hành như [1] và [2]. Đối với các cấu kiện BTUST dùng cáp không bím dính, hiện chỉ có nghiên cứu của [29] có đề xuất một quy trình tính toán khả năng kháng uốn (cho loại cấu kiện đã xuất hiện hư hỏng nhiều) dựa trên hiệu chỉnh công thức xác định biến dạng cáp bím dính trong tiêu chuẩn [103], nhưng chưa xét đến các cấu kiện còn nguyên, hoặc có xuất hiện vết nứt trước khi gia cường với bề rộng vết nứt vẫn nằm trong giới hạn cho phép hoặc chịu ảnh hưởng của tải lặp, cũng như chưa xét đến ảnh hưởng của hàm lượng tấm CFRP, tương tác giữa cáp và tấm CFRP đến khả năng kháng uốn của loại cấu kiện này.

1.2. Những đóng góp mới của luận án

- (1) Làm sáng tỏ đặc tính bám dính giữa tấm CFRP và bê tông dầm BTUST dùng cáp không bám dính;
- (2) Định lượng hóa hiệu quả gia cường uốn của tấm CFRP cho dầm đơn giản BTUST dùng cáp không bám dính dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và lặp;
- (3) Đề xuất công thức tính biến dạng của cáp và biến dạng bong tách của tấm FRP trong dầm BTUST dùng cáp không bám dính được gia cường bằng tấm CFRP.

1.3. Phạm vi và phương pháp nghiên cứu

1.3.1. Phạm vi nghiên cứu

Luận án tập trung nghiên cứu trên dầm đơn giản BTUST dùng cáp không bám dính quỹ đạo parabol tiết diện chữ T. Dầm được thiết kế theo dạng U của tiêu chuẩn [104] dùng cáp không bám dính có đường kính 12.7mm, có cường độ chịu nén bê tông 45 MPa, dùng tấm CFRP.

1.3.2. Phương pháp nghiên cứu

Các phương pháp nghiên cứu chủ đạo dùng trong nghiên cứu này là thực nghiệm, tính toán giải tích và thống kê hồi qui.

CHƯƠNG 2. CHƯƠNG TRÌNH THỰC NGHIỆM

2.1. Vật liệu

2.1.1. Bê tông, cốt thép thanh và cáp ứng suất trước

Bê tông có cường độ chịu nén trung bình của bê tông $f_{c,cube}=47.2\text{MPa}$ và $f_{sp,cube}=5.8\text{MPa}$. Giới hạn chảy và giới hạn bền trung bình lần lượt là $f_y=430\text{MPa}$ và $f_u=600\text{MPa}$ (cốt dọc); và $f_{yw}=342\text{MPa}$ và $f_{uw}=463\text{MPa}$ (cốt đai). Mô-đun đàn hồi của cốt thép $E_s = 200\text{GPa}$ lấy theo [107]. Cáp sử dụng loại không bám dính theo tiêu chuẩn [108] với đường kính danh định là 12.7 mm, loại bảy sợi với cường độ kéo đứt, $f_{pu}=1860\text{MPa}$.

2.1.2. Tấm sợi các bon và keo epoxy

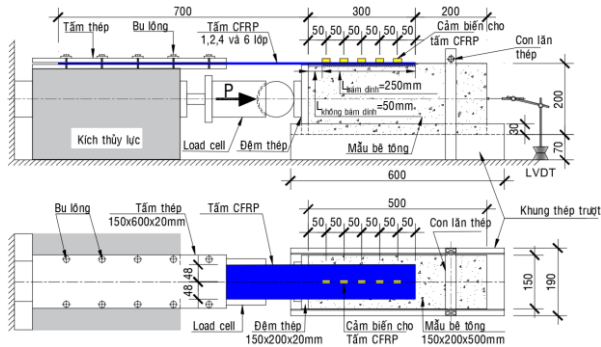
Theo thông số của nhà sản xuất, tấm sợi các-bon trục hướng (CFF) dày 0.166mm, mô-đun đàn hồi E_f là 240 GPa và biến dạng kéo đứt $\varepsilon_{fu}=2.1\%$, có cường độ kéo đứt theo thí nghiệm, $f_{fu} = 3986\text{MPa}$; keo epoxy hai thành phần A-B có cường độ chịu kéo $f_{epoxy,u}=60\text{MPa}$, mô-đun đàn hồi E_{epoxy} từ 3÷3.5 GPa.

2.2. Mẫu thí nghiệm

2.2.1. Mẫu thí nghiệm

Bảng 2.2. Thông số kỹ thuật các mẫu dầm thí nghiệm

Nhóm Tên dầm	$b_w \times h \times b_{fb} \times h_f \times L_0$ mm	d_p mm	ρ_s %	ρ_{sw} %	ρ_p %	n_f lớp	t_f mm	a_f mm	A_f mm ²	w_f mm	s_f mm
M0						0	--	--	--	--	--
M2CB						2	0.166	70	23	--	--
M4CB						4	0.166	70	46	--	--
M6CB						6	0.166	70	70	--	--
M M2CB-AN1	110×360×200×90×6000	305	0.47	0.29	0.41	2	0.166	70	23	300;100	350
M4CB-AN1						4	0.166	70	46	300;100	350
M6CB-AN1						6	0.166	70	70	300;100	350
M2CB-AN2						2	0.166	70	23	100	250
M4CB-AN2						4	0.166	70	46	100	250
RC0											0
RC4						4	0.166	70	46	--	--
RC RC6	305	0.47	0.29	0.41	6	0.166	70	70	--	--	--
RC4-AN2					4	0.166	70	46	100	250	
RC4-AN3r1					4	0.166	70	46	100	210	
C0						0	--	--	--	--	
C4						4	0.166	70	46	--	--
C C6	305	0.47	0.29	0.41	6	0.166	70	70	--	--	--
C4-AN2					4	0.166	70	46	100	250	
C4-AN3r1					4	0.166	70	46	100	210	
C4-AN5					4	0.166	70	46	100	235;195	



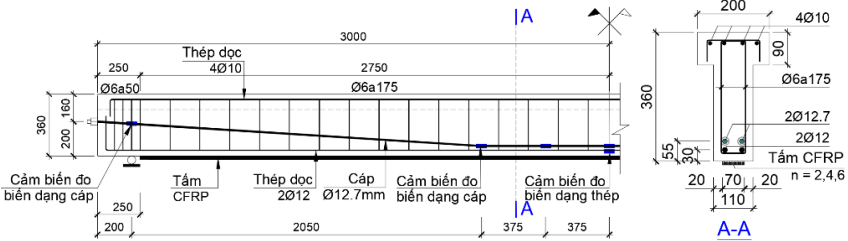
Hình 2.9. Thông số kỹ thuật và sơ đồ thí nghiệm mẫu kéo trượt đơn

Thực nghiệm kéo trượt dùng kiểm chứng được tiến hành trên bảy mẫu bê tông có kích thước rộng×cao×dài = 150×200×500 mm, gồm một mẫu dán một lớp CFRP, hai mẫu dán hai lớp, hai mẫu dán bốn lớp, và hai mẫu dán sáu lớp CFRP. Sơ đồ thí nghiệm kéo trượt một mặt và bố trí thiết bị đo đạc được thể hiện trên **Hình 2.9**.

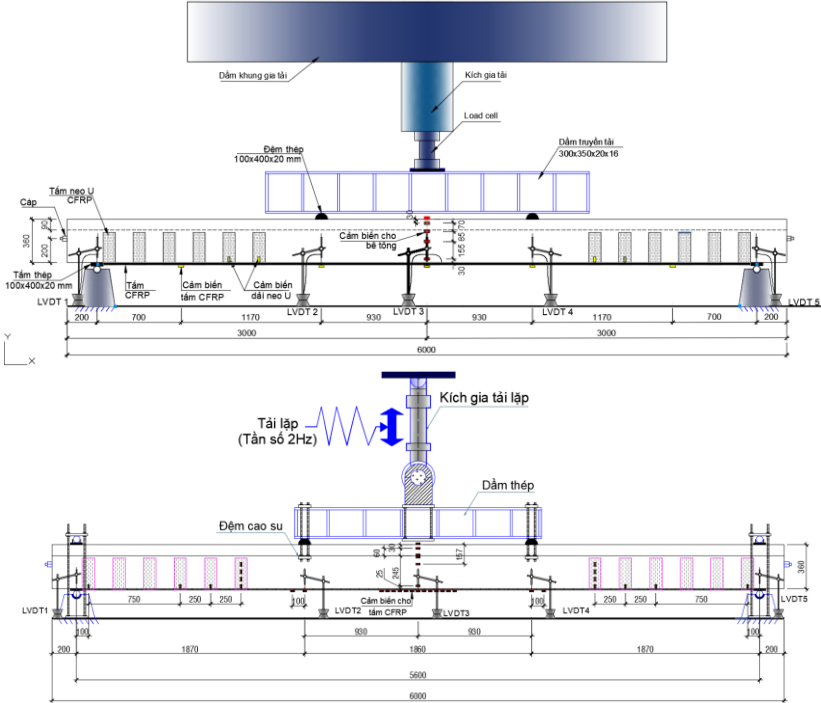
1.2.2. Thông số kỹ thuật và sơ đồ thí nghiệm

Thực nghiệm được tiến hành trên 20 dầm BTUST (**Bảng 2.2** và **Hình 2.10a&e**). Các dầm nhóm M được gia tải với cấp tải 15 kN trong giai đoạn trước khi vết nứt uốn xuất hiện; sau đó, giá trị mỗi cấp tải được tăng lên 20 kN đến khi phá hoại.

Dầm nhóm RC được gia tải lặp sáu chu kỳ với cận dưới của tải = 8kN và cận trên của tải = 90kN để tạo vết nứt có bề rộng lớn nhất xấp xỉ 0.3 mm. Sau đó, các dầm được dỡ tải và tiến hành gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP và được tiếp tục gia tải tĩnh với mỗi cấp gia tải từ 10-20kN đến khi dầm phá hoại. Dầm nhóm C được gia tải theo ba giai đoạn: giai đoạn 1, các dầm chịu tải trọng lặp dạng hình sin với tần số là 2 Hz trong 500 nghìn chu kỳ. Biên độ tải trọng không đổi ($P_{upper,1} = 0.98P_{cr}$ và $P_{lower,1} = 8kN$); giai đoạn 2, các dầm được gia tải cũng với tần số 2 Hz trong khoảng 128 nghìn chu kỳ nhưng với cận trên của tải lặp $P_{upper,2} = 76 kN$. Trong giai đoạn 3, các dầm được gia tải tĩnh cho đến khi phá hoại với với tốc độ gia tải 10-15 kN/phút.



Hình 2.1. Thông số kỹ thuật của dầm thí nghiệm

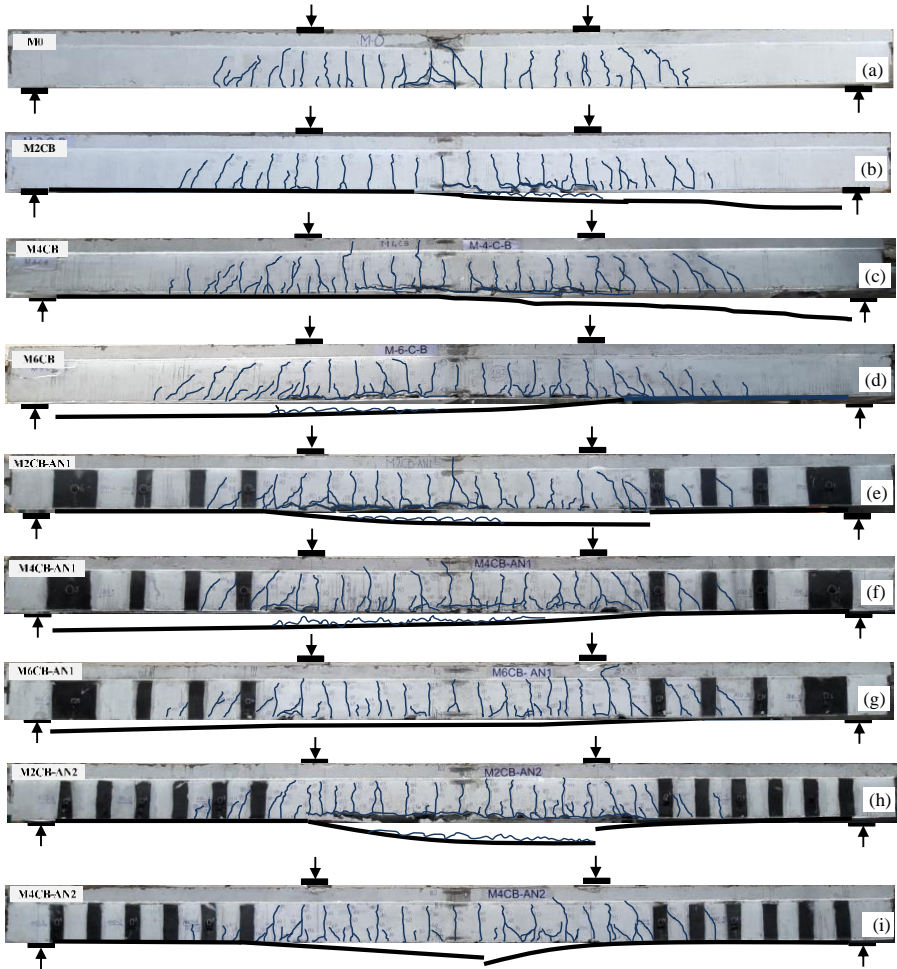


Hình 2.10a&e. Sơ đồ thí nghiệm và lắp đặt thiết bị đo của dầm nhóm M và C

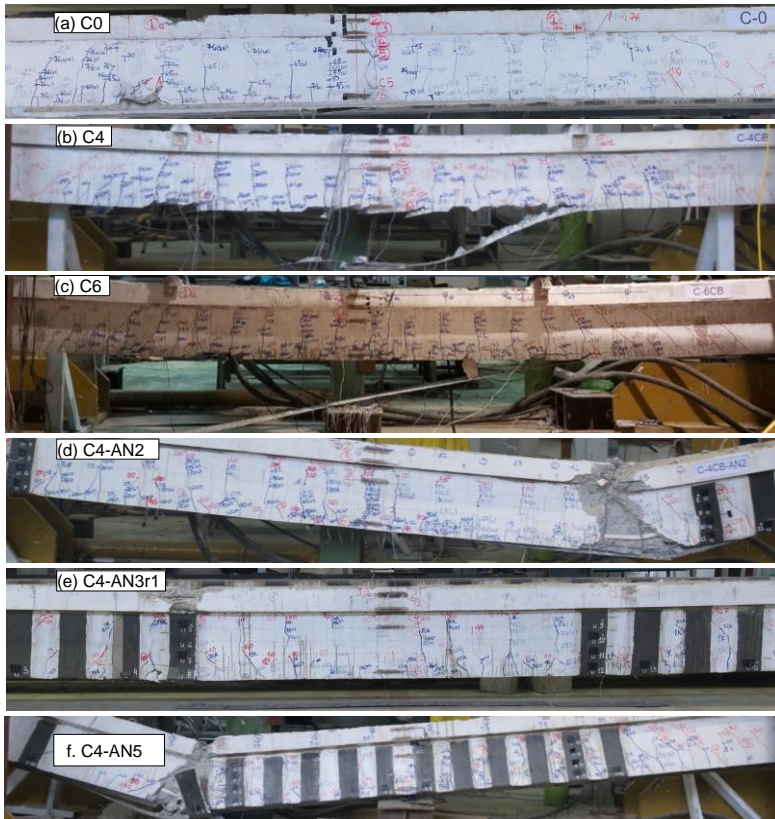
CHƯƠNG 3. ĐẶC TÍNH BÁM DÍNH GIỮA TẤM CFRP-BÊ TÔNG CHO DẦM BTUST

3.1. Đặc tính bám dính của liên kết tấm CFRP–bê tông

3.1.1. Kiểu phá hoại của liên kết CFRP – bê tông trong mẫu dầm BTUST Kiểu phá hoại trong các nhóm dầm: Nhóm dầm M – nhóm dầm còn nguyên gia cường tấm CFRP chịu tải đơn điệu, Nhóm dầm C – nhóm dầm còn nguyên gia cường chịu tải trọng lặp và Nhóm dầm RC – nhóm dầm bị nứt gia cường chịu tải đơn điệu được thể hiện trong Hình 3.2, Hình 3.4, Hình 3.5 và Bảng 3.1.



Hình 3.2. Hình thái vết nứt và kiểu phá hoại của các dầm thực nghiệm nhóm M



Hình 3.4. Kiểu phá hoại của dầm nhóm C



Hình 3.5. Kiểu phá hoại của dầm nhóm RC



Hình 3.5 (tiếp theo). Kiểu phá hoại của các dầm nhóm RC

3.1.2. Kiểu phá hoại của liên kết CFRP – bê tông trong mẫu kéo trượt

Khi lực kéo vượt $80\%P_{max}$, tốc độ bong tách tăng nhanh và sự bong tách hoàn toàn của tấm gần như tức thời, kèm tiếng nổ lớn (**Hình 3.1**).

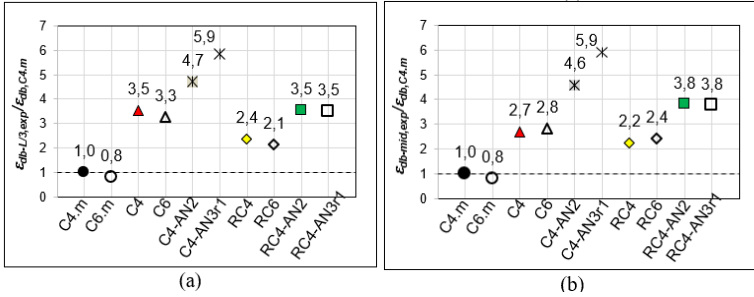


Hình 3.1. Kiểu phá hoại điển hình của mẫu kéo trượt đơn

3.1.3. Sự khác biệt về phân bố biến dạng bong tách tấm CFRP trong các mẫu kéo trượt so với mẫu dầm BTUST

Biến dạng bong tách tại vùng giữa nhịp dầm gia cường không neo của nhóm C và RC cao hơn biến dạng bong tách của mẫu kéo trượt 4 lớp CFRP lần lượt 170%, 180%, 120% và 140%; trong khi, các dầm gia cường 4 lớp CFRP có sử dụng hệ neo của nhóm C và RC cao hơn lần lượt là 360%, 490%, 280% và 280%

(Hình 3.10b). Vùng gần điểm gia tải, biến dạng bong tách tâm CFRP của các dầm gia cường không neo của nhóm C và RC cao hơn biến dạng bong tách của mẫu kéo trượt 4 lớp CFRP lần lượt 250%, 230%, 140% và 110%; các dầm gia cường 7 lớp CFRP có sử dụng hệ neo của nhóm C và RC cao hơn lần lượt là 370%, 490%, 250% và 250% (Hình 3.10a).

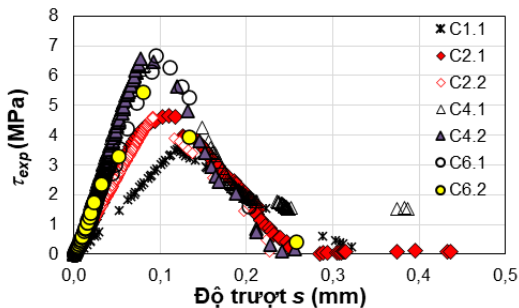


Hình 3.10. Tỉ số biến dạng bong tách tại vùng gia tải (a) và vùng giữa nhịp (b) của các dầm BTUST dùng cáp không bám dính và của mẫu kéo trượt đơn

3.1.4. Sự khác biệt về quan hệ ứng suất bám dính - độ trượt của liên kết tấm CFRP - bê tông trong mẫu kéo trượt so với mẫu dầm BTUST

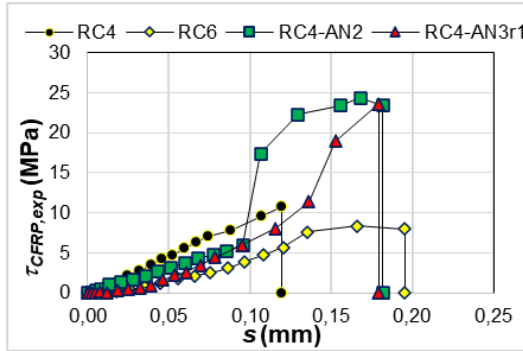
(a) Ứng suất bám dính - độ trượt liên kết tấm CFRP-bê tông mẫu kéo trượt

Ứng suất bám dính lớn nhất (τ_u) của liên kết tấm CFRP-bê tông trong các mẫu kéo trượt 2, 4 và 6 lớp CFRP có xu hướng tăng trung bình lần lượt 25%, 75% và 64% so với của mẫu kéo trượt 1 lớp CFRP. Độ trượt s_0 tương ứng với τ_u của các mẫu dán 2, 4 và 6 lớp CFRP có xu hướng giảm nhẹ trung bình lần lượt là 20%, 40% và 30% so với của mẫu dán 1 lớp.



Hình 3.12. Quan hệ giữa ứng suất bám dính và độ trượt của tấm CFRP trong các mẫu kéo trượt

(b) Ứng suất bám dính & độ trượt của liên kết tấm CFRP-bê tông của mẫu dầm



Hình 3.16. Quan hệ giữa ứng suất bám dính và độ trượt các dầm nhóm RC

Quan hệ giữa ứng suất bám dính và độ trượt của tấm CFRP trong mẫu dầm RC4 và RC6 có dạng cut-off (**Hình 3.16**). Kết quả này có thể là do ảnh hưởng của hình thái vết nứt trong dầm dẫn đến chiều dài bám dính thực tế của tấm CFRP trong các dầm khá nhỏ, xấp xỉ khoảng từ 19 đến 27% so với chiều dài bám dính hữu hiệu tối thiểu được dự đoán trong các hướng dẫn thiết kế điển hình như [2]. Điều này dẫn đến quá trình bong tách tấm CFRP trong dầm diễn ra đột ngột và có dạng cut-off như đã nêu trên. Ngược lại, ở các mẫu kéo trượt thuần túy, chiều dài bám dính của tấm CFRP đủ dài và lớn hơn rất nhiều so với chiều dài bám dính hữu hiệu theo các tiêu chuẩn đã đề cập làm cho quá trình truyền ứng suất trong tấm diễn ra mượt mà hơn và làm xuất hiện nhánh mềm hóa trong đường quan hệ ứng suất bám dính-độ trượt của các mẫu kéo trượt một mặt (**Hình 3.12**).

Không hoàn toàn giống như của dầm gia cường không dùng hệ neo U-wraps, quan hệ giữa ứng suất bám dính và độ trượt của tấm CFRP của dầm gia cường sử dụng hệ neo U-wraps có dạng song tuyến tính. Nguyên nhân là do hệ neo đã giúp ngăn chặn đáng kể sự trượt của tấm CFRP, vì vậy làm tăng nhanh biến dạng tấm. Kết quả thực nghiệm cho thấy ứng suất bám dính cực hạn trong các mẫu dầm gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP không có và có sử dụng hệ neo Uwraps tương ứng cao hơn so với mẫu kéo trượt thuần túy trung bình xấp xỉ 55% và 237%.

Bảng 3.1. Kết quả thí nghiệm của các dầm thực nghiệm

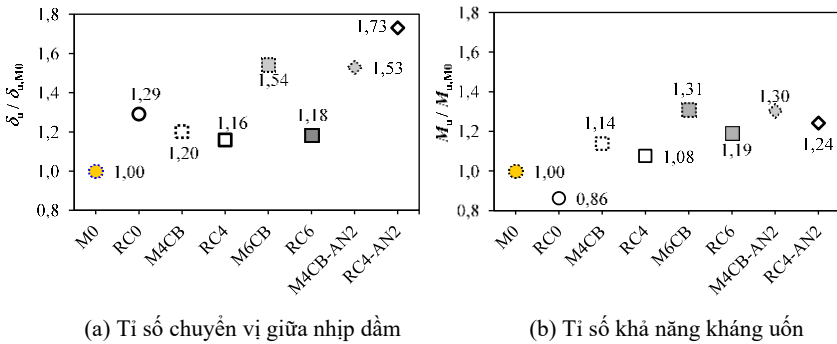
Dầm	Nhóm	P_{max}	P_{cr}/P_{rc}	δ_u	ε_{ccu}	$\varepsilon_{an,max}$	$\varepsilon_{fu,L/3}$	$\varepsilon_{fu,mid}$	$\varepsilon_{pu,mid}$	w_{cru}	N_1-N_2	E_b	Kiểu phá hoại
		kN	kN	mm	%	%	%	%	%	mm		Nmm (x10 ³)	
M0	M	145	46	75	3.5	-	-	-	8.9	1.8	-	7152	TY+FC
M2CB		156	49	82	1.9	-	12.4	11.5	8.9	0.8	-	8827	TY+LC+DB
M4CB		165	53	87	2.2	-	11.4	5.9	9.3	1.0	-	10438	TY+LC+DB
M6CB		190	58	105	2.7	-	8.1	5.7	9.8	1.4	-	13873	TY+LC+DB
M2CB-AN1		176	51	100	2.6	3.9	14.5	11.5	14.7	1.4	-	11753	TY+LC+R
M4CB-AN1		189	55	116	2.8	6.8	12.9	10.9	11.0	1.3	-	14994	TY+LC+RAN+DB
M6CB-AN1		199	58	124	3.0	7.2	9.5	7.6	11.5	1.4	-	17452	TY+LC+RAN+DB
M2CB-AN2		169	51	90	2.4	1.2	13.9	13.2	10.1	1.1	-	10065	TY+LC+R
M4CB-AN2		189	55	115	2.5	4.7	11.5	11.5	10.8	1.3	-	15029	TY+LC+R
C0		C	132	54/27	118	3.9	-	-	-	8.5	1.8	32-14	10591
C4	174		57/39	96	3.1	-	11.2	8.5	8.0	1.0	32-14	10757	FCL+SFDB
C6	178		54/41	90	3.2	-	10.3	8.9	8.2	0.9	38-13	10255	SFDB
C4-AN2	188		56/39	142	3.3	3.3	14.9	14.5	9.7	1.3	36-13	18600	TY+FC+LDB
C4-AN3r1	187		54/37	151	3.6	2.6	18.6	18.7	10.6	1.6	31-11	20102	TY+FC+DB+R
C4-AN5	174		53/36	136	3.4	2.5	12.0	10.6	8.8	0.8	-	16624	TY+FC+DB
RC0	RC	125	40/25	97	2.8	-	-	-	8.5	1.5	35-13	8463	FC
RC4		156	45/39	87	3.2	-	7.5	7.1	7.7	0.8	36-12	9164	FCL+SDB
RC6		173	40/38	89	2.9	-	6.7	7.6	7.5	0.7	31-12	9392	FCL+SDB
RC4-AN2		180	40/38	130	3.7	3.8	11.2	12.0	9.1	1.4	34-12	15780	TY+FC+FLDB
RC4-AN3r1		180	40/36	124	3.6	2.2	11.1	11.9	8.7	1.5	30-12	15197	TY+FC+FLDB

CHƯƠNG 4. HIỆU NĂNG GIA CƯỜNG KHÁNG UỐN CỦA TẤM CFRP CHO DẦM BTUST DÙNG CẤP KHÔNG BẮM DÍNH

4.1. Khả năng kháng uốn, biến dạng và hấp thụ năng lượng của dầm

4.1.1. So sánh khả năng kháng uốn và biến dạng của dầm nhóm RC với của dầm nhóm M

Trong giai đoạn sử dụng, độ cứng của các dầm nhóm RC nhỏ hơn đáng kể so với các dầm tương ứng của nhóm M. Tại cấp tải cho phép trong giai đoạn sử dụng của dầm M0 ($P_{ser,M0}$), giá trị chuyển vị của dầm RC0 lớn hơn 39% so với của dầm M0; trong khi, giá trị chuyển vị của dầm RC4 và RC6 lớn hơn lần lượt 17% và 44% so với của dầm gia cường M4CB và M6CB, chuyển vị của dầm RC4-AN2 lớn hơn 22% so với dầm M4CB-AN2. Khả năng kháng uốn của các dầm nhóm RC trong giai đoạn sử dụng giảm nhẹ so với của các dầm nhóm M (**Hình 4.7b**).

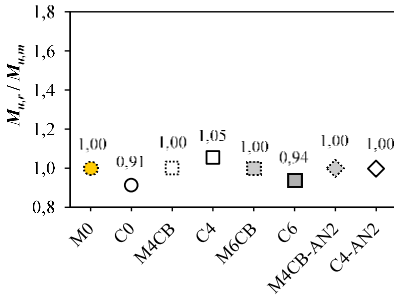


Hình 4.7. Tỷ số giữa khả năng kháng uốn và tỷ số chuyển vị giữa nhịp tại cấp tải phá hoại của dầm gia cường so với dầm đối chứng M0

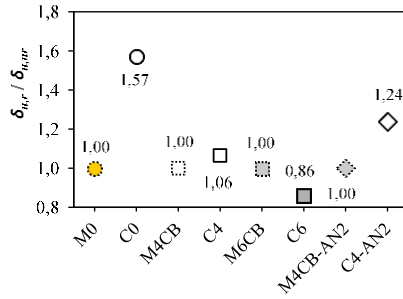
Tuy nhiên, ở trạng thái giới hạn bền, khả năng kháng uốn của các dầm gia cường trong nhóm RC tương tự như các dầm gia cường của nhóm M với mức giảm không lớn, thấp hơn 4% và 12% tương ứng với các dầm gia cường 4 và 6 lớp CFRP không neo, và 6% so với dầm gia cường 4 lớp CFRP có hệ neo AN2.

4.1.2. Sự khác biệt về khả năng kháng uốn và biến dạng của dầm nhóm C so với dầm nhóm M

Tại cấp tải cho phép trong giai đoạn sử dụng của dầm M0 ($P_{ser,M0}$), giá trị chuyển vị của dầm C0 lớn hơn xấp xỉ 55% so với của dầm M0; giá trị chuyển vị của dầm C4 và C6 lớn hơn lần lượt 34% và 31% so với của dầm M4CB và M6CB, và chuyển vị của dầm C4-AN2 lớn hơn 33% so với dầm M4CB-AN2. Khả năng kháng uốn của các dầm chịu ảnh hưởng bởi tải lặp trong giai đoạn sử dụng giảm 41% đối với dầm không gia cường, giảm 19% và 15% cho dầm gia cường 4 và 6 lớp CFRP không neo, 19% đối với dầm gia cường 4 lớp với AN2.



(a) Tỉ số khả năng kháng uốn



(b) Tỉ số chuyển vị giữa nhịp dầm

Hình 4.14. Tỉ số giữa khả năng kháng uốn và tỉ số chuyển vị giữa nhịp tại cấp tải phá hoại của dầm gia cường nhóm C và nhóm M so với của dầm M0

Giai đoạn bền, khả năng kháng uốn của các dầm chịu ảnh hưởng bởi tải trọng lặp giảm so với của các dầm không chịu ảnh hưởng bởi tải lặp (**Hình 4.14a**). Chuyển vị cuối cùng của dầm chịu ảnh hưởng bởi tải trọng lặp lớn hơn so với của dầm không chịu ảnh hưởng bởi tải trọng lặp, trừ dầm gia cường 6 lớp không neo (**Hình 4.14b**).

4.2. Ứng xử nứt của dầm BTUST dùng cáp không dăm dính gia cường tấm CFRP

4.2.1. Sự khác biệt về ứng xử nứt của dầm nhóm RC so với dầm nhóm M

Ở cấp tải phá hoại của dầm RC0 ($P_{u,0}$), bề rộng vết nứt của dầm RC0 lớn hơn đến 59% so với bề rộng nứt của dầm M0, trong khi đó bề rộng vết nứt của các dầm nhóm RC (RC4, RC6 và RC4-AN2) lớn hơn từ 12 đến 17% so với bề rộng nứt của các dầm nhóm M (dầm M4CB, M6CB và M4CB-AN2). Bề rộng vết nứt sau cùng ở cấp tải phá hoại của dầm nhóm M lại lớn hơn so với nhóm RC.

4.2.2. Sự khác biệt về ứng xử nứt của dầm nhóm C so với dầm nhóm M

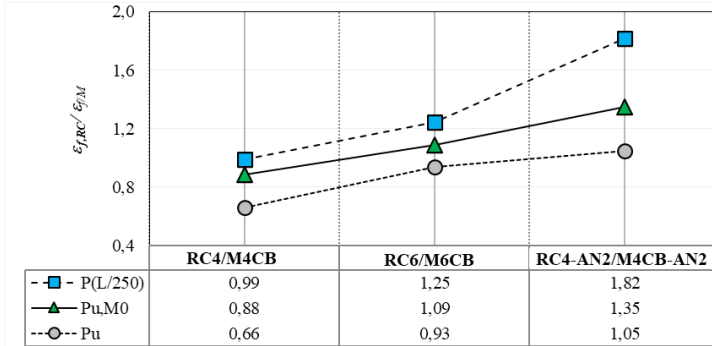
Ở cấp tải phá hoại của dầm đối chứng chịu ảnh hưởng bởi tải lặp dầm C0 ($P_{u,C0}$), bề rộng vết nứt trong dầm này là 1.84 mm, lớn hơn 91% so với bề rộng nứt của dầm M0; trong khi, bề rộng vết nứt của các dầm gia cường chịu ảnh hưởng của tải lặp (dầm C4, C6 và C4-AN2) chỉ lớn hơn từ 2% đến 21% so với bề rộng nứt của các dầm gia cường không chịu ảnh hưởng bởi tải lặp tương ứng (dầm M4CB, M6CB và M4CB-AN2).

4.3. Biến dạng của tấm CFRP gia cường kháng uốn

4.3.1. Sự khác biệt về biến dạng tấm CFRP của dầm nhóm RC so với nhóm M

Tại cấp tải tương ứng với chuyển vị $=L/250$ của dầm M0 ($P_{ser,M0}$), biến dạng tấm CFRP trong vùng mô men hằng số của dầm RC6 và RC4-AN2 lần lượt cao hơn 25% và 82% so với các dầm trong nhóm M (M6CB và M4CB-AN2); riêng biến dạng tấm CFRP dầm RC4 tương tự với dầm M4CB (**Hình 4.22**). Tại cấp tải lớn nhất của dầm M0 ($P_{u,M0}$), biến dạng của tấm CFRP trong vùng mô men hằng số

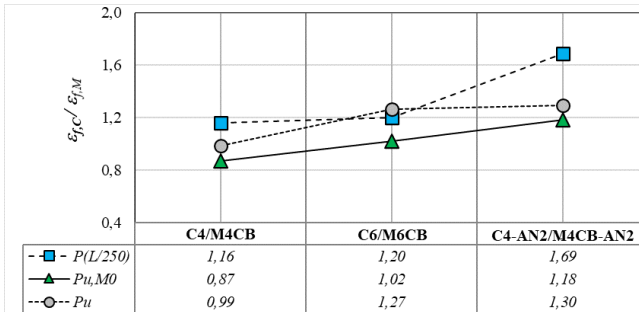
của các dầm RC6 và RC4-AN2 lần lượt cao hơn 9% và 35% so với các dầm M6CB và M4CB-AN2, riêng dầm RC4 thấp hơn 12% so với dầm M4CB. Tuy nhiên, biến dạng tấm không có nhiều khác biệt tại cấp tải lớn nhất của dầm (P_u) (Hình 4.22).



Hình 4.22. Tỷ số biến dạng của tấm CFRP trong các dầm gia cường nhóm RC và của các dầm gia cường tương ứng trong nhóm M

4.3.2. Sự khác biệt về biến dạng tấm CFRP của dầm nhóm C so với nhóm M

Biến dạng tấm CFRP của các dầm chịu ảnh hưởng bởi tải trọng lặp có xu hướng làm việc sớm và có giá trị lớn hơn đáng kể so với của các dầm không chịu ảnh hưởng bởi tải trọng lặp trong giai đoạn sử dụng (cao hơn từ 16 đến 69% tại cấp tải ứng với chuyển vị = $L/250$). Tuy vậy, tại cấp tải lớn nhất của dầm M0 ($P_{u,M0}$), biến dạng của tấm CFRP trong vùng mô men hằng số của các dầm nhóm C không có nhiều khác biệt so với các dầm tương ứng trong nhóm M (Hình 4.25).



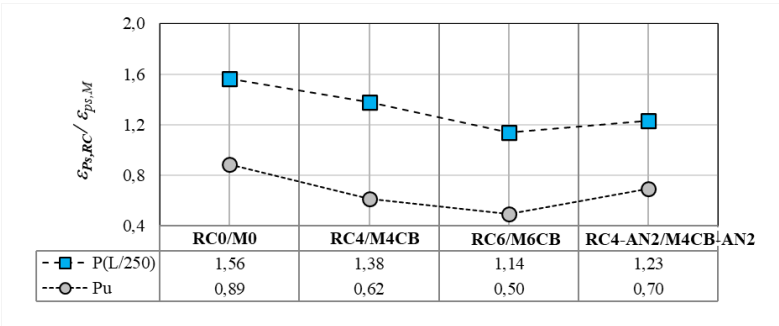
Hình 4.25. Tỷ số biến dạng của tấm CFRP trong các dầm gia cường nhóm C so với các dầm gia cường tương ứng trong nhóm M

4.4. Biến dạng của cáp và ảnh hưởng của tấm CFRP gia cường kháng uốn

4.4.1. Sự khác biệt về biến dạng cáp của dầm nhóm RC so với dầm nhóm M

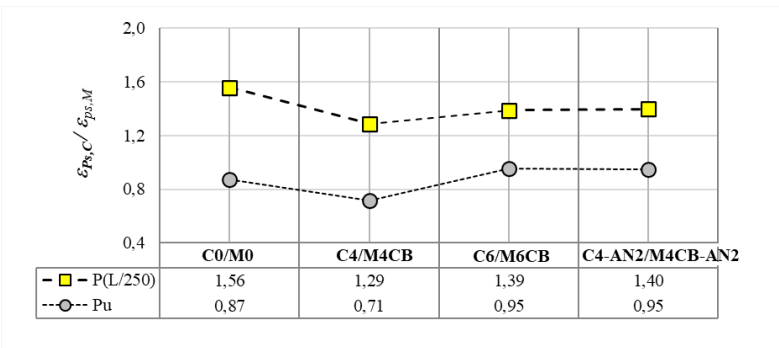
Tại cấp tải tương ứng với chuyển vị = $L/250$ của dầm M0 ($P_{ser,M0}$), biến dạng tăng thêm của cáp trong các dầm RC0, RC4, RC6 và RC4-AN2 lần lượt cao hơn 56%, 38%, 14% và 23% so với các dầm tương ứng trong nhóm M (dầm M0, M4CB,

M6CBC6 và M4CB-AN2) (**Hình 4.29**). Tuy nhiên, tại cấp tải lớn nhất của các dầm thí nghiệm (P_u), biến dạng tăng thêm cực hạn của cáp trong các dầm RC0, RC4, RC6 và RC4-AN2 lần lượt thấp hơn 11%, 38%, 50% và 30% so với các dầm M0, M4CB, M6CB và M4CB-AN2; và cáp trong các dầm nhóm RC vẫn chưa đạt đến giá trị chảy dẻo danh định ngoại trừ dầm RC4-AN2 (**Hình 4.29**).



Hình 4.29. Tỉ số biến dạng của cáp trong các dầm nhóm RC và của các dầm tương ứng trong nhóm M

4.4.2. Sự khác biệt về biến dạng cáp của dầm nhóm C so với dầm nhóm M



Hình 4.32. Tỉ số biến dạng của cáp trong các dầm nhóm C so với dầm nhóm M
 Tại cấp tải tương ứng với chuyển vị $=L/250$ của dầm đối chứng M0 ($P_{ser,M0}$), biến dạng tăng thêm của cáp trong các dầm chịu ảnh hưởng của tải lặp bao gồm dầm C0, C4, C6 và C4-AN2 lần lượt cao hơn 56%, 29%, 39% và 40% so với các dầm không chịu ảnh hưởng của tải lặp tương ứng trong nhóm M (dầm M0, M4CB, M6CB và M4CB-AN2) (**Hình 4.32**). Tuy nhiên, tại cấp tải lớn nhất của các dầm thí nghiệm (P_u), biến dạng tăng thêm cực hạn của cáp trong các dầm C0, C4, C6 và C4-AN2 lần lượt thấp hơn 13%, 29%, 5% và 5% so với các dầm M0, M4CB, M6CB và M4CB-AN2; và cáp trong các dầm C6 và C4-AN2 vượt xa giá trị chảy dẻo danh định (**Hình 4.32**).

CHƯƠNG 5. ĐỀ XUẤT CÔNG THỨC TÍNH BIẾN DẠNG CẤP, MÔ HÌNH VÀ CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH BIẾN DẠNG BONG TÁCH CỦA TẤM CFRP

5.1. Công thức tính biến dạng cấp không bám dính có xét đến ảnh hưởng của tấm CFRP

Công thức xác định biến dạng của cấp không bám dính trong trường hợp dầm BTUST gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP được đề xuất dựa trên công thức xác định biến dạng cấp không bám dính của [118] kết hợp với kết quả phân tích tương quan về biến dạng của cấp với các thông số của tấm gia cường kháng uốn CFRP có dạng đơn giản như sau:

Cho trường hợp dầm không có neo:

$$\Delta\varepsilon_{ps,CFRP} = \psi\varepsilon_c \left(\frac{d_p - c}{L} \right) \times \left(1 + 100 \frac{A_f E_f \varepsilon_{fe}}{A_c E_c \varepsilon_{ffu}} \right)^{0.59} \quad (5.14)$$

Cho trường hợp dầm có neo dạng U (U-wraps):

$$\Delta\varepsilon_{ps,CFRP} = \psi\varepsilon_c \left(\frac{d_p - c}{L} \right) \times \left(1 + 100 \frac{A_f E_f \varepsilon_{fe}}{A_c E_c \varepsilon_{ffu}} \right)^{1.35} \quad (5.15)$$

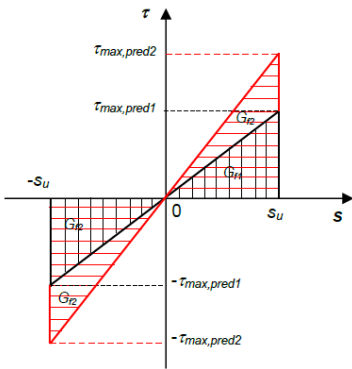
5.2. Mô hình bám dính - trượt cho liên kết tấm CFRP-bê tông trong dầm BTUST dùng cấp không bám dính

5.2.1. Mô hình đề xuất

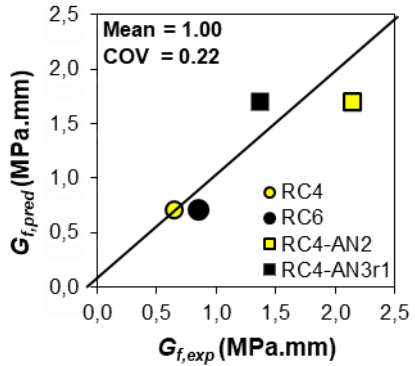
Kết quả phân tích từ thực nghiệm của nghiên cứu này cho thấy quan hệ ứng suất bám dính-trượt của liên kết giữa tấm CFRP và bê tông giữa hai vết nứt điển hình trong vùng mô men hằng số của dầm BTUST dùng cấp không bám dính có dạng như **Hình 5.4**. Cường độ bám dính cực hạn của tấm CFRP cho trường hợp dầm BTUST dùng cấp không bám dính có thể được dự đoán dựa trên công thức đề xuất theo [130] cho trường hợp cấu kiện BTCT được hiệu chỉnh lại như sau:

$$\begin{cases} \tau_{max,pred1} = 0.7k_p \sqrt{f_c f_t} \\ \tau_{max,pred2} = 1.68k_p \sqrt{f_c f_t} \end{cases} \quad (5.17)$$

Kết quả dự đoán năng lượng bong tách của tấm CFRP gia cường cho dầm BTUST dùng cấp không bám dính từ công thức đề xuất cho kết quả sát với thực nghiệm với giá trị Mean = 1.00 và COV = 0.22 (**Hình 5.5**).



Hình 5.4. Mô hình bám dính trượt đề xuất mới



Hình 5.5. So sánh năng lượng bong tách xác định từ công thức dự đoán và từ thực nghiệm

5.3. Công thức tính toán biến dạng bong tách tấm CFRP cho dầm BTUST dùng cáp không bám dính

Ứng suất bong tách lớn nhất của tấm FRP trong dầm gia cường có thể được xác định theo [132] như sau:

$$f_{\max} = b_f \tau_{\max} \sqrt{\frac{t_a E_f t_f}{G_a}} \text{ hoặc } \varepsilon_{\max} = \tau_{\max} \sqrt{\frac{t_a}{G_a E_f t_f}} \quad (5.26)$$

Bên cạnh đó, kết quả nghiên cứu từ thực nghiệm trình bày ở **Chương 3** và **4** cho thấy tại thời điểm phá hoại bong tách, độ võng, biến dạng nén của bê tông và cốt thép của dầm tăng rất nhanh. Lúc này kiểu bong tách tấm trong dầm không thuần túy là dạng II thuần túy, mà chuyển sang dạng kết hợp (dạng I và II) [133], [134]. Từ phương trình (5.26) và kết quả hồi quy tuyến tính từ thực nghiệm, biến dạng bong tách tấm trong dầm BTUST dùng cáp không bám dính gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP có thể được xác định như sau:

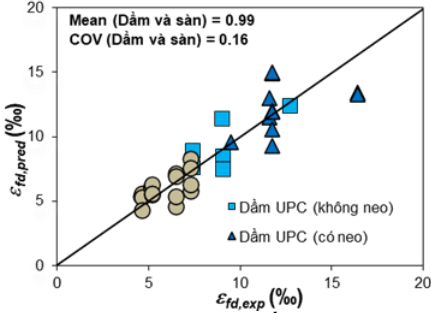
$$\varepsilon_{\max} = \theta \sqrt{\frac{2G_f}{E_f t_f}} \quad (5.29)$$

Công thức dự đoán đề xuất cho kết quả dự đoán sát với thực nghiệm và có độ ổn định cao với giá trị Mean và COV 0.99 và 0.16 (**Hình 5.8**).

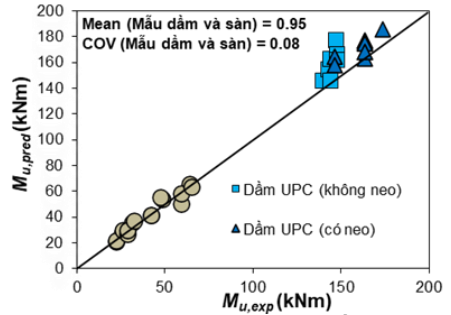
5.4. Kiểm chứng

Tính chính xác của các công thức đã được đề xuất [ct. (5.14), (5.15) và (5.16)] đã được trình bày ở Mục 5.1 và [ct. (5.29)] ở Mục 5.3, được kiểm chứng một lần

nữa dựa trên việc kiểm chứng khả năng kháng uốn của của 33 dầm BTUST dùng cáp không bám dính gia cường bằng tấm CFRP bao gồm 18 dầm trong nghiên cứu này và 15 dầm, sản từ nghiên cứu của [28]. Quy trình tính toán đề xuất cho kết quả sát với thực nghiệm và có độ ổn định cao với giá trị Mean và COV tương ứng 0.95 và 0.08 (Hình 5.9).



Hình 5.8. So sánh biến dạng bong tách tấm CFRP dự đoán từ công thức đề xuất và từ thực nghiệm



Hình 5.9. So sánh mô men uốn cực hạn của công thức dự đoán và thực nghiệm

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

❖ KẾT LUẬN

➤ Đặc tính bám dính của liên kết tấm CFRP - bê tông trong dầm BTUST dùng cáp không bám dính

(1) Biến dạng tấm CFRP trong các dầm thay đổi nhanh, đột ngột và lớn đáng kể ở những điểm gần mép vết nứt so với vùng lân cận của vết nứt, ảnh hưởng mạnh bởi hệ neo CFRP U-wraps. Biến dạng bong tách tấm của dầm đã bị nứt trước khi gia cường thấp hơn so với của dầm nguyên khi gia cường (35-40%).

(2) Các vết nứt làm cho ứng suất bám dính của tấm CFRP trong vùng giữa nhịp dầm phân bố phức tạp, không đều đặn như trong mẫu kéo trượt một mặt và thay đổi liên tục. Quan hệ giữa ứng suất bám dính-độ trượt của tấm trong các vùng nứt điển hình của dầm có dạng xấp xỉ tuyến tính, không có xu hướng mềm hóa.

(3) Biến dạng bong tách của tấm CFRP tính toán từ các hướng dẫn và tiêu chuẩn thiết kế gia cường kết cấu bê tông dùng tấm FRP dán ngoài hiện hành nhỏ hơn rất nhiều so với giá trị biến dạng bong tách của tấm CFRP thực nghiệm cho trường hợp dầm BTUST dùng cáp không bám dính (nhỏ hơn trung bình 41.83%).

➤ Hiệu năng gia cường kháng uốn của tấm CFRP cho dầm BTUST dùng cáp không bám dính

(1) Hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP chịu ảnh hưởng mạnh bởi các yếu tố tình trạng của dầm trước khi gia cường và tính chất của tải trọng trong giai đoạn sử dụng nhưng ít bị tác động hơn ở giai đoạn bền. Ở giai đoạn bền, tấm CFRP làm tăng khả năng kháng uốn của dầm từ 35 đến 41% và mức độ gia tăng này tỉ lệ nghịch với số lớp tấm CFRP. Hệ neo U-wraps ảnh hưởng không rõ nét đến khả năng kháng uốn của dầm trong giai đoạn sử dụng nhưng đáng kể hơn trong giai đoạn bền (tối đa 27% cho dầm nguyên trước khi gia cường, 15% cho dầm nứt trước khi gia cường, xấp xỉ 8% cho dầm ảnh hưởng bởi tải lặp).

(2) Tấm CFRP giúp giảm đáng kể bề rộng vết nứt của dầm cả ở giai đoạn sử dụng và bền; giảm mạnh chuyển vị của dầm trong giai đoạn sử dụng, nhưng tăng mạnh chuyển vị cuối cùng và khả năng hấp thụ năng lượng của dầm. Tình trạng của dầm trước khi gia cường và tính chất của tải trọng ảnh hưởng mạnh đến bề rộng vết nứt, chuyển vị và khả năng hấp thụ năng lượng ở giai đoạn sử dụng nhưng không đáng kể trong giai đoạn bền. Hệ neo U-wraps ảnh hưởng rõ nét đến dạng phá hoại của dầm và giúp tăng đáng kể chuyển vị cuối cùng, khả năng hấp thụ năng lượng và độ dẻo của dầm.

(3) Biến dạng của tấm CFRP trong các dầm đã nứt trước gia cường cao hơn so với các dầm nguyên trước khi gia cường (từ 25-82% trong giai đoạn sử dụng và từ 5-34% trong giai đoạn bền). Tấm CFRP của các dầm chịu ảnh hưởng bởi tải trọng lặp có xu hướng làm việc sớm và biến dạng của nó lớn hơn đáng kể so với của các dầm không chịu ảnh hưởng bởi tải trọng lặp (từ 16-69% trong giai đoạn sử dụng và từ 27-30% trong giai đoạn bền). Hệ neo dạng U-wrap phân bố ở hai đầu dầm phát huy tốt vai trò của chúng trong việc hạn chế sự bong tách sớm của tấm, giúp tăng mạnh biến dạng cuối cùng của tấm CFRP (đến 66%).

(4) Tấm CFRP làm giảm đáng kể biến dạng của cáp trong các dầm gia cường trong giai đoạn sử dụng (từ 7-44%). Biến dạng tăng thêm của cáp trong các dầm bị nứt trước gia cường và chịu ảnh hưởng bởi tải trọng lặp tăng mạnh ở giai đoạn sử dụng (từ 14 đến 56%) nhưng có xu hướng giảm trong giai đoạn bền (từ 5 đến 50%). Sự gia tăng biến dạng cáp lớn nhất trong các dầm gia cường có neo cao hơn so với các dầm không neo (từ 10 đến 65%). Tăng số lớp tấm CFRP gia cường chỉ ảnh hưởng đáng kể đến sự gia tăng biến dạng tăng thêm của cáp đối với nhóm dầm nguyên trước gia cường.

➤ Các công thức đề xuất cho dầm BTUST dùng cáp không bám dính gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP

(1) Kết quả kiểm chứng công thức đề xuất xác định biến dạng của cáp không bám dính xét đến ảnh hưởng của tấm CFRP cho kết quả tốt và có độ ổn định cao thể hiện qua giá trị Mean và hệ số COV của tỉ số giữa mô men kháng uốn xác định từ các công thức dự đoán so với thực nghiệm lần lượt là 0.95 và 0.08.

(2) Mô hình năng lượng bong tách tấm FRP đề xuất cho dầm BTUST dùng cáp không bám dính cho kết quả gần thực nghiệm với giá trị Mean và COV của tỉ số của năng lượng dự đoán từ mô hình tính trên năng lượng thực nghiệm lần lượt là 1.0 và 0.22.

(3) Công thức đề xuất tính biến dạng bong tách tấm CFRP cho dầm BTUST dùng cáp không bám dính không có và có hệ neo dạng U đơn giản, dễ sử dụng và cho kết quả gần với thực nghiệm, ổn định thể hiện qua giá trị Mean và COV của tỉ số giữa biến dạng bong tách từ công thức dự đoán đề xuất với biến dạng bong tách thực nghiệm lần lượt là 0.99 và 0.16.

❖ KIẾN NGHỊ

Luận án này nghiên cứu về hiệu năng gia cường kháng uốn của tấm CFRP cho dầm BTUST dùng cáp không bám dính với các tham số khảo sát tương đối tổng quát bao gồm thay đổi hàm lượng tấm CFRP, tình trạng dầm trước khi gia cường, loại tải trọng và kiểu neo U-CFRP. Tuy nhiên, do sự hạn chế về kinh phí, thiết bị thí nghiệm và thời gian nghiên cứu, nghiên cứu mới chỉ xét đến ảnh hưởng của tải lặp với số chu kỳ hữu hạn, nên chưa đánh giá được hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP một khi dầm ở trạng thái mỏi. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của sự thay đổi ứng suất căng hữu hiệu của cáp không bám dính do các tổn hao ngắn và dài hạn gây nên đến hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP cho dầm, đặc biệt là dầm liên tục vẫn chưa được làm rõ. Để các hiểu biết về ứng xử uốn của dầm BTUST dùng cáp không bám dính gia cường tấm CFRP được đầy đủ hơn, các vấn đề này được kiến nghị cho hướng nghiên cứu tiếp theo.

LỜI CẢM ƠN

Luận án này được thực hiện tại Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG TP.HCM dưới sự đồng hướng dẫn của PGS. TS. Nguyễn Minh Long và PGS. TS. Ngô Hữu Cường. Các nghiên cứu được trình bày trong luận án này được tài trợ một phần kinh phí bởi đề tài NCKH cấp Quốc Gia mã số 14/2018/HĐ-KHCN-TNB.ĐT/11-19/C26 thuộc Chương trình Tây Nam Bộ, Đại học Mở Thành Phố Hồ Chí Minh với Đề tài mã số E2016.6.6.1 và Trường Đại học Bách Khoa TP. HCM với Đề tài mã số TNCS-KTXD-2016-14. Tôi xin trân trọng cảm ơn PGS. TS. Nguyễn Minh Long, PGS. TS. Ngô Hữu Cường, Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Phòng Đào tạo Sau đại học và các nhân viên tại phòng thí nghiệm Kết cấu công trình (BKSEL) đã tận tình chỉ bảo, hướng dẫn tôi trong suốt quá trình làm nghiên cứu sinh và đặc biệt hướng dẫn tôi viết Luận án Tiến sĩ này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] CNR DT200R1/2013, “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures - materials, RC and PC structures, masonry structures.” Rome, Italia, 2013.
- [2] ACI 440.2R-17, *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2017.
- [3] J. F. Chen and J. G. Teng, “Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 127, no. 7, pp. 784–791, 2001.
- [4] J. G. Teng, S. T. Smith, J. Yao, and J. F. Chen, “Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs,” *Construction and Building Materials*, vol. 17, no. 6–7, pp. 447–462, 2003.
- [5] C. Bakis *et al.*, “Fiber-reinforced polymer composites for construction-state-of-the-art review,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 6, no. 2, pp. 73–87, 2002, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73).
- [6] J. G. Teng, J. F. Chen, S. T. Smith, and L. Lam, *FRP: strengthened RC structures*. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley and Sons, 2002.
- [7] Z. Wu, X. Wang, and K. Iwashita, “State-of-the-art of advanced FRP applications in civil infrastructure in Japan,” *Composites and Polycon*, vol. 37, pp. 1–17, 2007.
- [8] H. Toutanji, Y. Deng, Y. Zhang, M. Jia, and P. Balaguru, “Static and fatigue performances of RC beams strengthened with carbon fiber sheets bonded by inorganic matrix,” Soc. for the Advancement of Material and Process Engineering, 2002.
- [9] L. C. Bank, *Composites for construction: structural design with FRP materials*. John Wiley & Sons, 2006.
- [10] X. L. Zhao and L. Zhang, “State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures,” *Engineering Structures*, vol. 29, no. 8, pp. 1808–1823, 2007.
- [11] H. Saadatmanesh and M. R. Ehsani, “RC beams strengthened with GFRP plates. I: Experimental study,” *Journal of Structural Engineer*, vol. 117, no. 11, pp. 3417–3433, 1991.
- [12] T. C. Triantafillou and N. Plevris, “Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials,” *Materials and Structures*, vol. 25, no. 4, pp. 201–211, 1992.
- [13] A. Nanni, “CFRP strengthening,” *Concrete International*, vol. 19, pp. 19–23, 1997.
- [14] A. Nanni, “Concrete repair with externally bonded FRP reinforcement,” *Concrete International*, vol. 17, no. 6, pp. 22–26, 1995.
- [15] O. Rabinovitch and Y. Frostig, “Experiments and analytical comparison of RC beams strengthened with CFRP composites,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 34, no. 8, pp. 663–677, 2003.
- [16] N. Attari, S. Amziane, and M. Chemrouk, “Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets,” *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 746–757, 2012.
- [17] R. Kotynia, H. Abdel Baky, K. W. Neale, and U. A. Ebead, “Flexural strengthening of RC beams with externally bonded CFRP systems: Test results and 3D nonlinear FE analysis,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 12, no. 2, pp. 190–201, 2008.
- [18] C. E. Reed and R. J. Peterman, “Evaluation of prestressed concrete girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 185–192, 2004.
- [19] O. Rosenboom, C. Walter, and S. Rizkalla, “Strengthening of prestressed concrete girders with composites: Installation, design and inspection,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 4, pp. 1495–1507, 2009.
- [20] Y. J. Kim, M. F. Green, and G. J. Fallis, “Repair of bridge girder damaged by impact loads with prestressed CFRP sheets,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 15–23, Jan. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:1(15).
- [21] M. di Ludovico, A. Prota, G. Manfredi, and E. Cosenza, “FRP strengthening of full-scale PC girders,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 14, no. 5, pp. 510–520, 2010.
- [22] J. L. Kasan, K. A. Harries, R. Miller, and R. J. Brinkman, “Limits of application of externally bonded CFRP repairs for impact-damaged prestressed concrete girders,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 18, no. 3, Jun. 2014, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000347.
- [23] T. T. D. Nguyen, K. Matsumoto, Y. Sato, I. Asami, T. Tsustumi, and J. Niwa, “Effects of externally bonded CFRP sheets on flexural strengthening of pretensioned prestressed concrete beams having ruptured strands,” *Journal of JSCE*, vol. 2, no. 1, pp. 25–38, 2014.
- [24] H. M. Afefy, K. Sennah, M. Asce, and A. Cofini, “Retrofitting actual-size precracked precast prestressed concrete double-Tee girders using externally bonded CFRP sheets,” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 30, no. 2, pp. 1–18, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000763.

- [25] V. Pino, A. Nanni, D. Arboleda, C. Roberts-Wollmann, and T. Cousins, "Repair of damaged prestressed concrete girders with FRP and FRCM composites," *Journal of Composites for Construction*, vol. 21, no. 3, p. 4016111, 2017.
- [26] O. Rosenboom, T. K. Hassan, and S. Rizkalla, "Flexural behavior of aged prestressed concrete girders strengthened with various FRP systems," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 4, pp. 764–776, 2007.
- [27] P. R. Chakrabari, "Behavior of un-bonded post-tensioned beams repaired and retrofitted with composite materials," in *In Structures Congress 2005: Metropolis and Beyond*, 2005, pp. 1–11.
- [28] F. el Meski and M. Harajli, "Flexural behavior of unbonded posttensioned concrete members strengthened using external FRP composites," *Journal of Composites for Construction*, vol. 17, no. 2, pp. 197–207, 2013.
- [29] F. el Meski and M. Harajli, "Evaluation of the Flexural Response of CFRP-Strengthened Unbonded Posttensioned Members," *Journal of Composites for Construction*, vol. 19, no. 3, p. 04014052, Jun. 2015, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000516.
- [30] S. Ghasemi, A. Akbar Maghsoudi, H. Akbarzadeh Bengar, and H. Reza Ronagh, "Sagging and hogging strengthening of continuous unbonded posttensioned HSC beams by NSM and EBR," *Journal of Composites for Construction*, vol. 20, no. 2, p. 04015056, Apr. 2016, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000621.
- [31] F. Oudah and R. El-Hacha, "Research progress on the fatigue performance of RC beams strengthened in flexure using Fiber Reinforced Polymers," *Composites Part B: Engineering*, vol. 47, pp. 82–95, 2013.
- [32] K. H. Larson, R. J. Peterman, and H. A. Rasheed, "Strength-fatigue behavior of fiber reinforced polymer strengthened prestressed concrete T-beams," *Journal of Composites for Construction*, vol. 9, no. 4, pp. 313–326, 2005.
- [33] G. Spadea, F. Bencardino, and R. N. Swamy, "Structural Behavior of Composite RC Beams with Externally Bonded CFRP," *Journal of Composites for Construction*, vol. 2, no. 3, pp. 132–137, 1998.
- [34] S. F. Breña, R. M. Bramblett, S. L. Wood, and M. E. Kreger, "Increasing flexural capacity of reinforced concrete beams using carbon fiber-reinforced polymer composites," *ACI Structural Journal*, vol. 100, no. 1, pp. 36–46, 2003.
- [35] O. Buyukozturk, O. Gunes, and E. Karaca, "Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites," *Construction and Building Materials*, vol. 18, no. 1, pp. 9–19, 2004.
- [36] H. N. Garden and L. C. Hollaway, "An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams," *Composite Structures*, vol. 42, no. 2, pp. 175–188, 1998.
- [37] A. Hasnat, M. M. Islam, and A. F. M. S. Amin, "Enhancing the Debonding Strain Limit for CFRP-Strengthened RC Beams Using U-Clamps: Identification of Design Parameters," *Journal of Composites for Construction*, vol. 20, no. 1, pp. 1–16, 2016.
- [38] X. Li, X. Gu, X. Song, Y. Ouyang, and Z. Feng, "Contribution of U-shaped strips to the flexural capacity of low-strength reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre composite sheets," *Composites Part B: Engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 117–126, 2013.
- [39] M. J. Chajes, W. W. Finch, T. F. Januszka, and T. A. Thomson, "Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete," *ACI Structural Journal*, vol. 93, no. 2, pp. 209–217, Mar. 1996.
- [40] Y. Sato, K. Kimura, and Y. Kobatake, "Bond behavior between CFRP sheet and concrete (part 1)," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 500, pp. 75–82, 1997.
- [41] L. Bizindavyi and K. W. Neale, "Transfer lengths and bond strengths for composites bonded to concrete," *Journal of Composites for Construction*, vol. 3, no. 4, pp. 153–160, 1999.
- [42] K. Broens and D. van Gemert, "Plate end shear design for external CFRP laminates," in *AEDIFICATIO Publishers, Fracture Mechanics of Concrete Structures*, (3), 1998, pp. 1793–1804.
- [43] J. Yao, J. G. Teng, and J. F. Chen, "Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints," *Composites Part B: Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 99–113, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.compositesb.2004.06.001.
- [44] J. Dai, Y. Sato, and T. Ueda, "Improving the load transfer and effective bond length for FRP composites bonded to concrete," in *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 24(1), 2002, pp. 1423–1428.
- [45] J. Dai, T. Ueda, and Y. Sato, "Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method," *Journal of Composites for Construction*, vol. 9, no. 1, pp. 52–62, Feb. 2005, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:1(52).

- [46] C. Mazzotti, M. Savoia, and B. Ferracuti, "A new single-shear set-up for stable debonding of FRP-concrete joints," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 4, pp. 1529–1537, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.04.003.
- [47] C. Mazzotti, M. Savoia, and B. Ferracuti, "An experimental study on delamination of FRP plates bonded to concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 7, pp. 1409–1421, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.04.009.
- [48] B. Ferracuti, M. Savoia, and C. Mazzotti, "Interface law for FRP-concrete delamination," *Composite Structures*, vol. 80, no. 4, pp. 523–531, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.compstruct.2006.07.001.
- [49] L. de Lorenzis, B. Miller, and A. Nanni, "Bond of FRP laminates to concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 98, no. 3, pp. 256–264, 2001.
- [50] C. Pellegrino, D. Tinazzi, and C. Modena, "Experimental study on bond behavior between concrete and FRP reinforcement," *Journal of Composites for Construction*, vol. 12, no. 2, pp. 180–189, Apr. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:2(180).
- [51] Fib Model Code 2010, "fib Model Code for Concrete Structures 2010." CH-1015 Lausanne, Switzerland, 2013.
- [52] TR55, "Design guidance for strengthening concrete structures with fibre composite materials," 2, 2012.
- [53] J. G. Teng, X. Z. Lu, L. P. Ye, and J. J. Jiang, "Recent research on intermediate crack debonding in FRP-strengthened RC beams," 2004.
- [54] H. Pham and R. Al-Mahaidi, "Experimental investigation into flexural retrofitting of reinforced concrete bridge beams using FRP composites," *Composite Structures*, vol. 66, no. 1–4, pp. 617–625, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.compstruct.2004.05.010.
- [55] O. Rosenboom and S. Rizkalla, "Behavior of prestressed concrete strengthened with various CFRP systems subjected to fatigue loading," *Journal of Composites for Construction*, vol. 10, no. 6, pp. 492–502, 2006.
- [56] A. Nanni, "Composites: Coming on Strong," *Concrete Construction*, vol. 44, p. 120, 1999.
- [57] ACI Committee 440, "State-of-the-art report on fiber reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures (ACI 440R-96)." American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 1996.
- [58] D. J. Oehlers and J. P. Moran, "Premature failure of externally plated reinforced concrete beams," *Journal of Structural Engineering*, vol. 116, no. 4, pp. 978–995, 1990.
- [59] ISIS Canada, *Design manual No. 3, reinforcing concrete structures with fibre reinforced polymers*. Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, Winnipeg, Manitoba, 2007.
- [60] CSA (Canadian Standards Association), "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers (Reaffirmed 2007)," *CSA S806-02*, no. Reaffirmed. Canadian Standards Association, Ontario, Canada, 2002.
- [61] International Federation for Structural Concrete (fib), "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, Technical report on the Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures," vol. 14. CH-1015 Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib) as Bulletin 14, 2001.
- [62] L. Nguyen-Minh, P. Phan-Vu, D. Tran-Thanh, Q. P. T. Truong, T. M. Pham, C. Ngo-Huu, and M. Rovňák, "Flexural-strengthening efficiency of cfrp sheets for unbonded post-tensioned concrete T-beams," *Engineering Structures*, vol. 166, pp. 1–15, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.03.065.
- [63] D. T. Tran, P. Phan-Vu, T. M. Pham, T. D. Dang, and L. Nguyen-Minh, "Repeated and post-repeated flexural behavior of unbonded post-tensioned concrete T-beams strengthened with CFRP sheets," *Journal of Composites for Construction*, vol. 24, no. 2, p. 04019064, Apr. 2020, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000996.
- [64] B. Ferracuti, M. Savoia, and C. Mazzotti, "A numerical model for FRP-concrete delamination," *Composites Part B: Engineering*, vol. 37, no. 4–5, pp. 356–364, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.compositesb.2005.08.002.
- [65] K. Brosens, "Anchorage of externally bonded steel plates and CFRP laminates for the strengthening of concrete elements," 2001.
- [66] K. Brosens and D. van Gemert, "Anchoring stresses between concrete and carbon fibre reinforced laminates," in *In Composite constructive-conventional and innovative*, 1997, pp. 181–186.
- [67] T. Maeda, "A study on bond mechanism of carbon fiber sheet," *FRPTCS3*, vol. 1, pp. 279–286, 1997.
- [68] K. Nakaba, T. Kanakubo, T. Furuta, and H. Yoshizawa, "Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete," *ACI Structural Journal*, vol. 98, no. 3, pp. 359–367, May 2001.

- [69] S. Popovics, "A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 3, pp. 583–599, 1973.
- [70] T. Sato, Y. Asano, and T. Ueda, "Fundamental study on bond mechanism of carbon fiber sheet," *Concrete Library International, JSCE*, vol. 37, pp. 97–115, 2001.
- [71] T. Ueda and J. G. Dai, "Interface bond between FRP sheets and concrete substrates: properties, numerical modeling and roles in member behaviour," *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 7, no. 1, pp. 27–43, 2005.
- [72] H. Yoshizawa, Z. Wu, H. Yuan, and T. Kanakubo, "Study on FRP–concrete interface bond performance," *Doboku Gakkai Ronbunshu*, vol. 662, no. 49, pp. 105–119, 2000.
- [73] U. Neubauer and F. S. Rostasy, "Bond failure of concrete fiber reinforced polymer plates at inclined cracks experiments and fracture mechanics model," *Special Publication*, vol. 188, pp. 369–382, Aug. 1999.
- [74] U. Neubauer and F. S. Rostasy, "Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP plates," in *Proc., 7th Int. Conf. on Struct. Faults and Repairs, ECS Publications, Edinburgh, Scotland, 2*, 1997, pp. 109–118.
- [75] O. Holzenkammer, "Ingenieurmodelle des Verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile," *Dissertation, TU Braunschweig, German*. German, 1994.
- [76] J. F. Chen, H. Yuan, and J. G. Teng, "Debonding failure along a softening FRP-to-concrete interface between two adjacent cracks in concrete members," *Engineering Structures*, vol. 29, pp. 259–270, 2007.
- [77] J. G. Teng, H. Yuan, and J. F. Chen, "FRP-to-concrete interfaces between two adjacent cracks: Theoretical model for debonding failure," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 43, pp. 5750–5778, 2006.
- [78] A. Yuan, H. Dai, D. Sun, and J. Cai, "Behaviors of segmental concrete box beams with internal tendons and external tendons under bending," *Engineering Structures*, vol. 48, pp. 623–634, 2013.
- [79] H. Yuan, J. G. Teng, R. Seracino, Z. S. Wu, and J. Yao, "Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints," *Engineering Structures*, vol. 26, no. 5, pp. 553–565, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.engstruct.2003.11.006.
- [80] H. Yuan, Z. S. Wu, and H. Yoshizawa, "Theoretical solutions on interfacial stress transfer of externally bonded steel/composite laminates," *J. Struct. Mech. and Earthquake Engrg.*, 2001.
- [81] X. Z. Lu, J. G. Teng, L. P. Ye, and J. J. Jiang, "Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete," *Engineering Structures*, vol. 27, no. 6, pp. 920–937, May 2005, doi: 10.1016/j.engstruct.2005.01.014.
- [82] K. Liu and Y. F. Wu, "Analytical identification of bond–slip relationship of EB-FRP joints," *Composites: Part B*, vol. 43:1955–63, 2012.
- [83] Y. W. Zhou, Y. F. Wu, and Y. Yun, "Analytical modeling of the bond–slip relationship at FRP–concrete interfaces for adhesively-bonded joints," *Composites: Part B*, vol. 41, pp. 423–33, 2010.
- [84] C. H. Biscaia, C. Chastre, and M. A. G. Silva, "Linear and nonlinear analysis of bond-slip models for interfaces between FRP composites and concrete," *Composites: Part B*, vol. 45, pp. 1554–1568, 2013.
- [85] M. Savoia, B. Ferracuti, and C. Mazzotti, "Non linear bond-slip law for FRP-concrete interface," in *In Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures: (In 2 Volumes)*, Jun. 2003, pp. 163–172. doi: 10.1142/9789812704863_0013.
- [86] Y. Hiroyuki and Z. Wu, "Analysis of debonding fracture properties of CFS strengthened member subject to tension," in *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Struct., Proc., 3rd Int. Symp., Japan Concrete Institute, Sapporo, 1*, 1997, pp. 287–294.
- [87] Y. Sato, T. Ueda, Y. Kakuta, and T. Tanaka, "Shear reinforcing effect of carbon fiber sheet attached to side of reinforced concrete beams," 1996.
- [88] T. Tanaka, "Shear resisting mechanism of reinforced concrete beams with CFS as shear reinforcement," 1996.
- [89] T. Maeda, Y. Asano, Y. Sato, T. Ueda, and Y. Kakuta, "A study on bond mechanism of carbon fiber sheet," in *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Struct., Proc., 3rd Int. Symp., Japan Concrete Institute, Sapporo, 1*, 1997, pp. 279–285.
- [90] A. Khalifa, W. J. Gold, A. Nanni, and A. Aziz, "Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members," *J. Compos. for Constr., ASCE*, vol. 2, no. 4, pp. 195–203, 1998.
- [91] Japan Concrete Institute (JCI), "Technical report of technical committee on retrofit technology," 2003.
- [92] J. Yang, J. Ye, and Z. Niu, "Interfacial shear stress in FRP-plated RC beams under symmetric loads," *Cement and concrete composites*, vol. 29, no. 5, pp. 421–432, 2007.
- [93] B. Täljsten, "Plate bonding: Strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fibre reinforced plastics," 1994.

- [94] H. Yuan and Z. Wu, "Interfacial fracture theory in structures strengthened with composite of continuous fiber," in *Proc., Symp. of China and Japan: Sci. and Technol. of 21st Century, Tokyo, Sept.*, 1999, pp. 142–155.
- [95] T. Kanakubo, T. Futura, and H. Fukuyama, "Bond strength between fiber-reinforced polymer laminates and concrete," in *6th International Conference on FRP Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-6*, 2003, pp. 133–142.
- [96] H. v GangaRao and P. v Vijay, "Bending behavior of concrete beams wrapped with carbon fabric," *Journal of structural engineering*, vol. 124, no. 1, pp. 3–10, 1998.
- [97] B. S. I. BS8110, "Part 1, Code of practice for design and construction, structural use of concrete." London: British Standards Institution, 1997.
- [98] A. ElSafty, M. K. Graeff, and S. Fallaha, "Behavior of Laterally Damaged Prestressed Concrete Bridge Girders Repaired with CFRP Laminates Under Static and Fatigue Loading," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 8, no. 1, pp. 43–59, 2014.
- [99] M. Arduini and A. Nanni, "Behavior of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets," *Journal of composites for construction*, vol. 1, no. 2, pp. 63–70, 1997.
- [100] B. Y. Bahn and R. S. Harichandran, "Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Sheets and Epoxy Mortar," *Journal of Composites for Construction*, vol. 12, no. 4, pp. 387–395, Aug. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:4(387).
- [101] H. R. Sobuz, E. Ahmed, M. A. Uddin, N. M. Sadiqu, Hasan, and M. J. Uddin, "Structural strengthening of RC beams externally bonded with different CFRP laminates configurations," *Journal of Civil Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 33–47, 2011, [Online]. Available: <http://www.concrete.org/Publications/InternationalConcreteAbstractsPortal.aspx?m=details&i=11534>
- [102] A. Ali, J. Abdalla, R. Hawileh, and K. Galal, "CFRP mechanical anchorage for externally strengthened RC beams under flexure," in *Physics Procedia*, 2014, vol. 55, pp. 10–16. doi: 10.1016/j.phpro.2014.07.002.
- [103] ACI Committee, *ACI 440.2R-08: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures*. USA: Farmington Hills, 2008.
- [104] ACI 318-14, *Building Code Requirements for Structural Concrete*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2014.
- [105] TCVN 3105:1993, "Hỗn hợp bê tông nặng và bê tông nặng - Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử." Viện Tiêu chuẩn chất lượng Việt Nam, 1993.
- [106] TCVN 1651-1:2008, "Thép cốt bê tông." Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam, 2008.
- [107] TCVN 5574:2012, "Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép – Tiêu chuẩn thiết kế." Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng – Bộ Xây dựng, Việt Nam, 2012.
- [108] ASTM International, "ASTM A416 - Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed." ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2016.
- [109] ACI 318M-14, "Building Code Requirements for Structural Concrete." *American Concrete Institute*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, p. 519, 2015. doi: 10.1016/0262-5075(85)90032-6.
- [110] CEN (European Committee for Standardization), "Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings," *Eurocode 2*. Brussels, 2004.
- [111] R. J. de F. M. Carneiro and G. S. S. de A. Melo, "Analytical Model for CFRP-Strengthened Prestressed Concrete Girders Subject to Cyclic Loading," *Journal of Composites for Construction*, no. October, p. 4015072, 2011, doi: 10.1061/(ASCE)CC.
- [112] A. Miller, O. Rosenboom, and S. Rizkalla, "Fatigue Behavior of Impact Damaged Prestressed Concrete Bridge Girder Repaired With Cfrp Sheets," in *7th International Conference on Short and Medium Span Bridges*, 2006, pp. 1–10.
- [113] H. Ko, S. Matthys, A. Palmieri, and Y. Sato, "Development of a simplified bond stress-slip model for bonded FRP-concrete interfaces," *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 142–157, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.037.
- [114] M. H. Harajli and A. E. Naaman, "Static and fatigue tests on partially prestressed beams," *Journal of Structural Engineering*, vol. 111, no. 7, pp. 1602–1618, 1985.
- [115] AASHTO, *AASHTO LRFD bridge design specification-U.S. unit*, 6th ed. Washington, DC, 2012. doi: 978-1-56051-523-4.
- [116] K. Soudki and T. Alkhrdaji, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-02)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2005, pp. 1627–1633. doi: 10.1061/40753(171)159.
- [117] F. N. Pannell, "The ultimate moment of resistance of unbonded prestressed concrete beams," *Magazine of concrete research*, vol. 21, no. 66, pp. 43–54, 1969.

- [118] A. Tam and F. N. Pannell, "Ultimate Moment of Resistance of Unbonded Partially Prestressed Reinforced-Concrete Beams," *Magazine of Concrete Research*, vol. 28, no. 97, pp. 203–208, 1976.
- [119] F. T. K. Au and J. S. Du, "Prediction of ultimate stress in unbonded prestressed tendons," *Magazine of Concrete Research*, vol. 56, no. 1, pp. 1–11, 2004.
- [120] A. L. L. Baker, "A plastic theory of design for ordinary reinforced and prestressed concrete including moment re-distribution in continuous members," *Magazine of Concrete Research*, vol. 1, no. 2, pp. 57–66, 1949.
- [121] F. W. Gifford, "The Design of Simply Supported Prestressed Concrete Beams for Ultimate Loads," in *Proceedings, Institution of Civil Engineers (London), Part III, V. 3, No. 1*, 1954, pp. 125–143.
- [122] J. R. Janney, E. Hognestad, and D. McHenry, "Ultimate flexural strength of prestressed and conventionally reinforced concrete beams," *Journal of American Concrete Institute*, vol. 52, no. 6, pp. 601–620, 1956.
- [123] J. Warwaruk, M. A. Sozen, and C. P. Siess, *Strength and behavior in flexure of prestressed concrete beams*. 1962.
- [124] A. H. Mattock, J. Yamazaki, and B. T. Kattula, "Comparative study of prestressed concrete beams with and without bond," *ACI Journal*, vol. 68, no. 2, pp. 116–125, 1971.
- [125] ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-63)." American Concrete Institute, Detroit, p. 144, 1963.
- [126] S. Mojtahedi and W. L. Gamble, "Ultimate steel stresses in unbonded prestressed concrete," *Journal of the Structural Division*, vol. 104, no. 7, pp. 1159–1164, 1978.
- [127] ACI Committee, "Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71)." 1971.
- [128] M. Maguire, M. Chang, W. N. Collins, and Y. Sun, "Stress Increase of Unbonded Tendons in Continuous Posttensioned Members," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 22, no. 2, p. 4016115, 2017.
- [129] G. Monti, M. Renzelli, and P. Luciani, "FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones," in *In Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures: (In 2 Volumes)*, 2003, pp. 183–192.
- [130] CNR-DT 200/2004, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures (CNR-DT 200/2004)*. Rome, Italia, 2005.
- [131] O. Rosenboom and S. Rizkalla, "Analytical Modeling of Flexural Debonding in CFRP Strengthened Reinforced or Prestressed Concrete Beams," in *Proceedings of the 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8)*, 2007, pp. 1–10.
- [132] Z. Wu and H. Niu, "Shear transfer along FRP/concrete interface in flexural members," *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE*, vol. 49, no. 662, pp. 231–245, 2000.
- [133] L. de Lorenzis and G. Zavarise, "Modeling of mixed-mode debonding in the peel test applied to superficial reinforcements," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 45, no. 20, pp. 5419–5436, 2008.
- [134] Z. Suo and W. H. John, "Interface crack between two elastic layers," *International Journal of Fracture*, vol. 43, no. 1, pp. 1–18, 1990.