

Nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường dầm bê tông cốt thép chịu xoắn bằng vật liệu tấm sợi các bon CFRP

Nguyễn Trung Hiếu*, Lý Trần Cường

Trường Đại học Xây dựng

Ngày nhận bài 12/12/2017; ngày chuyển phản biện 18/12/2017; ngày nhận phản biện 19/1/2018; ngày chấp nhận đăng 29/1/2018

Tóm tắt:

Nội dung bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm sự làm việc của dầm bê tông cốt thép (BTCT) chịu xoắn được gia cường bằng vật liệu tấm sợi các bon (CFRP); 6 mẫu dầm thí nghiệm có cùng kích thước hình học và cấu tạo cốt thép được chế tạo, trong đó 2 mẫu dầm không được gia cường và 4 mẫu được gia cường chống xoắn bằng tấm sợi CFRP. Các kết quả thực nghiệm về cơ chế phá hoại, mô men xoắn cực hạn, góc xoay, tình trạng nứt của các mẫu thí nghiệm được trình bày và thảo luận. Những kết quả thu được từ nghiên cứu này cho thấy hiệu quả của việc sử dụng tấm sợi CFRP trong gia cường kết cấu dầm BTCT chịu xoắn.

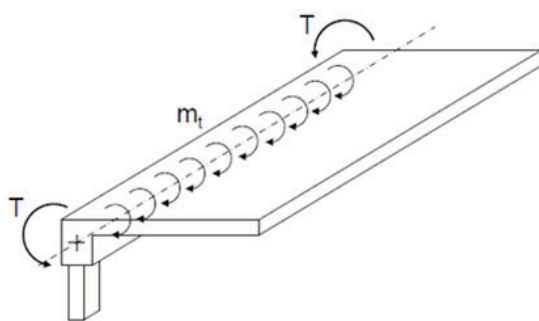
Từ khóa: Dầm, gia cường, tấm sợi composite, xoắn.

Chỉ số phân loại: 2.1

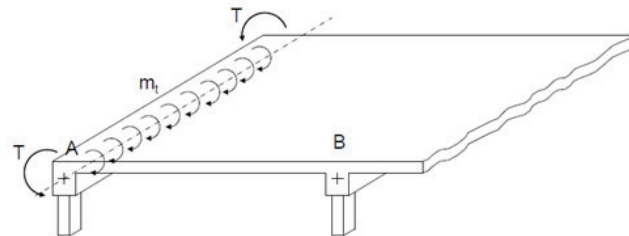
Đặt vấn đề

Hiện nay, kết cấu BTCT là dạng kết cấu chịu lực được sử dụng phổ biến nhất trong các công trình xây dựng. Sự làm việc của kết cấu BTCT theo thời gian chịu tác dụng của nhiều yếu tố tác động khác nhau dẫn đến tình trạng hư hỏng, suy giảm khả năng chịu lực cũng như xuất hiện những yêu cầu về cải tạo, sửa chữa cho phù hợp với các điều kiện, công năng sử dụng. Cấu kiện BTCT làm việc chịu xoắn là dạng kết cấu thường gặp trong hệ kết cấu công trình, ví dụ như dầm đỡ ban công, các bản sàn có dạng công-xôn... Mô men xoắn có xu hướng gây xoắn các cấu kiện quanh trục dọc của các cấu kiện này và trong nhiều trường hợp đã gây ra tình trạng nứt bê tông do xoắn (hình 1).

Việc sử dụng tấm sợi composite cường độ cao (Fibre Reinforced Polymer, viết tắt FRP) trong công tác gia cường kết cấu BTCT 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... Trong số các loại composite làm vật liệu gia cường, CFRP được sử dụng rất phổ biến. 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 dưới tác động của yếu tố môi trường... Bên cạnh ưu điểm về đặc tính cơ học, gia cường bằng CFRP còn cho thấy những tiện lợi trong 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 2 giới thiệu hình ảnh sử dụng CFRP trong công tác gia cường kết cấu BTCT chịu uốn.



A. Dầm đỡ ban công-xôn.



B. Dầm biên trong hệ kết cấu dầm sàn liên tục nhiều nhịp.

Hình 1. Dầm BTCT làm việc chịu xoắn.

*Tác giả liên hệ: Email: hieunt@nuce.edu.vn

Experimental study on the strengthening efficiency of reinforced concrete beams under torsion using CFRP sheets

Trung Hieu Nguyen*, Tran Cuong Ly

National University of Civil Engineering

Received 12 December 2017; accepted 29 January 2018

Abstract:

This paper presents an experimental study on the torsional behavior of reinforced concrete (RC) beams strengthened with externally bonded carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets. Six identical specimens were cast. The concrete grade and the steel reinforcement ratio were kept constant for all specimens. Two specimens without being strengthened were the control specimens, while the four other specimens were strengthened with CFRP composite sheets. In the experimental findings, the failure mode, the ultimate torsional moment, the crack patterns of tested specimens were presented and discussed. The obtained results from this research clarified the torsional behavior of beams strengthened by CFRP and the strengthening effectiveness in the torsional capacity of RC beams using this material.

Keywords: Beam, composite sheet, strengthening, torsion.

Classification number: 2.1



Hình 2. Hình ảnh gia cường kết cấu chịu uốn bằng CFRP [1].

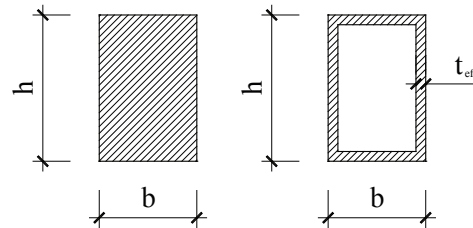
Ở nước ta hiện nay, vật liệu CFRP đã được sử dụng cho việc gia cường một số công trình cầu và nhà dân dụng. Tuy nhiên, việc áp dụng còn nhiều hạn chế, chưa được phổ biến, trong đó nguyên nhân chính là giá thành và tiêu chuẩn kỹ thuật áp dụng cho loại vật liệu này. Trong nước chưa có các tiêu chuẩn thiết kế, thi công gia cường kết cấu BTCT sử dụng CFRP; việc tính toán thiết kế được thực hiện theo một số tiêu chuẩn nước ngoài như FIP-Bulletin No14 [1], ACI

440.2R-08 [2]; do đó việc tính toán, phân tích cho từng đối tượng kết cấu cụ thể, làm cơ sở để xây dựng tiêu chuẩn riêng cho việc áp dụng loại vật liệu gia cường này ở trong nước là cần thiết. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu sử dụng CFRP trong việc gia cường kết cấu BTCT làm việc chịu xoắn, được thực hiện tại Phòng thí nghiệm và kiểm định công trình, Trường Đại học Xây dựng.

Nội dung nghiên cứu

Lý thuyết tính toán gia cường kết cấu chịu xoắn

Xét dầm BTCT có tiết diện ngang hình chữ nhật kích thước $b \times h$ làm việc chịu xoắn. Theo CEB-FIP Model Code 1990 [3], để tính toán khả năng chịu xoắn, tiết diện chữ nhật được quy đổi về tiết diện thanh thành mỏng tương đương (hình 3), trong đó chiều dày t_{ef} được xác định bằng tỷ số giữa diện tích và chu vi của tiết diện.



Hình 3. Quy đổi tiết diện chữ nhật sang tiết diện thanh thành mỏng tương đương.

Tính toán khả năng chịu xoắn được áp dụng theo lý thuyết tính toán thanh thành mỏng với các giả thiết: (1) ở trạng thái giới hạn, ứng suất tiếp phân bố đều theo các mặt của thanh thành mỏng; (2) ở trạng thái giới hạn, ứng suất trong cốt thép dọc và cốt thép đai đạt đến cường độ chịu kéo tính toán của cốt thép, bê tông trong dải nén nghiêng đạt đến cường độ chịu nén tính toán; (3) bỏ qua khả năng chịu kéo của bê tông.

Khả năng chịu xoắn của tiết diện xác định từ điều kiện để bê tông không bị ép vỡ được tính theo công thức (1).

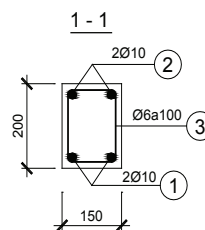
$$R_{d,max} = \frac{1,33}{\cotg \theta} \frac{f_{ck} t_{ef} A_k}{\tg \theta} \quad (1)$$

Trong đó: f_{ck} là cường độ chịu nén đặc trưng của bê tông (MPa); ν là hệ số giảm cường độ của bê tông, được xác định theo công thức (2); A_k là diện tích phần lõi của thanh thành mỏng tương đương được tính theo công thức (3); θ là góc xoắn (góc nghiêng của đường nứt do xoắn so với phương ngang) được xác định theo công thức (4).

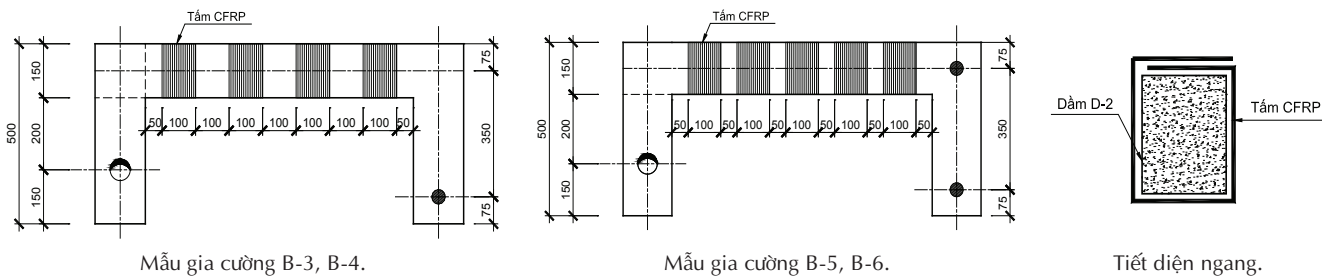
$$\nu = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \quad (2)$$

$$A_k = (b - t_{ef})(h - t_{ef}) \quad (3)$$

(4)

$$F_{fd,h} = \varepsilon_{fd,v} E_{fu} \frac{t_f b_f}{s_f} . b . \cos \theta \quad (6)$$


31



Hình 6. Mẫu thí nghiệm được gia cường B-3, B-4, B-5, B-6.

đọc 4φ10, cốt thép đai φ6a100) và cường độ bê tông. Trong đó:

- 2 mẫu không gia cường, ký hiệu B-1 và B-2, là các mẫu thí nghiệm đối chứng.
- 2 mẫu được gia cường chịu xoắn bằng CFRP ở đoạn dầm D-2, ký hiệu B-3, B-4, với khoảng cách các tấm CFRP là 100 mm.
- 2 mẫu được gia cường chịu xoắn bằng CFRP ở đoạn dầm D-2, ký hiệu B-5, B-6, với khoảng cách các tấm CFRP là 100 mm.

Cấp phối vật liệu bê tông chế tạo mẫu thí nghiệm được trình bày trong bảng 1. Giá trị cường độ chịu nén của bê tông trình bày trong bảng 1 được xác định bằng giá trị cường độ nén trung bình của 3 mẫu thí nghiệm hình trụ $D \times H = 150 \times 300$ mm ở tuổi 28 ngày. Cốt thép φ6 và φ10 có giới hạn chảy xác định qua thí nghiệm kéo lần lượt là 240 MPa và 325 MPa.

Bảng 1. Cấp phối vật liệu chế tạo bê tông.

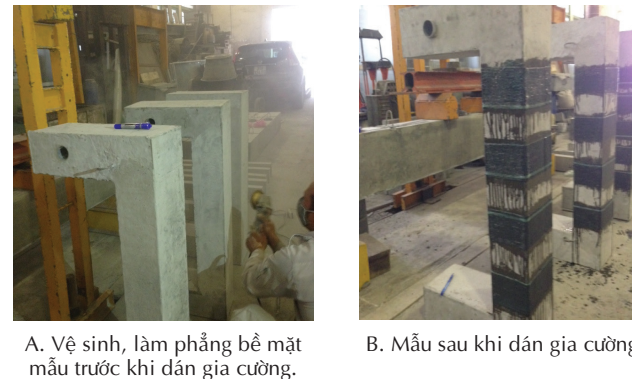
Xi măng PCB40 (kg)	Cát vàng (kg)	Đá dăm 1x2 (kg)	Nước (lít)	Cường độ chịu nén R_{28} (MPa)
325	680	1240	195	25,0

Tấm 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 CFRP sử dụng gia cường.

STT	Thông số	Giá trị
1	Chiều dày tấm t_f	0,4 mm
2	Cường độ chịu kéo f_{tu}	1778 MPa
3	Mô đun đàn hồi E_f	96,9 GPa
4	Biến dạng cực hạn ϵ_{fu}	1,85 %

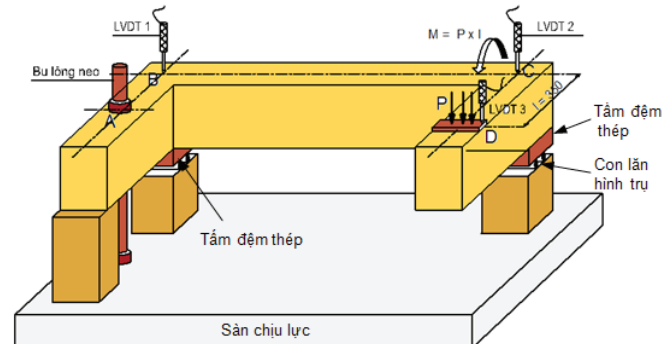
Trên hình 7 minh họa hình các mẫu thí nghiệm sau khi đã được gia cường bằng tấm CFRP. Sử dụng keo epoxy chuyên dụng để dán tấm composite lên bề mặt bê tông. Thời gian cần thiết để lớp keo epoxy đóng rắn là 48 h sau khi dán. Trong công tác gia cường, việc chuẩn bị, làm phẳng bề mặt bê tông (hình 7A) có vai trò quan trọng để đảm bảo độ bền liên kết giữa bê tông và tấm CFRP.



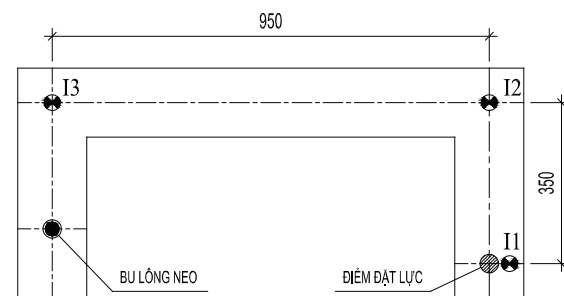
Hình 7. Hình ảnh công tác gia cường mẫu thí nghiệm.

Sơ đồ thí nghiệm và bố trí dụng cụ đo:

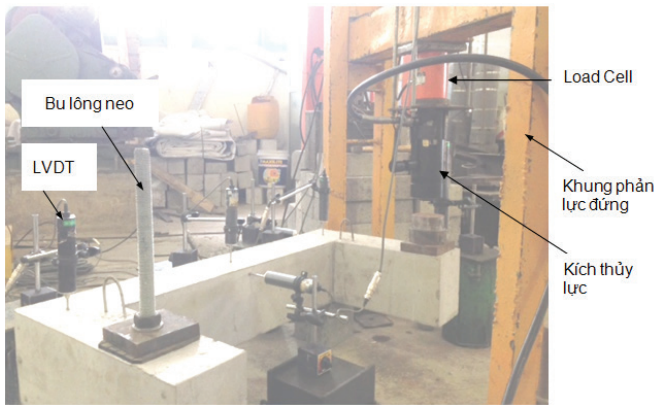
Hình 8 trình bày sơ đồ thí nghiệm trong đó đoạn dầm D2 giữa hai điểm B và C làm việc chịu xoắn thuần túy, hình 9 trình bày sơ đồ bố trí dụng cụ đo chuyển vị LVDT. Mô men



Hình 8. Sơ đồ thí nghiệm.



Hình 9. Sơ đồ bố trí dụng cụ đo chuyển vị LVDT.



Hình 10. Hình ảnh minh họa sơ đồ thí nghiệm.



Hình 11. Hình ảnh bố trí các dụng cụ đo chuyển vị LVDT.

xoắn được tạo ra thông qua tải trọng tập trung P tác dụng tại điểm D , có cánh tay đòn so với đoạn dầm $D2$ là khoảng cách CD bằng 350 mm. Đoạn dầm AB có vai trò tạo ra liên kết ngàm của đoạn dầm BC , thông qua một bu lông neo M40 (loại 8.8) tại điểm A và một gối tựa tại điểm B (nhằm ngăn cản chuyển vị đứng). Việc lựa chọn bu lông neo M40 nhằm hạn chế tối đa biến dạng dãn dài của bu lông dưới tác dụng của tải trọng. Tại điểm C , mẫu thí nghiệm được kê lên một tấm đệm thép (chiều dày 20 mm) đặt trên các con lăn hình trụ nhằm ngăn cản chuyển vị đứng của mẫu thí nghiệm nhưng cho phép mẫu thí nghiệm có thể quay tự do quanh vị trí liên kết này.

Trong thí nghiệm này, các đại lượng cần đo đặc gồm tải trọng tác dụng lên mẫu thí nghiệm và chuyển vị tại các vị trí đặc trưng. Sử dụng kích thủy lực kết hợp với trạm bơm dầu để tạo ra tải trọng tác dụng lên mẫu thí nghiệm. Giá trị tải trọng tác dụng được xác định thông qua 1 dụng cụ đo lực điện tử (load cell) như minh họa trên hình 10. Chuyển vị đứng của mẫu dưới tác dụng của tải trọng được xác định thông qua 3 dụng cụ đo chuyển vị điện tử (LVDT) ký hiệu I1, I2, I3 như trên hình 9 và thực tế trên hình 11. Các dụng cụ đo chuyển vị và đo lực được kết nối với bộ thu thập và xử

lý số liệu (Data logger) cho phép ghi nhận tự động và đồng thời (01 giây/lần) các số liệu thí nghiệm. Từ số đo trên các dụng cụ đo chuyển vị cho phép xác định được góc xoắn θ của đoạn dầm BC theo công thức (11).

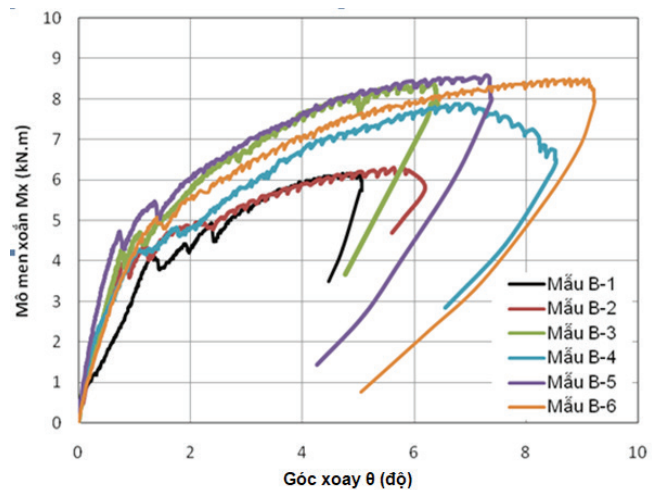
$$\operatorname{tg} \theta = \frac{f_1 - f_2 - f_3}{l} \quad (11)$$

Trong đó, f_1, f_2, f_3 lần lượt là giá trị chuyển vị của mẫu thí nghiệm xác định qua các dụng cụ đo I1, I2 và I3; l là chiều dài cánh tay đòn của lực tập trung bằng 350 mm.

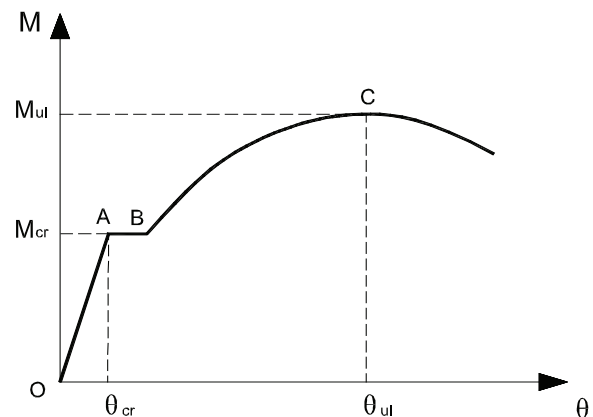
Kết quả và bàn luận

Biểu đồ quan hệ mô men xoắn - góc xoay ($M_x - \theta$)

Hình 12 trình bày biểu đồ quan hệ giữa mô men xoắn M_x và góc xoay θ của các mẫu thí nghiệm.



Hình 12. Biểu đồ quan hệ giữa mô men xoắn và góc xoay của 6 mẫu thí nghiệm.



Hình 13. Biểu đồ đặc trưng quan hệ $M - \theta$.

Từ kết quả thí nghiệm trình bày trên hình 12 có thể xác định được biểu đồ đặc trưng quan hệ giữa mô men xoắn và góc xoay như trên hình 13. Các kết quả thu được cũng phù hợp với kết quả nghiên cứu được trình bày trong [4, 5].

Trong đó, sự làm việc của mẫu dầm chịu xoắn trong cả hai trường hợp không gia cường và có gia cường có thể chia thành các giai đoạn làm việc như sau:

- Đoạn OA: Giai đoạn dầm làm việc đàn hồi, quan hệ M- θ là tuyến tính. Trong giai đoạn này, tỷ lệ kích thước các cạnh tiết diện ngang của dầm ảnh hưởng nhiều đến ứng xử đàn hồi dưới tác dụng của mô men xoắn. Trong giai đoạn này xác định được độ cứng chống xoắn đàn hồi của tiết diện.

- Đoạn AB: Giai đoạn xuất hiện các vết nứt do mô men xoắn gây ra. Điểm A tương ứng với điểm thay đổi độ dốc đầu tiên của đường quan hệ M- θ . Trong giai đoạn này xác định được mô men xoắn gây nứt dầm, ký hiệu M_{cr} và góc xoay tương ứng θ_{cr} .

- Đoạn BC: Quan hệ M- θ là phi tuyến. Điểm C tương ứng với thời điểm dầm bị phá hoại hoàn toàn và xác định được mô men xoắn cực hạn M_{ul} và góc xoay tương ứng θ_{ul} .

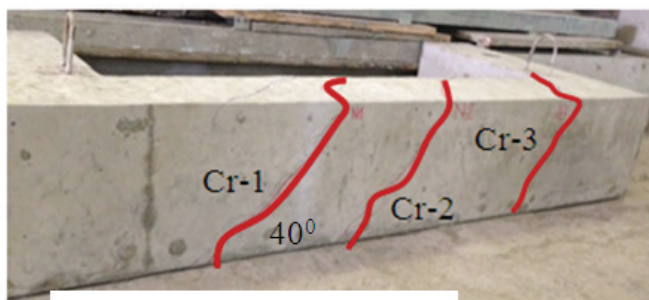
Trên cơ sở phân tích trên đây và kết quả thực nghiệm có thể rút ra các giá trị đặc trưng cho sự làm việc của các mẫu thí nghiệm dưới tác dụng của mô men xoắn (bảng 3).

Bảng 3. Các giá trị mô men xoắn gây nứt M_{cr} , mô men xoắn cực hạn M_{ul} .

Mẫu	M_{cr} (kN.m)	θ_{cr} (độ)	M_{ul} (kN.m)	θ_{ul} (độ)
B-1	4,0	0,9	6,1	5,80
B-2	4,1	1,6	6,0	5,15
B-3	4,3	0,8	8,3	7,10
B-4	4,2	1,5	7,9	7,77
B-5	4,8	0,9	8,4	7,70
B-6	5,0	1,8	8,5	8,50

Cơ chế phá hoại

Đối với các mẫu dầm không gia cường, cơ chế phá hoại là cốt thép bị chảy dẻo và bê tông bị nén vỡ. Số lượng các vết nứt trên 2 mẫu dầm B-1 và B-2 là 3 vết nứt/dầm. Các vết nứt đều nghiêng góc so với phương nằm ngang xấp xỉ 40° (hình 14A). Đối với các dầm gia cường, cơ chế phá hoại xảy ra do sự bong của lớp FRP gia cường khỏi bề mặt bê tông,



A. Mẫu không gia cường B-1

đồng thời phá hoại bê tông do bị nén vỡ. Về tình trạng nứt, các vết nứt xuất hiện đều trên cả khoảng tiết diện khảo sát, bề rộng các vết nứt nhỏ. Điều này thể hiện vai trò của lớp FRP trong việc tăng tính dẻo của dầm và góp phần phân tán các vết nứt. Góc nghiêng của các vết nứt so với phương ngang cũng xấp xỉ 35° như đối với các dầm thông thường (hình 14B).

Đánh giá hiệu quả gia cường

Bảng 4 trình bày kết quả so sánh mô men xoắn gây nứt, mô men xoắn cực hạn và góc xoay cực hạn của các mẫu được gia cường bằng tấm CFRP so với các mẫu đối chứng không gia cường. Kết quả thu được cho việc tấm CFRP gia cường tham gia chịu xoắn đã góp phần làm tăng khả năng chịu xoắn của mẫu thí nghiệm. Hiệu quả gia cường của mẫu B-5 và B-6 cao hơn so với mẫu B-3 và B-4 do có sự gia tăng về diện tích tấm gia cường CFRP. Nếu đánh giá độ dẻo của kết cấu theo tiêu chí độ lớn của góc xoay cực hạn khi các mẫu thí nghiệm bị phá hoại, có thể thấy rõ hơn hiệu quả của việc gia cường chống xoắn bằng tấm CFRP trong việc tăng độ dẻo của kết cấu. Có thể thấy rõ các tấm CFRP được bố xung quanh tiết diện chịu xoắn trong trường hợp này có tác dụng ngăn cản sự mở rộng, phát triển của các vết nứt do mô men xoắn gây ra, dẫn đến làm tăng góc xoay của kết cấu thí nghiệm.

Bảng 4. So sánh sự gia tăng của mô men xoắn gây nứt M_{cr} , mô men xoắn cực hạn M_{ul} và góc xoay cực hạn θ_{ul} của các mẫu được gia cường so với mẫu không gia cường.

Mẫu	Độ tăng M_{cr} (%)	Độ tăng M_{ul} (%)	Độ tăng θ_{ul} (%)
B-1	-	-	-
B-2	-	-	-
B-3	6,1	37,1	29,6
B-4	3,7	30,5	41,9
B-5	18,5	38,	40,6
B-6	23,5	40,5	55,3

So sánh kết quả thực nghiệm và kết quả tính toán lý thuyết

Bảng 5 trình bày kết quả so sánh giữa khả năng chịu mô



B. Mẫu gia cường B-1

Hình 14. Hình ảnh vết nứt trên các mẫu thí nghiệm không gia cường và có gia cường.

men xoắn của dầm không/có gia cường theo tính toán lý thuyết và theo thực nghiệm. Có thể thấy khả năng chịu xoắn theo tính toán lý thuyết đều nhỏ hơn so với thực nghiệm. Với các mẫu không gia cường, kết quả lý thuyết và kết quả thực nghiệm khá tương đồng. Với các mẫu được gia cường, kết quả tính toán lý thuyết theo tiêu chuẩn FIP-Bulletin chênh lệch khá nhiều so với kết quả thực nghiệm. Có thể thấy, tiêu chuẩn CEB-FIP 2010 hạn chế khá nhiều giá trị biến dạng ϵ_{fe} của tấm CFRP khi xảy ra bong tấm CFRP khỏi bề mặt bê tông và là nguyên nhân dẫn đến chênh lệch này. Việc tiến hành các nghiên cứu sâu hơn về giá trị biến dạng của tấm CFRP khi xảy ra phá hoại là vấn đề cần thiết.

Bảng 5. So sánh mô men xoắn tới hạn M_{ul} (kN.m) của các mẫu dầm theo lý thuyết và theo thực nghiệm.

Mẫu	Tính toán theo [1]	Theo thực nghiệm	Chênh lệch (%)
B-1, B-2	5,48	6,05	10,4
B-3, B-4	5,99	7,43	24,0
B-5, B-6	6,15	8,1	31,7

Kết luận

Dựa trên các kết quả nghiên cứu thu được cho phép rút ra một số kết luận sau:

- Sự làm việc của kết cấu dầm BTCT chịu xoắn được gia cường bằng FRP tuân thủ theo các giai đoạn làm việc điển hình của kết cấu dầm BTCT thông thường không được gia cường.

- Dạng phá hoại điển hình của kết cấu chịu xoắn được gia cường bằng FRP là bong tấm FRP khỏi bề mặt bê tông. Đây là dạng phá hoại điển hình của các kết cấu được gia cường bằng vật liệu này.

- Gia cường kết cấu dầm BTCT bằng CFRP cho phép tăng khả năng chịu xoắn của dầm. Tấm CFRP góp phần hạn chế sự phát triển và mở rộng của các vết nứt do mô men xoắn gây ra. Trong nghiên cứu này, khả năng chịu xoắn của kết cấu được gia cường tăng đến 40,5% so với trường hợp không gia cường. Độ dẻo của kết cấu chịu xoắn xác định dựa trên cơ sở góc xoắn cực hạn θ_{ul} tăng đáng kể trong trường hợp kết cấu được gia cường chịu xoắn.

- Kết quả tính toán gia cường kết cấu chịu xoắn theo mô hình CEB-FIP 2010 cho kết quả chênh lệch khá lớn với kết quả thực nghiệm. Nguyên nhân chính là do việc hạn chế giá trị biến dạng của tấm FRP tại thời điểm bị bong liên kết bề mặt. Cần có những nghiên cứu tiếp theo về vấn đề này.

- Trong thực tế, kết cấu dầm BTCT thường làm việc kết hợp với bản sàn BTCT đổ toàn khối. Vì vậy, việc nghiên cứu ảnh hưởng của bản sàn BTCT đến hiệu quả gia cường là một nội dung có thể tiếp tục được phát triển của hướng nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] FIP-Bulletin No14 (2001), *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*, Comité Euro-International du Béton.
- [2] ACI 440.2R-08 (2008), *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, ACI Committee 440.
- [3] CEB-FIP Model Code (1990), *Design Code*, Comité Euro-International du Béton.
- [4] M. Ameli, H.R. Ronagh, P.F. Dux (2007), "Behavior of FRP strengthened reinforced concrete beams under torsion", *Journal of Composite for Construction*, **11**(2), pp.192-200.
- [5] A. Prabaghar, G. Kumaran (2013), "Theoretical Study on the Behaviour of Rectangular Concrete Beams reinforced internally with GFRP reinforcements under pure torsion", *Journal of Computation and Modelling*, **3**(1), pp.1-31.