

ỨNG XỬ BÁM DÍNH CỦA TẤM CFRP GIA CƯỜNG KHÁNG UỐN TRONG DẦM BÊ TÔNG ỨNG SUẤT TRƯỚC DÙNG CÁP KHÔNG BÁM DÍNH ĐÃ NỨT

Phan Vũ Phương^a, Đặng Đăng Tùng^{b,c}, Đinh Văn Thuật^d, Nguyễn Minh Long^{b,c,*}

^aKhoa Xây dựng, Trường Đại học Mở TP. Hồ Chí Minh,
35-37 Hồ Hảo Hớn, Quận 1, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^bKhoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh,
268 đường Lý Thường Kiệt, quận 10, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^cĐại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, phường Linh Trung, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^dKhoa 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 06/3/2023, Sửa xong 28/3/2023, Chấp nhận đăng 29/3/2023

Tóm tắt

Bài báo này nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của hàm lượng tấm CFRP và neo U-CFRP (neo U) đến đặc tính bám dính của liên kết CFRP – bê tông trong dầm BTUST dùng cáp không bám dính đã bị nứt trước khi gia cường. Chương trình thực nghiệm được tiến hành trên năm dầm BTUST dùng cáp không bám dính được gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP với các thông số thay đổi gồm số lớp CFRP (4 hoặc 6 lớp) và sử dụng neo U hoặc không. Kết quả cho thấy kiểu phá hoại của các dầm BTUST dùng cáp không bám dính được gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP bị ảnh hưởng đáng kể bởi yếu tố có hay không có neo U, việc bố trí neo và trạng thái hư hỏng trước khi gia cường (không hoặc có vết nứt). Biến dạng bong tách tấm CFRP của dầm có sự khác biệt rõ so với của mẫu kéo trượt trong nghiên cứu trước đây với sự thay đổi đột ngột và không đều của biến dạng tấm CFRP. Việc sử dụng neo U giúp tăng biến dạng bong tách của tấm CFRP trong dầm (lên tới 127%). Cường độ bám dính của tấm CFRP với bê tông trong các mẫu dầm có/không sử dụng neo U cao hơn nhiều so với của mẫu kéo trượt lần lượt trung bình là 55% và 237%.

Từ khóa: cường độ bám dính; liên kết CFRP – bê tông; dầm bê tông ứng suất trước; cáp không bám dính.

BOND BEHAVIOUR OF FLEXURAL-STRENGTHENING CFRP SHEETS IN UNBONDED POST-TENSIONED PRE-CRACKED CONCRETE BEAMS

Abstract

This paper presents an experimental study on the effect of number of layers of CFRP sheets and CFRP U-wrap anchors system on the bond behavior of CFRP-to-concrete joints in UPC pre-cracked beams under flexure. The experimental program was conducted on five UPC pre-cracked beams strengthened with CFRP sheets with variable parameters including the number of CFRP sheet layers (0, 4, and 6 layers) and CFRP U-wrap anchors system (with and without anchors). The results show that the failure mode of UPC pre-cracked beams strengthened with CFRP sheets is significantly affected by the CFRP U-wrap anchors, anchor configuration and the damaged state before strengthening (uncracked and pre-cracked). The debonding strain of CFRP sheets of the beams changes suddenly and irregularly which is clearly different from that of single-lap shear tests in the previous study. The CFRP U-wrap anchors system greatly improves the debonding strain of the flexural-strengthening CFRP sheets in the beams (up to 127%). Bond strength of CFRP sheets to concrete in the beams with/without using CFRP U-wrap anchors system was much higher than that in previous single-lap shear tests by average 55% and 237%, respectively.

Keywords: bond strength; CFRP-to-concrete joints; post-tensioned concrete beams; unbonded tendons.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(3V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(3V)-01) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

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

1. Đặt vấn đề

Hiệu quả của giải pháp sử dụng vật liệu CFRP cho sửa chữa hoặc gia cường sức kháng uốn đã được đề cập và khẳng định trong nhiều nghiên cứu liên quan đến cấu kiện bê tông cốt thép (BTCT) [1–8], cấu kiện bê tông ứng suất trước (BTUST) sử dụng cáp bám dính [9–17] và gần đây trong một số ít nghiên cứu trên cấu kiện BTUST dùng cáp không bám dính [18–24]. Trong các nghiên cứu vừa nêu, ứng xử bám dính của tấm CFRP với bề mặt bê tông của cấu kiện được gia cường, mặc dù được xem là yếu tố quan trọng quyết định đến hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP, nhưng nó chưa được đề cập một cách định lượng và đầy đủ. Sự thiếu vắng các nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử bám dính (ứng suất bám dính và độ trượt tương ứng) của tấm CFRP trên các cấu kiện được gia cường kháng uốn dẫn đến việc đánh giá ứng xử bám dính của liên kết CFRP - bê tông hầu hết đều dựa trên các nghiên cứu liên quan đến thí nghiệm kéo trượt một mặt [25–34] và một số ít dựa trên thí nghiệm kéo uốn trên mẫu dầm thuần bê tông [35, 36]. Từ đó, công thức xác định biến dạng bong tách tấm CFRP quy định trong các hướng dẫn tính toán thiết kế gia cường kết cấu sử dụng vật liệu CFRP dán ngoài hiện nay như [37–39] đều được xây dựng dựa trên các nghiên cứu của thí nghiệm kéo trượt thuần túy ở 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 như trong [40, 41] để dự đoán giá trị biến dạng bong tách tấm CFRP khi tính toán cho cấu kiện BTCT chịu uốn.

Mặc dù, các thí nghiệm kéo trượt một mặt có ưu điểm là dễ thực hiện và ít tốn kém, tuy nhiên nó chưa phản ánh được ứng xử bám dính thực của tấm CFRP với bê tông do bỏ qua ảnh hưởng của ứng suất kéo do uốn và sự xuất hiện của các vết nứt uốn trong cấu kiện. Một số nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến tấm CFRP gia cường kháng uốn trên các dầm BTCT như [7, 42], trên các dầm BTUST dùng cáp bám dính như [10, 12, 14, 16, 43, 44] và trên các dầm BTUST dùng cáp không bám dính như [19, 20] đều cho thấy biến dạng bong tách tấm CFRP trên các dầm BTCT, đặc biệt trên dầm BTUST là lớn hơn rất nhiều so với của mẫu thí nghiệm kéo trượt. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng hàm lượng và loại tấm gia cường ảnh hưởng đáng kể đến dạng phá hoại bong tách tấm CFRP [37, 38, 40, 45–52]; do đó, việc đề xuất giải pháp kéo dài tấm FRP gia cường vào trong vùng gối tựa có thể giúp ngăn chặn quá trình bong tách sớm hơn, tuy nhiên nó vẫn chưa giải quyết được triệt để. Nghiên cứu trong [53] cho rằng việc bố trí thêm tấm gia cường kháng cắt sẽ đóng vai trò như neo U-CFRP (neo U) trong kháng uốn giúp làm tăng tải trọng phá hoại và tính dẻo dai cho các dầm BTCT được gia cường. Sự thiếu vắng các dữ liệu nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến đặc tính bám dính của tấm CFRP gia cường kháng uốn ở cấp độ cấu kiện có kích thước lớn, đặc biệt là cấu kiện BTUST dùng cáp không bám dính, làm cho vấn đề dự đoán biến dạng hữu hiệu của tấm CFRP có thể trở nên sai lệch, kém chính xác và làm giảm tính kinh tế của thiết kế.

Bài báo này trình bày một nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử bám dính của tấm CFRP trên dầm BTUST dùng cáp không bám dính đã bị nứt chịu tải trọng uốn. Chương trình thực nghiệm được tiến hành trên năm dầm BTUST dùng cáp không bám dính gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP với các thông số thay đổi gồm số lớp CFRP gia cường (0, 4 hoặc 6 lớp) và sử dụng neo U hoặc không. Mục tiêu của bài báo là khảo sát và phân tích ảnh hưởng của hàm lượng (số lớp) tấm CFRP và việc sử dụng neo U đến kiểu phá hoại, sự phân bố biến dạng bong tách và cường độ bám dính của tấm CFRP trong dầm BTUST dùng cáp bám dính đã bị nứt trước khi gia cường.

2. Chương trình thực nghiệm

2.1. Vật liệu

a. Bê tông

Các mẫu thí nghiệm sử dụng bê tông thương phẩm với cấp phối như sau: xi măng PC40 (410 kg/m^3); đá 1×2 (20-22 mm, 1028 kg/m^3); cát sông (0-4 mm, 550 kg/m^3); cát nghiền (0-2 mm,

247 kg/m³); và phụ gia dẻo (5,5 l/m³), độ sụt bê tông xấp xỉ 12±2 cm. Cường độ chịu nén trung bình dọc trục và kéo chéo của bê tông được xác định trên kết quả nén sáu mẫu lập phương 150×150×150 mm theo [54], lần lượt là 47,2 MPa (COV = 0,02) và 5,8 MPa (COV = 0,05).

b. Cáp ứng suất trước

Cáp sử dụng loại không bám dính theo tiêu chuẩn [55] với đường kính danh định là 12,7 mm (Hình 1 và 2), loại bảy sợi với các thông số kỹ thuật được cung cấp bởi nhà sản xuất (Bảng 1).



Hình 1. Đầu neo và loại cáp sử dụng cho đầm thí nghiệm



Hình 2. Gia công và thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo của cáp

c. Cốt thép thường

Cốt thép thanh (cốt đai và cốt dọc) mỗi loại lấy ba mẫu để xác định giới hạn chảy và giới hạn bền của cốt thép. Thí nghiệm kéo thép được thực hiện dựa theo [56]. Giới hạn chảy và giới hạn bền trung bình của cốt thép dọc chịu kéo lần lượt là 430 MPa (COV = 0,02) và 600 MPa (COV = 0,03); của cốt đai lần lượt là 342 MPa (COV = 0,03) và 463 MPa (COV = 0,01). Mô-đun đàn hồi của cốt thép lấy bằng 200 GPa theo [57].

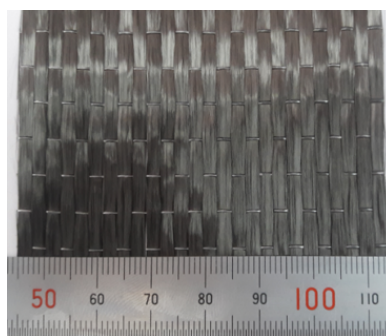
Bảng 1. Thông số kỹ thuật của cáp do nhà sản xuất cung cấp và thí nghiệm

Thông số kỹ thuật	Giá trị
Đường kính danh nghĩa, d_{np} (mm)	12,7
Tiết diện cắt danh nghĩa, A_{ps} (mm ²)	98,71
Trọng lượng (kg/1000m)	775
Cường độ chịu kéo, f_{fu} (MPa)	1860 (1895*)
Giới hạn chảy danh định, f_{fy} (MPa)	1670
Mô đun đàn hồi danh nghĩa của cáp, E_p (GPa)	196
Lực kéo đứt tối thiểu một tao cáp (kN)	183,7
Tải trọng nhỏ nhất khi giãn dài 1% (kN)	165,3

Ghi chú: (*) kết quả trung bình của sáu mẫu thí nghiệm.

d. Tấm sợi các bon và keo epoxy

Tấm sợi các-bon trục hướng (CFF) dày 0,166 mm (theo thông số của nhà sản xuất) (Hình 3). Cường độ kéo đứt được xác định trên bốn mẫu thí nghiệm theo ASTM D3039 [58] (Hình 4) với giá trị trung bình là 3986 MPa. Mô-đun đàn hồi và biến dạng kéo đứt của tấm sợi được lấy theo nhà sản xuất, lần lượt là 240 GPa và 2,1%. Keo epoxy hai thành phần A-B (Hình 5) có cường độ chịu kéo là 60 MPa và mô-đun đàn hồi từ 3 đến 3,5 GPa do nhà sản xuất cung cấp.



Hình 3. Tấm sợi CFF



Hình 4. Công tác gia công và kéo thí nghiệm mẫu tấm CFRP



Hình 5. Keo dán epoxy Carbotex Impreg

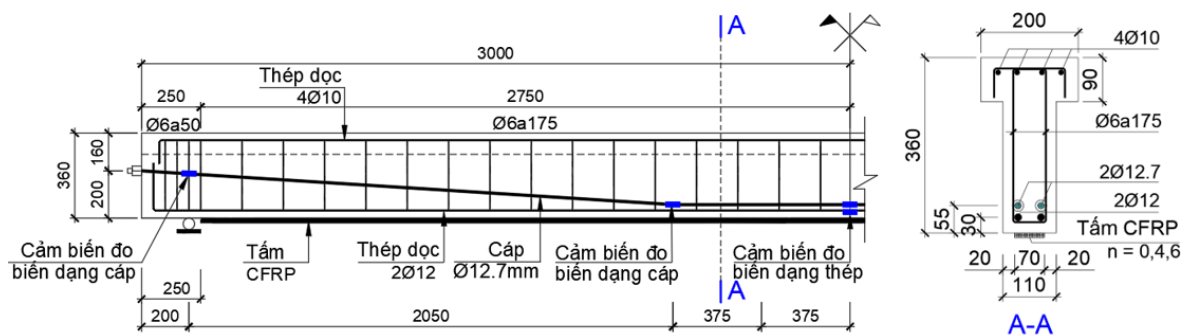
2.2. Mẫu thí nghiệm

Chương trình thí nghiệm gồm năm dầm BTUST dùng cáp không bám dính có kích thước lớn (mô phỏng tỉ lệ 1/2 kích thước dầm thực tế), tiết diện dầm chữ T với chiều cao dầm ($h = 360$ mm), bề rộng cánh dầm ($b_{fb} = 200$ mm), bề rộng bụng dầm ($b_w = 110$ mm), chiều dày cánh dầm ($h_f = 90$ mm), chiều dài dầm ($L_0 = 6000$ mm) và chiều dài nhịp dầm ($L = 5600$ mm) (Bảng 2 và Hình 6). Sau 28 ngày, các dầm được căng bằng hai cáp loại bảy sợi, đường kính 12,7 mm, loại không bám dính. Lực căng ban đầu trong mỗi cáp, F_{pi} , là 128,5 kN, sao cho thỏa mãn các điều kiện ứng suất cho phép theo [59].

Bảng 2. Thông số kỹ thuật của các mẫu dầm thí nghiệm

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	w_f mm	s_f mm
RC0						0	–	–	–
RC4						4	0,166	–	–
RC6	110×360×200 ×90×6000	305	0,47	0,29	0,41	6	0,166	–	–
RC4-AN2						4	0,166	100	250
RC4-AN3r1						4	0,166	100	210

Ghi chú: d_p là chiều cao làm việc của cáp; ρ_s là hàm lượng cốt thép dọc; ρ_{sw} là hàm lượng cốt thép đai; ρ_p là hàm lượng cáp; n_f là số lớp tấm CFRP; t_f là chiều dày tấm CFRP; w_f là bề rộng tấm neo CFRP; s_f là bước dải neo (tính từ tim đến tim).

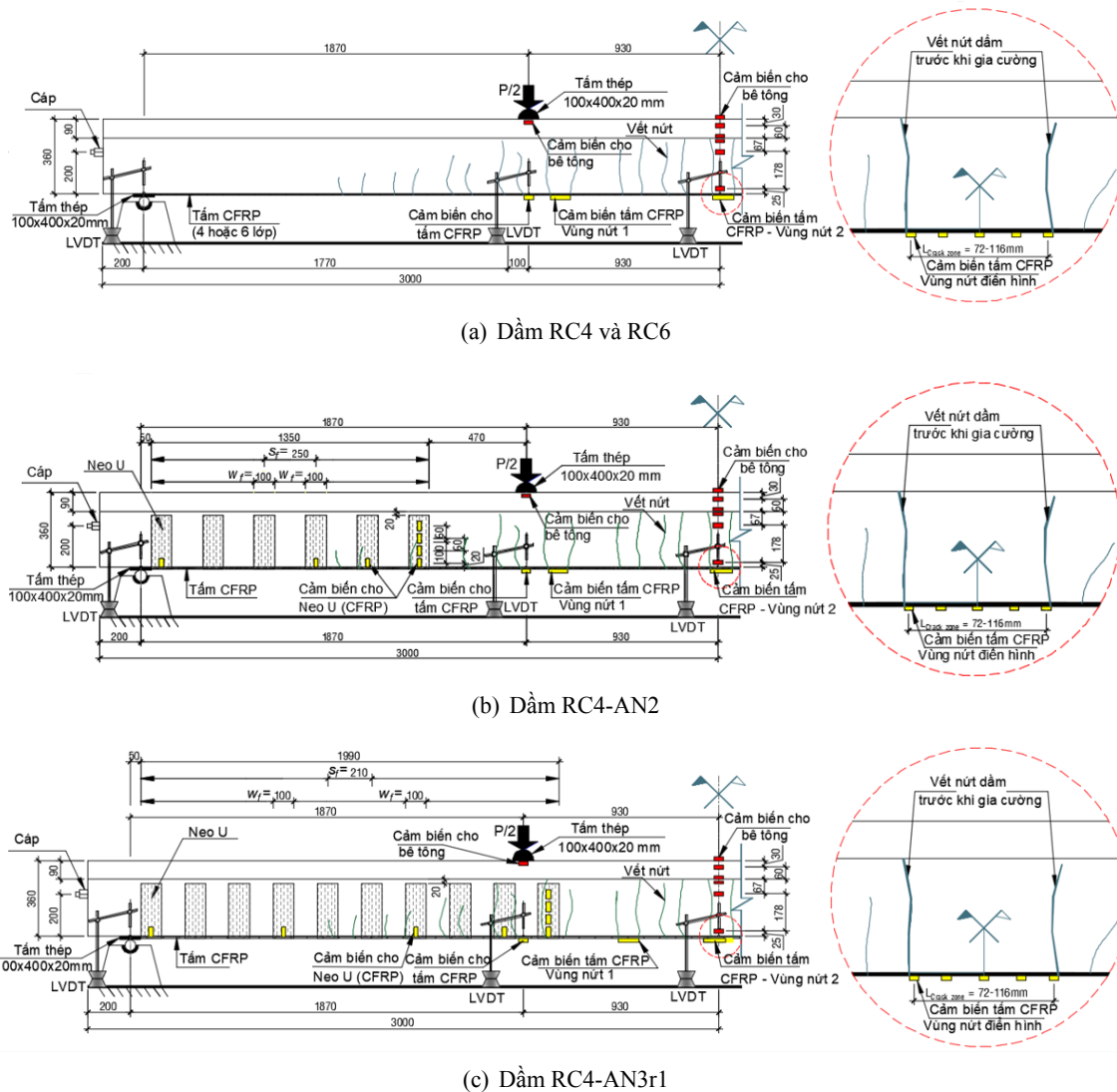


Hình 6. Mặt cắt dọc và mặt cắt ngang (A-A) của dầm thí nghiệm

Các dầm được gia cường sau khi đã được tạo nứt với bề rộng xấp xỉ bằng 0,3 mm. Năm dầm này gồm một dầm không gia cường dùng làm dầm đối chứng (dầm RC0); một dầm được gia cường bốn lớp CFRP không sử dụng neo U (dầm RC4); một dầm được gia cường sáu lớp CFRP không sử dụng neo U (dầm RC6); một dầm được gia cường bốn lớp CFRP có sử dụng neo U dạng AN2 và một dầm được gia cường bốn lớp CFRP có sử dụng neo U dạng AN3r1 (RC4-AN3r1) (Hình 7).

Neo U được thiết kế để ngăn chặn kiểu bong tách hai đầu tấm và kiểu bong tách do vết nứt uốn [40]. Trong đó, neo AN2 với các dải neo được bố trí một phần trong nhịp cắt ở giáp hai đầu dầm; neo AN3r1 cũng được bố trí tương tự như AN2, tuy nhiên với vùng neo được bố trí vượt quá nhịp cắt với kỳ vọng là hạn chế được sự bong tách của tấm hiệu quả hơn so với neo AN2. Neo AN2 có tổng diện tích neo là 199 mm² (tính cho 1/2 dầm), tương ứng với 78% diện tích neo yêu cầu theo [38]; trong khi, neo AN3r1 có tổng diện tích neo là 332 mm² (tính cho 1/2 dầm), tương ứng với 130% diện tích neo yêu cầu theo [38].

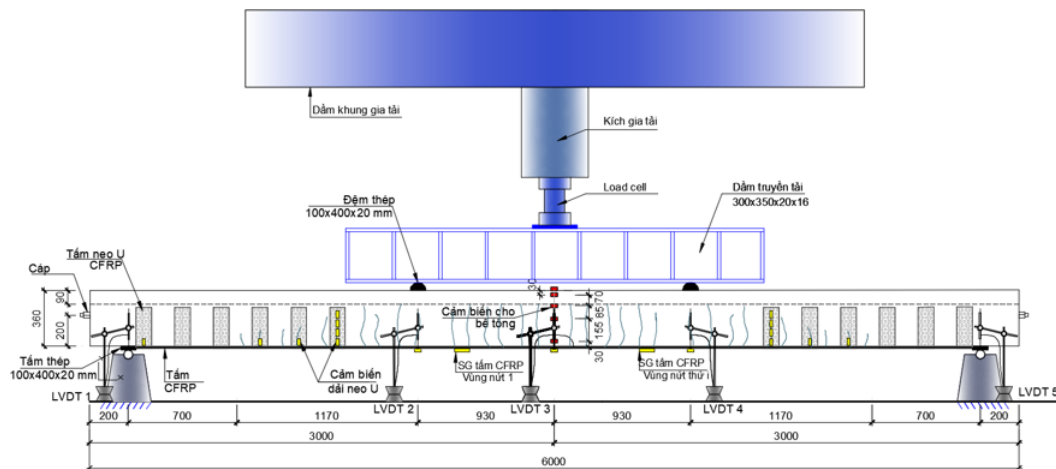
Thứ chịu kéo và chịu nén của dầm được bố trí cốt thép cấu tạo lần lượt gồm hai thanh có đường kính 12 mm và bốn thanh đường kính 10 mm. Cốt đai dùng thép đường kính 6 mm, bước cốt đai 175 mm phân bố đều dọc theo chiều dài dầm. Tại hai đoạn giáp đầu dầm, trong khoảng 250 mm, để tránh hiện tượng bị phá hoại cục bộ do lực căng trước, cốt đai được bố trí dày hơn với khoảng cách 50 mm. Hình dạng tiết diện, sự phân bố cáp, cốt thép, sơ đồ dán tấm CFRP và bố trí cảm biến trong dầm được thể hiện ở Hình 6 và 7.



Hình 7. Vị trí gia cường và bố trí các cảm biến cho các dầm thí nghiệm

2.3. Sơ đồ thí nghiệm, bố trí thiết bị đo và quy trình gia tải

Sơ đồ thí nghiệm uốn bốn điểm truyền thống phổ biến được chọn để khảo sát ứng xử uốn của các dầm thí nghiệm (Hình 8). Vị trí đặt lực cách gối tựa một khoảng bằng 1/3 nhịp (1870 mm). Biến dạng của tấm CFRP, neo U, cáp, cốt thép và bê tông được ghi nhận thông qua các SGs với vị trí lắp đặt được thể hiện ở các Hình 6-8. Để khảo sát ứng xử bám dính giữa tấm FRP và bề mặt bê tông ở cấp độ cấu kiện, hai mươi SGs bố trí trong bốn vùng nứt điển hình ở đoạn giữa nhịp dầm (Hình 7). Biến dạng của cáp được xác định thông qua năm SGs tại hai vị trí đầu neo, tại giữa nhịp và hai vị trí tác dụng lực (Hình 6). Nhằm mục đích khảo sát sự thay đổi biến dạng của bê tông theo chiều cao dầm trong quá trình gia tải, làm cơ sở đánh giá sự tương thích giữa biến dạng của bê tông, cáp ứng suất trước và tấm CFRP gia cường kháng uốn, hai SGs được gắn ở mặt trên của dầm tại vị trí đặt tải và sáu SGs bố trí dọc theo chiều cao của dầm tại vị trí giữa nhịp. Biến dạng của cốt thép dọc chịu kéo được xác định qua một cảm biến dán tại vị trí giữa nhịp. Chuyển vị dầm được xác định dựa trên năm chuyển vị kế (LVDTs) bố trí lần lượt tại giữa nhịp, hai vị trí đặt tải, và tại hai gối tựa.



Hình 8. Sơ đồ thí nghiệm và lắp đặt thiết bị đo của các dầm

Các dầm được gia tải lặp sáu chu kỳ với cận dưới của tải bằng 8 kN tương ứng với tĩnh tải của các lớp hoàn thiện và cận trên của tải bằng 90 kN để tạo vết nứt có bề rộng lớn nhất xấp xỉ 0,3 mm (bề rộng vết nứt giới hạn cho cấu kiện dầm BTUST dùng cáp không bám dính theo [60] (trong điều kiện nóng ẩm). Cấp tải này được lấy theo kết quả nghiên cứu thực nghiệm của [22] với các dầm có thông số hình học, vật liệu và cấu tạo tương đồng. 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 kN đến 20 kN cho đến khi dầm phá hoại (Hình 8).

3. Kết quả thực nghiệm và thảo luận

3.1. Kiểu phá hoại của các dầm

Kết quả thí nghiệm cho thấy dạng phá hoại của dầm đối chứng là do bê tông vùng nén bị nén vỡ và cáp chảy dẻo; kiểu phá hoại này tương tự với dầm đối chứng của Nguyen-Minh và cs. [23] (Hình 9). Bề rộng vết nứt lớn nhất của dầm được xác định tại cấp tải bằng 97% cấp tải phá hoại, theo đó bề rộng vết nứt lớn nhất trong dầm đối chứng không gia cường xấp xỉ 1,5 mm. Đối với các dầm được gia cường, kiểu phá hoại của chúng cũng bị ảnh hưởng đáng kể bởi các yếu tố có hay không có neo U; đồng thời, kiểu phá hoại của chúng còn chịu tác động bởi trạng thái hư hỏng trước khi gia cường (có hay không có vết nứt), khi đối chứng với kết quả từ nghiên cứu của [22] (dầm chưa nứt trước khi gia cường).

Các dầm được gia cường bằng bốn và sáu lớp không dùng neo U đều bị phá hoại uốn do tấm CFRP bị bong tách, trong khi cáp không bị chảy và bê tông không bị nén vỡ. Tấm CFRP trong vùng giữa nhịp bị bong tách trước do sự mở rộng quá mức của vết nứt uốn và sau đó sự bong tách dần lan truyền



(a) Dầm RC0 bị nén vỡ bê tông vùng nén giữa nhịp uốn



(b) Dầm RC4 bị bong tách tấm CFRP trong nhịp cắt và lớp bê tông bảo vệ trong nhịp uốn



(c) Dầm RC6 bị bong tách tấm CFRP trong nhịp cắt và lớp bê tông bảo vệ trong nhịp uốn



(d) Dầm RC4-AN2 bị nén vỡ bê tông vùng nén và liền sau đó là bong tách tấm CFRP trong nhịp uốn



(e) Dầm RC4-AN3r1 bị nén vỡ bê tông vùng nén và liền sau đó là bong tách tấm CFRP trong nhịp uốn

Hình 9. Kiểu phá hoại của các dầm thí nghiệm

hướng về hai gối tựa của dầm (Hình 9(b) và (c)); kiểu bong tách này còn được gọi là bong tách do vết nứt uốn trong nhịp dầm (kiểu IC-DB) đã được đề cập trong nghiên cứu của [40]. Tại cấp tải phá hoại của các dầm trên, trong nhịp uốn, tấm CFRP bị bong tách kèm theo lớp bê tông bảo vệ (kiểu CD-DB) kết hợp với kiểu bong tách tại bề mặt liên kết giữa tấm CFRP và bê tông kéo theo lớp bê tông mỏng (kiểu IF-DB); tuy nhiên, trong nhịp cắt, chỉ có dạng IF-DB. Bề rộng vết nứt lớn nhất trong dầm được

gia cường bốn và sáu lớp không dùng neo lần lượt là 0,8 mm và 0,7 mm (Bảng 3).

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm của các dầm thí nghiệm

Dầm	P_{max} (kN)	δ_u (mm)	ε_{ccu} (‰)	$\varepsilon_{fu,L/3}$ (‰)	$\varepsilon_{fu,mid}$ (‰)	$\varepsilon_{pu,mid}$ (‰)	w_{cru} (mm)	Kiểu phá hoại
RC0	125	97	2,8	-	-	8,5	1,5	FC
RC4	156	87	3,2	7,5	7,1	7,7	0,8	FCL+SDB
RC6	173	89	2,9	6,7	7,6	7,5	0,7	FCL+SDB
RC4-AN2	180	130	3,7	11,2	12,0	9,1	1,4	TY+FC+FLDB
RC4-AN3r1	180	124	3,6	11,1	11,9	8,7	1,5	TY+FC+FLDB

Ghi chú: TY là cáp chày dẻo; FC là nén vỡ bê tông tại nhịp; FCL là bong tách lớp bê tông bảo vệ nhịp uốn; SDB là bong tách tấm CFRP trong nhịp cắt; FLDB là bong tách tấm CFRP cục bộ trong nhịp uốn; P_{max} là cấp tải lớn nhất; δ_u là chuyển vị giữa nhịp tại cấp tải lớn nhất; ε_{ccu} là biến dạng nén bê tông tại cấp tải lớn nhất; $\varepsilon_{fu,L/3}$ và $\varepsilon_{fu,mid}$ lần lượt là biến dạng của tấm CFRP kháng uốn tại vùng gần vị trí đặt lực và tại vùng giữa nhịp ở cấp tải phá hoại; $\varepsilon_{pu,mid}$ là biến dạng của cáp ở giữa nhịp tại cấp tải phá hoại; w_{cru} là bề rộng vết nứt uốn lớn nhất của dầm.

Các dầm được gia cường có neo U có kiểu phá hoại khác nhau và chịu ảnh hưởng mạnh bởi bố trí neo U. Do trước khi gia cường đã được tạo nứt với bề rộng vết nứt lớn nhất sấp xỉ 0,3 mm, chiều cao vết nứt phát triển đến vùng cánh chữ T của dầm làm cho độ cứng của chúng suy giảm đáng kể và có ảnh hưởng lớn đến kiểu phá hoại của chúng. Từ kiểu phá hoại đứt tấm CFRP là chủ đạo và theo sau là biến dạng của cáp vượt xa giá trị chảy dẻo danh định như các dầm được gia cường ở trạng thái còn nguyên của [22], kiểu phá hoại của các dầm này chuyển sang kiểu phá hoại do nén vỡ bê tông vùng nén là chủ đạo, theo sau là bong tách tấm CFRP và cáp bị chảy dẻo.

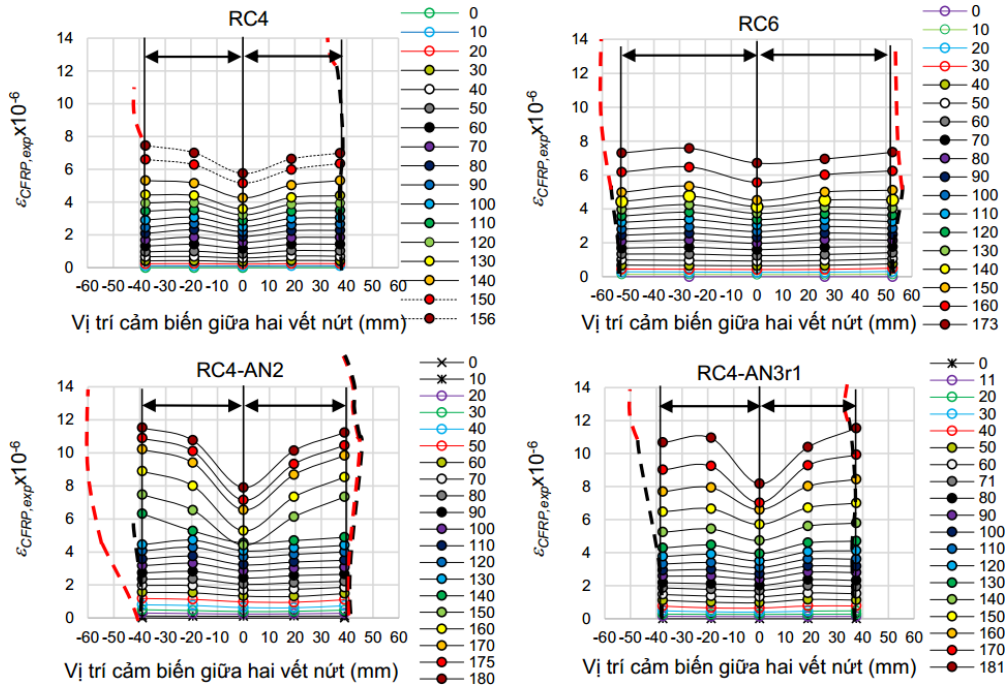
Ngoài ra, kết quả thực nghiệm cho thấy khoảng cách các vết nứt điển hình trong vùng giữa nhịp của các dầm nằm trong khoảng từ 72 đến 116 mm. Khoảng cách này là tương đối nhỏ có thể khiến cho chiều dài bám dính hữu hiệu của tấm CFRP thực tế trong mẫu dầm BTUST dùng cáp không bám dính nhỏ hơn đáng kể so với các mô hình dự đoán trước đây.

3.2. Sự phân bố biến dạng bong tách tấm CFRP trong dầm

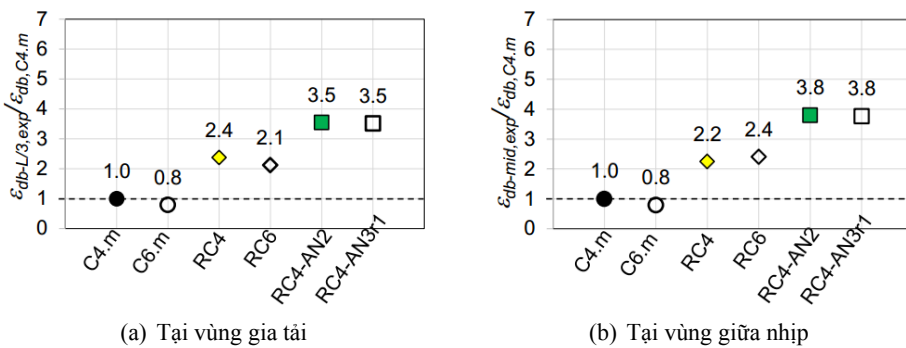
Sự phân bố biến dạng bong tách tấm CFRP trong các vùng nứt điển hình ở vùng giữa nhịp dầm được thể hiện chi tiết trong Hình 10. Kết quả cho thấy sự phân bố biến dạng này ở những cấp tải còn nhỏ có xu hướng phân bố đều và gần như không đổi dọc theo chiều dài vùng giữa nhịp dầm (giữa hai vị trí đặt tải). Tuy nhiên, sau cấp tải gây nứt này, biến dạng của tấm CFRP có xu hướng tăng nhanh, đặc biệt sau cấp tải bằng 0,74-0,86 P_{max} (P_{max} là cấp tải cực hạn của dầm thí nghiệm); tốc độ gia tăng và sự phân bố của biến dạng tấm bị ảnh hưởng rõ rệt bởi có và không có sử dụng neo U và bị chi phối rất đáng kể bởi vết nứt trong dầm; giá trị biến dạng của tấm gia tăng mạnh và có xu hướng lớn dần từ giữa vùng nứt hướng ra mép vết nứt. Neo U dạng AN2 và AN3r1 giúp gia tăng biến dạng bong tách trong dầm được gia cường lên trung bình 63% so với của dầm không dùng neo U (dầm RC4 và RC6) (Bảng 3).

Biến dạng của tấm CFRP trong các dầm thay đổi nhanh, đột ngột và có xu hướng lớn hơn rất đáng kể ở những vị trí gần mép vết nứt so với vùng lân cận của vết nứt (Hình 10), đặc biệt ở những cấp tải gần cấp tải phá hoại. Không giống như các mẫu kéo trượt, đối với các dầm BTUST dùng cáp không bám dính, chiều dài bám dính hữu hiệu của tấm CFRP gần như bị phụ thuộc bởi khoảng cách giữa các vết nứt. Kết quả thí nghiệm cho thấy khoảng cách nứt trong dầm dao động từ 72 đến 116 mm. Khoảng cách quá nhỏ này dường như không đủ để cho ứng suất kéo trong tấm CFRP lan truyền một cách đều đặn như trường hợp của tấm CFRP trong mẫu kéo trượt, vì vậy có thể đã gây nên hiện tượng

chênh lệch biến dạng như đã nêu trên. Ngoài ra, sự ảnh hưởng của neo U cũng đã góp phần đáng kể ngăn chặn sự trượt của tấm CFRP gia cường uốn trong dầm BTUST dùng cáp không bám dính khiến cho sự phân bố biến dạng của tấm CFRP trong vùng có giá trị mô men uốn không đổi có nhiều khác biệt so với mẫu kéo trượt đơn thuần túy.



Hình 10. Sự phân bố biến dạng bong tách tấm CFRP ($\epsilon_{CFRP,exp}$) trong vùng nứt điển hình của các dầm theo các cấp tải trọng thí nghiệm



Hình 11. Tỷ số biến dạng bong tách của các mẫu dầm BTUST dùng cáp không bám dính so với biến dạng bong tách của mẫu kéo trượt đơn

Ghi chú: m là giá trị trung bình của mẫu kéo trượt 1 và 2 lấy theo [61]; $\epsilon_{db-L/3}$; ϵ_{db-mid} là biến dạng bong tách tấm CFRP tại vùng gia tải và vùng giữa nhịp dầm

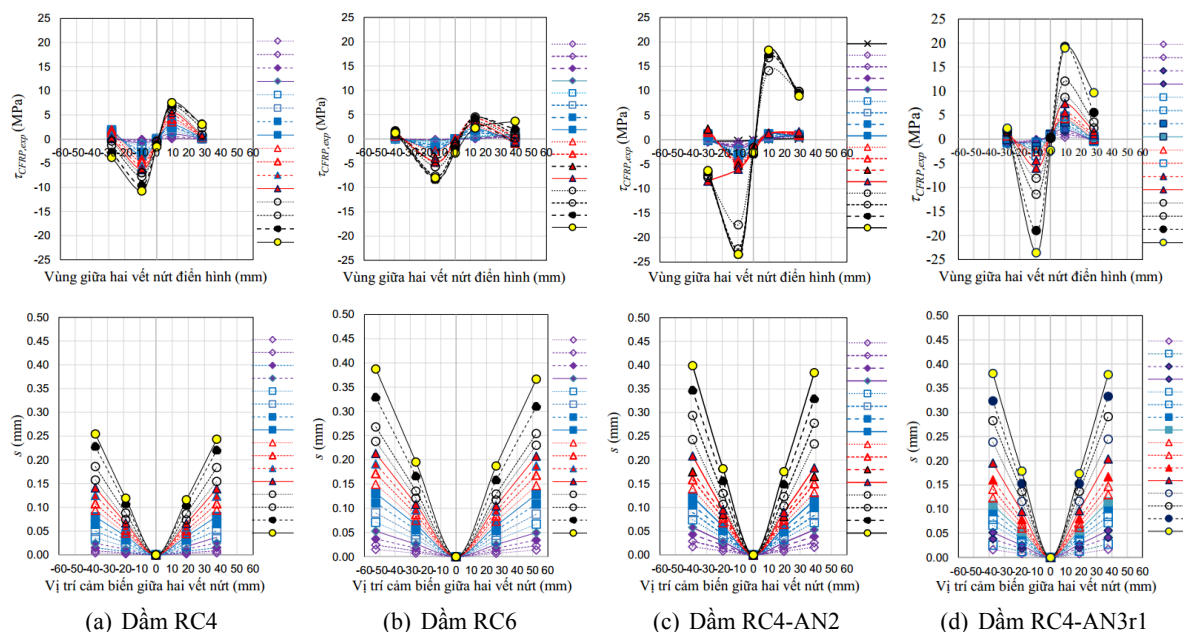
Biến dạng bong tách tấm CFRP của các dầm cao hơn rất nhiều so với mẫu thí nghiệm kéo trượt đơn có cùng độ cứng dọc trục (Hình 11). Trong vùng gần vị trí gia tải, biến dạng bong tách tấm CFRP của các dầm được gia cường bốn và sáu lớp CFRP không sử dụng neo U cao hơn biến dạng bong tách của mẫu kéo trượt bốn lớp CFRP lần lượt là 140% và 110%; trong khi, các dầm được gia cường bốn lớp CFRP có sử dụng neo RC4-AN2 và RC4-AN3r1 cao hơn lần lượt là 250% và 250% (Hình 11(a)).

Biến dạng bong tách tại vùng giữa nhịp dầm trong các dầm được gia cường bốn và sáu lớp CFRP không sử dụng neo cao hơn biến dạng bong tách của mẫu kéo trượt bốn lớp CFRP lần lượt 120% và 140%; trong khi, các dầm được gia cường bốn lớp CFRP có sử dụng neo RC4-AN2 và RC4-AN3r1 cao hơn lần lượt là 280% và 280% (Hình 11(b)).

Sự khác biệt lớn về sự phân bố biến dạng và giá trị biến dạng bong tách của tấm CFRP trong các mẫu dầm có và không có sử dụng neo U so với của các mẫu kéo trượt thuần túy cho thấy việc dự đoán biến dạng bong tách tấm CFRP theo các công thức dựa trên mẫu kéo trượt thuần túy trong một số hướng dẫn thiết kế hiện nay chưa phản ánh đúng điều kiện làm việc thực tế của các dầm được gia cường.

3.3. Ứng suất bám dính và độ trượt của liên kết tấm CFRP - bê tông trong dầm

Sự phân bố ứng suất bám dính trong tấm CFRP và độ trượt tương ứng của nó trong vùng nứt điển hình hình trong các dầm thí nghiệm được thể hiện trong Hình 12; trong đó, ứng suất bám dính được tính theo mô hình của [62]. Ứng suất bám dính lớn nhất giữa tấm CFRP với bê tông của các dầm không sử dụng neo như RC4, RC6 lần lượt là 10,7 MPa, 8,4 MPa, có thể do khi tăng độ cứng dọc trục của tấm CFRP gia cường kháng uốn dẫn đến sự phân bố biến dạng của tấm CFRP trong vùng dầm có giá trị mô men không đổi có xu hướng đều đặn hơn (Hình 10); và của các dầm có sử dụng neo U như RC4-AN2 và RC4-AN3r1 lần lượt là 24,3 MPa và 23,6 MPa; tăng tương ứng 127% và 121% so với dầm RC4.



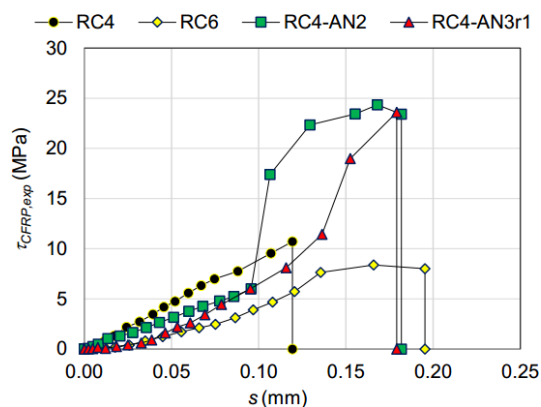
Hình 12. Sự phân bố ứng suất bám dính và độ trượt trong vùng nứt điển hình

Ghi chú: $\tau_{CFRP,exp}$ là ứng suất bám dính của tấm CFRP; s là độ trượt của liên kết tấm CFRP là bê tông

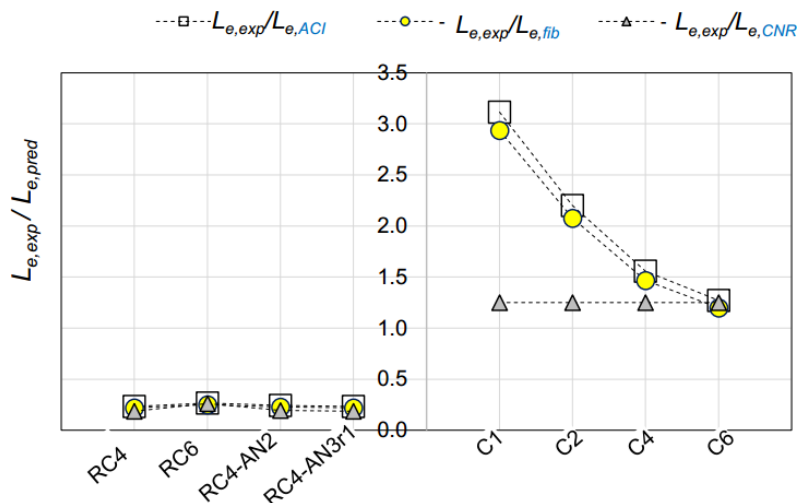
Quan hệ giữa ứng suất bám dính với độ trượt của tấm CFRP trong các dầm này được thể hiện ở Hình 13. Quan hệ giữa ứng suất bám dính và độ trượt của tấm CFRP trong mẫu dầm được gia cường không dùng neo U (RC4 và RC6) có dạng đứt đột ngột. Kết quả này có thể là do ảnh hưởng của hình thái vết nứt trong dầm (khoảng cách nứt nhỏ, chỉ từ 72 đến 116 mm), dẫn đến chiều dài bám dính thực tế của tấm CFRP trong các dầm khá nhỏ (theo mô hình đối xứng bằng 1/2 khoảng cách nứt, từ 36 đến 58 mm), chỉ đạt 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] ($L_e = 161-197$ mm), [22] ($L_e = 170-209$ mm), [37] ($L_e = 200$ mm). Điều này dẫn đến quá trình bong tách tấm CFRP trong dầm diễn ra đột ngột và có dạng 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 (Hình 14), làm cho quá trình truyền ứng suất trong tấm diễn ra đều 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 như đã thấy trong các nghiên cứu trước đây [30, 31, 63–71].

Không hoàn toàn giống như của dầm được gia cường không dùng neo U, quan hệ giữa ứng suất bám dính và độ trượt của tấm CFRP trên dầm được gia cường sử dụng neo U có dạng song tuyến tính (Hình 13). Trong giai đoạn đầu (từ cấp tải 0 đến 78% đối với dầm RC4-AN2 và từ cấp tải 0 đến 83% đối với dầm RC4-AN3r1), ứng suất bám dính giữa tấm CFRP và bê tông của dầm được gia cường có sử dụng neo U có xu hướng tăng tuyến tính theo tải trọng giống như của dầm được gia cường không dùng neo. Tuy nhiên, từ sau cấp tải này, ứng suất bám dính có tốc độ gia tăng nhanh hơn so với tốc độ gia tăng độ trượt, dẫn đến hình thành nhánh gãy khúc như ở Hình 13. Nguyên nhân có thể là do neo U đã giúp ngăn chặn đáng kể sự trượt của tấm CFRP, vì vậy làm tăng nhanh biến dạng của tấm. Kết quả thực nghiệm cho thấy ứng suất bám dính lớn nhất trong các dầm được gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP không hoặc có sử dụng neo U tương ứng cao hơn so với trị ứng suất bám dính cực hạn của mẫu kéo trượt thuần túy từ nghiên cứu của [61] lần lượt trung bình là 55% và 237%.



Hình 13. Quan hệ giữa ứng suất bám dính và độ trượt của liên kết CFRP – bê tông trong các dầm



Hình 14. So sánh chiều dài bám dính hữu hiệu của tấm CFRP theo các tiêu chuẩn khác nhau
Ghi chú: C1, C2, C4 và C6 là các mẫu kéo trượt 1, 2, 4 và 6 lớp CFRP lấy theo [61];
 $L_{e,exp}$ là chiều dài bám dính hữu hiệu của tấm CFRP

4. Kết luận

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử bám dính của tấm CFRP trên dầm BTUST dùng cáp không bám dính khi đã bị nứt và chịu tải trọng uốn. Từ kết quả thực nghiệm đạt được trên năm dầm với các thông số thay đổi gồm số lớp CFRP gia cường (0, 4 hoặc 6 lớp) và sử dụng neo U (có neo đầy đủ, không đầy đủ và không có neo), một số kết luận được rút ra như sau:

(i) Kiểu phá hoại của các dầm được gia cường kháng uốn dùng tấm CFRP bị ảnh hưởng đáng kể bởi yếu tố có hay không có neo U, bố trí neo (đầy đủ hay không đầy đủ trong nhịp cắt) và trạng thái hư hỏng trước khi gia cường (không hoặc có vết nứt);

(ii) Biến dạng bong tách tấm CFRP của dầm thay đổi đột ngột và không đều, lớn hơn nhiều so với của mẫu kéo trượt trong nghiên cứu trước (250% khi không neo; và 490% khi có neo). Tình trạng hư hỏng của dầm trước khi được gia cường ảnh hưởng đáng kể đến biến dạng bong tách tấm CFRP; theo đó, biến dạng bong tách tấm CFRP trong vùng gần vị trí gia tải của dầm đã bị nứt trước khi gia cường thấp hơn so với của dầm còn nguyên trong nghiên cứu trước lần lượt là 35% (không dùng neo U) và 40% (có dùng neo U). Việc sử dụng neo U giúp cải thiện mạnh biến dạng bong tách của tấm CFRP gia cường kháng uốn trong dầm (lên tới 127%);

(iii) Ứng suất bám dính của tấm CFRP trong vùng giữa nhịp dầm có phân bố phức tạp, không đều đặn và thay đổi liên tục. Quan hệ giữa ứng suất bám dính và độ trượt của liên kết CFRP – bê tông trong các vùng nứt điển hình có dạng đứt đột ngột và không có xu hướng mềm hóa. Cường độ bám dính của tấm CFRP trong các dầm không hoặc có sử dụng neo U cao hơn so với của mẫu kéo trượt trong nghiên cứu trước lần lượt trung bình là 55% và 237%;

(iv) Tỉ số giữa khoảng cách vết nứt điển hình trong vùng giữa nhịp dầm với chiều cao làm việc của dầm (tính đến trọng tâm của cáp) từ 0,24 đến 0,38 (từ 72 mm đến 116 mm). Khoảng cách này là tương đối nhỏ và có thể khiến cho chiều dài bám dính hữu hiệu của tấm CFRP thực tế trong dầm có thể nhỏ hơn đáng kể so với các mô hình dự đoán trước đây.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Việt Nam (NAFOSTED) thông qua đề tài mã số 107.01-2018.302.

Tài liệu tham khảo

- [1] Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R. (1991). RC Beams Strengthened with GFRP Plates. I: Experimental Study. *Journal of Structural Engineering*, 117(11):3417–3433.
- [2] Triantafyllou, T. C., Plevris, N. (1992). Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials. *Materials and Structures*, 25(4):201–211.
- [3] Nanni, A. (1997). Carbon FRP strengthening: New technology becomes mainstream. *Concrete International*, 19(6):19–23.
- [4] Nanni, A. (1995). Concrete repair with externally bonded FRP reinforcement. *Concrete International*, 17(6):22–26.
- [5] Rabinovitch, O., Frostig, Y. (2003). Experiments and analytical comparison of RC beams strengthened with CFRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 34(8):663–677.
- [6] Attari, N., Amziane, S., Chemrouk, M. (2012). Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets. *Construction and Building Materials*, 37:746–757.
- [7] Kotynia, R., Baky, H. A., Neale, K. W., Ebead, U. A. (2008). Flexural Strengthening of RC Beams with Externally Bonded CFRP Systems: Test Results and 3D Nonlinear FE Analysis. *Journal of Composites for Construction*, 12(2):190–201.
- [8] 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 (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 15(2V):1–11.

- [9] Reed, C. E., Peterman, R. J. (2004). [Evaluation of Prestressed Concrete Girders Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets](#). *Journal of Bridge Engineering*, 9(2):185–192.
- [10] Rosenboom, O., Walter, C., Rizkalla, S. (2009). [Strengthening of prestressed concrete girders with composites: Installation, design and inspection](#). *Construction and Building Materials*, 23(4):1495–1507.
- [11] Kim, Y. J., Green, M. F., Fallis, G. J. (2008). [Repair of Bridge Girder Damaged by Impact Loads with Prestressed CFRP Sheets](#). *Journal of Bridge Engineering*, 13(1):15–23.
- [12] Ludovico, M. D., Prota, A., Manfredi, G., Cosenza, E. (2010). [FRP Strengthening of Full-Scale PC Girders](#). *Journal of Composites for Construction*, 14(5):510–520.
- [13] Kasan, J. L., Harries, K. A., Miller, R., Brinkman, R. J. (2014). [Limits of Application of Externally Bonded CFRP Repairs for Impact-Damaged Prestressed Concrete Girders](#). *Journal of Composites for Construction*, 18(3).
- [14] Nguyen, T. T. D., Matsumoto, K., Sato, Y., Iwasaki, A., Tsutsumi, T., Niwa, J. (2014). [Effects of externally bonded CFRP sheets on flexural strengthening of pretensioned prestressed concrete beams having ruptured strands](#). *Journal of JSCE*, 2(1):25–38.
- [15] Afefy, H. M., Sennah, K., Cofini, A. (2016). [Retrofitting Actual-Size Precracked Precast Prestressed Concrete Double-Tee Girders Using Externally Bonded CFRP Sheets](#). *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(2).
- [16] Pino, V., Nanni, A., Arboleda, D., Roberts-Wollmann, C., Cousins, T. (2017). [Repair of Damaged Prestressed Concrete Girders with FRP and FRCM Composites](#). *Journal of Composites for Construction*, 21(3).
- [17] Rosenboom, O., Hassan, T. K., Rizkalla, S. (2007). [Flexural behavior of aged prestressed concrete girders strengthened with various FRP systems](#). *Construction and Building Materials*, 21(4):764–776.
- [18] Chakrabari, P. R. (2005). [Behavior of Un-Bonded Post-Tensioned Beams Repaired and Retrofitted with Composite Materials](#). *Structures Congress 2005*, American Society of Civil Engineers.
- [19] Meski, F. E., Harajli, M. (2013). [Flexural Behavior of Unbonded Posttensioned Concrete Members Strengthened Using External FRP Composites](#). *Journal of Composites for Construction*, 17(2):197–207.
- [20] Meski, F. E., Harajli, M. (2015). [Evaluation of the Flexural Response of CFRP-Strengthened Unbonded Posttensioned Members](#). *Journal of Composites for Construction*, 19(3).
- [21] Ghasemi, S., Maghsoudi, A. A., Bengar, H. A., Ronagh, H. R. (2016). [Sagging and Hogging Strengthening of Continuous Unbonded Posttensioned HSC Beams by NSM and EBR](#). *Journal of Composites for Construction*, 20(2).
- [22] Nguyen-Minh, L., Phan-Vu, P., Tran-Thanh, D., Truong, Q. P. T., Pham, T. M., Ngo-Huu, C., Rovňák, M. (2018). [Flexural-strengthening efficiency of cfrp sheets for unbonded post-tensioned concrete T-beams](#). *Engineering Structures*, 166:1–15.
- [23] Tran, D. T., Phan-Vu, P., Pham, T. M., Dang, T. D., 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*, 24(2).
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Sato, Y., Kimura, K., Kobatake, Y. (1997). [Bond behavior between CFRP sheet and concrete \(part 1\)](#). *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, 62(500):75–82.
- [27] 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.
- [28] Brosens, K., Van Gemert, D. (1998). Plate end shear design for external CFRP laminates. *AEDIFICATIO Publishers, Fracture Mechanics of Concrete Structures*, 3:1793–1804.
- [29] Yao, J., Teng, J., Chen, J. (2005). [Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints](#). *Composites Part B: Engineering*, 36(2):99–113.
- [30] Dai, J.-G., Sato, Y., Ueda, T. (2002). [Improving the load transfer and effective bond length for FRP](#)

- composites bonded to concrete. *Proceedings of Japan Concrete Institute*, 24(2):1423–8.
- [31] 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.
- [32] Mazzotti, C., Savoia, M., Ferracuti, B. (2009). [A new single-shear set-up for stable debonding of FRP–concrete joints](#). *Construction and Building Materials*, 23(4):1529–1537.
- [33] Mazzotti, C., Savoia, M., Ferracuti, B. (2008). [An experimental study on delamination of FRP plates bonded to concrete](#). *Construction and Building Materials*, 22(7):1409–1421.
- [34] Ferracuti, B., Savoia, M., Mazzotti, C. (2006). [A numerical model for FRP–concrete delamination](#). *Composites Part B: Engineering*, 37(4-5):356–364.
- [35] De Lorenzis, L., Miller, B., Nanni, A. (2001). Bond of FRP laminates to concrete. *ACI Materials Journal*, 98(3):256–264.
- [36] Pellegrino, C., Tinazzi, D., Modena, C. (2008). [Experimental Study on Bond Behavior between Concrete and FRP Reinforcement](#). *Journal of Composites for Construction*, 12(2):180–189.
- [37] 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*. National Research Council (CNR), Rome.
- [38] ACI 440.2R-17 (2017). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2R-17)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [39] Fib Model Code 2010 (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. CH-1015 Lausanne, Switzerland.
- [40] Teng, J. G., Smith, S. T., Yao, J., Chen, J. F. (2003). [Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs](#). *Construction and Building Materials*, 17(6-7):447–462.
- [41] Teng, J., Lu, X. Z., Ye, L. P., Jiang, J. J. (2004). Recent research on intermediate crack debonding in FRP-strengthened RC beams. *International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*.
- [42] Pham, H., Al-Mahaidi, R. (2004). [Experimental investigation into flexural retrofitting of reinforced concrete bridge beams using FRP composites](#). *Composite Structures*, 66(1-4):617–625.
- [43] Larson, K. H., Peterman, R. J., Rasheed, H. A. (2005). [Strength-Fatigue Behavior of Fiber Reinforced Polymer Strengthened Prestressed Concrete T-Beams](#). *Journal of Composites for Construction*, 9(4): 313–326.
- [44] Rosenboom, O., Rizkalla, S. (2006). [Behavior of Prestressed Concrete Strengthened with Various CFRP Systems Subjected to Fatigue Loading](#). *Journal of Composites for Construction*, 10(6):492–502.
- [45] 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.
- [46] 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*, 1:279–286.
- [47] Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T., Yoshizawa, H. (2001). [Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete](#). *ACI Structural Journal*, 98(3):359–367.
- [48] Yoshizawa, H., Wu, Z., Yuan, H., Kanakubo, T. (2000). [Study on FRP-concrete interface bond performance](#). *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2000(662):105–119.
- [49] 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.
- [50] Täljsten, B. (1994). *Plate bonding: Strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fibre reinforced plastics*. Luận án Tiến sĩ, Luleå tekniska universitet.
- [51] Yuan, H., Wu, Z. (1999). Interfacial fracture theory in structures strengthened with composite of continuous fiber. *Proceedings of the Symposium of China and Japan, science and technology of the 21st century*, Tokyo, Japan, 1315:142155.
- [52] Kanakubo, T., Furuta, T., Fukuyama, H. (2003). [Bond strength between fiber-reinforced polymer laminates and concrete](#). *Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, World Scientific Publishing Company, 133–142.

- [53] Buyukozturk, O., Gunes, O., Karaca, E. (2004). [Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites](#). *Construction and Building Materials*, 18(1):9–19.
- [54] TCVN 3105:1993. *Hỗn hợp bê tông nặng và bê tông nặng - Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [55] ASTM A416 (2016). *Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed*. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [56] TCVN 1651-1:2008. *Thép cốt bê tông*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [57] TCVN 5574:2012. *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Tiêu chuẩn thiết kế*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [58] ASTM D3039/D3039M (2017). *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [59] ACI 318 (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [60] Eurocode 2 (2004). *Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels.
- [61] Phuong, P. V. (2022). *Hiệu năng gia cường kháng uốn của tấm CFRP cho dầm bê tông căng sau dùng cáp không bám dính*. Luận án tiến sĩ, Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM.
- [62] Ferracuti, B., Savoia, M., Mazzotti, C. (2007). [Interface law for FRP–concrete delamination](#). *Composite Structures*, 80(4):523–531.
- [63] 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.
- [64] Chen, J. F., Yuan, H., Teng, J. G. (2007). [Debonding failure along a softening FRP-to-concrete interface between two adjacent cracks in concrete members](#). *Engineering Structures*, 29(2):259–270.
- [65] Teng, J. G., Yuan, H., Chen, J. F. (2006). [FRP-to-concrete interfaces between two adjacent cracks: Theoretical model for debonding failure](#). *International Journal of Solids and Structures*, 43(18-19):5750–5778.
- [66] Yuan, A., Dai, H., Sun, D., Cai, J. (2013). [Behaviors of segmental concrete box beams with internal tendons and external tendons under bending](#). *Engineering Structures*, 48:623–634.
- [67] Yuan, H., Teng, J. G., Seracino, R., Wu, Z. S., Yao, J. (2004). [Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints](#). *Engineering Structures*, 26(5):553–565.
- [68] Yuan, H., Wu, Z., Yoshizawa, H. (2001). [Theoretical solutions on interfacial stress transfer of externally bonded steel/composite laminates](#). *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2001(675):27–39.
- [69] Lu, X., Teng, J., Ye, L., Jiang, J. (2005). [Bond–slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete](#). *Engineering Structures*, 27(6):920–937.
- [70] Liu, K., Wu, Y.-F. (2012). [Analytical identification of bond–slip relationship of EB-FRP joints](#). *Composites Part B: Engineering*, 43(4):1955–1963.
- [71] Zhou, Y.-W., Wu, Y.-F., Yun, Y. (2010). [Analytical modeling of the bond–slip relationship at FRP–concrete interfaces for adhesively-bonded joints](#). *Composites Part B: Engineering*, 41(6):423–433.