

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM HIỆU QUẢ GIA CƯỜNG VAI CỘT BẰNG TẦM SỢI COMPOSITE GỐC CÁC BON CFRP

Nguyễn Mạnh Hùng^{a,*}, Lê Phước Lành^a, Nguyễn Trung Hiếu^a

^a*Khoa 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 07/08/2021, Sửa xong 08/09/2021, Chấp nhận đăng 10/09/2021

Tóm tắt

Kết cấu cột bê tông cốt thép (BTCT) dạng có vai hiện được sử dụng khá phổ biến trong các kết cấu nhà công nghiệp. Vai cột làm việc như một dầm công xôn ngắn (corbel). Do sự suy giảm khả năng chịu lực của vai cột theo thời gian hoặc do có sự gia tăng tải trọng tác dụng lên vai cột đòi hỏi cần phải tiến hành gia cường kết cấu này. Nội dung bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường khả năng chịu lực của vai cột bằng vật liệu tấm sợi composite gốc các bon (CFRP). Hai mẫu vai cột BTCT có cùng kích thước hình học, cấu tạo cốt thép và cường độ bê tông được chế tạo. Một mẫu vai cột không có gia cường được chọn làm mẫu đối chứng, mẫu vai cột còn lại được gia cường kháng cắt bằng vật liệu tấm sợi composite gốc các bon CFRP. Kết quả thu được cho thấy hiệu quả gia cường kháng cắt bằng tấm CFRP được chứng minh thông qua sự gia tăng khả năng chịu lực của vai cột được gia cường.

Từ khoá: vai cột; tấm CFRP; gia cường; nứt.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE STRENGTHENING EFFECTIVENESS OF REINFORCED CONCRETE CORBELS WITH CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) SHEETS

Abstract

Reinforced concrete (RC) columns with the corbel are commonly used in prefabricated industrial buildings. RC corbel works as a short cantilever member. Due to the decrease in the bearing capacity of the RC corbel over time or an increase in the load acting on the RC corbel, it is necessary to strengthen this structure. This paper presents the experimental results on the effectiveness of strengthening of RC corbel with Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets. Two identical RC corbels were cast and tested, in which one specimen without CFRP strengthening was used as the control specimen and the other corbel was reinforced with shear resistance using CFRP sheets. The obtained results show that the effect of shear reinforcement by CFRP sheets is demonstrated through the increase in the bearing capacity of the strengthened RC corbel. The obtained results allowed to evaluate the behavior of the strengthened RC corbel as well as the effectiveness of this strengthening technique.

Keywords: corbel; CFRP sheets; strengthening; cracking.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(5V\)-12](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(5V)-12) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Đặt vấn đề

Đối với các công trình công nghiệp có hệ kết cấu chịu lực bằng bê tông cốt thép (BTCT) lắp ghép, kết cấu cột BTCT có vai được sử dụng phổ biến. Vai cột đóng vai trò như các gối đỡ các dầm BTCT liên kết với cột (Hình 1). Trong trường hợp này, vai cột làm việc như một dầm công xôn ngắn, hay còn

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hungnm1@nuce.edu.vn (Hùng, N. M.)

gọi là dầm cao, với tỷ lệ giữa cánh tay đòn đặt lực (ký hiệu là a) chia cho chiều cao làm việc của dầm (ký hiệu là d) là $a/d \leq 2$. Đối với loại kết cấu này, các lý thuyết tính toán dầm thông thường không còn phù hợp, do mặt cắt tiết diện dầm sau khi nứt không còn là tiết diện phẳng. Hầu hết các tiêu chuẩn tính toán thiết kế kết cấu trên thế giới như ACI 318-19 [1], Eurocode 2 (EC2) [2], ... cũng như ở Việt Nam là tiêu chuẩn TCVN 5574:2018 [3] đều có các chỉ dẫn tính toán cho loại kết cấu này. Các tiêu chuẩn đưa ra hai phương pháp tính toán là phương pháp lực cắt ảo (Shear fiction, SF) và phương pháp giàn ảo (Strut-and-Tie Modeling, STM). Phương pháp SF được cho là nhanh và đơn giản hơn, tuy nhiên phương pháp STM được đánh giá là có độ chính xác cao hơn [4–8].



Hình 1. Sơ đồ làm việc của vai cột (corbel)

Nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm về khả năng chịu lực cắt của vai cột nhận được nhiều sự quan tâm, điển hình như các nghiên cứu [4–8]. Các kết quả thu được đều cho thấy, sự phá hoại cắt trên tiết diện của vai cột là dạng phá hoại điển hình. Đây là dạng phá hoại đột ngột, không có dấu hiệu cảnh báo. Với đặc điểm như vậy, đối với các vai cột đã đưa vào sử dụng một thời gian dài, hoặc khi có sự gia tăng của tải trọng tác dụng, công tác gia cường cho kết cấu này cần được lưu ý. Những nghiên cứu về giải pháp gia cường cho kết cấu vai cột đã được đề cập đến trong một số nghiên cứu gần đây như [9–12].

Bên cạnh các phương pháp gia cường kết cấu BTCT mang tính truyền thống như mở rộng tiết diện, sử dụng ứng lực trước căng ngoài, sử dụng thép hình, ... thì hiện nay, phương pháp gia cường bằng tấm sợi composite cường độ cao gốc các bon (CFRP) được áp dụng phổ biến ở nhiều nước trên thế giới [9–19].

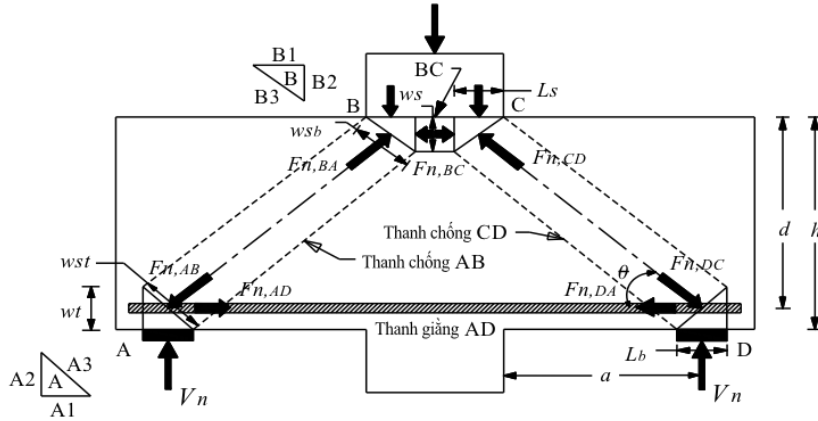
Phương pháp gia cường bằng vật liệu CFRP tận dụng được những ưu điểm của loại vật liệu này như cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi cao, trọng lượng nhẹ, không bị ăn mòn trong môi trường xâm thực [14–19]. Bên cạnh ưu điểm về đặc tính cơ học, gia cường bằng vật liệu CFRP còn cho thấy những tiện lợi cho quá trình thi công gia cường như nhanh chóng, đơn giản, không cần nhiều máy móc thiết bị, thời gian thi công nhanh [15].

Nội dung tiếp theo của bài báo trình bày các cơ sở tính toán khả năng chịu cắt của vai cột theo mô hình STM và khả năng chịu cắt sau gia cường bằng tấm sợi CFRP cùng với nghiên cứu thực nghiệm nhằm làm rõ ứng xử của vai cột sau gia cường cũng như kiểm chứng việc áp dụng mô hình STM trong tính toán khả năng chịu cắt của vai cột. Các mẫu thí nghiệm được đúc và thử nghiệm tại Phòng thí nghiệm và kiểm định công trình, trường Đại học Xây dựng.

2. Cơ sở tính toán vai cột

2.1. Tính toán vai cột theo mô hình STM (ACI 318-19)

Trên Hình 2 trình bày sơ đồ tính toán khả năng chịu cắt của vai cột theo mô hình STM, dựa theo chỉ dẫn trong tiêu chuẩn ACI 318-19 [1] với vai cột được xoay ngược để phù hợp với sơ đồ thí nghiệm trình bày ở Hình 6, mục 3.3. Giàn ảo áp dụng cho tính toán vai cột được tạo thành từ các thành phần sau: (1) thanh chống AB và BC (mô phỏng cho sự tham gia chịu lực của bê tông và cốt thép đai), (2) thanh giằng AD (mô phỏng cho sự tham gia chịu lực của cốt thép dọc), (3) các nút giàn A, B, C, D. Khả năng chịu cắt của vai cột sẽ được xác định trên cơ sở khả năng chịu lực của các thành phần nêu trên của giàn ảo.



Hình 2. Sơ đồ tính toán vai cột theo mô hình STM [5]

Sử dụng mô hình STM để tính toán khả năng chịu lực của vai cột có thể được tóm tắt qua các bước như sau:

Tính toán các kích thước nút giàn (A, B, C, D):

$$w_t = 2(h - d); \quad w_s = 0,8w_t; \quad jd = h - 0,5w_t - 0,5w_s \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{jd}{a + \frac{L_s}{2}} \right) \quad (2)$$

$$w_{sb} = L_s \sin \theta + w_t \cos \theta; \quad w_{st} = L_b \sin \theta + w_s \cos \theta \quad (3)$$

Xác định khả năng chịu lực của các nút giàn A, B:

$$f_{ce} = 0,85\beta_s f'_c \text{ lấy } \beta_s^A = 0,8 \text{ và } \beta_s^B = 1,0 \quad (4)$$

$$V_{n,A1} = f_{ce} L_s b; \quad V_{n,A2} = f_{ce} w_t b \tan \theta; \quad V_{n,A3} = f_{ce} w_{sb} b \sin \theta \quad (5)$$

$$V_{n,B1} = f_{ce} L_b b; \quad V_{n,B2} = f_{ce} w_s b \tan \theta; \quad V_{n,B3} = f_{ce} w_{st} b \sin \theta \quad (6)$$

$$Q = \sum \left(\frac{A_{si}}{b_i s_i} \right) \sin \alpha_i \quad \begin{cases} \text{nếu } Q \geq 0,003 \text{ thì lấy } \beta_s = 0,75 \\ \text{nếu } Q < 0,003 \text{ thì lấy } \beta_s = 0,6\lambda \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda = 1,8173 \left(\frac{f_{ct}}{\sqrt{f'_c}} \right) - 0,0143 \quad (8)$$

Khả năng chịu lực nén của thanh chống AB và CD bằng nhau và được xác định theo các công thức sau đây:

$$w_{eff} = \min(w_{st}; w_{sb}) \quad (9)$$

$$V_{n,AB} = V_{n,CD} = f_{ce} w_{eff} b \sin \theta \quad (10)$$

Khả năng chịu kéo của thanh giằng AD được xác định dựa trên cơ sở khả năng chịu kéo của cốt thép dọc và được xác định theo các công thức sau:

$$F_{n,AD} = A_s f_y \quad (11)$$

$$V_{n,AD} = F_{n,AD} \tan \theta \quad (12)$$

Khả năng chịu cắt danh nghĩa của vai cột:

$$V_{n,max} = 0,83bd \sqrt{f'_c} \quad (13)$$

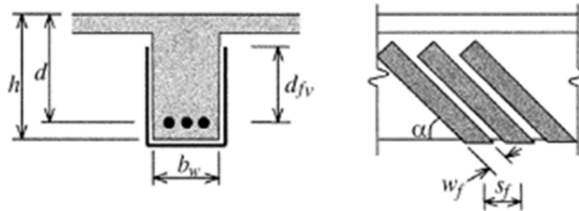
Khả năng chịu cắt của vai cột xác định theo mô hình STM, ký hiệu V_n , được xác định theo công thức sau:

$$V_n = \min(V_{n,B1}; V_{n,B2}; V_{n,B3}; V_{n,A1}; V_{n,A2}; V_{n,A3}; V_{n,AB}; V_{n,BC}; V_{n,AD}; V_{n,max}) \quad (14)$$

trong các công thức trên: f_{ce} là cường độ chịu nén hiệu quả của bê tông; f'_c là cường độ nén tính toán của bê tông; β_s là hệ số kể đến ảnh hưởng của vết nứt tới cường độ chịu nén hiệu quả của bê tông; f_y là cường độ tính toán của cốt thép; A_s là diện tích cốt thép; Q là hệ số kể tới sự phân bố cốt thép đai trong vùng thanh chống chéo; s_i là khoảng cách cốt thép đai; b_s là chiều rộng của thanh chống chéo; $b \times h$ là chiều rộng và chiều cao tiết diện dầm; d là chiều cao làm việc của dầm; θ là góc hợp bởi thanh giằng và thanh chống. Các kích thước hình học khác có thể xem trên Hình 2.

2.2. Tính toán gia cường kháng cắt vai cột bằng vật liệu tấm CFRP

Tính toán gia cường kháng cắt vai cột bằng tấm CFRP được thực hiện theo chỉ dẫn trong ACI 440.2R-17 [9]. Tấm CFRP được dán theo dải, dạng chữ U, như sơ đồ trên Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ dán tấm CFRP gia cường kháng cắt [9]

Khả năng chịu cắt của vai cột sau gia cường được xác định theo công thức sau:

$$V_n^s = V_n + \psi_f V_f \quad (15)$$

trong đó V_n là khả năng chịu cắt của vai cột trước khi gia cường (xác định theo mô hình STM, được trình bày mở mục 2.1); V_f là khả năng chịu cắt của tấm CFRP; ψ_f là hệ số triết giảm cường độ cho tấm CFRP gia cường kháng cắt, với sơ đồ dán gia cường 3 mặt $\psi_f = 0,85$.

Biến dạng có hiệu quả trong tấm CFRP được tính theo công thức (16) và được khống chế không vượt quá 0,004 để tránh xảy ra sự bong tấm CFRP khỏi bề mặt bê tông.

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (16)$$

trong đó k_v là hệ số, có giá trị không vượt quá 0,75; ε_{fu} là biến dạng cực hạn của tấm CFRP.

Xác định ứng suất hiệu quả trong tấm CFRP:

$$\sigma_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (17)$$

Diện tích tấm CFRP tham gia chịu cắt:

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \quad (18)$$

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

Khả năng chịu cắt của tấm CFRP gia cường được xác định theo công thức sau:

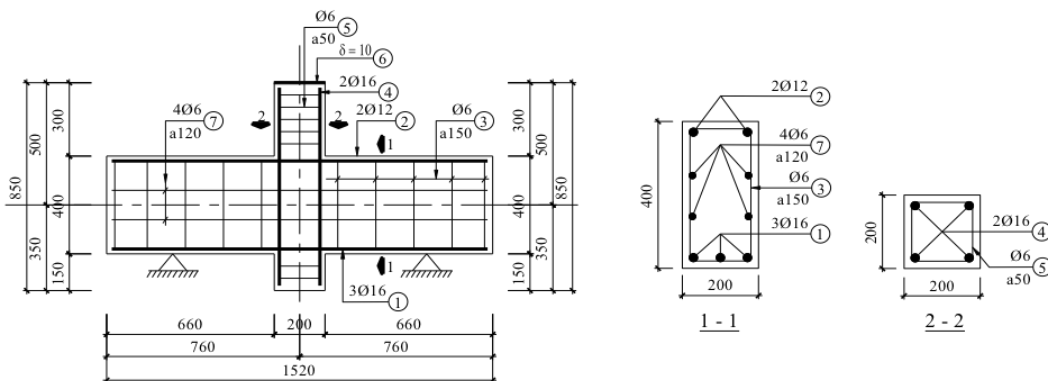
$$V_f = \frac{A_{fv} \sigma_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (19)$$

trong đó α là góc nghiêng của các dải CFRP gia cường so với phương ngang; s_f là khoảng cách giữa các dải; d_{fv} là chiều cao làm việc hiệu quả của các dải.

3. Nghiên cứu thực nghiệm

3.1. Mẫu thí nghiệm và vật liệu chế tạo

Trong nghiên cứu này, 02 mẫu thí nghiệm vai cột BTCT (gọi tắt là mẫu vai cột) có cùng kích thước hình học, cấu tạo cốt thép và cường độ bê tông được chế tạo. Trong đó 01 mẫu thí nghiệm với vai cột không gia cường, ký hiệu D-0, và 01 mẫu với vai cột được gia cường kháng cắt bằng tấm CFRP, ký hiệu D-S. Vai cột có tiết diện hình chữ nhật, kích thước $b \times h = 200 \times 400$ mm được bố trí ở hai phía của cột BTCT. Cột bê tông có kích thước tiết diện ngang 200×200 mm. Cốt thép trong vai cột được tính toán nhằm đảm bảo vai cột bị phá hoại do lực cắt, dựa trên cơ sở trình bày ở mục 2.1, trong đó cốt thép dọc vùng kéo $3\varnothing 16$, cốt thép dọc vùng nén $2\varnothing 12$, cốt thép đai $\varnothing 6$, khoảng cách 150 mm. Đối với cột BTCT, cốt thép được lựa chọn đảm bảo quy định cấu tạo, cốt thép dọc bố trí $4\varnothing 16$, cốt thép



Hình 4. Chi tiết cấu tạo mẫu vai cột

đai $\varnothing 6$ khoảng cách 50 mm. Chi tiết kích thước hình học và cấu tạo cốt thép của 02 mẫu thí nghiệm được trình bày trên Hình 4.

Trên Bảng 1 trình bày cấp phối vật liệu bê tông chế tạo mẫu vai cột. Cường độ chịu nén của bê tông, cường độ chịu kéo của cốt thép dọc trong vai cột được xác định thông qua thí nghiệm phá hoại trên các mẫu thử. Kết quả thí nghiệm được tổng hợp trong Bảng 2, trong đó mỗi giá trị cường độ được xác định bằng trung bình cộng kết quả thí nghiệm trên 03 mẫu thí nghiệm.

Bảng 1. Thành phần cấp phối vật liệu chế tạo bê tông (kg/m^3)

Xi măng PCB30 (kg)	Cát vàng (kg)	Đá dăm 1×2 (kg)	Nước (kg)
430	597	1207	195

Bảng 2. Giá trị cường độ của bê tông và cốt thép sử dụng chế tạo các mẫu vai cột

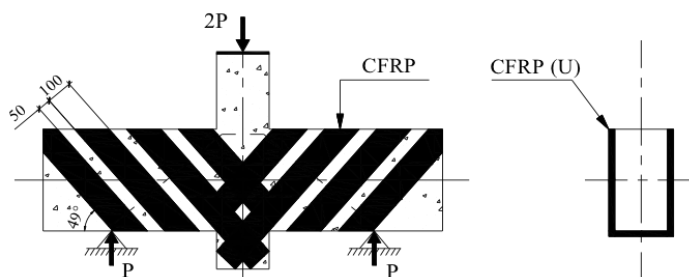
Cường độ chịu nén của bê tông ở 28 ngày tuổi (xác định trên mẫu trụ $D \times H = 150 \times 300$ mm)	23,0 MPa
Giới hạn chảy của thép $\varnothing 16$	410 MPa
Giới hạn chảy của thép $\varnothing 12$	380 MPa

Tấm CFRP và keo dán (keo epoxy hai thành phần) sử dụng gia cường do hãng Toray (Nhật Bản) sản xuất. Các thông số cơ học của tấm CFRP được lấy theo nhà sản xuất công bố và trình bày ở Bảng 3.

Bảng 3. Đặc trưng cơ học của tấm CFRP

Chiều dày tấm t_f	0,16 mm
Cường độ chịu kéo cực hạn f_{fu}	3400 MPa
Mô đun đàn hồi E_f	212,5 GPa
Độ giãn dài cực hạn ε_{fu}	1,6%

Trên Hình 5 trình bày phương án gia cường kháng cắt vai cột bằng tấm CFRP. Các tấm CFRP được dán theo dải dạng chữ U (dán 3 mặt). Các dải có bề rộng 100 mm, cách đều nhau 50 mm và nghiêng góc $\alpha = 49^\circ$ so với phương nằm ngang. Việc lựa chọn góc nghiêng này nhằm đảm bảo tấm CFRP được dán vuông góc với phương vết nứt xiên do lực cắt gây ra (theo tính toán lý thuyết, vết nứt xiên do lực cắt theo phương của thanh chống chéo, nghiêng góc $\theta = 41^\circ$ so với phương ngang).



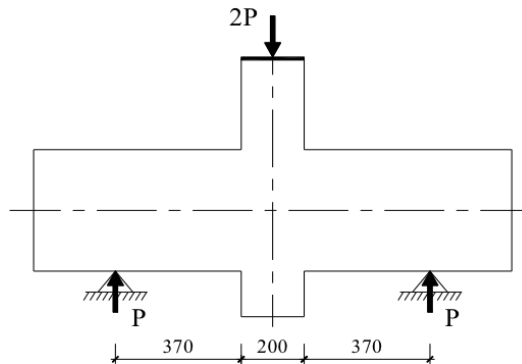
Hình 5. Phương án gia cường mẫu vai cột bằng tấm CFRP

3.2. Quy trình thi công dán tấm CFRP

Sau khi các mẫu vai cột được đổ bê tông và bảo dưỡng theo tiêu chuẩn, ở tuổi 28 ngày khi bê tông đã đạt cường độ thiết kế, tiến hành công tác thi công dán tấm CFRP. Các công đoạn thi công chính gồm làm sạch bề mặt mẫu (đảm bảo nhẵn, phẳng); quét lớp keo epoxy chuyên dụng lên bề mặt bê tông; dán tấm CFRP có bề rộng 100 mm và cách nhau 50 mm theo phương vuông góc với vùng vết nứt hình thành theo kết quả thí nghiệm mẫu vai cột thường D-0; 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 mẫu vai cột gia cường D-S được tiến hành.

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

Các mẫu D-0 và D-S được lắp dựng theo sơ đồ thí nghiệm trình bày trên Hình 6. Các mẫu vai cột được xoay 180° so với thực tế, mục đích để thuận tiện trong quá trình lắp dựng và tạo tải trọng tác dụng lên vai cột. Tải trọng thí nghiệm tác dụng lên cột BTCT, theo phương thẳng đứng, với giá trị $2P$. Hai phản lực tạo ra tại hai gối tựa có giá trị P chính là giá trị tải trọng đặt lên vai cột. Hình 7 minh họa sơ đồ thí nghiệm các mẫu vai cột D-0 và D-S.



Hình 6. Sơ đồ thí nghiệm mẫu vai cột



(a) Mẫu D-0

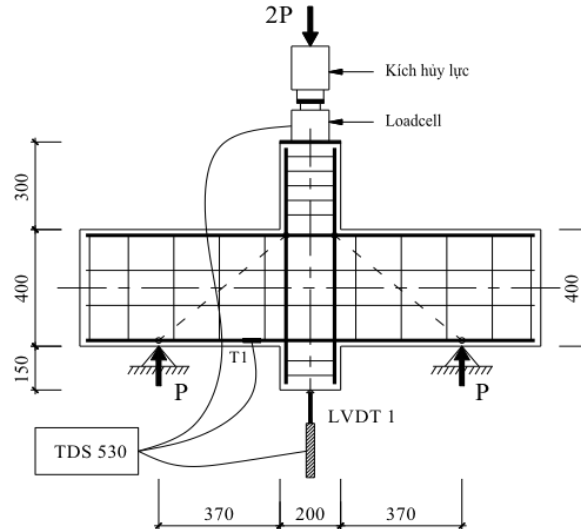


(b) Mẫu D-S

Hình 7. Hình ảnh các mẫu vai cột D-0 và D-S

Trên Hình 8 trình bày sơ đồ bố trí dụng cụ thiết bị đo. Chuyển vị đứng của cột BTCT được đo bằng 01 dụng cụ đo chuyển vị điện tử, ký hiệu LVDT1. Biến dạng trong cốt thép dọc vùng kéo $3\phi 16$ được đo bằng các phiến điện trở, được dán lên bề mặt cốt thép trước khi đổ bê tông, ký hiệu T1. Giá

trị tải trọng tác dụng lên vai cột được xác định thông qua dụng cụ đo lực điện tử (Load cell) 2000 kN. Các dụng cụ đo lực, đo chuyển vị, đo biến dạng 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).



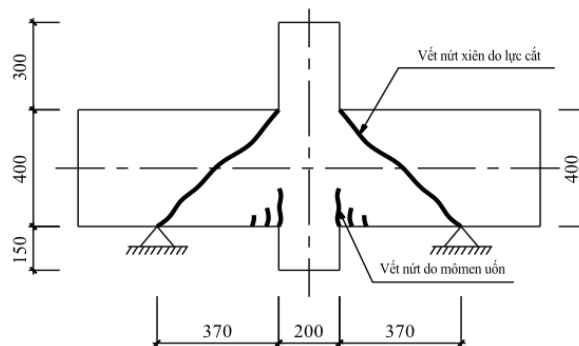
Hình 8. Sơ đồ bố trí dụng cụ đo mẫu vai cột thí nghiệm

4. Phân tích và đánh giá kết quả

4.1. Cơ chế phá hoại các mẫu thí nghiệm

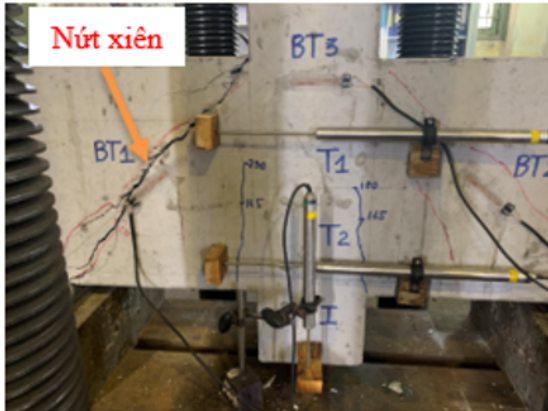
Kết quả thí nghiệm thu được cho thấy cả hai mẫu vai cột đều bị phá hoại do lực cắt. Vết nứt xiên có phương theo phương của các thanh chống trong mô hình STM. Sự hình thành và phát triển của vết nứt từ khi xuất hiện cho đến khi mẫu bị phá hoại có thể được miêu tả như sau:

Đối với mẫu D-0: Các vết nứt xuất hiện đầu tiên do mô men uốn gây ra. Các vết nứt này xuất hiện tại vùng bê tông chịu kéo, tại mép giao nhau giữa dầm và cột, khi tải trọng thí nghiệm bằng 82 kN. Tiếp sau đó là sự hình thành các vết nứt do lực cắt (vết nứt xiên) ở cấp tải trọng 120 kN và mẫu bị phá hoại từ vết nứt xiên sát với đường thanh chống nén bởi góc 410 ở tải trọng lớn nhất là 177,59 kN. Trên Hình 9 miêu tả sơ đồ hình thành và phát triển của các vết nứt trên bề mặt vai cột.

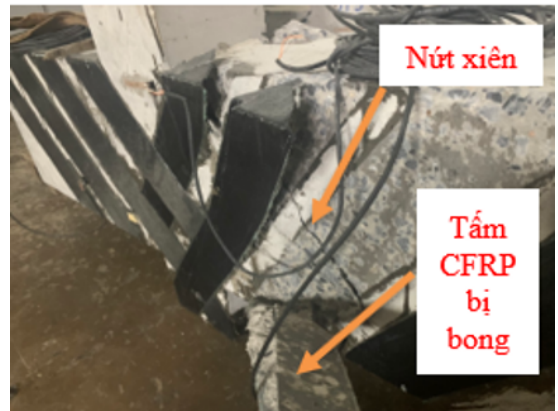


Hình 9. Sơ đồ vết nứt trên mẫu D-0

Đối với mẫu gia cường D-S: Sơ đồ phân bố vết nứt cũng tương tự như mẫu D-0. Vết nứt xuất hiện đầu tiên vẫn là vết nứt do uốn tại mép giao giữa dầm và cột ở tải trọng 90 kN. Phá hoại cắt xảy ra ngay khi tấm CFRP bị bong khỏi bề mặt bê tông. Vết nứt xiên hình thành nổi từ vị trí gối tựa đến mép trên cột, với góc nghiêng bằng 410, tương tự như vết nứt xiên trên mẫu D-0. Tải trọng tương ứng với thời điểm xảy ra phá hoại cắt là 302,21 kN. Hình ảnh thực tế sự phá hoại của hai mẫu vai cột được thể hiện trên Hình 10.



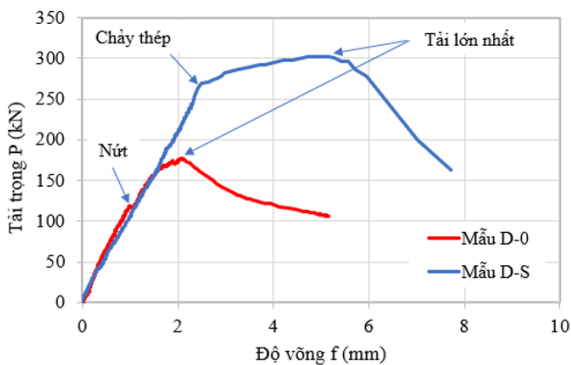
(a) Mẫu D-0



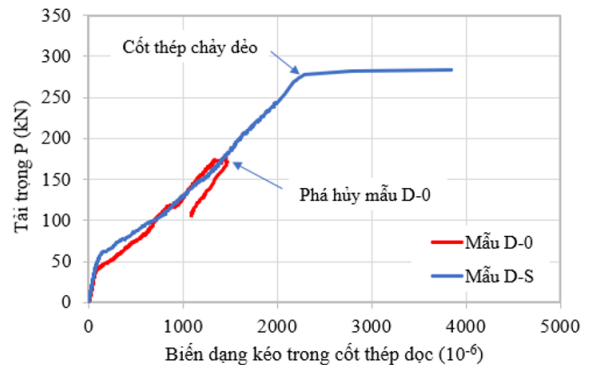
(b) Mẫu D-S

Hình 10. Hình ảnh phá hoại của các mẫu vai cột thí nghiệm

Trên Hình 11 trình bày mối quan hệ giữa tải trọng và độ võng của 02 mẫu vai cột thí nghiệm. Bảng 4 tổng hợp các giá trị tải trọng thí nghiệm đặc trưng cho sự làm việc của 02 mẫu thí nghiệm. Dựa trên các biểu đồ tải trọng - độ võng thu được cho phép làm rõ hơn cơ chế phá hoại của hai mẫu vai cột thí nghiệm. Mẫu D-0 bị phá hoại cắt thuần túy. Với mẫu D-S, trước khi xảy ra phá hoại cắt, cốt thép chịu kéo đã bị chảy dẻo (thể hiện qua sự thay đổi độ dốc trên biểu đồ quan hệ tải trọng - độ võng và kết quả trên Hình 12). Như vậy, mẫu D-S bị phá hoại uốn-cắt đồng thời. Sự có mặt của tấm CFRP gia cường góp phần tăng khả năng chịu cắt của vai cột, làm chậm sự phá hoại cắt, do vậy phát huy được sự tham gia chịu uốn của cốt thép chịu kéo. Đồng thời, tính dẻo của kết cấu cũng được tăng lên thể hiện qua việc độ võng ở thời điểm xảy ra phá hoại của mẫu D-S cao hơn gấp 1,7 lần so với mẫu D-0. Hiệu quả của việc gia cường kháng cắt bằng tấm CFRP còn thể hiện trong việc gia tăng tải trọng cực hạn lên 70% (Bảng 4).



Hình 11. Biểu đồ quan hệ tải trọng – độ võng của vai cột



Hình 12. Biểu đồ quan hệ tải trọng – biến dạng kéo trong cốt thép dọc

Bảng 4. Các giá trị tải trọng đặc trưng

Mẫu thí nghiệm	Tải trọng gây nứt (kN)	Tải trọng gây chảy cốt thép (kN)	Tải trọng cực hạn (kN)	Mức độ tăng khả năng chịu lực
D-0	80	-	177,59	-
D-S	90	270	302,21	70,1%

Kết quả thu được cho thấy sự làm việc của hai mẫu vai cột có sự khác biệt rõ ràng. Mẫu D-0 cho thấy sự phá hoại giòn đã xảy ra, trong khi mẫu D-S thể hiện đầy đủ sự làm việc của một cấu kiện bị phá hoại dẻo.

Bên cạnh đó, kết quả khảo sát biến dạng trong cốt thép dọc chịu kéo trình bày trên Hình 12 góp phần làm rõ hơn hiệu quả của việc gia cường kháng cắt vai cột bằng tấm CFRP. Kết quả cho thấy, cốt thép dọc của mẫu gia cường D-S đã bị chảy dẻo trước khi dầm bị phá hoại do lực cắt. Đối với mẫu D-0, tại thời điểm mẫu bị phá hoại, biến dạng trong cốt thép bằng 1400×10^{-6} , tương đương với ứng suất kéo 280 MPa. Như vậy cốt thép trong mẫu D-0 chưa bị chảy dẻo. Các kết quả này hoàn toàn phù hợp với cơ chế phá hoại của hai mẫu vai cột, trong đó mẫu D-0 bị phá hoại cắt còn mẫu D-S bị phá hoại uốn-cắt. Tổng hợp những kết quả phân tích có thể khẳng định rõ hiệu quả của việc gia cường kháng cắt cho vai cột bằng vật liệu CFRP với sơ đồ gia cường như trong nghiên cứu này.

4.2. So sánh khả năng chịu lực của vai cột theo lý thuyết và thực nghiệm

Trên Bảng 5 trình bày so sánh kết quả tính toán khả năng chịu cắt của các mẫu vai cột D-0 và D-S theo mô hình STM với kết quả thực nghiệm. Có thể thấy kết quả thực nghiệm lớn hơn so với kết quả tính toán lý thuyết với mức chênh lệch nhỏ. Kết quả này, cùng với cơ chế phá hoại của các mẫu vai cột cho thấy việc áp dụng mô hình STM nhằm tính toán khả năng chịu cắt của vai cột không gia cường và được gia cường kháng cắt bằng tấm CFRP dán theo dải là phù hợp.

Bảng 5. Kết quả tính toán khả năng chịu cắt của vai cột

Dầm	Lực cắt tính toán theo STM V_n (kN)	Lực cắt tính toán sau gia cường bằng CFRP $V_{n,CFRP}$ (kN)	Lực cắt theo thực nghiệm $V_{n,tn}$ (kN)	$V_{n,tn}/V_{n,lt}$
D-0	162,34	-	177,59	1,09
D-S	-	293,87	302,21	1,03

5. Kết luận

Nội dung bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm sự làm việc của vai cột được gia cường kháng cắt bằng vật liệu tấm sợi CFRP. Từ các kết quả thu được, có thể rút ra những kết luận sau:

- Sử dụng tấm CFRP gia cường kháng cắt cho vai cột là giải pháp phù hợp. Cơ chế phá hoại của vai cột được gia cường là phá hoại uốn-cắt đồng thời. Hiệu quả gia cường được thể hiện rõ qua việc khả năng chịu lực của vai cột sau khi gia cường tăng 70% so với trước khi gia cường.

- Cơ chế phá hoại kết cấu gia cường thu được trong nghiên cứu này là tấm CFRP bị bong khỏi bề mặt bê tông khi bê tông đã bị nứt vỡ. Do đó đảm bảo lực bám dính giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông là vấn đề cần được lưu ý khi áp dụng giải pháp gia cường này.

- Đối với vai cột được gia cường kháng cắt bằng tấm CFRP, sử dụng kết hợp mô hình STM với mô hình tính khả năng chịu cắt của tấm CFRP theo ACI 440.2R-17 cho kết quả phù hợp, Có thể mở rộng những nghiên cứu tiếp theo để khẳng định khả năng áp dụng của mô hình này cho kết cấu vai cột được gia cường bằng tấm CFRP.

Tài liệu tham khảo

- [1] ACI 318 (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute.
- [2] BS EN 1992-1-1 (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General - common rules for buildings and civil engineering structures*. London: British Standards Institution (BSI).
- [3] TCVN 5574:2018. *Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép*.
- [4] Minh, P. Q., Phong, N. T., Thắng, N. T., Tùng, V. M. (2021). *Kết cấu bê tông cốt thép - Phần cấu kiện cơ bản (TCVN 5574:2018)*. Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật.
- [5] Abdul-Razzaq, K. S., Dawood, A. A. (2020). [Corbel strut and tie modeling – Experimental verification](#). *Structures*, 26:327–339.
- [6] Dawood, A. A., Kadhum, A. K., Abdul-Razzaq, K. S. (2018). Strength of reinforced concrete corbels—a parametric study. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)*, 9(11):2274–2288.
- [7] Campione, G. (2009). [Performance of Steel Fibrous Reinforced Concrete Corbels Subjected to Vertical and Horizontal Loads](#). *Journal of Structural Engineering*, 135(5):519–529.
- [8] Khosravikia, F., su Kim, H., Yi, Y., Wilson, H., Yousefpour, H., Hrynyk, T., Bayrak, O. (2018). [Experimental and Numerical Assessment of Corbels Designed Based on Strut-and-Tie Provisions](#). *Journal of Structural Engineering*, 144(9):04018138.
- [9] 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.
- [10] FIP Bulletin No14 (2001). *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC structures*. Technical Report, Bulletin 14, International Federation for Structural Concrete (fib).
- [11] 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).
- [12] Al-Kamaki, Y. S. S., Hassan, G. B., Alsofi, G. (2018). [Experimental study of the behaviour of RC corbels strengthened with CFRP sheets](#). *Case Studies in Construction Materials*, 9:e00181.
- [13] El-Maaddawy, T. A., Sherif, E.-S. I. (2014). [Response of concrete corbels reinforced with internal steel rebars and external composite sheets: Experimental testing and finite element modeling](#). *Journal of Composites for Construction*, 18(1):04013020.
- [14] JSCE (2001). *Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheet*. Concrete Engineering Series 41, Japan Society of Civil Engineering.
- [15] Hiếu, N. T., Cường, L. T. (2020). *Gia cường kết cấu bê tông cốt thép bằng vật liệu tấm sợi composite*. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Quỳnh, D. Đ., Hiếu, N. T., Đạt, P. X., Hùng, N. M. (2021). [Nghiên cứu thực nghiệm sự làm việc chịu uốn của dầm bê tông cốt thép được gia cường bằng tấm composite CFRP ở trạng thái đang chịu tải](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 15(2V):1–11.
- [19] Lam, L., Teng, J. G. (2003). [Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete](#). *Construction and Building Materials*, 17(6-7):471–489.