

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VỀ GIA CƯỜNG KHÁNG CẮT CHO DÀM BÊ TÔNG CỐT THÉP BẰNG TẤM SỢI THỦY TINH

TS. NGUYỄN HÙNG PHONG

Đại học Xây dựng

Tóm tắt: Bài báo trình bày về một nghiên cứu thực nghiệm gia cường chịu cắt cho các dầm bê tông cốt thép. Bốn dầm giống nhau được chế tạo, trong đó, ba dầm được gia cường bằng tấm sợi thủy tinh với các hình thức gia cường khác nhau. Kết quả thí nghiệm cho thấy, tấm sợi thủy tinh làm gia tăng đáng kể khả năng chịu cắt và làm tăng độ cứng, độ dẻo của dầm. Các yếu tố về cấu tạo như độ dính kết giữa bê tông và tấm gia cường, đoạn neo của tấm, bán kính cong góc gia cường, chất lượng lớp bê tông bảo vệ ảnh hưởng lớn đến hiệu quả gia cường.

1. Tổng quan về phương pháp gia cường

Tình trạng công trình bê tông cốt thép (BTCT) bị xuống cấp theo thời gian, chất lượng thi công công trình không đảm bảo và việc gia tăng tải trọng sử dụng lên công trình đòi hỏi công trình cần được gia cố/gia cường để tránh hư hỏng, sụp đổ. Trong các hình thức phá hoại kết cấu BTCT, phá hoại cắt diễn ra rất đột ngột và nguy hiểm, do đó, việc gia cường, gia cố chịu cắt cho công trình cần đảm bảo độ an toàn cao. Trong các phương pháp được sử dụng, giải pháp gia cố chịu cắt cho dầm BTCT bằng tấm sợi liên tục cường độ cao FRP (fiber reinforced polymer) là một giải pháp tương đối đơn giản, cho phép thi công nhanh và ít gây ảnh hưởng tới kiến trúc công trình. Ngoài việc gia cố kháng cắt, giải pháp dán tấm FRP còn giúp bảo vệ kết cấu BTCT khỏi tác dụng xâm thực của môi trường và đóng vai trò neo cho gia cố kháng uốn bằng cách dán tấm FRP ở đáy dầm. Có nhiều hình thức gia cường kháng cắt dầm BTCT bằng tấm FRP như gia cường dạng tấm liên tục trên suốt chiều dài dầm hoặc gia cường theo từng băng, gia cường theo phương thẳng đứng hay phương xiên, gia cường dán ba mặt dầm hoặc hai mặt bên của dầm.



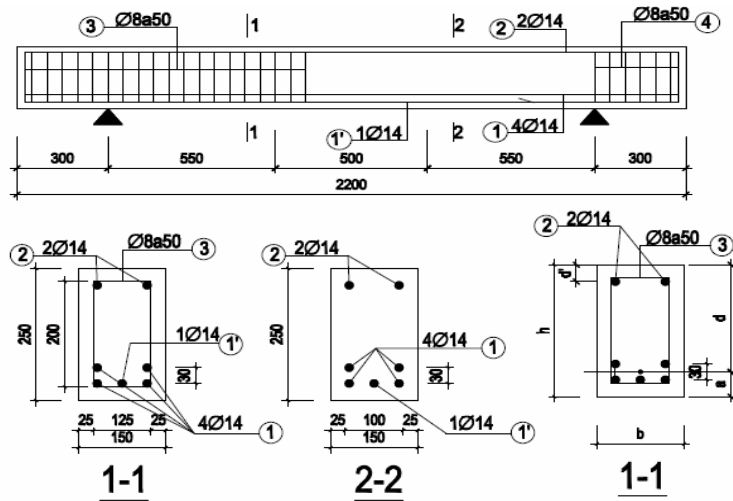
Hình 1. Gia cố kháng cắt cho dầm BTCT bằng tấm FRP

Trong số các loại tấm FRP thông dụng, tấm sợi thủy tinh (glass fiber reinforced polymer – viết tắt là GFRP) được sử dụng khá phổ biến do có giá thành tương đối thấp. Trong nghiên cứu thực nghiệm này, tác giả đã tiến hành thí nghiệm gia tải cho bốn dầm BTCT được gia cường bằng tấm GFRP theo các hình thức khác nhau. Qua kết quả thí nghiệm, tác giả đã tiến hành phân tích, đánh giá về hiệu quả gia cường của tấm GFRP, hình thức nứt và phá hoại dầm cũng như các chi tiết cấu tạo trong gia cường, từ đó đưa ra các khuyến cáo cho việc thiết kế, thi công gia cường kháng cắt cho kết cấu BTCT bằng tấm sợi thủy tinh.

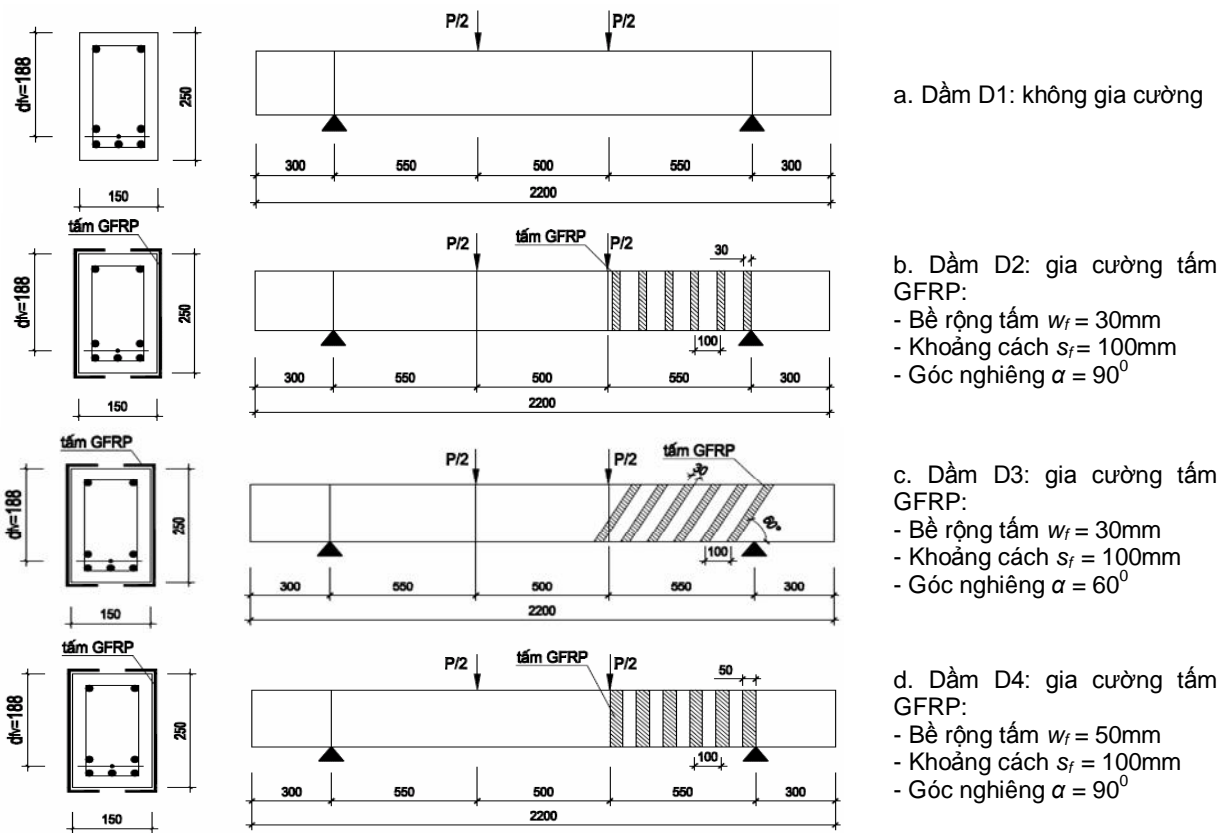
2. Mẫu thí nghiệm

2.1. Chi tiết mẫu thí nghiệm

Bốn mẫu dầm được chế tạo hoàn toàn giống nhau trước khi gia cường tấm GFRP (hình 2). Các dầm này được bố trí cốt thép dọc với hàm lượng lớn sao cho khả năng chịu uốn của dầm lớn hơn khả năng chịu cắt ở nhịp phải (xem bảng 3) để khi thí nghiệm dầm không bị phá hoại do uốn. Nhịp cắt bên trái của các dầm ($a = 550\text{mm}$) được bố trí cốt đai thép tương đối lớn ($\phi 8$ khoảng cách 50 mm) để sự phá hoại cắt sẽ không xảy ra ở nhịp này mà xảy ra ở nhịp bên phải là nhịp mà các dầm sẽ được gia cường bằng tấm GFRP theo các hình thức khác nhau (hình 3). Các tấm (băng) GFRP gia cường được dán ở hai mặt bên của dầm bằng keo epoxy và được neo vào mặt trên và mặt dưới của dầm một đoạn 50mm.



Hình 2. Chi tiết mẫu dầm trước khi gia cường tấm GFRP



Hình 3. Chi tiết gia cường các mẫu dầm bằng tấm GFRP theo các hình thức khác nhau

Cường độ của vật liệu thép và bê tông được xác định bằng thí nghiệm tại thời điểm cùng ngày với thí nghiệm gia tải các mẫu dầm và được tóm tắt trong bảng 1. Các đặc trưng cơ học của tấm GFRP do nhà phân phối cung cấp, được tóm tắt trong bảng 2. Các thông số về kết cấu của các dầm tính toán theo tiêu chuẩn ACI [4] được tóm tắt trong bảng 3 với hàm lượng

bằng GFRP gia cường ρ_f được định nghĩa theo công thức (1).

$$p_f = \frac{2t_f w_{fn}}{bs_f} \tag{1}$$

trong đó: t_f - chiều dày của băng GFRP; w_{fn} - bề rộng của băng GFRP theo phương nằm ngang; s_f - khoảng cách giữa các băng GFRP tính từ tim; b - bề rộng của dầm.

Bảng 1. Cường độ thí nghiệm của vật liệu thép và bê tông của các mẫu dầm

Giới hạn chảy của thép dọc $\phi 14 f_y$	351 MPa
Giới hạn chảy của thép đai $\phi 8 f_{yt}$	362 MPa
Cường độ chịu nén của bê tông (mẫu trụ 150x300mm) f_c'	20,07 MPa

Bảng 2. Các đặc trưng cơ học của tấm sợi thủy tinh GFRP

Các đặc trưng cơ học (giá trị thí nghiệm)	Tấm sợi thủy tinh
Cường độ chịu kéo cực hạn theo phương của sợi f_f	575 MPa
Độ dẫn dài cực hạn ϵ_f	2,2 %
Mô-đun kéo E_f	26,1 GPa
Chiều dày tấm t_f	0,635 mm

Bảng 3. Các thông số về kết cấu của các mẫu dầm tính theo lý thuyết của tiêu chuẩn ACI [4]

Tên dầm	Đặc điểm gia cường nhịp phải	Hàm lượng băng GFRP ρ_f (%)	Khả năng chịu cắt nhịp trái ($V_c + V_s$) (kN)	Khả năng chịu uốn ($P/2 = M/a$) (kN)	Khả năng chịu cắt nhịp phải ($V_c + V_f$) (kN)
D1	Không gia cường	-	203,8	103,7	66,8 (V_c)
D2	Băng thẳng 30mm	0,254			75,9
D3	Băng xiên 30mm	0,293			79,2
D4	Băng thẳng 50mm	0,423			81,9

(P: tổng tải trọng kích thủy lực tác dụng lên dầm chia làm hai lực tập trung hai bên, mỗi lực = P/2)

2.2 Quy trình gia cường mẫu

Trước tiên các mẫu dầm được đánh sạch bằng máy mài cầm tay và giấy ráp để loại bỏ lớp vữa xi măng bên ngoài mẫu, tăng độ dính bám giữa tấm GFRP và bê tông (BT). Các góc dầm được mài tròn với bán kính cong 10mm để đảm bảo kết dính tốt và tránh tập trung ứng suất trong quá trình chịu lực. Sau đó, dùng chổi lăn sơn lăn epoxy lên bề mặt của mẫu cho kín toàn bề mặt, để cho epoxy thấm vào trong BT. Tiếp theo, dùng chổi lăn epoxy lên bề mặt tấm GFRP đã được cắt theo đúng kích thước cần thiết. Lăn cả hai mặt sao cho epoxy thấm đẫm vào trong sợi vải thủy tinh. Trong khi lăn cần chú ý lăn chổi theo

phương dọc với phương của sợi, không được lăn theo phương vuông góc với phương của sợi sẽ làm hư hỏng cấu trúc của vải. Cuối cùng, dán tấm GFRP đã tẩm epoxy lên bề mặt mẫu. Khi dán lưu ý dùng tay vuốt nhẹ lên bề mặt tấm để tấm được phẳng, không có bọt khí bên trong, đảm bảo tiếp xúc tốt giữa bề mặt BT và tấm GFRP.

Có thể nhận thấy quy trình gia cường là tương đối đơn giản và nhanh chóng. Quá trình gia cường ba dầm thí nghiệm kéo dài trong khoảng 3 tiếng. Thí nghiệm gia tải các dầm được tiến hành sau thời gian gia cường mẫu ít nhất là 72 tiếng để đảm bảo epoxy khô cứng, đạt cường độ và lực dính tối đa.



a. Mài bề mặt và các góc dầm



b. Lăn epoxy lên bề mặt BT



c. Tẩm epoxy vào hai mặt tấm

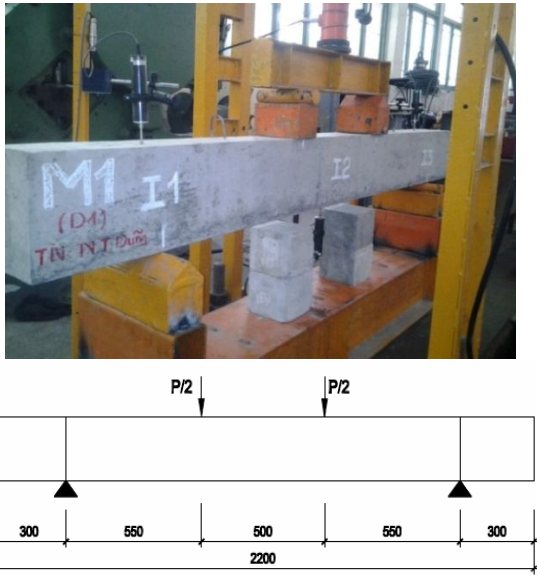


d. Dán tấm lên bề mặt dầm

Hình 4. Quy trình gia cường mẫu

3. Thí nghiệm mẫu

Sơ đồ thí nghiệm là dầm đơn giản kê lên gối cố định và gối di động. Thiết bị gia tải là kích thủy lực loại 20 tấn, kết hợp với hệ khung phản lực và dầm phân tải tạo nên hai tải trọng tập trung với khoảng cách 500 mm. Tải trọng thí nghiệm được đo bằng đầu đo tải trọng (load cell) ký hiệu là P. Các giá trị chuyển vị (độ võng) của dầm được đo tại vị trí giữa nhịp và hai gối tựa bằng các đầu đo chuyển vị ký hiệu I1, I2, I3 (hình 5).



Hình 5. Sơ đồ thí nghiệm mẫu

Sau khi lắp đặt và cân chỉnh các thiết bị đo, các mẫu dầm được thí nghiệm theo quy trình sau đây. Dựa vào lực phá hoại dự đoán của dầm chọn ra thang lực thí nghiệm phù hợp. Tiến hành gia tải theo

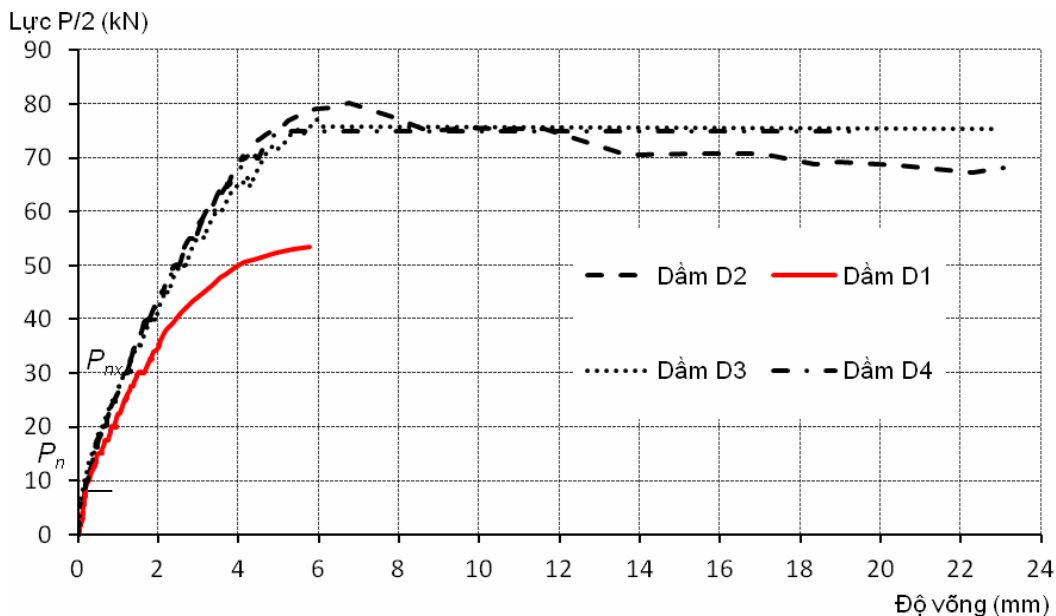
từng cấp của thang lực. Cần quan sát kỹ BT vùng kéo để phát hiện vết nứt thẳng góc và vết nứt xiên. Tại mỗi cấp gia tải, dừng tải để quan sát, chụp ảnh, theo dõi số đọc trên các thiết bị đo và tiến hành vẽ sự phát triển của vết nứt trên dầm. Tăng tải trọng theo từng cấp cho đến khi dầm phá hoại – quan sát kỹ để xác định nguyên nhân và hình thức phá hoại của dầm.

4. Kết quả thí nghiệm và nhận xét

4.1. Biểu đồ quan hệ tải trọng – độ võng

Hình 6 thể hiện đường cong quan hệ tải trọng – độ võng của các dầm trong quá trình thí nghiệm. Giá trị của tải trọng thể hiện khả năng chịu cắt của dầm. Các dầm được gia cường (D2, D3, D4) có khả năng chịu cắt tăng đáng kể so với dầm D1. Khả năng chịu cắt của các dầm được tóm tắt trong bảng 4. Ta thấy mặc dầu hai dầm D3 và D4 có hàm lượng tấm GFRP lớn hơn so với dầm D2 nhưng khả năng chịu cắt của hai dầm này lại nhỏ hơn so với dầm D2 vì chúng bị phá hoại sớm do các chi tiết cấu tạo trong quá trình gia tải. Nguyên nhân phá hoại sẽ được thảo luận kỹ hơn ở phần sau.

So sánh khả năng chịu cắt của các dầm theo thực nghiệm (bảng 4) và theo lý thuyết (bảng 3) ta thấy kết quả thực nghiệm khá gần so với tính toán lý thuyết – dầm D2 có khả năng chịu cắt thực tế lớn hơn lý thuyết, trong khi dầm D3 và D4 do bị phá hoại sớm nên có khả năng chịu cắt thực tế nhỏ hơn so với lý thuyết.



Hình 6. Quan hệ tải trọng – độ võng của các dầm

Bảng 4. Khả năng chịu cắt của các dầm theo kết quả thực nghiệm

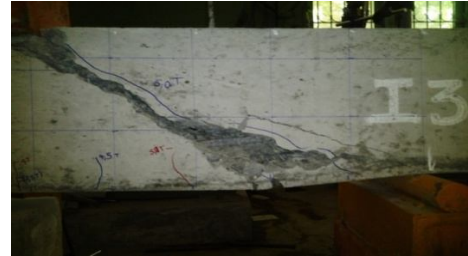
Tên dầm	Đặc điểm gia cường tấm GFRP	Hàm lượng tấm GFRP ρ_f (%)	Khả năng chịu cắt của dầm ($V_u = P/2$) (kN)	Khả năng chịu cắt của tấm GFRP ($V_f = V_u - V_1$) (kN)
D1	Không gia cường	-	53,53	-
D2	Băng thẳng 30mm	0,254	80,29	26,76
D3	Băng xiên 30mm	0,293	77,08	23,55
D4	Băng thẳng 50mm	0,423	77,33	23,80

Các dầm D1 đến D4 xuất hiện vết nứt thẳng góc ở tải trọng xấp xỉ nhau, khoảng 15kN. Sau đó, có thể thấy rằng với cùng một giá trị tải trọng thì dầm D1 có độ võng lớn hơn so với ba dầm kia. Điều này càng trở nên rõ rệt hơn sau khi các dầm xuất hiện vết nứt xiên ở tải trọng khoảng 30-35kN. Như vậy, việc gia cường tấm GFRP còn làm tăng độ cứng (chính là độ dốc của biểu đồ tải trọng – độ võng) so với dầm không được gia cường. Nguyên nhân là do các tấm GFRP được dán trên mặt bên của dầm cản trở sự phát triển của vết nứt nghiêng làm cho độ cứng của dầm được gia cường không bị suy giảm nhiều sau khi vết nứt nghiêng xuất hiện.

Ngoài ra, cũng trên biểu đồ tải trọng – độ võng có thể thấy rằng các dầm được gia cường tấm GFRP có khả năng chịu biến dạng tốt hơn nhiều so với dầm D1. Dầm này bị phá hoại đột ngột ở độ võng khoảng 5,8mm trong khi ba dầm kia sau khi đạt tải trọng cực đại thì không bị phá hoại đột ngột mà tiếp tục có khả năng chịu tải gần bằng giá trị cực đại cho tới độ võng lên đến khoảng hơn 20mm. Điều đó cho thấy các dầm được gia cường tấm GFRP có độ dẻo cao hơn hẳn so với dầm D1, tức là có thể làm việc an toàn hơn, khó bị sụp đổ hơn dưới tác dụng của tải trọng động đất.

4.2. Sự phát triển của vết nứt và hình thức phá hoại

Sự phát triển của vết nứt ở dầm D1 và các dầm được gia cường là tương đối khác nhau. Ở dầm D1, đầu tiên, khi tải trọng ($P/2$) đạt 15kN thì dầm xuất hiện vết nứt thẳng góc. Sau đó, khi tiếp tục tăng tải trọng tới 30kN, thì dầm bắt đầu xuất hiện vết nứt nghiêng – độ cứng của dầm giảm mạnh (hình 6). Vết nứt nghiêng này liên tục phát triển khi tải trọng tăng dần và dẫn tới dầm bị phá hoại cắt (tension shear failure) theo tiết diện nghiêng này. Góc của vết nứt nghiêng so với trục dầm là khoảng 40° (hình 7).



Hình 7. Sự phá hoại dầm D1

Đối với các dầm gia cường tấm GFRP, vết nứt nghiêng xuất hiện muộn hơn ($P/2 \approx 35$ kN). Tuy nhiên, sau đó độ cứng của dầm không bị suy giảm, thể hiện qua độ dốc của biểu đồ tải trọng – độ võng gần như không thay đổi (hình 6). Vết nứt nghiêng phát triển gặp phải sự cản trở của các băng GFRP nên không mở rộng được nhanh và do đó một số vết nứt nghiêng lân cận hình thành. Các vết nứt nghiêng này giúp truyền đều tải trọng ra cho các băng GFRP cùng tham gia chịu lực (hình 8).



Hình 8. Sự phát triển của các vết nứt nghiêng ở dầm D3 (các vết nứt được tô đen)

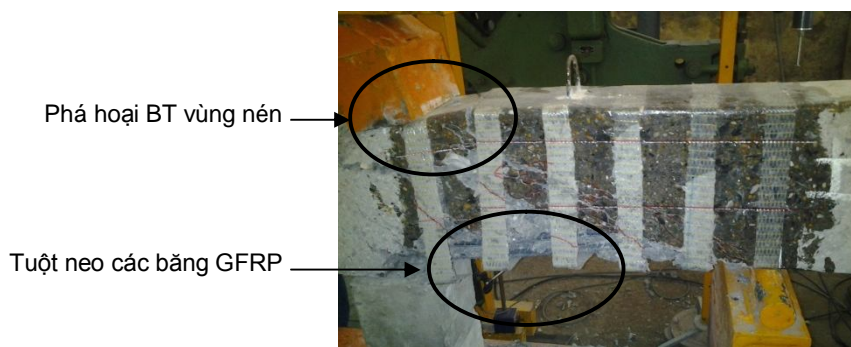
Khi tải trọng tiếp tục tăng thì ứng suất trong các băng GFRP tại vị trí vết nứt nghiêng tăng rất nhanh. Do sợi thủy tinh có mô-đun đàn hồi thấp nên biến dạng của các băng khá lớn, lại làm cho vết nứt nghiêng phát triển rộng hơn. Ứng suất trong băng GFRP truyền từ vị trí vết nứt đến vị trí neo thông qua ứng suất dính giữa băng GFRP và bề mặt BT có được nhờ keo epoxy. Do đó, khi ứng suất trong băng tăng nhanh thì dẫn đến hiện tượng bong (mất dính kết) giữa các băng và bề mặt BT. Hiện tượng bong đầu tiên xảy ra xung quanh vết nứt nghiêng. Chính nhờ hiện tượng bong này mà các băng GFRP không bị tập trung ứng suất quá lớn tại vị trí vết nứt mà ứng suất được phân đều trên chiều dài đoạn bong, làm

cho băng không bị đứt tại vị trí vết nứt nghiêng. Khi tiếp tục tăng tải, chiều dài đoạn bong tăng dần và lan rộng ra vị trí đầu neo của băng ở mặt trên và mặt dưới của dầm. Vì bề rộng vết nứt nghiêng lớn hơn ở phía dưới chiều cao dầm nên các băng GFRP thường bị bong ở đầu neo phía đáy dầm. Khi các dải neo bị bong thì băng GFRP mất hoàn toàn tác dụng và dẫn đến dầm bị phá hoại.

Ta thấy, do tấm sợi thủy tinh có cường độ cao hơn của epoxy khá nhiều nên sự phá hoại của các dầm được gia cường bằng GFRP phụ thuộc vào hiện tượng bong tấm GFRP trên bề mặt BT. Do đó, khi hàm lượng

tấm (băng) GFRP tương đối lớn thì khả năng chịu cắt của các dầm không phụ thuộc nhiều vào hàm lượng tấm mà phụ thuộc chính vào thời điểm băng bị bong và tuột đầu neo. Vì vậy, trên thực tế khả năng chịu cắt của dầm D3 và D4 không lớn hơn của dầm D2 mặc dù gia cường nhiều tấm GFRP hơn.

Quan sát thí nghiệm cho thấy dầm D2 bị phá hoại do BT vùng nén ở đầu vết nứt nghiêng bị ép vỡ (compression shear failure), sau đó dầm vẫn tiếp tục duy trì khả năng chịu tải khoảng 90% giá trị cực đại rồi bị phá hoại hoàn toàn khi đầu neo của tấm GFRP bị bong khỏi bề mặt BT ở đáy dầm (hình 9).



Hình 9. Sự phá hoại dầm D2

Ở dầm D3, khi bị phá hoại, đoạn băng GFRP theo phương xiên ở góc dầm bị đứt sớm. Tại vị trí góc này, do bán kính cong không đủ lớn dẫn đến tấm GFRP bị tập trung ứng suất; thêm vào đó, đoạn góc lại nằm theo phương xiên (không phải phương vuông góc) với phương của sợi nên tấm GFRP có cường độ chịu kéo thấp hơn và bị đứt

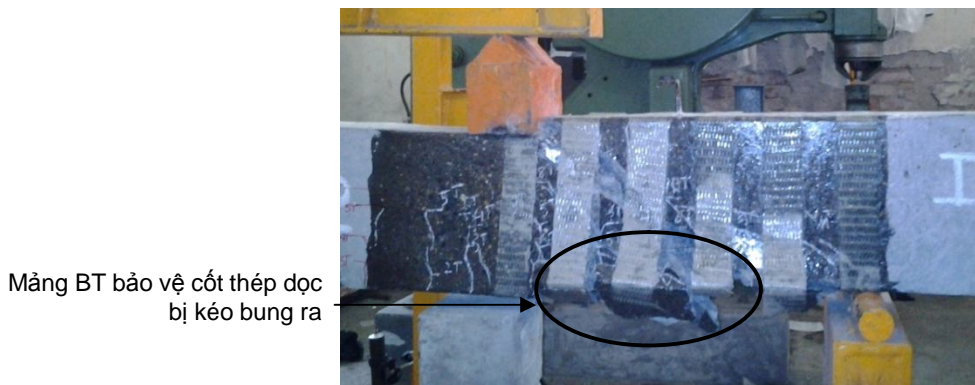
dọc theo góc sớm hơn. Vì vậy, khả năng chịu tải của dầm D3 nhỏ hơn của dầm D2 (bảng 4). Qua đó, ta có thể thấy rằng việc đảm bảo các chi tiết cấu tạo khi gia cường như mài tròn các góc dầm có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả gia cường kháng cắt, nhất là với trường hợp gia cường các băng theo phương xiên.



Hình 10. Sự phá hoại dầm D3

Dầm D4 được gia cường với băng GFRP bề rộng 50 mm. Do băng rộng nên bề mặt tiếp xúc với BT lớn và đầu neo của băng không bị bong ra. Tuy nhiên, khi vết nứt mở rộng, lực dính giữa băng GFRP và BT lớn đã tạo thành một lực kéo tung lớp BT bảo vệ cốt thép dọc, làm mất hiệu quả gia cường của băng và dẫn

đến phá hoại dầm (hình 11). Như vậy, chất lượng của lớp BT bảo vệ cốt thép dọc và lực dính giữa BT và cốt thép dọc cũng ảnh hưởng tới hiệu quả gia cường. Trong trường hợp này, cũng có thể thấy rằng việc gia cường với một hàm lượng tấm GFRP quá lớn là không hiệu quả và gây lãng phí vật liệu FRP.



Hình 11. Sự phá hoại dầm D4

Ở trạng thái phá hoại, các dầm được gia cường tấm GFRP đều có bề rộng vết nứt nghiêng rất lớn do mô-đun đàn hồi của tấm GFRP khá nhỏ. Do đó, trong công tác thiết kế gia cường chịu cắt cho dầm BTCT bằng tấm GFRP cần hạn chế ứng suất (biến dạng) trong tấm để tránh bề rộng vết nứt nghiêng quá lớn, không đảm bảo điều kiện sử dụng về bề rộng khe nứt và làm mất hiệu ứng chèn cốt liệu ở BT. Ngoài ra, sợi thủy tinh rất dễ bị phá hoại đột ngột do tác dụng của tải trọng dài hạn (creep rupture) nên khi gia cường cần hạn chế ứng suất dài hạn trong tấm sợi thủy tinh nằm trong giới hạn cho phép.

5. Kết luận và kiến nghị

Nghiên cứu thực nghiệm gia cường dầm BTCT bằng tấm GFRP cho thấy đây là một phương pháp gia cường đơn giản, có thể thực hiện nhanh chóng với chi phí tương đối thấp và không làm tăng kích thước cấu kiện. Kết quả thí nghiệm cho thấy phương pháp gia cường này làm tăng đáng kể khả năng chịu cắt của dầm BTCT, đồng thời làm tăng độ cứng và độ dẻo của dầm.

Khả năng chịu cắt của dầm được gia cường không những phụ thuộc vào hàm lượng và hình thức bố trí tấm GFRP, mà còn phụ thuộc rất nhiều vào sự dính kết giữa tấm GFRP và bề mặt BT, hay nói cách khác là phụ thuộc vào hiện tượng bong tấm GFRP trong quá trình chịu tải. Ngoài ra, hiệu quả gia cường và hình thức phá hoại của dầm bị ảnh hưởng lớn bởi các chi tiết cấu tạo trong quá trình gia cường như đoạn neo tấm GFRP, bán kính mài cong của góc gia cường hay cường độ và độ dính bám của lớp BT bảo vệ cốt thép dọc. Do đó, trong quá trình gia cường cần

tuân thủ nghiêm ngặt các điều kiện cấu tạo để tránh xảy ra trường hợp phá hoại sớm.

Do tấm GFRP có mô-đun đàn hồi kéo thấp nên bề rộng của vết nứt nghiêng tương đối lớn, ảnh hưởng đến yêu cầu sử dụng và khả năng chịu cắt của BT. Vì vậy, trong quá trình thiết kế gia cường chịu cắt cho dầm BTCT cần hạn chế ứng suất trong tấm GFRP nằm trong giới hạn cho phép để tránh bề rộng vết nứt nghiêng lớn và tránh hiện tượng phá hoại đột ngột do từ biến (creep rupture) của tấm GFRP.

Hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu là gia cường tấm GFRP cho các cấu kiện BT cường độ cao và đi sâu vào tìm hiểu về ảnh hưởng của keo epoxy và sự dính kết giữa BT và tấm GFRP đến hiệu quả gia cường cho kết cấu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. NGUYỄN TIẾN DŨNG, Gia cường chịu cắt dầm bê tông cốt thép bằng tấm sợi cường độ cao FRP, *Luận văn thạc sỹ, Đại học Xây dựng (2014)*.
2. NGUYỄN HÙNG PHONG, Nghiên cứu thực nghiệm về gia cường cột bê tông bằng tấm sợi liên tục cường độ cao, *Tạp chí Xây dựng, 6-2014, trang 89-93 (2014)*.
3. ACI 440.1R-06, Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars, *American Concrete Institute (2006)*.
4. ACI 440.2R-08, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, *American Concrete Institute (2008)*.

Ngày nhận bài sửa: 5/9/2014.