

HIỆU QUẢ GIA CƯỜNG KHÁNG CẮT CHO DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP BẰNG VẬT LIỆU TẦM SỢI CÁC BON

Hà Mạnh Hùng^{a,*}, Nguyễn Trung Hiếu^a

^a*Khoa Xây dựng dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 01/03/2021, Sửa xong 17/03/2021, Chấp nhận đăng 19/03/2021

Tóm tắt

Gia cường kháng cắt cho kết cấu dầm bê tông cốt thép (BTCT) được tiến hành khi kết cấu dầm không đủ khả năng chịu cắt (do tính toán không đủ, do sai sót trong quá trình thi công, do có sự gia tăng tải trọng hay do thay đổi sơ đồ làm việc...). Nội dung bài báo trình bày về thiết kế gia cường kháng cắt theo tiêu chuẩn ACI 440.2R-08 và các kết quả nghiên cứu thực nghiệm sự làm việc của dầm BTCT được gia cường kháng cắt bằng vật liệu tấm sợi các bon (CFRP). 03 mẫu dầm BTCT thí nghiệm có cùng kích thước hình học và cấu tạo cốt thép được chế tạo, trong đó 01 mẫu dầm không được gia cường là dầm đối chứng, 02 dầm còn lại được gia cường kháng cắt bằng vật liệu CFRP theo dải. Hiệu quả gia cường được đánh giá thông qua sự gia tăng khả năng chịu cắt của các mẫu dầm sau gia cường.

Từ khoá: dầm; gia cường; tấm sợi composite; cắt; tiêu chuẩn ACI 440.2R-08.

THE STRENGTHENING EFFICIENCY OF REINFORCED CONCRETE BEAMS UNDER SHEAR USING CFRP SHEETS

Abstract

This paper presents the design of the shear behavior according to ACI 440.2R-08 and an experimental study on this shear behavior of reinforced concrete (RC) beams strengthened with externally bonded carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets. This strengthening is carried out when the beam structure is not capable enough to withstand shear (due to insufficient calculation, errors during construction, increased load or due to change the working diagram...). Three identical specimens were cast. The concrete grade and the steel reinforcement ratio were kept constant for all specimens. One specimen without being strengthened was the control specimens, while the two other specimens were strengthened with CFRP composite sheets. The strengthening effect is assessed through the increase in shear strength of the reinforced post-beam specimens.

Keywords: beam; strengthening; composite sheet; shear; ACI 440.2R-08.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15\(1V\)-09](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15(1V)-09) © 2021 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Hiện nay, việc sử dụng tấm sợi composite cường độ cao (Fibre Reinforced Polymer, viết tắt FRP) trong công tác gia cường kết cấu công trình được áp dụng phổ biến ở các nước tiên tiến trên thế giới. Các kết cấu công trình được gia cường có thể là kết cấu cột, dầm, sàn bê tông cốt thép, kết cấu khối xây gạch... Trong số các vật liệu composite dùng để gia cường kết cấu bằng bê tông cốt thép thì vật liệu tấm sợi các bon (viết tắt CFRP) được sử dụng rộng rãi. Phương pháp gia cường bằng vật liệu CFRP tận dụng được những ưu điểm của loại vật liệu này như cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hunghm@nuce.edu.vn (Hùng, H. M.)

cao, trọng lượng nhẹ, không bị ăn mòn... Bên cạnh ưu điểm về đặc tính cơ học, gia cường bằng vật liệu CFRP còn cho thấy những tiện lợi cho quá trình thi công gia cường như nhanh chóng, đơn giản, không cần nhiều máy móc thiết bị, thời gian thi công nhanh. Trên Hình 1 giới thiệu hình ảnh sử dụng tấm sợi CFRP trong việc gia cường sức kháng uốn và kháng cắt cho dầm bê tông cốt thép.



(a) Gia cường sức kháng uốn



(b) Gia cường sức kháng cắt

Hình 1. Hình ảnh gia cường dầm BTCT bằng vật liệu CFRP

Ở nước ta, vật liệu CFRP đã được sử dụng cho việc gia cường một số công trình cầu và nhà dân dụng. Tuy nhiên việc áp dụng còn hạn chế, chưa được phổ biến trong đó những nguyên nhân chính là giá thành và tiêu chuẩn kỹ thuật áp dụng cho loại vật liệu gia cường này. Hiện nay ở nước ta chưa có các tiêu chuẩn tính toán thiết kế, gia cường kết cấu bê tông cốt thép bằng vật liệu CFRP. Việc tính toán chủ yếu dựa theo các tiêu chuẩn nước ngoài như tiêu chuẩn ACI 440.2R-08, ISIS, fib, TR 55, JSCE và AASHTO [1–6].

Kết cấu BTCT được gia cường bằng vật liệu CFRP được tạo thành từ ba loại vật liệu: bê tông, cốt thép và tấm CFRP. Trong đó, tấm CFRP đóng vai trò như cốt thép trong các trường hợp gia cường kháng uốn và kháng cắt cho kết cấu. Việc sử dụng vật liệu CFRP trong thiết kế gia cường đòi hỏi người kỹ sư không chỉ hiểu về đặc tính cơ lý của loại vật liệu này mà còn là sự tương tác giữa vật liệu CFRP với bê tông, cốt thép khi mà mỗi loại vật liệu có sự khác biệt lớn về đặc trưng cơ học. Những nghiên cứu thực nghiệm về sự làm việc chịu uốn của kết cấu BTCT được gia cường bằng cách dán tấm CFRP ở vùng làm việc chịu kéo cho thấy ứng xử của kết cấu rất phức tạp so với kết cấu BTCT không gia cường [7–12], với nhiều cơ chế phá hoại có thể xảy ra phụ thuộc vào các đặc trưng của vật liệu CFRP, giải pháp thiết kế, thi công, điều kiện làm việc.

Các nghiên cứu về ứng xử của kết cấu BTCT được gia cường và hiệu quả gia cường bằng vật liệu FRP nói chung và vật liệu CFRP đã được nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước tiến hành mà một số nghiên cứu điển hình được trình bày trong các tài liệu [13–20]. Các kết quả thu được đều chứng minh được hiệu quả của việc sử dụng loại vật liệu này khi gia cường sức kháng uốn, sức kháng cắt, khả năng chịu nén, chịu xoắn... của kết cấu BTCT. Đồng thời cũng cho thấy ứng xử của kết cấu được gia cường là phức tạp, với nhiều dạng phá hoại khác nhau và hiệu quả của việc gia cường phụ thuộc rất nhiều vào đặc trưng cơ học của vật liệu CFRP (có giá trị khác nhau theo nhà sản xuất) và vào quy cách, chất lượng thi công gia cường dán tấm sợi lên kết cấu được gia cường.

Nội dung bài báo trình bày về vấn đề thiết kế gia cường kháng cắt theo tiêu chuẩn ACI 440.2R-08

[1] và những kết quả nghiên cứu thực nghiệm sự làm việc của kết cấu dầm BTCT được gia cường bằng vật liệu CFRP. Những kết quả thu được thông qua nghiên cứu này góp phần làm rõ ứng xử của dầm bê tông cốt thép được gia cường bằng vật liệu CFRP cũng như hiệu quả của việc gia cường kết cấu dầm BTCT chịu cắt bằng loại vật liệu này.

2. Thiết kế gia cường kháng cắt dầm BTCT theo ACI 440.2R-08 [1]

Từ những năm 1990 đến nay, đã có rất nhiều tiêu chuẩn cũng như chỉ dẫn thiết kế và thi công gia cường kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) sử dụng loại vật liệu này. Những tiêu chuẩn này về cơ bản được xây dựng dựa trên cơ sở của tiêu chuẩn thiết kế kết cấu BTCT. Hiện nay, các nước tiên tiến trên thế giới đã ban hành các tiêu chuẩn và chỉ dẫn kỹ thuật về việc thiết kế và thi công gia cường kết cấu BTCT bằng vật liệu FRP, trong đó có tiêu chuẩn chính được sử dụng phổ biến nhất là ACI 440.2R-08 [1]:

Theo ACI, khả năng chịu cắt của kết cấu dầm BTCT sau gia cường, ϕV_n , phải lớn hơn so với lực cắt yêu cầu, V_u , mà kết cấu phải chịu:

$$\phi V_n \geq V_u \quad (1)$$

Khả năng chịu cắt của kết cấu sau gia cường được xác định theo công thức sau:

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (2)$$

trong đó V_c , V_s , V_f lần lượt là khả năng chịu cắt của bê tông, cốt thép đai và của FRP; ϕ là hệ số giảm độ bền khi tính toán chịu cắt, lấy bằng 0,75; ψ_f là hệ số giảm độ bền phụ thuộc cho tấm FRP gia cường kháng cắt.

Các bước thiết kế gia cường kháng cắt cho kết cấu dầm BTCT làm việc chịu uốn bằng vật liệu FRP, khi vật liệu FRP được dán theo dải, gồm:

- Xác định khả năng chịu cắt của bê tông và của cốt thép:

$$V_c = 0,17 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (3)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (4)$$

trong đó A_v là diện tích cốt thép đai chịu cắt; f_y là cường độ tính toán của cốt thép; s là khoảng cách cốt đai.

- Kiểm tra điều kiện không chế:

$$\frac{V_u}{\phi} - V_c \leq 0,83 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (5)$$

trong đó f'_c là cường độ chịu nén đặc trưng của bê tông (xác định dựa trên cường độ chịu nén của mẫu thí nghiệm hình trụ tiêu chuẩn); d và b_w lần lượt là chiều cao hiệu quả và bề rộng của tiết diện dầm BTCT.

Nếu điều kiện không chế không thỏa mãn cần lựa chọn giải pháp gia cường khác như tăng tiết diện.

- Xác định hệ số giảm khả năng bám dính κ_v theo công thức:

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11,9 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (6)$$

trong đó k_1, k_2 là các hệ số; L_e là chiều dài mà trên đó ứng suất bám dính được duy trì; ε_{fu} là biến dạng cực hạn của tấm FRP.

- Xác định biến dạng hiệu quả trong tấm FRP:

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (7)$$

- Xác định ứng suất hiệu quả trong tấm FRP:

$$\sigma_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (8)$$

- Tính diện tích tấm FRP tham gia chịu cắt:

$$A_{vf} = 2n t_f w_f \quad (9)$$

trong đó n là số lớp FRP; t_f và w_f lần lượt là chiều dày và chiều rộng của dải FRP.

- Tính toán khả năng chịu cắt của tấm FRP:

$$V_f = \frac{A_{vf} \sigma_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (10)$$

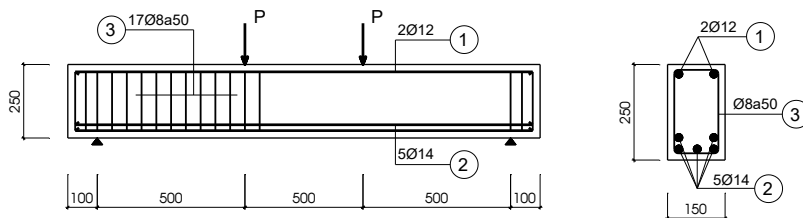
trong đó α là góc nghiêng của của các dải FRP dán lên kết cấu so với phương nằm ngang; s_f là khoảng cách giữa các dải FRP; d_{fv} là chiều cao làm việc hiệu quả của các dải FRP.

Từ các kết quả tính toán, xác định sức kháng cắt của kết cấu sau khi gia cường theo công thức (2) và đánh giá hiệu quả gia cường theo công thức (1).

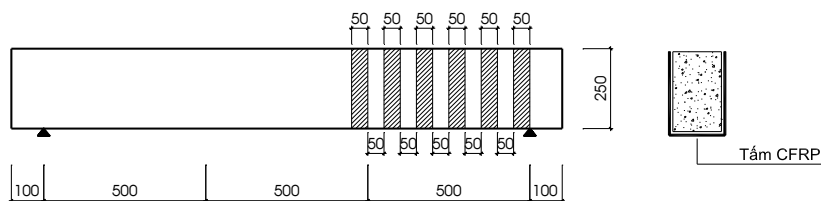
3. Nghiên cứu thực nghiệm

3.1. Mẫu thí nghiệm và vật liệu chế tạo

Trong nghiên cứu này, 03 mẫu dầm được chế tạo giống nhau trước khi tiến hành gia cường. Các mẫu dầm BTCT thí nghiệm có chiều dài 1700 mm, kích thước tiết diện $b \times h = 150 \times 250$ mm. Nhịp làm việc của dầm là 1500 mm. Dầm chịu tác dụng của 02 lực tập trung P đặt cách các gối tựa 500 mm. Qua tính toán theo chỉ dẫn của tiêu chuẩn ACI318-05 [7], để tránh cho các mẫu dầm thí nghiệm không bị phá hoại do mô men uốn, lựa chọn cốt dọc chịu lực vùng kéo (phía dưới dầm) là $5\phi 14$, cốt dọc vùng nén (phía trên dầm) bố trí $2\phi 12$. Cốt thép đai $\phi 6a50$ được bố trí ở một phía của dầm, phía còn lại không được bố trí cốt đai. Dầm không gia cường (đối chứng) được ký hiệu D-1, 02 dầm còn lại ký hiệu D-2 và D-3 được gia cường kháng cắt (vùng không bố trí cốt đai) bằng vật liệu CFRP theo dải, dạng U với bề rộng các tấm CFRP là 50 mm. Chi tiết các dầm được trình bày trên Hình 2 và Hình 3.



Hình 2. Kích thước hình học và cấu tạo cốt thép của các mẫu dầm thí nghiệm



Hình 3. Chi tiết phương án gia cường kháng cắt

Cường độ vật liệu bê tông, vật liệu thép sử dụng chế tạo dầm được xác định thông qua thí nghiệm trên các mẫu thí nghiệm và được trình bày tóm tắt trong Bảng 1. Cả 03 mẫu dầm thí nghiệm được chế tạo cùng một cấp phối bê tông và đổ cùng ngày. Kết quả thí nghiệm cường độ nén trung bình của 03 mẫu thí nghiệm hình trụ tiêu chuẩn $D \times H = 150 \times 300$ mm, được lấy trong quá trình đúc các mẫu dầm được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Cường độ bê tông và cốt thép chế tạo dầm

Cường độ chịu nén của bê tông ở 28 ngày	24,2 MPa
Giới hạn chảy của thép D14	375 MPa
Giới hạn chảy của thép D8	365 MPa

Vật liệu tấm sợi các bon CFRP sử dụng gia cường dầm do hãng TORAY (Nhật Bản) sản xuất. Các thông số đặc trưng của vật liệu được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Các đặc trưng của vật liệu CFRP sử dụng gia cường

STT	Thông số	Giá trị
1	Chiều dày tấm t_f	0,365 mm
2	Cường độ chịu kéo f_{fu}	1210 MPa
3	Mô đun đàn hồi E_f	96,9 GPa
4	Biến dạng cực hạn ε_{fu}	1,85%

3.2. Quy trình thi công gia cường tấm vật liệu composite

Trên Hình 4 và Hình 5 giới thiệu một số hình ảnh vật liệu và thi công gia cường dầm bằng vật liệu CFRP. Đầu tiên, bề mặt dầm tại vùng dán tấm gia cường được đánh sạch bằng máy mài cầm tay và giấy ráp để loại bỏ phần vữa xi măng kém chất lượng và tăng sự bám dính giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông. Tiếp đến quét lớp keo dán epoxy lên bề mặt bê tông thành lớp mỏng và quét lên hai mặt tấm CFRP sao cho keo epoxy xâm nhập hết vào tấm CFRP. Cuối cùng dán tấm CFRP lên bề mặt bê tông. Thí nghiệm được tiến hành sau 72 h để đảm bảo lực dính kết giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông.



Hình 4. Hình ảnh vật liệu CFRP sử dụng trong gia cường



Hình 5. Một số hình ảnh thi công gia cường tấm sợi composite

3.3. Tính toán khả năng chịu lực của dầm được gia cường

Việc tính toán khả năng chịu cắt của các dầm thí nghiệm nhằm làm cơ sở cho công tác thí nghiệm trong việc lựa chọn hệ gia tải (kích thủy lực, hệ khung gia tải) và so sánh khả năng chịu cắt theo tính toán của các mẫu dầm gia cường D-2 và D-3 với kết quả thực nghiệm. Dựa trên các số liệu thí nghiệm về cường độ bê tông và cường độ của cốt thép và các đặc trưng cơ học của vật liệu CFRP, xác định được khả năng chịu cắt của dầm sau khi gia cường dựa theo các công thức được trình bày ở mục 2 (không xét đến hệ số an toàn ϕ khi tính toán). Tổng hợp kết quả tính toán khả năng chịu cắt của các dầm thí nghiệm được trình bày ở Bảng 3.

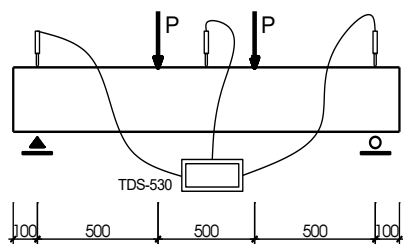
Bảng 3. Khả năng chịu cắt của các mẫu dầm theo tính toán lý thuyết theo tiêu chuẩn ACI 440.2R-08 [1]

Dầm	Khả năng chịu cắt bên trái $V_c + V_s$ (kN)	Khả năng chịu cắt bên phải $V_c + V_f$ (kN)
D-1		$25,6 + 0 = 25,6$
D-2, D-3	$25,6 + 139,3 = 164,9$	$25,6 + 23,0 = 48,6$

3.4. Sơ đồ thí nghiệm và bố trí dụng cụ đo

Các mẫu dầm được thí nghiệm theo sơ đồ dầm đơn giản kê lên gối tựa cố định và gối tựa di động (Hình 6). Dầm chịu tác dụng của 02 lực tập trung P cách gối tựa mỗi bên 750 mm. Để tạo ra tải trọng tác dụng lên dầm, sử dụng kích thủy lực (loại 20 tấn) kết hợp với dầm phân tải. Thông qua dầm phân tải, tải trọng tập trung đầu kích được phân thành 02 tải trọng bằng nhau tác dụng lên dầm. Giá trị tải trọng tập trung đầu kích được xác định thông qua 01 dụng cụ đo lực điện tử (Load Cell) được kết nối với bộ xử lý số liệu Data-Logger TDS 530 (do hãng Tokyo Sokki – Nhật Bản sản xuất).

Chuyển vị của dầm được xác định thông qua 03 dụng cụ đo chuyển vị LVDT được bố trí ở hai gối tựa và ở giữa dầm. Trong trường hợp này, độ võng f ở vị trí giữa dầm được xác định theo công thức $f = f_2 - 0,5(f_1 + f_3)$ với f_1, f_2, f_3 là giá trị chuyển vị xác định từ số đọc trên các LVDT tương ứng. Các dụng cụ đo chuyển vị, lực load cell được kết nối với bộ thu thập, xử lý số liệu TDS-530 cho phép ghi nhận tự động và đồng thời các thông số đo đạc trong thí nghiệm.

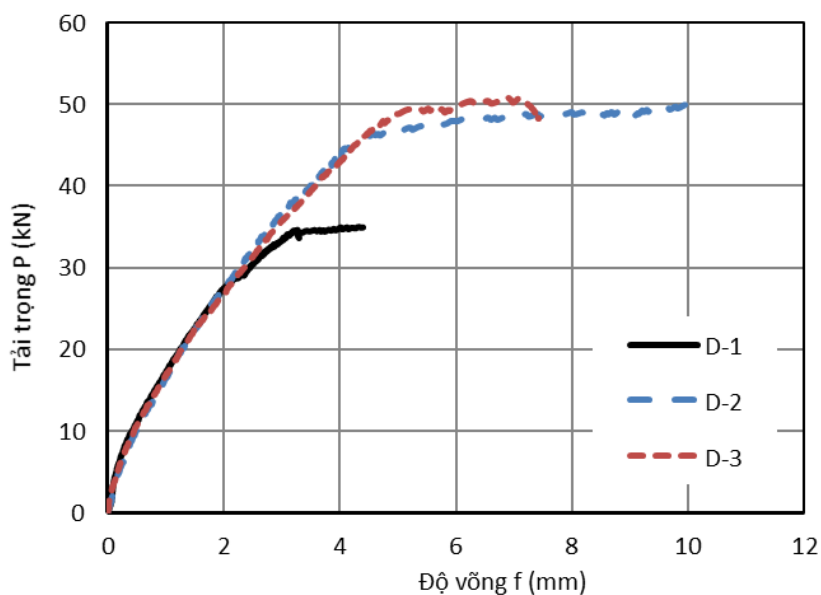


Hình 6. Sơ đồ thí nghiệm

3.5. Phân tích và đánh giá kết quả

a. Quan hệ tải trọng – độ võng

Trên Hình 7 trình bày mối quan hệ giữa tải trọng P và độ võng f tại tiết diện giữa nhịp của các mẫu đầm thí nghiệm.



Hình 7. Quan hệ tải trọng - độ võng của các đầm thí nghiệm

Các kết quả thu được từ biểu đồ $P-f$ của thí nghiệm cho thấy, việc gia cường kháng cắt đầm BTCT bằng vật liệu tấm sợi CFRP không có tác dụng gia tăng độ cứng của đầm BTCT.

Kết quả thu được trên Hình 7 cũng cho thấy có sự chênh lệch về độ võng cực hạn của các đầm D-1, D-2 và D-3 tại thời điểm bị phá hoại hoàn toàn. Điều này được giải thích bằng việc các đầm đều bị phá hoại cắt. Đây là dạng phá hoại đột ngột phụ thuộc vào sự hình thành và phát triển của vết nứt xiên trong bê tông. Sự không đồng đều về phân bố cốt liệu trong bê tông (chủ yếu là cốt liệu đá dăm)

cũng như vai trò của lớp CFPR gia cường ảnh hưởng đến sự phát triển của vết nứt, dẫn đến sự chênh lệch của tải trọng và độ võng cực hạn của các mẫu thí nghiệm.

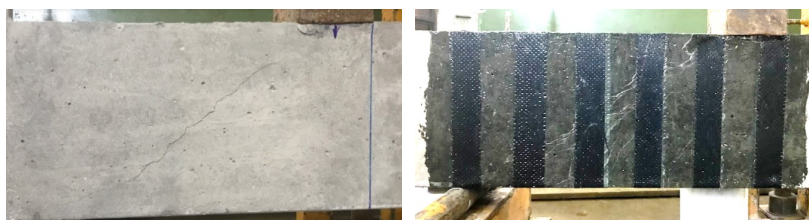
Giá trị của tải trọng cực hạn gây phá hoại các mẫu đầm và hiệu quả của công tác gia cường được trình bày ở Bảng 4. Có thể nhận thấy các đầm được gia cường chịu cắt bằng tấm CFRP cho có lực phá hoại cao hơn hẳn so với mẫu đầm đối chứng. Mức độ tăng khả năng chịu cắt, với sự tham gia của tấm CFRP, lần lượt là 50,7% và 48,0% của đầm D-2 và D-3 so với đầm D-1.

Bảng 4. Tải trọng phá hoại (cắt) các mẫu đầm

Dầm	Tải trọng phá hoại theo thực nghiệm P_{ph} (kN)	% tăng khả năng chịu lực
D-1	33,5	-
D-2	50,5	50,7%
D-3	49,6	48,0%

b. Sự phá hoại các mẫu thí nghiệm

Các mẫu đầm thí nghiệm đều bị phá hoại cắt. Trên Hình 8 trình bày minh họa hình ảnh phá hoại của mẫu đầm đối chứng D-1 và của mẫu đầm được gia cường D-2. Hình ảnh phá hoại từ mẫu đầm D-1 cho thấy xuất hiện 01 vết nứt xiên khoảng 450 so với phương nằm ngang, bề rộng vết nứt phát triển nhanh. Đối với đầm D-2, do sự ngăn cản của tấm FRP và lớp keo dán nên xuất hiện nhiều hơn các vết nứt nhỏ xiên so với phương nằm ngang, với bề rộng vết nứt được hạn chế đáng kể so với bề rộng vết nứt trên đầm D-1.



Hình 8. Hình ảnh phá hoại đầm đối chứng D1 và đầm được gia cường D-2

Đối với các mẫu đầm được gia cường, khi bề rộng vết nứt tăng lên thì sự truyền lực qua vết nứt được đảm bảo thông qua sự làm việc của các tấm FRP gia cường. Sự làm việc này được đảm bảo thông qua lực bám dính giữa tấm FRP và bề mặt bê tông. Khi bề rộng vết nứt tăng lên sẽ dẫn đến ứng suất kéo trong tấm FRP lớn. Lực kéo trong tấm FRP lớn đã kéo bong lớp bê tông bảo vệ ở đầu tự do của tấm FRP (Hình 9), làm mất liên kết giữa tấm FRP với bề mặt bê tông và gây phá hoại đầm. Các tấm FRP chưa bị đứt khi đầm bị phá hoại. Cơ chế phá hoại này đều quan sát được đối với 02 đầm D-2 và D-3. Từ cơ chế này cho thấy, trong công tác gia cường nói chung và gia cường kháng cắt nói riêng, cần đảm bảo chất lượng của lớp bê tông bảo vệ ở vùng gia cường cũng như đảm bảo được lực bám dính giữa tấm FRP và bề mặt bê tông (thông qua xử lý làm phẳng, nhẵn bề mặt, đảm bảo chất lượng keo dán...) để tăng hiệu quả của việc gia cường.

Các mẫu đầm gia cường D-2, D-3 bị phá hoại hoàn toàn khi xảy ra bong tấm FRP khỏi bề mặt bê tông (Hình 9).



Hình 9. Lớp bê tông bảo vệ ở cuối tấm FRP bị kéo vỡ

c. So sánh kết quả thực nghiệm với kết quả tính toán lý thuyết

Trên Bảng 5 trình bày kết quả so sánh tải trọng phá hoại giữa tính toán lý thuyết theo ACI 440.2R-08 và kết quả thí nghiệm của các dầm gia cường D-2 và D-3. Có thể nhận thấy giá trị thu được từ thực nghiệm lớn hơn so với lý thuyết, và độ chênh lệch là không đáng kể. Như vậy kết quả tính toán lý thuyết theo ACI 440.2R-08 phù hợp trong việc dự báo khả năng chịu cắt của dầm BTCT gia cường bằng vật liệu CFRP.

Bảng 5. So sánh tải trọng phá hoại (cắt) theo tính toán lý thuyết với thực nghiệm

Dầm	Tải trọng phá hoại theo tính toán P_{lt} (kN)	Tải trọng phá hoại theo thực nghiệm P_m (kN)	P_m/P_{lt}
D-2	48,6	50,5	1,04
D-3	48,6	49,6	1,02

4. Kết luận về hiệu quả gia cường kháng cắt

Bên cạnh các giải pháp truyền thống, sử dụng tấm sợi CFRP trong công tác gia cường kháng cắt là giải pháp tiên tiến với những ưu điểm nổi bật như phương pháp thi công đơn giản, thời gian thi công nhanh và không làm thay đổi không gian kiến trúc của công trình sau gia cường. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy các dầm được gia cường chịu cắt bằng tấm CFRP cho có lực phá hoại cao hơn hẳn so với mẫu dầm đối chứng, phương pháp gia cường kháng cắt cho kết cấu dầm BTCT bằng cách sử dụng tấm sợi FRP dán thành dải cho hiệu quả rõ rệt trong việc tăng sức kháng cắt của dầm BTCT. Cả 02 dầm gia cường bằng vật liệu CFRP đều bị phá hoại do lực kéo trong tấm FRP lớn gây kéo vỡ lớp bê tông bảo vệ. Điều này cho thấy trong công tác gia cường, những vị trí hư hỏng bề mặt bê tông hoặc lớp bảo vệ kém chất lượng cần được tiến hành sửa chữa trước khi tiến hành thi công gia cường.

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) cho đề tài mã số 107.01-2019.321.

Tài liệu tham khảo

- [1] ACI 440.2R-08 (2008). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Reported by ACI Committee 440, American Concrete Institute.
- [2] FIP Bulletin No 14 (2001). *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC structures*. Technical Report, Bulletin 14, International Federation for Structural Concrete.
- [3] ISIS (2008). *FRP Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, Design Manual 4, Version 2*. The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS Network).
- [4] TR55 (2000). *Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials*. Concrete Society Technical Report 55, The Concrete Society, Crowthorne, UK.
- [5] JSCE (2001). *Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheet*. Concrete Engineering Series 41, Japan Society of Civil Engineering.
- [6] AASHTO (2012). *Guide Specifications for Design of Bonded FRP Systems for Repair and Strengthening of Concrete Bridge Elements*. First Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- [7] ACI 318-14 (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute.
- [8] ACI 546R-04 (2004). *Concrete Repair Guide*. American Concrete Institute.
- [9] ACI 224.1R (2007). *Causes, Evaluation and Repair of Crack in Concrete Structures*. American Concrete Institute.
- [10] ASTM D3039. *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*.
- [11] Hiếu, N. T. (2015). Nghiên cứu hiệu quả gia cường kháng uốn cho dầm bê tông cốt thép bằng vật liệu tấm sợi các bon. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 1/2015.
- [12] Hiếu, N. T., Cường, L. T. (2018). Nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường dầm bê tông cốt thép chịu xoắn bằng vật liệu tấm sợi các bon CFRP. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật và Công nghệ Việt Nam*, 60(3).
- [13] 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.
- [14] Chen, J.-F., Teng, J. G. (2003). [Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding](#). *Construction and Building Materials*, 17(1):27–41.
- [15] Deniaud, C., Cheng, J. R. (2001). Shear behavior of reinforced concrete T-beams with externally bonded fiber-reinforced polymer sheets. *Structural Journal*, 98(3):386–394.
- [16] Deniaud, C., Cheng, J. R. (2004). [Simplified shear design method for concrete beams strengthened with fiber reinforced polymer sheets](#). *Journal of Composites for Construction*, 8(5):425–433.
- [17] Alzoubi, F., Zhengliang, L. (2007). [Overview shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP composites](#). *Journal of Applied Sciences*, 7(8):1093–1106.
- [18] Hoa, H. P., Minh, P. D. (2014). Nghiên cứu gia cường dầm bê tông cốt thép bằng tấm vật liệu composite sợi cacbon. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng*, 3(76):28–31.
- [19] Lâm, C. V., Lan, N. (2016). Đánh giá hiệu quả của các biện pháp gia cường sức kháng cắt đối với cầu bê tông cốt thép thường bằng phần mềm abaqus và thực nghiệm. *Tạp chí Giao thông vận tải*, (3/2016): 53–56.
- [20] Dũng, N. T., Mọi, N. V., Hoa, H. P. (2011). Nghiên cứu giải pháp gia cường dầm bê tông cốt thép bằng tấm vật liệu composite sợi carbon. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng*, 3(44):36–42.