

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM SỰ LÀM VIỆC CHỊU UỐN CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP ĐƯỢC GIA CƯỜNG BẰNG TẦM COMPOSITE CFRP Ở TRẠNG THÁI ĐANG CHỊU TẢI

Dương Đức Quỳnh^a, Nguyễn Trung Hiếu^{b,*}, Phạm Xuân Đạt^b, Nguyễn Mạnh Hùng^b

^aCông ty CP COTECO Công nghiệp, ô 38, TT33 khu đô thị mới Văn Phú, quận Hà Đông, Hà Nội, Việt Nam

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

Nhận ngày 26/04/2021, Sửa xong 20/05/2021, Chấp nhận đăng 21/05/2021

Tóm tắt

Gia cường kháng uốn kết cấu BTCT bằng vật liệu tấm sợi composite gốc các bon (CFRP) là giải pháp cho thấy nhiều ưu điểm so với các giải pháp gia cường truyền thống. Nội dung chính của nghiên cứu này nhằm đánh giá ảnh hưởng của tải trọng ban đầu đến hiệu quả gia cường kháng uốn dầm BTCT bằng vật liệu CFRP. Ba mẫu dầm BTCT có cùng kích thước hình học, cấu tạo cốt thép và cường độ bê tông được chế tạo. Một mẫu dầm không được gia cường được chọn làm mẫu đối chứng, trong khi hai mẫu dầm còn lại được gia cường ở trạng thái đang chịu cùng một cấp độ tải trọng ban đầu được xác định trên cơ sở tạo ra khe nứt trên bề mặt vùng kéo, với bề rộng khe nứt bằng 0,2 mm. Kết quả thu được cho thấy trong trường hợp dầm BTCT đã bị võng, nứt thì hiệu quả gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP vẫn được chứng minh thông qua sự gia tăng độ cứng uốn và khả năng chịu lực của dầm được gia cường.

Từ khoá: dầm BTCT; tấm CFRP; gia cường kháng uốn; gia tải ban đầu; nứt.

EXPERIMENTAL STUDY ON FLEXURAL BEHAVIOR OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH CFRP COMPOSITE SHEETS UNDER SUSTAINING LOAD

Abstract

Flexural strengthening of Reinforced concrete (RC) beams using Carbon fiber composite (CFRP) sheets is a solution that shows many advantages compared to the traditional strengthening solutions. The main goal of this study is to examine the effects of initial loading on the effectiveness of strengthening by externally bonded CFRP sheets. Three identical beams were cast and tested, in which one beam without CFRP strengthening was used as the control specimen while two other beams were strengthened in flexure under the same initial loading levels. The value of initial loads was determined on the basis of maximum crack width of concrete in tension zone, that is 0,2 mm. The obtained results have shown that for RC beams that are already cracked and deformed under sustaining loads, the effectiveness of CFRP strengthening can be demonstrated by the significant increase in the flexural stiffness and the load-carrying capacity of the strengthened RC beams.

Keywords: reinforced concrete beams; CFRP sheets; flexural strengthening; initial loading; cracking.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15\(2V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15(2V)-01) © 2021 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Đặt vấn đề

Đối với kết cấu công trình nói chung và kết cấu công trình bằng vật liệu bê tông cốt thép (BTCT) nói riêng, trong quá trình làm việc, do sự suy giảm khả năng chịu lực hoặc do yêu cầu thay đổi công

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hieunt@nuce.edu.vn (Hiếu, N. T.)

năng sử dụng và có sự gia tăng tải trọng tác dụng đặt ra vấn đề gia cường cho kết cấu công trình. Bên cạnh các giải pháp gia cường truyền thống như mở rộng tiết diện, ứng lực trước căng ngoài, sử dụng thép hình... thì hiện nay, việc sử dụng tấm sợi composite cường độ cao (Fibre Reinforced Polymer, 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 (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 cao, trọng lượng nhẹ, không bị ăn mòn [1–3]. 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 [1–4].

Một trong những vấn đề đặt ra cho công tác gia cường kết cấu là khi tiến hành gia cường, kết cấu đang làm việc và chịu tác dụng của tải trọng. Việc giảm tải trọng tác dụng lên kết cấu ở thời điểm gia cường được xem là một trong những giải pháp đảm bảo hiệu quả của việc gia cường. Trong thực tế, công việc này thường gặp khó khăn và chủ yếu chỉ giảm tác dụng của hoạt tải sử dụng. Đối với kết cấu BTCT làm việc chịu uốn, ở thời điểm gia cường thường trên kết cấu đã xuất hiện vết nứt ở vùng bê tông chịu kéo (dáy dầm hoặc bản sàn). Theo một số kết quả khảo sát của nhóm tác giả trên thực tế công trình, các vết nứt thường nằm trong khoảng từ 0,1 mm đến 0,3 mm [4].

Hình 1 trình bày minh họa hình ảnh thực tế gia cường dầm BTCT bị nứt, võng bằng tấm CFRP. Ở thời điểm gia cường, công trình đang tiến hành thi công xây dựng và kết cấu dầm đang chịu tác dụng của tải trọng gồm trọng lượng bản thân và hoạt tải thi công.



Hình 1. Gia cường dầm BTCT bị nứt, võng bằng tấm CFRP

Một trong những vấn đề đặt ra của công tác gia cường kháng uốn cho kết cấu BTCT nói chung và gia cường bằng vật liệu tấm sợi composite nói riêng là hiệu quả của việc gia cường trong trường hợp không thể giảm toàn bộ tải trọng tác dụng lên kết cấu ở thời điểm tiến hành gia cường. Việc tồn tại trước ứng suất kéo trong cốt thép và ứng suất nén trong bê tông vùng nén sẽ ảnh hưởng đến ứng xử của kết cấu được gia cường so với trường hợp kết cấu được gia cường từ đầu, khi chưa chịu tác dụng của tải trọng.

Nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử của kết cấu BTCT được gia cường bằng vật liệu CFRP và hiệu quả của việc gia cường đã được nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước tiến hành, trong đó một số nghiên cứu điển hình được trình bày trong các tài liệu [5–19]. Các kết quả thu được cho thấy giải

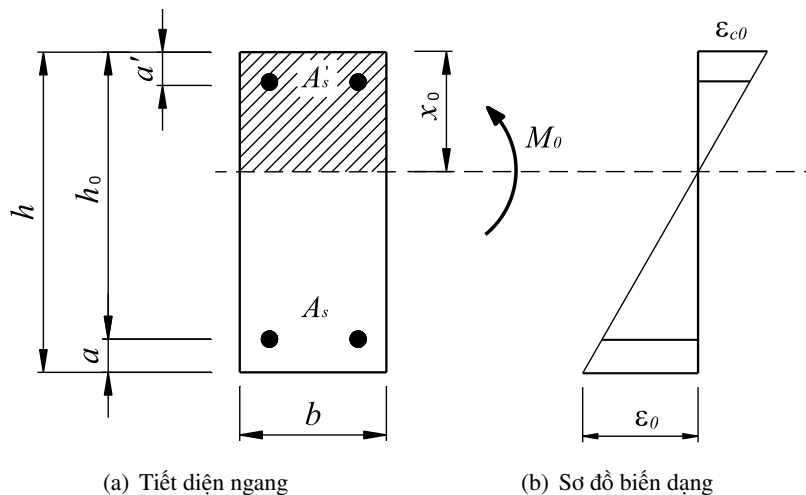
pháp sử dụng vật liệu CFRP phù hợp cho các trường hợp gia cường kháng uốn, kháng cắt, gia cường tăng khả năng chịu nén, chịu xoắn. . . Đồng thời cũng cho thấy ứng xử của kết cấu được gia cường là phức tạp, với nhiều dạng phá hoại khác nhau và hiệu quả của việc gia cường phụ thuộc vào nhiều yếu tố mà điển hình là đặc trưng cơ học của vật liệu CFRP và công tác thi công gia cường. Bên cạnh đó, có thể nhận thấy, hầu hết các nghiên cứu đều tiến hành trên các mẫu thí nghiệm được gia cường ở thời điểm ban đầu, khi kết cấu chưa chịu tác dụng của tải trọng. Điều này dẫn đến những sai khác khi đánh giá hiệu quả gia cường so với thực tế của công tác này, khi mà việc gia cường được tiến hành tại thời điểm kết cấu đang chịu tác dụng của tải trọng.

Ở nước ta hiện nay, vật liệu tấm CFRP đã được sử dụng khá phổ biến cho việc gia cường một số công trình cầu và nhà dân dụng. Tuy nhiên có thể thấy việc áp dụng còn hạn chế, chưa được phổ biến trong đó nguyên nhân chính là giá thành và tiêu chuẩn kỹ thuật áp dụng cho vật liệu gia cường này [4]. Việc tính toán thiết kế chủ yếu được thực hiện theo một số tài liệu, chỉ dẫn của nước ngoài như ACI 440.2R-08 [1], FIB 14 [2], TR 55 [5] . . . Vì vậy, những nghiên cứu trong lĩnh vực này góp phần làm cơ sở cho việc áp dụng phổ biến hơn giải pháp gia cường có nhiều ưu điểm này trong thực tế xây dựng.

Nội dung bài báo trình bày về ứng xử của kết cấu được gia cường và hiệu quả của công tác gia cường bằng vật liệu tấm CFRP trong trường hợp công tác gia cường tiến hành ở thời điểm kết cấu đang chịu tác dụng của tải trọng. Nghiên cứu thực nghiệm được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm và Kiểm định công trình, Trường Đại học Xây dựng.

2. Cơ sở tính toán gia cường kháng uốn cho kết cấu dầm BTCT bị nứt trước

Trên Hình 2 trình bày sơ đồ tính toán dầm BTCT khi tiến hành công tác gia cường, trong đó dầm BTCT đã bị nứt dưới tác dụng của tải trọng ban đầu (thể hiện qua mô men uốn M_0).



Hình 2. Sơ đồ tính toán biến dạng của kết cấu trước khi gia cường

Vị trí trục trung hòa (hay chiều cao của vùng bê tông chịu nén) của tiết diện dầm, ký hiệu x_0 , được xác định theo công thức sau đây:

$$\frac{1}{2}bx_0^2 + nA'_s(x_0 - a') = nA_s(h_0 - x_0) \quad (1)$$

trong đó n là tỷ số giữa mô đun đàn hồi của cốt thép và của bê tông $n = \frac{E_s}{E_b}$.

Mô men quán tính của tiết diện dầm (đã bị nứt) được xác định theo công thức sau:

$$I_{c0} = \frac{bx_0^3}{3} + nA_s(h_0 - x_0)^2 + nA'_s(x_0 - a')^2 \quad (2)$$

Biến dạng ban đầu của bê tông vùng nén, ε_{c0} , do mô men M_0 gây ra:

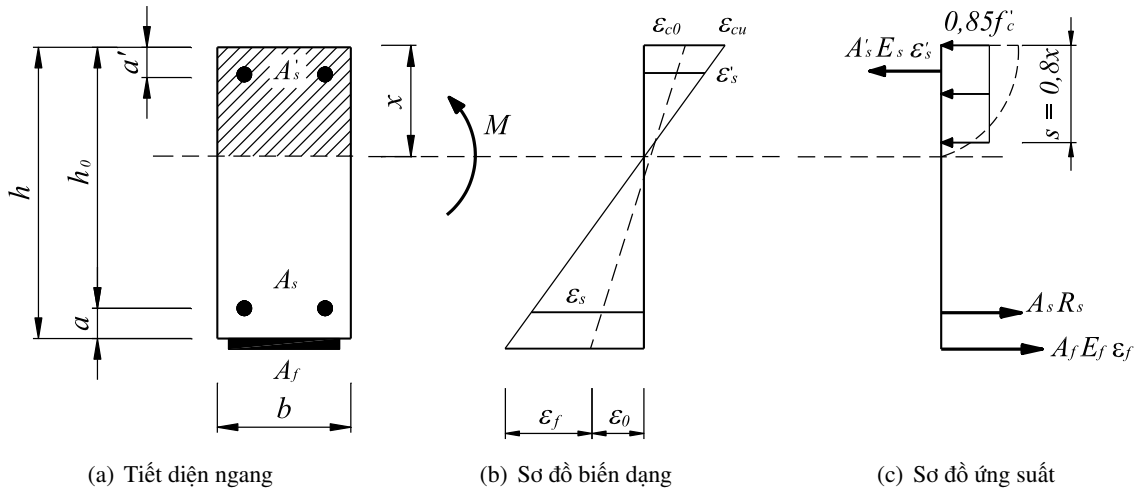
$$\varepsilon_{c0} = \frac{M_0 x_0}{E_c I_{c0}} \quad (3)$$

Dựa trên sơ đồ biến dạng trình bày ở Hình 2, có thể tính được biến dạng của cốt thép và của bê tông ở vùng chịu kéo (mép ngoài) của dầm tại thời điểm trước khi gia cường:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{c0} \frac{h_0 - x_0}{x_0} \quad (4)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{c0} \frac{h - x_0}{x_0} \quad (5)$$

Sau khi gia cường, tải trọng tác dụng lên dầm gây ra mô men uốn M . Các giả thiết cơ bản sử dụng để tính toán khả năng chịu lực của tiết diện sau gia cường: (1) giả thiết tiết diện phẳng; (2) dạng phá hoại điển hình của kết cấu dầm BTCT được gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP là cốt thép chịu kéo bị chảy dẻo; (3) bê tông vùng nén bị ép vỡ và tấm CFRP bị bong khỏi bề mặt dầm hoặc bị đứt; (4) biến dạng của thớ bê tông chịu nén ngoài cùng đạt đến giá trị ε_{cu} ; (5) ứng suất nén của bê tông trong vùng nén được xác định từ đường cong ứng suất - biến dạng có biểu đồ có dạng parabol, được quy đổi về biểu đồ hình chữ nhật tương đương với chiều cao vùng nén s (Hình 3(c)). Sơ đồ tính toán khả năng chịu lực của dầm sau gia cường theo được trình bày trên Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ tính toán khả năng chịu lực của dầm sau khi gia cường

Chiều cao vùng nén của tiết diện, x , được xác định theo điều kiện cân bằng lực:

$$0,85f'_c b(0,8x) + A'_s E_s \varepsilon'_s = A_s R_s + A_f E_f \varepsilon_f \quad (6)$$

trong đó f'_c là cường độ chịu nén của bê tông, được xác định qua thí nghiệm nén mẫu thí nghiệm hình trụ $D \times H = 150 \times 300$ mm, R_s là cường độ chịu kéo của cốt thép chịu kéo, E_s và E_f lần lượt là mô đun đàn hồi của cốt thép và của tấm CFRP, ε_f và ε'_s lần lượt là biến dạng tương đối của tấm CFRP và của cốt thép chịu nén. Biến dạng tương đối của tấm CFRP và của cốt thép chịu nén được xác định theo công thức:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fu} \quad (7)$$

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{cu} \frac{x - a'}{x} \quad (8)$$

trong đó ε_{cu} là biến cực hạn của bê tông vùng nén, theo fib 14 [2] lấy bằng 0,0035; ε_{fu} là biến dạng cực hạn của vật liệu CFRP.

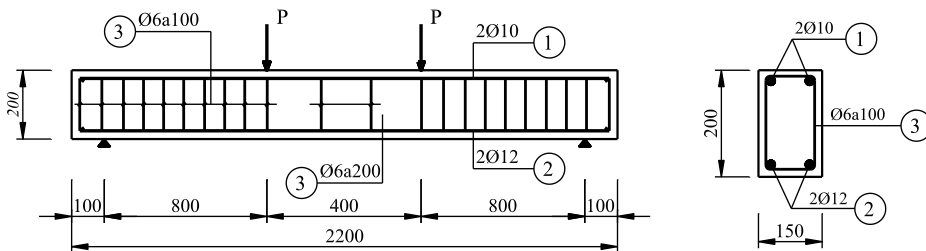
Khả năng chịu lực của tiết diện sau khi gia cường:

$$[M] = A_s R_s \left(h_0 - \frac{0,8x}{2} \right) + A'_s E_s \varepsilon'_s \left(\frac{0,8x}{2} - a' \right) + A_f E_f \varepsilon_f \left(h - \frac{0,8x}{2} \right) \quad (9)$$

3. Nghiên cứu thực nghiệm

3.1. Mẫu thí nghiệm và vật liệu chế tạo

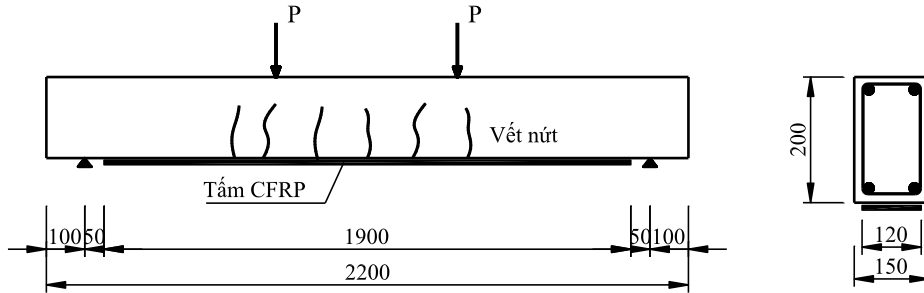
Trong nghiên cứu này, 03 mẫu dầm BTCT có cùng kích thước hình học, cấu tạo cốt thép và cường độ bê tông được chế tạo. Các mẫu dầm có chiều dài 2200 mm, kích thước tiết diện $b \times h = 150 \times 200$ mm. Qua tính toán sơ bộ để tránh cho các mẫu dầm thí nghiệm không bị phá hoại do lực cắt, lựa chọn cốt thép dọc chịu lực vùng kéo (phía dưới dầm) là 2Ø12, cốt thép dọc vùng nén (phía trên dầm) bố trí 2Ø10, cốt thép đai Ø6 khoảng cách 100 mm ở vùng giữa gối tựa dầm và vị trí tác dụng tải trọng. Trong số các mẫu dầm thí nghiệm, 01 mẫu dầm không được gia cường, ký hiệu D-0 được sử dụng làm dầm đối chứng. 02 mẫu dầm còn lại, ký hiệu D-1, D-2 được tạo tải trọng ban đầu theo sơ đồ dầm chịu uốn bốn điểm sau đó tiến hành công tác gia cường. Tải trọng ban đầu có độ lớn sao cho bề rộng vết nứt lớn nhất ở vùng chịu kéo do tải trọng này gây ra trên các mẫu dầm D-1, D-2 có giá trị bằng 0,2 mm. Hai mẫu dầm D-1, D-2 đều được gia cường bằng tấm sợi composite CFRP có cùng kích thước bề rộng 120 mm, chiều dày 0,111 mm và chiều dài 1950 mm. Chi tiết cấu tạo cốt thép của 03 mẫu dầm thí nghiệm được trình bày trên Hình 4. Trên Hình 5 trình bày phương án gia cường các mẫu dầm bằng tấm CFRP.



Hình 4. Chi tiết cấu tạo cốt thép các mẫu dầm thí nghiệm

Đối với các vật liệu chế tạo dầm, cường độ chịu nén của bê tông, cường độ chịu kéo của cốt thép được xác định thông qua thí nghiệm trên các mẫu thử và được trình bày tóm tắt trong Bảng 1.

Tấm CFRP sử dụng gia cường và keo dán epoxy do hãng Toray (Nhật Bản) sản xuất. Các thông số cơ học của vật liệu này do nhà sản xuất cung cấp và được trình bày ở Bảng 2.



Hình 5. Quy cách gia cường dầm D-1, D-2 bằng tấm CFRP

Bảng 1. Giá trị cường độ của bê tông và cốt thép sử dụng chế tạo các mẫu dầm

Cường độ chịu nén của bê tông ở 28 ngày tuổi (mẫu thí nghiệm hình trụ $D \times H = 150 \times 300$ mm)	34,7 MPa
Mô đun đàn hồi của bê tông ở 28 ngày tuổi (mẫu thí nghiệm hình trụ $D \times H = 150 \times 300$ mm)	32500 MPa
Giới hạn chảy của thép $\varnothing 12$	410 MPa
Giới hạn chảy của thép $\varnothing 10$	380 MPa

Bảng 2. Đặc trưng cơ học của tấm CFRP

Chiều dày tấm t_f	0,111 mm
Cường độ chịu kéo cực hạn R_f	3400 MPa
Mô đun đàn hồi E_f	95,5 GPa
Độ giãn dài cực hạn ε_{fu}	1,6%

3.2. Quy trình tạo, giữ tải trọng ban đầu tác dụng lên dầm và thi công dán tấm CFRP

Để tạo tải trọng ban đầu tác dụng lên các mẫu dầm D-1, D-2 và duy trì tải trọng này không đổi trong suốt quá trình gia cường, sử dụng kết hợp hệ thiết bị gia tải và giữ tải gồm kích thủy lực, khung phản lực, dầm phân tải và các bu lông neo. Đầu tiên, sử dụng kích thủy lực, khung phản lực và dầm phân tải tạo ra 02 tải trọng tập trung có giá trị bằng nhau tác dụng lên dầm (Hình 6). Tiếp đến, tăng tải trọng tác dụng lên các mẫu dầm cho đến khi các mẫu dầm bị nứt và bề rộng vết nứt lớn nhất trên các mẫu dầm này có giá trị bằng 0,2 mm. Bề rộng của vết nứt được đo đạc bằng thiết bị quang học chuyên dụng trong suốt quá trình gia tải trọng (Hình 7). Sau khi đã tạo ra được tải trọng ban đầu có độ lớn yêu cầu, sử dụng 02 bu lông neo để neo giữ hệ dầm phân tải xuống sàn chịu lực của Phòng thí nghiệm, sau đó giải phóng hệ kích thủy lực và khung gia tải. Tải trọng ban đầu được duy trì thông qua lực kéo trong các bu lông neo. Sự làm việc ổn định của cơ cấu bu lông neo và dầm phân tải được theo dõi, kiểm tra thông qua việc đo đạc biến dạng tương đối của hai thanh cốt thép chịu kéo $\varnothing 12$ trong dầm. Sử dụng 02 phiên điện trở (Strain gauges), ký hiệu St1 và St2, dán lên các thanh cốt thép trước khi đổ bê tông, để đo biến dạng (Hình 9). Kết quả đo biến dạng cho thấy cơ cấu giữ tải làm việc ổn định, đảm bảo duy trì tải trọng ban đầu ổn định trong suốt quá trình thi công gia cường các mẫu dầm.



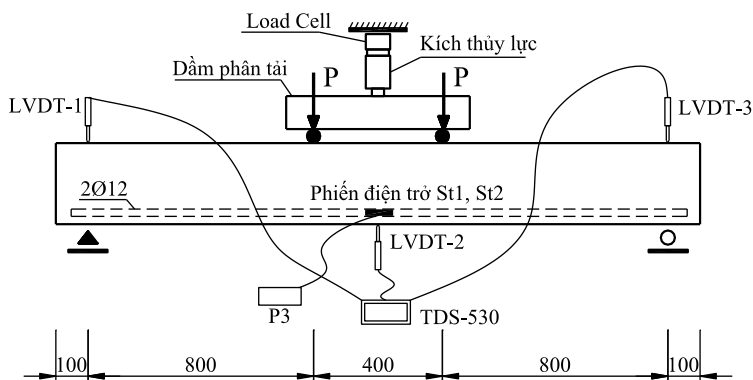
Hình 6. Sơ đồ tạo tải trọng ban đầu tác dụng lên các mẫu đầm thí nghiệm



Hình 7. Đo bề rộng khe nứt vùng bê tông chịu kéo



Hình 8. Dán tấm CFRP gia cường ở đáy đầm D-1 và D-2

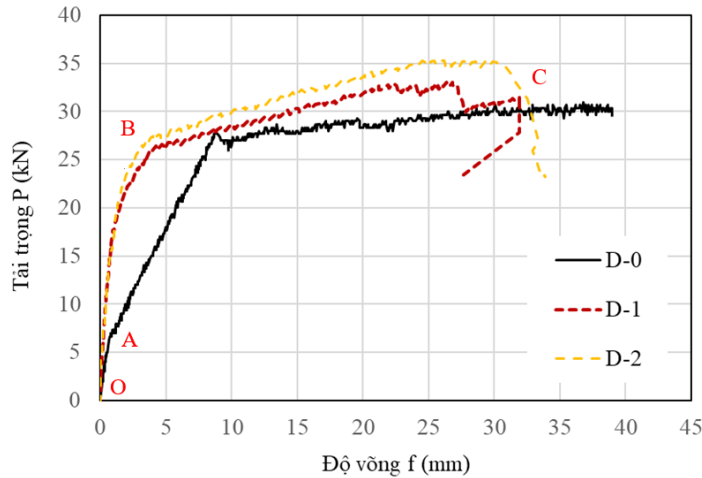


Hình 9. Bố trí thí nghiệm đầm BTCT được gia cường

Trong Bảng 3 trình bày giá trị của tải trọng ban đầu, ký hiệu P_0 , tác dụng lên các mẫu đầm thí nghiệm và tỷ số giữa tải trọng ban đầu và tải trọng cực hạn gây phá hoại đầm, $P_0/P_{\max}$. Tải trọng cực hạn $P_{\max}$ có giá trị bằng 30,5 kN được xác định từ kết quả thí nghiệm uốn phá hoại mẫu đầm đối chứng D-0 (xem Hình 10).

Bảng 3. Giá trị tải trọng ban đầu tác dụng lên các mẫu đầm thí nghiệm và bề rộng vết nứt tương ứng

Mẫu đầm thí nghiệm	Giá trị tải trọng ban đầu P_0 (kN)	$\frac{P_0}{P_{\max}}$ (%)	Bề rộng vết nứt lớn nhất tương ứng (mm)
D-1, D-2	15,0	50%	0,2



Hình 10. Biểu đồ quan hệ tải trọng – độ võng của các mẫu đầm thí nghiệm

Sau khi tác dụng và giữ ổn định tải trọng ban đầu, tiến hành công tác thi công dán tấm CFRP. Các công đoạn thi công chính gồm quét lớp keo epoxy chuyên dụng lên bề mặt bê tông đáy đầm (đã được mài nhẵn, phẳng); dán tấm CFRP có kích thước dài $\times$ rộng = 1950 $\times$ 120 mm; quét lớp keo phủ. Sau khi dán 48 giờ, lớp keo dán khô cứng và tấm CFRP đảm bảo điều kiện làm việc, công tác thí nghiệm đối với các đầm gia cường được tiến hành.

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

Sau khi gia cường, tiếp tục thí nghiệm gia tải các mẫu đầm theo đúng sơ đồ tác dụng tải trọng ban đầu. 03 dụng cụ đo chuyển vị điện tử, ký hiệu LVDT-1, LVDT-2, LVDT-3, được bố trí ở hai gối tựa và ở tiết diện giữa đầm cho phép xác định độ võng của đầm dưới tác dụng của tải trọng. Giá trị tải trọng tác dụng lên đầm được xác định thông qua dụng cụ đo lực điện tử (Load cell) 200 kN. Các dụng cụ đo lực, đo chuyển vị được kết nối với bộ thu thập và xử lý số liệu TDS 530 (do hãng Tokyo Sokki của Nhật bản sản xuất) cho phép ghi nhận tự động và đồng thời các số liệu thí nghiệm (01 giây/lần ghi).

4. Phân tích và đánh giá kết quả

4.1. Quan hệ tải trọng – độ võng và ứng xử của đầm được gia cường

Trên Hình 10 trình bày biểu đồ quan hệ tải trọng và độ võng của các mẫu đầm thí nghiệm. Đối với đầm đối chứng D-0, có thể thấy đầm bị phá hoại dẻo, sự làm việc của đầm được chia thành 3 giai đoạn chính: giai đoạn trước khi nứt OA, giai đoạn làm việc sau nứt đến khi cốt thép chịu kéo bị chảy dẻo AB (điểm B tương ứng thời điểm cốt thép bị chảy dẻo) và giai đoạn BC tương ứng với sự làm việc của bê tông vùng nén, điểm C ứng với thời điểm bê tông vùng nén bị ép vỡ và đầm bị phá hoại

hoàn toàn. Đối với các mẫu dầm gia cường D-1 và D-2, có thể thấy do dầm đã bị nứt nên sự làm việc có thể chia thành 2 giai đoạn: giai đoạn OB với điểm B tương ứng thời điểm cốt thép chịu kéo bị chảy dẻo, giai đoạn BC tương ứng với sự làm việc của tấm CFRP gia cường và của bê tông vùng nén, điểm C ứng với thời điểm tấm CFRP bị đứt và bê tông vùng nén bị ép vỡ.

Có thể nhận thấy sự tham gia làm việc của tấm CFRP gia cường thể hiện rõ nét trong giai đoạn OB. Trong giai đoạn này, độ cứng uốn của các mẫu dầm D-1 và D-2 tăng đáng kể so với mẫu dầm đối chứng D-0. Sự gia tăng này được giải thích bởi: (1) tấm CFRP tham gia làm việc; (2) khi dầm bị nứt trước do tải trọng ban đầu sẽ làm giảm chiều cao vùng nén, dẫn đến tăng khoảng cách từ trọng tâm cốt thép chịu kéo và từ tấm CFRP đến điểm đặt hợp lực của các nội lực trong vùng chịu nén, do đó làm tăng độ cứng uốn của tiết diện dầm.

Sau khi cốt thép vùng kéo bị chảy dẻo, khả năng chịu lực của các mẫu dầm gia cường phụ thuộc vào khả năng chịu lực của bê tông vùng nén và của tấm CFRP. Trong giai đoạn này tấm CFRP ngoài việc đảm bảo độ cứng uốn của các mẫu dầm cao hơn so với dầm đối chứng còn góp phần tăng khả năng chịu lực của dầm. Tải trọng cực hạn gây phá hoại các mẫu dầm gia cường tăng trung bình 10% so với mẫu dầm đối chứng.

Từ các kết quả phân tích, có thể thấy rõ hiệu quả của việc gia cường dầm BTCT chịu tải trọng ban đầu. Hiệu quả gia cường thể hiện rõ nét ở giai đoạn trước khi cốt thép chịu kéo bị chảy dẻo. Tương ứng với thời điểm này, bề rộng vết nứt đo được trên dầm cũng đạt đến giá trị cho phép bằng 0,3 mm theo quy định trong TCVN 5574:2018 [8].

4.2. Cơ chế phá hoại các mẫu dầm

Mẫu dầm đối chứng D-0 bị phá hoại dẻo. Trên Hình 11 trình bày hình ảnh phá hoại điển hình của 02 mẫu dầm được gia cường. Các mẫu dầm này đều bị phá hoại theo cơ chế đầu tiên cốt thép vùng chịu kéo bị chảy dẻo, vết nứt phát triển đến vùng nén và bê tông vùng nén bị ép vỡ, tiếp đến tấm CFRP bị đứt. Đây là một trong những cơ chế phá hoại điển hình của kết cấu dầm BTCT được gia cường kháng uốn bằng vật liệu CFRP bên cạnh cơ chế phá hoại do tấm CFRP bị bong khỏi bề mặt bê tông [1–3]. Kết quả này cũng cho thấy cần có giới hạn cho sự tham gia chịu lực của tấm CFRP trong việc gia cường để tránh xảy ra phá hoại đứt tấm CFRP vì đây là dạng phá hoại đột ngột.



Hình 11. Hình ảnh phá hoại của các dầm D-1 và D-2

4.3. So sánh khả năng chịu lực của dầm được gia cường theo lý thuyết và theo thực nghiệm

Căn cứ vào cơ chế phá hoại của các mẫu dầm gia cường trình bày ở mục 4.2, có thể thấy các giả thiết tính toán khả năng chịu lực của mẫu dầm gia cường trình bày ở mục 2 là phù hợp. Biến dạng

của tấm CFRP ε_f được tính theo công thức (7) dựa trên cơ sở biến dạng ban đầu ε_0 . Kết quả tính toán cho thấy giá trị ε_f lớn hơn biến dạng cực hạn của tấm CFRP. Kết quả này cũng phù hợp với việc tấm CFRP bị đứt trong quá trình gia tải. Do vậy trong tính toán, biến dạng của tấm CFRP được lấy bằng biến dạng cực hạn ε_{fu} . Khả năng chịu lực của mẫu dầm sau gia cường được xác định theo công thức (9) và được tổng hợp trong Bảng 4, trong đó giá trị tải trọng gây phá hoại các mẫu dầm gia cường $P_{\max}$ được lấy theo Bảng 5. Tỷ số $P_{\max}/P_{tt}$ thu được cho thấy kết quả tính toán lý thuyết phù hợp với kết quả thu được từ thực nghiệm.

Bảng 4. So sánh khả năng chịu lực của dầm gia cường theo tính toán và theo thực nghiệm

Tên dầm	Biến dạng ε_0 (% theo công thức (5))	Biến dạng ε_f (% theo công thức (7))	Biến dạng của tấm CFRP sử dụng trong tính toán ε_{fu} (%)	Tải trọng gây phá hoại theo tính toán P_{tt} (kN)	Tỷ số $\frac{P_{\max}}{P_{tt}}$
D-1	0,0018	0,0335	0,016	31,10	1,11
D-2	0,0018	0,0335	0,016	31,10	1,05

Bảng 5. Các giá trị tải trọng và độ võng đặc trưng

Mẫu dầm thí nghiệm	Tải trọng gây chảy cốt thép P_y (kN)	Độ võng khi cốt thép chảy (mm)	Tải trọng gây phá hoại $P_{\max}$ (kN)	Độ võng khi dầm bị phá hoại (mm)
D-0	27,5	9,0	30,5	37,0
D-1	26,2	4,2	34,8	24,8
D-2	26,5	3,8	32,6	22,0

5. Kết luận

Nội dung bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm sự làm việc của dầm BTCT được gia cường kháng uốn ở trạng thái đang chịu tải. Đây là trường hợp gia cường phù hợp với thực tế làm việc của kết cấu công trình, khi mà kết cấu được gia cường đã bị võng, nứt. Từ các kết quả thu được, có thể rút ra những kết luận chính sau:

- Sử dụng tấm CFRP nhằm gia cường kháng uốn kết cấu BTCT ở trạng thái đang chịu tải là một giải pháp hiệu quả. Kết quả thu được cho thấy trong trường hợp dầm BTCT đã bị võng, nứt thì hiệu quả gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP vẫn được chứng minh thông qua sự gia tăng độ cứng uốn và khả năng chịu lực của dầm được gia cường.

- Cơ chế phá hoại kết cấu gia cường thu được trong nghiên cứu này là tấm CFRP bị đứt. Đây là dạng phá hoại đột ngột. Vì vậy trong quá trình thiết kế gia cường kháng uốn cần hạn chế ứng suất trong tấm CFRP. Việc giảm tối đa tải trọng tác dụng lên kết cấu ở thời điểm gia cường cũng cần được lưu ý để phát huy khả năng làm việc của tấm CFRP.

Tài liệu tham khảo

- [1] ACI 440.2R (2017). *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 No14 (2001). *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC structures*. Technical Report, Bulletin 14, International Federation for Structural Concrete (fib).
- [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] Hiếu, N. T., Cường, L. T. (2020). *Gia cường kết cấu bê tông cốt thép bằng vật liệu tấm CFRP composite*. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [5] TR55 (2000). *Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials*. Concrete Society Technical Report 55, The Concrete Society, Crowthorne, UK.
- [6] JSCE (2001). *Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheet*. Concrete Engineering Series 41, Japan Society of Civil Engineering.
- [7] Bank, L. C. (2006). *Composites for construction: structural design with FRP materials*. John Wiley & Sons.
- [8] TCVN 5574:2018. *Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép*.
- [9] Nguyen, M. H., Tran, T. D. (2016). Experimental Study on Flexural Strengthening of One - Way Reinforced Concrete Slabs Using Carbon and Glass Fiber Reinforced Polymer Sheets. *The 7th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF 2016)*, Hà Nội, Việt Nam.
- [10] Hiếu, N. T. (2015). Nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường kháng uốn dầm bê tông cốt thép bằng vật liệu tấm sợi composite. *Tạp chí Khoa học công nghệ, Viện Khoa học công nghệ Xây dựng IBST*, 1:3–9.
- [11] N.T. Hiếu, L. C. (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).
- [12] Hùng, H. M., Hiếu, N. T. (2021). [Hiệu quả gia cường kháng cắt cho dầm bê tông cốt thép bằng vật liệu tấm sợi các bon](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 15(1V):102–111.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Thomsen, H., Spacone, E., Limkatanyu, S., Camata, G. (2004). [Failure Mode Analyses of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymers](#). *Journal of Composites for Construction*, 8(2):123–131.
- [16] Lam, L., Teng, J. G. (2003). [Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete](#). *Construction and Building Materials*, 17(6-7):471–489.
- [17] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R. (1988). [Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete](#). *Journal of Structural Engineering*, 114(8):1804–1826.
- [18] Thomsen, H., Spacone, E., Limkatanyu, S., Camata, G. (2004). [Failure Mode Analyses of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymers](#). *Journal of Composites for Construction*, 8(2):123–131.
- [19] Hassan, M., Chaallal, O. (2007). [Fiber-Reinforced Polymer Confined Rectangular Columns: Assessment of Models and Design Guidelines](#). *ACI Structural Journal*, 104(6).