

KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA CƯỜNG ĐỘ BÊ TÔNG ĐẾN BẮM ĐÍNH GIỮA TẤM SỢI COMPOSITE CFRP VÀ BỀ MẶT BÊ TÔNG

Trần Xuân Vinh^{a,*}, Nguyễn Trung Hiếu^b, Phạm Xuân Đạt^b

^aKhoa Xây dựng, Trường Đại học Vinh, 182 Lê Duẩn, thành Phố Vinh, tỉnh Nghệ An, Việt Nam

^bKhoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 19/6/2023, Sửa xong 04/8/2023, Chấp nhận đăng 09/8/2023

Tóm tắt

Trong việc sử dụng tấm sợi composite gốc các bon (Carbon Fiber Reinforced Polymer-CFRP) để gia cường kết cấu bê tông cốt thép, lực bám dính giữa tấm FRP và bề mặt bê tông là yếu tố quan trọng nhất quyết định đến hiệu quả gia cường. Nội dung bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm khảo sát ảnh hưởng của cường độ bê tông đến sự bám dính giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông. 03 nhóm mẫu bê tông có cường độ chịu nén lần lượt bằng 20 MPa, 27 MPa, 36 MPa được lựa chọn. Một mô hình thí nghiệm kéo trượt được xây dựng cho phép xác định được lực tối hạn gây phá hoại liên kết giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông. Dựa trên kết quả thí nghiệm cho thấy: (1) sự phá hoại bề mặt liên kết phụ thuộc vào chất lượng (cường độ) bê tông. Sự phá hoại xảy ra vào sâu lớp bê tông ở bề mặt với nhóm mẫu cường độ bê tông 20 MPa và 27 MPa, sự phá hoại chủ yếu xảy ra ở bề mặt tiếp xúc giữa tấm CFRP và bê tông đối với nhóm mẫu có cường độ 36 MPa; (2) Lực bám dính giữa tấm CFRP và bê tông tỉ lệ thuận với cường độ bê tông. Tuy nhiên, khi cường độ bê tông đủ lớn thì sự bám dính giữa tấm CFRP và bê tông sẽ bị ảnh hưởng bởi cường độ của keo epoxy.

Từ khóa: gia cường; tấm sợi composite; bê tông; bám dính; thí nghiệm kéo trượt.

INVESTIGATION ON THE INFLUENCE OF CONCRETE STRENGTH ON THE BOND STRENGTH BETWEEN CFRP SHEETS AND CONCRETE SUBSTRATES

Abstract

In the application of carbon fiber composite sheets (Carbon Fiber Reinforced Polymer-CFRP) to enhance reinforced concrete structures, the bond strength between the CFRP sheets and concrete members plays a crucial role in determining the capacity of the strengthened structures. The paper present an experimental investigation on the influence of concrete compressive strength on the bonding strength between CFRP sheets and concrete substrates. Three groups of specimens with concrete compressive strengths of 20 MPa, 27 MPa, and 36 MPa were prepared. A near-end supported single-shear test was employed to determine the ultimate load that causes debonding between CFRP sheets and concrete substrates. The experimental results revealed the following: (1) Debonding failures depends on the quality (compressive strength) of concrete. Two groups of specimen with concrete compressive strengths of 20 MPa and 27 MPa, damage occurs deep into the concrete cover, otherwise, the specimens with the concrete compressive strength of 36 MPa, damage occurs at the contact surface between CFRP sheets and concrete substrates; (2) The bonding load between CFRP sheets and concrete substrates is proportional to the concrete strength. However, when the concrete strength is sufficiently high, the bonding between the CFRP sheet and the concrete will be influenced by the strength of the epoxy adhesive used.

Keywords: strengthening; composite sheets; concrete; bonding; pull-out test.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(4V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(4V)-02) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Đặt vấn đề

Trong nhiều thập kỉ qua, giải pháp gia cường kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) sử dụng tấm sợi composite Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) bám dính ngoài ngày càng được áp dụng phổ

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: xuanvinhkxd@vinhuni.edu.vn (Vinh, T. X.)

biến [1, 2]. Giải pháp sử dụng tấm CFRP bám dính ngoài có nhiều tính ưu việt hơn các phương pháp gia cường truyền thống như: không làm tăng tĩnh tải kết cấu, không làm thay đổi hình dạng kích thước kết cấu, thời gian thi công nhanh, và chống được các tác động ăn mòn từ môi trường. Hiệu quả của giải pháp này đã được chứng minh qua nhiều nghiên cứu trước đây [3–8]. Nhiều nghiên cứu cho thấy các kết cấu gia cường sử dụng giải pháp tấm sợi CFRP, dạng phá hoại do bong tách giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông là dạng phá hủy điển hình và ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả gia cường của kết cấu, đặc biệt là trong gia cường dầm BTCT [9–12]. Do đó, việc xác định chính xác cường độ bám dính giữa tấm CFRP và bê tông sẽ giúp quá trình tính toán thiết kế đảm bảo tính kỹ thuật và tính kinh tế hơn. Chen và Teng [13] đã phân loại các dạng phá hoại do bong tách thành sáu dạng như sau: (1) Phá hủy bề mặt bê tông; (2) Tấm FRP bị kéo đứt; (3) Phá hủy lớp keo bám dính; (4) Tấm FRP bị bong tách; (5) Phá hủy bề mặt tiếp xúc giữa bê tông và lớp keo; (6) Phá hủy bề mặt tiếp xúc giữa tấm FRP và lớp keo. Một số nghiên cứu thực nghiệm về cường độ bám dính giữa tấm FRP và bê tông đã được thực hiện với các mô hình thí nghiệm khác nhau, như: thí nghiệm kéo trượt một mặt [14–18], thí nghiệm kéo trượt hai mặt [19–23], thí nghiệm uốn có hiệu chỉnh [24, 25].

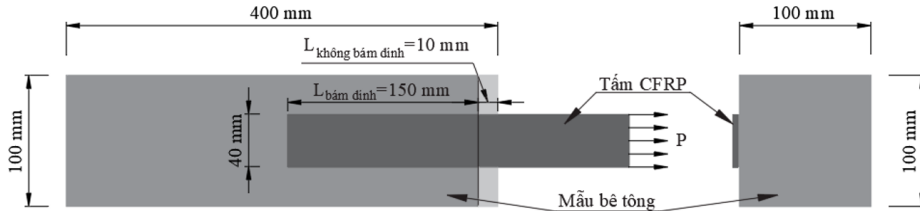
Tấm CFRP thường được ưu tiên sử dụng gia cường kháng uốn cho kết cấu BTCT. Hiệu quả gia cường kháng uốn cho kết cấu BTCT chịu ảnh hưởng đáng kể của cường độ bám dính giữa tấm CFRP và bê tông. Việc xác định rõ hơn cường độ bám dính giữa tấm CFRP và bê tông là điều cần thiết cho quá trình thiết kế. Cho đến nay, mặc dù đã có nhiều mô hình được đề xuất để xác định cường độ bám dính giữa tấm FRP và bê tông. Tuy nhiên, phần lớn các mô hình đều được xây dựng từ các bộ dữ liệu thí nghiệm thu thập được và phạm vi áp dụng khá rộng [13, 26–28]. Trong khi đó, ứng xử bám dính của tấm FRP và bê tông có độ nhạy lớn và chịu sự ảnh hưởng đáng kể của chất lượng lớp bê tông bề mặt.

Trong nghiên cứu này trình bày kết quả khảo sát thực nghiệm nhằm làm rõ ảnh hưởng của cường độ bê tông đến cường độ bám dính giữa tấm CFRP và bê tông. Một mô hình thí nghiệm kéo trượt đơn được xây dựng. 03 nhóm cường độ bê tông, với các giá trị cường độ được sử dụng phổ biến trong thực tế xây dựng hiện nay, được lựa chọn để khảo sát tương ứng với 09 mẫu thí nghiệm. Kết quả thí nghiệm đồng thời được so sánh với một số mô hình dự báo do một số tác giả đề xuất nhằm đánh giá khả năng và phạm vi áp dụng của các mô hình.

2. Mẫu thí nghiệm và vật liệu chế tạo

2.1. Mẫu thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, 09 mẫu hình lăng trụ bê tông có kích thước $100 \times 100 \times 400$ mm được chế tạo. Tấm CFRP có bề rộng (b_{CFRP}) 40 mm, chiều dài bám dính của tấm CFRP và mẫu bê tông (L_{CFRP}) 150 mm. Mẫu bê tông sau 28 ngày tuổi được gia công làm sạch bề mặt và quét keo nền, tấm CFRP được tẩm keo epoxy và dán vào mặt bê tông được gia công với chiều dài bám dính 15 cm. Giá trị chiều dài bám dính này được lựa chọn lớn hơn giá trị quy định về chiều dài bám dính được nêu trong ACI 440.2R-17 [29]. Chi tiết kích thước hình học của mẫu thí nghiệm và quy cách tấm CFRP được trình bày trên Hình 1. Để tránh hiện tượng phá hủy cục bộ của bê tông ở vùng cạnh (mép) mẫu, 01 đoạn không bám dính có chiều dài 10 mm được tạo ra bằng cách dán lên bề mặt bê tông ở vùng này một lớp băng dính mỏng (Hình 1). Các mẫu bê tông hình lăng trụ sau khi đúc được bảo dưỡng đến tuổi 28 ngày. Sau đó, các mẫu này được làm phẳng, sạch vùng bề mặt liên kết với tấm CFRP. Tấm CFRP được dán lên bề mặt mẫu bê tông hình lăng trụ theo đúng quy trình dán ướt (wet layup) như chỉ dẫn trong ACI 440.2R-17 [29] với các bước chính như quét lớp keo lót lên bề mặt mẫu bê tông, tẩm keo tấm CFRP, dán tấm CFRP lên bề mặt bê tông, quét lớp keo phủ. Sau khi dán tấm CFRP, các mẫu được bảo quản ở phòng thí nghiệm ở điều kiện phòng thí nghiệm 03 ngày để keo Epoxy khô hoàn toàn trước khi tiến hành thí nghiệm.



Hình 1. Sơ đồ mẫu thí nghiệm

09 mẫu thí nghiệm được chia thành ba nhóm tương ứng với ba cấp độ bền bê tông khác nhau, mỗi nhóm gồm 03 mẫu, được ký hiệu $SalBwc-d$ (trong đó: S là ký hiệu cường độ bê tông, L là ký hiệu chiều dài bám dính, W là ký hiệu bề rộng tấm CFRP; a tương ứng với giá trị cường độ bê tông; b là giá trị chiều dài bám dính của tấm CFRP, c là giá trị bề rộng tấm CFRP, d là số thứ tự mẫu trong một nhóm). Với quy định như trên, các mẫu thí nghiệm tương ứng với 03 nhóm mẫu bao gồm: S20L15W4-1,2,3; S27L15W4-1,2,3; S36L15W4-1,2,3.

2.2. Vật liệu chế tạo

Trong Bảng 1 trình bày các cấp phối vật liệu bê tông chế tạo mẫu và cường độ chịu nén của bê tông. Cường độ chịu nén của bê tông được xác định thông qua thí nghiệm nén một trục 03 mẫu trụ có kích thước $D \times H = 15 \times 30$ cm. Với mỗi cấp phối bê tông, cường độ chịu nén (f'_c) là giá trị trung bình của 03 kết quả thí nghiệm nén mẫu sau 28 ngày tuổi.

Bảng 1. Thành phần cấp phối vật liệu chế tạo bê tông và cường độ nén ở tuổi 28 ngày (kg/m^3)

Tên cấp phối	Xi măng PCB40 (kg)	Cát vàng (kg)	Đá dăm 1×2 (kg)	Nước (kg)	Cường độ bê tông	
					f'_c (MPa)	COV
B20	345	656	1260	180	20	0,032
B25	395	625	1220	180	27	0,045
B35	450	610	1210	180	36	0,019

Tấm CFRP sử dụng trong nghiên cứu này do hãng TORAY (Nhật Bản) sản xuất. Các tính chất cơ học của tấm CFRP được lấy theo công bố của nhà sản xuất và được trình bày trong Bảng 2.

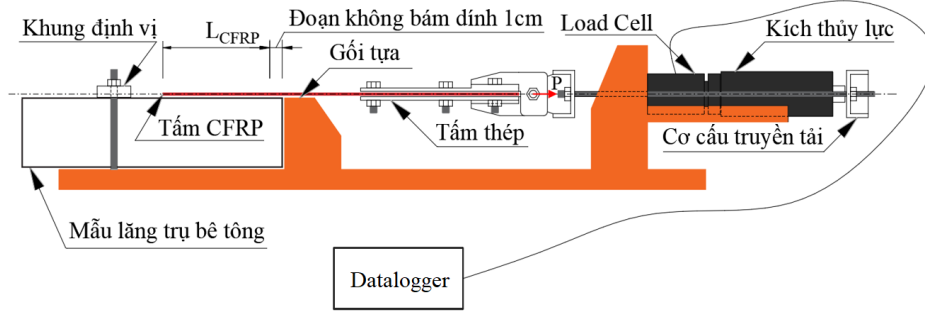
Bảng 2. Đặc trưng cơ học của tấm CFRP

Chiều dày t_{CFRP} (mm)	Cường độ chịu kéo cực hạn f_{CFRP} (MPa)	Mô đun đàn hồi E_{CFRP} (MPa)	Độ giãn dài cực hạn $\varepsilon_{CFRP,max}$ (%)
0,167	3400	245000	1,6

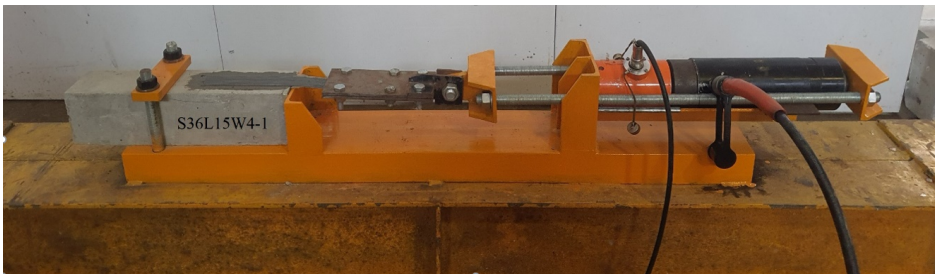
3. Sơ đồ thí nghiệm

Thí nghiệm bám dính giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông được bố trí theo sơ đồ kéo trượt đơn thông qua một cơ cấu thí nghiệm được xây dựng trong nghiên cứu này. Cơ cấu thí nghiệm này cho phép thực hiện các thí nghiệm kéo trượt đơn, phù hợp với điều kiện của phòng thí nghiệm, đảm bảo độ tin cậy và dễ dàng trong việc thu thập các số liệu đo cũng như quan sát trạng thái phá hoại của liên kết giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông. Hình 2 trình bày sơ đồ thí nghiệm và bố trí dụng cụ đo. Lực kéo tác dụng lên tấm CFRP theo phương ngang được tạo ra thông qua 01 kích thủy lực và trạm bơm dầu. Tải trọng do kích thủy lực tạo ra được truyền đến thanh CFRP thông qua cơ cấu truyền tải bao gồm 02 thanh căng, thanh phản lực và bộ phận liên kết với tấm CFRP (được tạo thành từ 02 bản thép, liên

kết ép mặt với tấm CFRP thông qua các bu lông). Mẫu bê tông hình lăng trụ bị ngăn cản chuyển vị ngang thông qua một gối tựa và hệ 02 bu lông neo. Tải trọng thí nghiệm được tăng dần đến khi liên kết giữa tấm CFRP và bề mặt mẫu bê tông bị phá hoại, tấm CFRP bị tuột khỏi bề mặt bê tông. Giá trị tải trọng tác dụng lên tấm CFRP được ghi nhận liên tục trong suốt quá trình thí nghiệm thông qua 01 dụng cụ đo lực điện tử (load cell) kết nối với bộ thu thập và xử lý số liệu (Data logger).



(a) Sơ đồ bố trí dụng cụ đo



(b) Hình ảnh thực tế khung thí nghiệm

Hình 2. Khung thí nghiệm bám dính

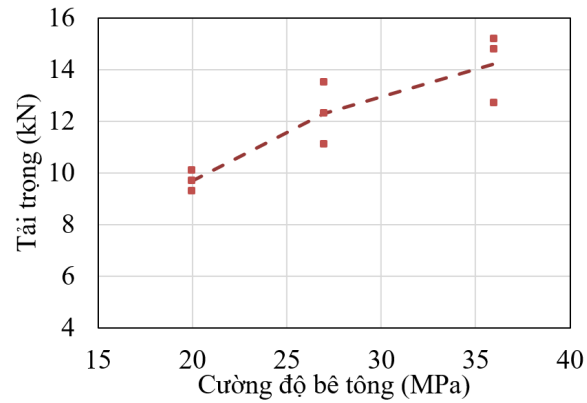
Các giá trị lực phá hoại (P_u^m), giá trị trung bình của các nhóm mẫu ($P_{u.tb}^m$), hệ số biến động (COV) và dạng phá hủy mẫu thí nghiệm được thống kê chi tiết trong Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả lực kéo giới hạn giữa tấm CFRP và bê tông

Tên mẫu	f'_c (MPa)	P_u^m (kN)	$P_{u.tb}^m$ (kN)	COV	Dạng phá hoại
S20L15W4-1	20	10,4	9,7	0,041	BT
S20L15W4-2	20	9,3			BT
S20L15W4-3	20	9,6			BT
S27L15W4-1	27	11,1	12,3	0,098	BT
S27L15W4-2	27	13,5			BT
S27L15W4-3	27	12,3			BT
S36L15W4-1	36	12,7	14,2	0,067	BD
S36L15W4-2	36	14,8			BD
S36L15W4-2	36	15,2			BD

Ghi chú : BT - phá hủy bề mặt bê tông, BD - phá hủy bám dính giữa tấm CFRP và bê tông.

Hình 3 thể hiện mối qua hệ giữa tải trọng phá hoại và cường độ bê tông của các mẫu thí nghiệm bằng các điểm hình vuông, và đường nét đứt thể hiện xu hướng giá trị trung bình của lực phá hủy ở các cấp độ bền bê tông.



Hình 3. Biểu đồ quan hệ giữa Tải trọng phá hủy và cường độ bê tông

4. Phân tích và đánh giá kết quả

4.1. Dạng phá hoại liên kết tấm CFRP và bê tông

Hình 4 trình bày các hình ảnh phá hủy của các mẫu thí nghiệm. Kết quả thí nghiệm cho thấy sự phá hủy của các mẫu bắt đầu tại vị trí kết thúc của mẫu bê tông bám dính với tấm CFRP nơi có sự tập



(a) S20L15W4-1



(b) S20L15W4-2



(c) S20L15W4-3



(d) S27L15W4-1



(e) S27L15W4-2



(f) S27L15W4-3



(g) S36L15W4-1



(h) S36L15W4-2



(i) S36L15W4-3

Hình 4. Dạng phá hủy của các mẫu thí nghiệm

trung ứng suất lớn, sau đó sự phá hủy lan truyền đến các vùng bám dính tiếp theo, khi mẫu phá hủy hoàn toàn kèm theo tiếng nổ lớn. Vùng phá hủy tập trung ứng suất có dạng hình thang với chiều cao khoảng 4 cm gần bằng bề rộng tấm CFRP. Kết quả thí nghiệm cho thấy sự ảnh hưởng của cường độ bê tông đến cơ chế phá hoại liên kết bám dính giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông. Các nhóm mẫu có cường độ chịu nén của bê tông thấp sự phá hủy xảy ra ở vùng bê tông bề mặt tiếp giáp với vùng bám dính giữa tấm CFRP và bê tông. Với nhóm mẫu có cường độ bê tông lớn nhất sự phá hủy xảy ra ở lớp keo epoxy. Trong các hình ảnh phá hủy của các mẫu, mẫu S20L15W4-2 có một phần nhỏ diện tích bị phá hủy ở lớp keo mà không bong bề mặt bê tông, điều này có thể do chất lượng đồng đều của keo nền Epoxy hai thành phần trong quá trình pha trộn và chế tạo mẫu.

4.2. Ảnh hưởng của cường độ bê tông đến sự bám dính

Hình 3 cho thấy cường độ bê tông ảnh hưởng đáng kể đến lực bám dính cực hạn giữa tấm CFRP và bê tông. Khi cường độ bê tông tăng lên thì lực bám dính cực hạn giữa tấm CFRP và bê tông cũng tăng lên. Các nhóm mẫu S20L15W4, S25L15W4, S35L15W4 có lực bám dính cực hạn trung bình tương ứng khoảng 9,7 kN, 12,3 kN, 13,7 kN. Đối với nhóm mẫu S20L15W4 và S25L15W4, lực bám dính cực hạn tăng lên khoảng 27%. Đối với nhóm mẫu S25L15W4 và S35L15W4 lực bám dính cực hạn tăng lên khoảng 11%.

Dựa trên cơ sở phân tích dạng phá hoại và lực bám dính cực hạn của ba nhóm mẫu thí nghiệm, có thể thấy rõ khi cường độ bê tông thấp, lực bám dính cực hạn giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông chịu ảnh hưởng của cường độ bê tông. Tuy nhiên, khi cường độ bê tông đủ lớn để không xảy ra phá hoại vào lớp bê tông bề mặt thì lực bám dính cực hạn sẽ bị ảnh hưởng bởi lớp keo dán. Đây là điều cần lưu ý khi áp dụng tấm CFRP trong thực tế.

4.3. So sánh biến dạng hiệu quả trong tấm CFRP theo thực nghiệm với một số mô hình dự báo

Như đã trình bày ở trên, đã có nhiều mô hình dự báo khả năng bám dính giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông. Các mô hình này đều được xây dựng dựa trên các số liệu thực nghiệm, hầu hết có kể đến ảnh hưởng của cường độ bê tông đến lực bám dính cực hạn và như vậy, chúng có khoảng áp dụng nhất định. Bên cạnh đó, từ kết quả thu được trong nghiên cứu này được trình bày ở mục 4.1 và 4.2, có thể thấy, ảnh hưởng của cường độ bê tông đến lực bám dính cực hạn cần phải được xem xét nhưng ở một phạm vi nhất định, khi cường độ bê tông đủ lớn thì lực bám dính cực hạn sẽ được quyết định bởi chất lượng của lớp keo liên kết cũng như đặc tính của tấm CFRP.

Để có cái nhìn tổng quan hơn về các yếu tố ảnh hưởng đến lực bám dính cực hạn giữa tấm CFRP, cũng như tính phù hợp của việc áp dụng mô hình dự báo lực bám dính, 05 mô hình bám dính được đề xuất trong [13, 26, 27, 29, 30] được lựa chọn để phân tích (Bảng 4) và so sánh lực bám dính xác định theo các mô hình này với kết quả thực nghiệm từ nghiên cứu này. Các mô hình của Khalifa và cs. [26], Adhikary và Mutsuyoshi [27], Iso [30] có xét đến ảnh hưởng của cường độ bê tông và thông số hình học, đặc trưng cơ lý của tấm CFRP. Chen và Teng [13] có xét đến đồng thời của cường độ bê tông thông số hình học, đặc trưng cơ lý của tấm CFRP và tỉ số bề rộng của tấm CFRP và bề rộng bề mặt bê tông. ACI 440.2R-17 [29] cũng quy định giới hạn về biến dạng hiệu quả trong tấm CFRP để tránh sự phá hoại do bong tách giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông xuất phát từ vết nứt uốn giữa dầm. Biến dạng hiệu quả theo [29] có xét đến ảnh hưởng của các thông số tương tự với mô hình của Chen và Teng [13].

Bảng 4. Một số mô hình cường độ bám dính giữa tấm CFRP và bê tông

Tên mô hình	Công thức	Các thông số ảnh hưởng
Khalifa và cs. [26]	$P_u = b_{CFRP} L \tau_u$ $\tau_u = 110,2 \times 10^{-6} E_{CFRP} t_{CFRP} \left(\frac{f'_c}{42} \right)^{2/3}$ $L = \min \left(L_{CFRP}; L_e = e^{6,13 - 0,58 \ln E_{CFRP} t_{CFRP}} \right)$ $E_{CFRP}, t_{CFRP} \text{ (đơn vị: GPa, mm)}$	- Đặc trưng cơ học tấm CFRP - Chiều dài bám dính hiệu quả - Cường độ bê tông
Chen và Teng [13]	$P_u = 0,427 \beta_p \beta_L \sqrt{f'_c} b_{CFRP} L_e$ $L_e = \sqrt{\frac{E_{CFRP} t_{CFRP}}{\sqrt{f'_c}}};$ $\beta_p = \sqrt{\frac{2 - b_{CFRP}/b_c}{1 + b_{CFRP}/b_c}};$ $\beta_L = \begin{cases} 1 & (L_{CFRP} \geq L_e) \\ \sin \frac{\pi L_{CFRP}}{2L_e} & (L_{CFRP} < L_e) \end{cases}$	- Cường độ bê tông - Đặc trưng cơ học tấm CFRP - Chiều dài bám dính hiệu quả - Tỉ số bề rộng tấm CFRP và bề rộng bề mặt bê tông
Adhikary và Mutsuyoshi [27]	$P_u = b_{CFRP} L \left(0,25 f'_c \right)^{2/3}$	- Đặc trưng cơ học tấm CFRP - Cường độ bê tông - Chiều dài bám dính
Iso (JCI 2003) [30]	$\tau_u = 0,93 (f'_c)^{0,44};$ $P_u = \tau_u L b_p; \quad L = \min (L_{CFRP}; L_e)$ $L_e = 0,125 (E_{CFRP} t_{CFRP})^{0,57}$	- Đặc trưng cơ học tấm CFRP - Cường độ bê tông - Chiều dài bám dính hiệu quả
ACI 440.2R-17 [29]	$\varepsilon_{CFRP,d} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{n E_{CFRP} t_{CFRP}}} \leq 0,9 \varepsilon_{CFRP,u}$ $P_u = \varepsilon_{CFRP,d} E_{CFRP} b_{CFRP} t_{CFRP}$	- Đặc trưng cơ học tấm CFRP - Cường độ bê tông

trong đó: P_u, τ_u - lần lượt là lực bám dính cực hạn và ứng suất tiếp bám dính giới hạn giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông; $b_{CFRP}, t_{CFRP}, E_{CFRP}$ - lần lượt là bề rộng, chiều dày và mô đun đàn hồi của tấm CFRP; β_p - hệ số kể đến ảnh hưởng của tỉ lệ bề rộng tấm CFRP và bề rộng bề mặt bê tông; β_L - hệ số kể đến ảnh hưởng của chiều dài bám dính; L_e - chiều dài bám dính hiệu quả của tấm CFRP.

Bảng 5 trình bày kết quả so sánh giữa các mô hình tính toán đã đề xuất với kết quả trung bình thí

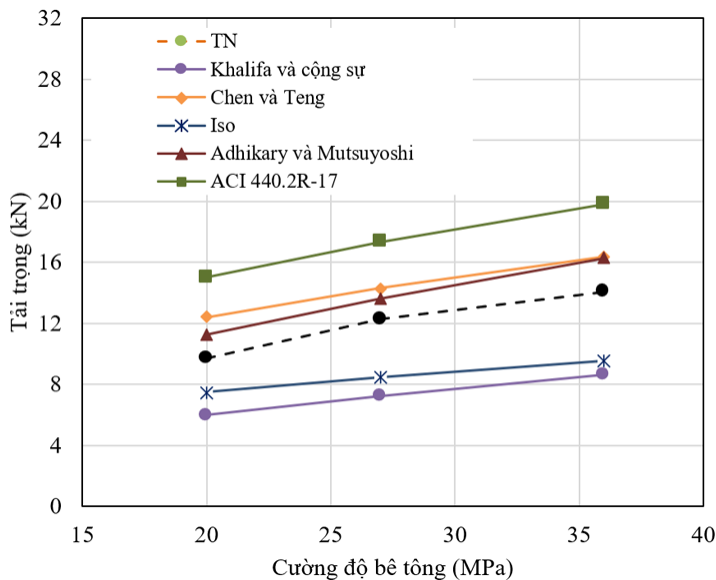
nghiệm của 3 mẫu cho mỗi nhóm cường độ bê tông. Tỷ số giữa giá trị tính toán theo mô hình và kết quả thí nghiệm trung bình được sử dụng để so sánh. Hình 5 trình bày ảnh hưởng của cường độ bê tông đến lực bám dính cực hạn của tấm CFRP và bề mặt bê tông của các mô hình khảo sát và kết quả thí nghiệm.

Bảng 5. So sánh kết quả thí nghiệm với các mô hình lý thuyết

Nhóm mẫu	P_u^K / P_u^{tn}	P_u^C / P_u^{tn}	P_u^A / P_u^{tn}	P_u^I / P_u^{tn}	P_u^{ACI} / P_u^{tn}
S20L15W4	0,62	1,28	1,16	0,77	1,55
S25L15W4	0,59	1,16	1,11	0,69	1,41
S35L15W4	0,61	1,16	1,14	0,68	1,41

Ghi chú: $P_u^K, P_u^C, P_u^A, P_u^I, P_u^{ACI}$ - giá trị lực phá hủy dự báo tương ứng với các mô hình của Khalifa và cs. [26], Chen và Teng [13], Adhikary và Mutsuyoshi [27], Iso [30], ACI 440.2R-17 [29] (xem Bảng 4).

Theo Bảng 5, lực bám dính cực hạn giữa tấm CFRP và bê tông của ba mô hình Khalifa và cs. [26], Chen và Teng [13] và Iso [30] đều không chế chiều dài bám dính hiệu quả cho giá trị dự báo thiên về an toàn cao, với kết quả dự báo thấp hơn 44% đến 51% kết quả thí nghiệm. Trong khi đó, mô hình của Adhikary và Mutsuyoshi [27], và ACI 440.2R-17 [29] không giới hạn về chiều dài bám dính hiệu quả cho giá trị dự báo sát hơn với kết quả thí nghiệm, tuy nhiên, các kết quả dự báo không thiên về an toàn, với các kết quả dự báo vượt quá từ 10% đến 26% kết quả thí nghiệm.



Hình 5. Ảnh hưởng của cường độ bê tông đến cường độ bám dính giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông

Mặc dù các mô hình được lựa chọn khảo sát ở trên đều xét đến ảnh hưởng của cường độ bê tông đến lực bám dính cực hạn giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông. Tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng của hai mô hình Adhikary và Mutsuyoshi [27], và ACI 440.2R-17 [29] cao hơn các mô hình còn lại và có xu hướng sát hơn với kết quả thí nghiệm thu được (Hình 5).

5. Kết luận

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của cường độ chịu nén của bê tông đến cường độ bám dính giữa tấm CFRP và bê tông. Từ kết quả thực nghiệm thu được với 3

mức cường độ chịu nén của bê tông (20 MPa, 27 MPa, 36 MPa), và so sánh với một số mô hình dựa vào đã đề xuất trước đây, một số kết luận được rút ra như sau:

Sự phá hủy xảy ra chủ yếu ở lớp bê tông bề mặt đối với bê tông có cường độ thấp (20 MPa và 27 MPa), với cường độ bê tông cao (36 MPa) sự phá hủy xảy ra ở lớp keo bám dính giữa tấm CFRP và bê tông.

Với cường độ bê tông thấp, mức độ ảnh hưởng của cường độ bê tông đến cường độ bám dính là đáng kể. Khi sự phá hủy xảy ra ở lớp keo Epoxy thì mức độ ảnh hưởng của bê tông đến cường độ bám dính giảm xuống.

Với kết quả thí nghiệm thu được từ nghiên cứu, các mô hình của Adhikary và Mutsuyoshi và Chen và Teng cho kết quả dự báo cường độ bám dính giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông với sai số thấp hơn các mô hình khác. Tuy nhiên, giá trị dự báo cao hơn kết quả thí nghiệm và không thiên về an toàn.

Tài liệu tham khảo

- [1] Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., Lam, L. (2002). *FRP: strengthened RC structures*.
- [2] Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H., Triantafillou, T. C. (2002). [Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review](#). *Journal of composites for construction*, 6(2):73–87.
- [3] Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. (1991). [RC beams strengthened with GFRP plates. I: Experimental study](#). *Journal of Structural Engineering*, 117(11):3417–3433.
- [4] Triantafillou, T. C., Plevris, N. (1992). [Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials](#). *Materials and Structures*, 25(4):201–211.
- [5] Shehata, I. A. E. M., Carneiro, L. A. V., Shehata, L. C. D. (2002). [Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets](#). *Materials and Structures*, 35(1):50–58.
- [6] Spadea, G., Bencardino, F., Swamy, R. N. (1998). [Structural behavior of composite RC beams with externally bonded CFRP](#). *Journal of Composites for Construction*, 2(3):132–137.
- [7] Pham, X. D., Nguyen, T. H. (2021). [Experimental study on cfrp strengthening of cracked reinforced concrete beams](#). *CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure: Proceedings of the 6th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures*; Springer, Springer Nature Singapore, 227–235. ISBN 9789811671609.
- [8] Hùng, N. M., Lành, L. P., Hiếu, N. T. (2021). [Nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường vai cột bằng tấm sợi composite gốc các bon CFRP](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 15(5V):146–156.
- [9] Quỳnh, D. Đ., Hiếu, N. T., Đạt, P. X., Hùng, N. M. (2021). [Nghiên cứu thực nghiệm sự làm việc chịu uốn của dầm bê tông cốt thép được gia cường bằng tấm composite CFRP ở trạng thái đang chịu tải](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 15(2V):1–11.
- [10] 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.
- [11] Smith, S. T., Teng, J. G. (2002). [FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models](#). *Engineering Structures*, 24(4):385–395.
- [12] Smith, S., Teng, J. (2002). [FRP-strengthened RC beams. II: assessment of debonding strength models](#). *Engineering Structures*, 24(4):397–417.
- [13] Chen, J. F., Teng, J. G. (2001). [Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete](#). *Journal of structural engineering*, 127(7):784–791.
- [14] Chajes, M. J., Finch, W. W., Thomson, T. A. (1996). [Bond and force transfer of composite-material plates bonded to concrete](#). *ACI Structural Journal*, 93(2):209–217.
- [15] Bizindavyi, L., Neale, K. W. (1997). Experimental and theoretical investigation of transfer lengths for composite laminates bonded to concrete. *Proceedings, Annual Conference of Canadian Society for Civil Engineering*, 6:51–60.
- [16] Täljsten, B. (1997). [Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete](#). *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 17(4):319–327.

- [17] Bizindavyi, L., Neale, K. W. (1999). [Transfer lengths and bond strengths for composites bonded to concrete](#). *Journal of Composites for Construction*, 3(4):153–160.
- [18] Toutanji, H., Saxena, P., Zhao, L., Ooi, T. (2007). [Prediction of interfacial bond failure of FRP–concrete surface](#). *Journal of Composites for Construction*, 11(4):427–436.
- [19] Brosens, K., Van Gemert, D. (1997). Anchoring stresses between concrete and carbon fibre reinforced laminates. *Composite Constructive-Conventional and Innovative (innsbruck, 16-18 September 1997)*, 181–186.
- [20] Fukuzawa, K. (1997). Critical strain energy release rate of interface debonding between carbon fiber sheet and mortar, non-metallic (FRP) reinforced for concrete structures. *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceeding of the Third International Symposium*, 1:295–302.
- [21] Yoshizawa, H. (1997). Analysis of debonding fracture properties of CFS strengthened RC member subject to tension. *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceeding of the Third International Symposium*, The Japan Concrete Institute, 287–294.
- [22] Maeda, T. (1997). A study on bond mechanism of carbon fiber sheet. *Proceedings of Third International Symposium of Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*.
- [23] Serbescu, A., Guadagnini, M., Pilakoutas, K. (2013). [Standardised double-shear test for determining bond of FRP to concrete and corresponding model development](#). *Composites Part B: Engineering*, 55:277–297.
- [24] De Lorenzis, L., Miller, B., Nanni, A. (2001). Bond of FRP laminates to concrete. *ACI Materials Journal*, 98(3):256–264.
- [25] Silva, M. A. G., Biscaia, H. C., Marreiros, R. (2013). [Bond–slip on CFRP/GFRP-to-concrete joints subjected to moisture, salt fog and temperature cycles](#). *Composites Part B: Engineering*, 55:374–385.
- [26] Khalifa, A., Gold, W. J., Nanni, A., Abdel Aziz, M. I. (1998). [Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members](#). *Journal of Composites for Construction*, 2(4):195–202.
- [27] Adhikary, B. B., Mutsuyoshi, H. (2001). Study on the bond between concrete and externally bonded CFRP sheet. *FRPRCS-5: Fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures Volume 1: Proceedings of the fifth international conference on fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures, Cambridge, UK, 16–18 July 2001*, Thomas Telford Publishing, 371–378.
- [28] Dai, J., Ueda, T., Sato, Y. (2005). [Development of the nonlinear bond stress–slip model of fiber reinforced plastics sheet–concrete interfaces with a simple method](#). *Journal of Composites for Construction*, 9(1): 52–62.
- [29] ACI 440.2R-17 (2017). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. American Concrete Institute.
- [30] Japan Concrete Institute (JCI) (2003). *Technical report of technical committee on retrofit technology*. Proc., Int. Symp. on the Latest Achievement of Technology and Research on Retrofitting Concrete Structures.