

Đánh giá hiệu quả gia cường bằng tấm CFRP trên dầm bê tông dự ứng lực dùng cáp không bám dính bị nứt trước

Evaluation of the efficacy of CFRP strengthening composites on unbonded prestressed concrete beams with pre-cracks

> TS PHAN VŨ PHƯƠNG^{1*}, NGUYỄN MINH TRIẾT², NGUYỄN VĂN QUÝ²

^{1*}GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mở TP.HCM; E-mail: phuong.pv@ou.edu.vn,

²SV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mở TP.HCM

TÓM TẮT

Các nghiên cứu về sửa chữa gia cường dầm bê tông dự ứng lực dùng cáp không bám dính (UPC) bị hư hỏng (nứt) trước bằng tấm sợi polyme (FRP) dán ngoài vẫn còn rất hạn chế. Do đó, nghiên cứu này khảo sát thực nghiệm hiệu quả gia cường của tấm FRP sợi cacbon (CFRP) trên dầm UPC có vết nứt trước. Chương trình thử nghiệm bao gồm bốn dầm UPC kích thước lớn với tiết diện chữ T được gia cường bằng tấm CFRP dán dọc và hệ neo dạng chữ U (U-wraps). Kết quả thử nghiệm cho thấy chỉ sau khi các vết nứt mở lại, hệ thống gia cường bằng tấm CFRP mới làm việc. Do đó, trong cả giai đoạn sử dụng và giai đoạn bền, các dầm được gia cường thể hiện khả năng làm việc tốt hơn so với đặc hiệu quả. Tấm CFRP giúp kháng ứng suất kéo, kiểm soát các vết nứt và do đó làm giảm sự suy giảm độ cứng của dầm bị hư hỏng trước không được gia cường về độ võng, chiều rộng vết nứt và khả năng chịu tải của dầm. Ngoài ra, hiện tượng bong tách của tấm CFRP dán dọc đã được ngăn chặn một cách hiệu quả bằng cách sử dụng các neo U-wraps và do đó giúp gia tăng sự đóng góp của các tấm CFRP dán dọc vào khả năng chịu lực của dầm.

Từ khóa: Vết nứt trước; gia cường; tấm CFRP; cáp không bám dính.

ABSTRACT

Research efforts on the pre-cracked unbonded prestressed concrete (UPC) beams strengthened with externally bonded fibre-reinforced polymer (FRP) systems are still very limited. Thus, this study intends to experimentally investigate the efficacy of FRP strengthening composites on UPC beams with pre-cracks. The experimental program comprised four large-scale UPC beams with a T-section strengthened with longitudinal carbon FRP (CFRP) sheets and CFRP U-wrap anchors. The experimental results showed that only after cracks reopened the CFRP strengthening system became effective. The CFRP composites carried tensile stress, controlled cracks and thus reduced the stiffness degradation of the pre-cracked beams. As a result, in both the serviceability stage and ultimate stage, the CFRP-strengthened beams had better performances as compared to the unstrengthened counterpart concerning the deflection, crack width and load-carrying capacity of the beam. In addition, the premature debonding of the longitudinal CFRP sheets was effectively averted by the use of U-wrap anchors, which increased the contribution of the longitudinal CFRP sheets.

Keywords: Pre-cracks; strengthening; CFRP composites; unbonded prestressing tendons.

1. GIỚI THIỆU

Sau một giai đoạn dài sử dụng, hư hỏng xuất hiện dưới dạng vết nứt là điều không thể tránh khỏi trong kết cấu bê tông và gây mất tính toàn vẹn, suy giảm độ cứng và khả năng chịu lực của kết cấu [1, 2]. Với nhiều đặc điểm nổi trội như trọng lượng nhẹ, không bị ăn mòn, cường độ chịu kéo cao, lắp đặt nhanh chóng và dễ dàng [3], việc gia cố thêm bằng tấm sợi polyme (FRP) dán ngoài được đánh giá là một trong những phương pháp hiệu quả nhất để sửa chữa hoặc gia cường kết cấu [4, 5]. Do đó, nhiều nghiên cứu đã được tiến hành nhằm đánh giá hiệu quả gia cường của tấm FRP trên dầm bê tông dự ứng lực (PC) bị hư hỏng/nứt

trước [6-9]. Như đã được đề cập trong các nghiên cứu này, việc sử dụng tấm sợi cacbon (CFRP) là một phương pháp hiệu quả và kinh tế để phục hồi và gia tăng khả năng chịu lực uốn và cắt của dầm PC bị hư hỏng, độ bền của dầm PC bị hư hỏng, và neo bọc chữ U có thể trì hoãn một cách hiệu quả hiện tượng bong tách sớm của tấm FRP và từ đó giúp tăng mức độ đóng góp của tấm.

Tuy nhiên, hiệu quả gia cường bằng tấm FRP trên dầm PC nứt sẵn mới chỉ được khảo sát trên dầm sử dụng cáp bám dính (bonded tendons). Các nghiên cứu tương tự trên dầm PC với cáp không bám dính (unbonded tendons) có vết nứt trước với là rất hiếm; do đó, sự hiểu biết về ứng xử của loại kết cấu này được gia

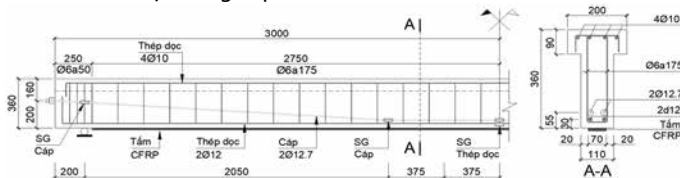
cường bằng tấm FRP vẫn còn rất hạn chế. Việc sử dụng cáp không bám dính được ưa chuộng hơn trong nhiều trường hợp so với cáp bám dính vì lắp đặt nhanh hơn và chi phí xây dựng, bảo dưỡng và thay thế thấp hơn, tuy nhiên nghiên cứu về loại cáp này vẫn còn hạn chế và do đó đã thu hút được sự quan tâm lớn từ giới học thuật trong thời gian gần đây [10, 11]. Ứng xử của dầm PC với cáp không bám dính (UPC) khác với ứng xử của dầm PC với cáp bám dính (BPC) tại vì cáp không có liên kết với bê tông trong kết cấu UPC. Kết quả là, không có sự tương thích về biến dạng giữa cáp và vùng bê tông lân cận và lực căng trước chỉ được truyền vào kết cấu UPC thông qua các neo của cáp [12-14]. Do đó, việc phân tích kết cấu UPC trở nên phức tạp hơn so với kết cấu BPC [10, 14, 15].

Nghiên cứu này khảo sát hiệu quả gia cường uốn của tấm CFRP trên dầm bê tông dự ứng lực dùng cáp không bám dính (UPC) nứt sẵn. Chương trình thí nghiệm được thực hiện trên bốn dầm UPC có tiết diện chữ T kích thước lớn. Khả năng làm việc của dầm UPC nứt trước được gia cường bằng tấm CFRP được khảo sát chi tiết trong nghiên cứu này. Thông số khảo sát bao gồm số lớp tấm gia cường CFRP và ảnh hưởng của việc sử dụng hệ neo dạng U (U-wraps) cho tấm CFRP.

2. QUY TRÌNH THÍ NGHIỆM

2.1. Mẫu thí nghiệm và vật liệu

Quy trình thí nghiệm được thực hiện trên bốn dầm bê tông kích thước lớn với tiết diện chữ T, đó là các dầm RC0, RC4, RC6 và RC4-AN. Tất cả các dầm đều tiên được gia tải tạo nứt nhằm mô phỏng hư hỏng, sau đó sẽ được gia cường bằng bốn (Dầm RC4 và RC4-AN) hoặc sáu (Dầm RC6) lớp tấm CFRP dán dọc ngoài trừ dầm RC0 – dầm đối chứng không được gia cường. Dầm RC4-AN còn được bố trí thêm hệ neo dạng U ở hai đầu dầm nhằm hạn chế sự bong tách sớm của tấm CFRP dán dọc. Chi tiết mẫu dầm thí nghiệm được thể hiện ở (Hình 1) và chi tiết của hệ neo dạng U được thể hiện ở (Hình 2). Bê tông thương phẩm với thiết kế cấp phối để cập trong [16, 17] được sử dụng. Độ sụt của bê tông là 120 ± 20 mm, thường được sử dụng để chế tạo dầm bê tông cốt thép [1, 18]. Cường độ chịu nén và cường độ kéo chế của bê tông lần lượt là 48,4 MPa (COV = 0,02) và 5,9 MPa (COV = 0,05), được xác định từ sáu mẫu lập phương $150 \times 150 \times 150$ mm³ theo [19, 20]. Độ dày danh định của tấm gia cường CFRP là 0,17 mm. Tấm CFRP có độ bền kéo là 3579 MPa (COV = 0,16), mô đun đàn hồi dọc trục là 201 GPa (COV = 0,08) và độ biến dạng kéo đứt là 17,8‰ (COV = 0,1). Các đặc tính này được xác định theo tiêu chuẩn ASTM D3039/D3039M [21]. Chất kết dính epoxy để liên kết các tấm CFRP có độ bền kéo là 60 MPa và mô đun đàn hồi là 3–3,5 GPa (được cung cấp bởi nhà sản xuất).



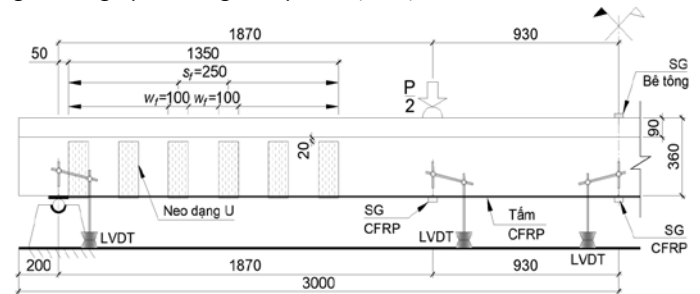
Hình 1. Cấu tạo dầm thí nghiệm

Cấu tạo của mẫu dầm thí nghiệm được minh họa trong Hình 1. Thiết kế của mẫu dầm thí nghiệm này cũng đã được sử dụng trong các nghiên cứu thực nghiệm trước đây [16, 17]. Tỷ số nhịp trên chiều cao hữu hiệu của dầm là 26, tỷ số này nằm trong phạm vi thường được sử dụng cho dầm PC [11] và nó cho phép ứng xử uốn chiếm ưu thế [22, 23]. Cáp không bám dính được sử dụng làm thép dự ứng lực cho dầm. Cáp được sử dụng là loại bó bầy sợi có đường kính danh định là 12,7 mm, mô đun đàn hồi là 196

GPa, độ bền kéo là 1860 MPa và cường độ chảy danh định là 1672 MPa. Những đặc tính này đã được đảm bảo bởi nhà sản xuất. Ứng suất căng trước hiệu quả là 960 MPa, được xác định từ phép đo biến dạng trong quá trình căng cáp. Như được sử dụng trong nhiều nghiên cứu [3, 17, 18], loại U (không nứt) theo ACI 318-19 [24] được sử dụng để thiết kế mẫu dầm. Cốt thép thường được sử dụng trong nghiên cứu này có mô đun đàn hồi là 200 GPa. Cốt thép dọc có cường độ chảy 430 MPa (COV = 0,02) và cường độ kéo 600 MPa (COV = 0,03). Giá trị tương ứng cho thép đai là 342 MPa (COV = 0,03) và 463 MPa (COV = 0,01).

2.2. Bố trí thí nghiệm

Sơ đồ thí nghiệm được minh họa trong (Hình 2). Tất cả các mẫu dầm đều chịu hai quá trình gia tải: gia tải gây nứt trước và gia tải phá hoại. Trong quá trình tải gây nứt trước cho dầm, dầm được gia tải với sáu chu kỳ với mức tải cận trên và dưới lần lượt là 90 kN và 8 kN. Số lượng chu kỳ gia tải dựa trên nghiên cứu của [25]. Mức tải cận trên được chọn để gây ra chiều rộng vết nứt trong dầm là 0,3 mm (giới hạn của trạng thái sử dụng theo Eurocode 2 [22]) dựa trên kết quả chiều rộng vết nứt của dầm có cấu tạo tương tự ở một nghiên cứu trước đó của nhóm tác giả [16]. Mức tải cận trên này bằng 62% khả năng chịu tải thực của dầm [16]. Mức tải cận dưới mô phỏng cho tình tải dựa trên [17]. Sau đó, các dầm được dỡ tải hoàn toàn và được tiến hành gia cường bằng tấm CFRP với thời gian bảo dưỡng là bảy ngày. Các vết nứt trên dầm gần như khép lại hoàn toàn và chuyển vị dư của dầm tương đối nhỏ (khoảng 2,6 mm) khi dầm được dỡ tải do tác dụng của lực căng trước. Sau quá trình gây vết nứt trước và gia cường, quá trình gia tải phá hoại được tiến hành.



Hình 2. Bố trí thí nghiệm

Năm cảm biến đo biến dạng (SG) được sử dụng để đo biến dạng của cáp với vị trí được thể hiện trong (Hình 1). Biến dạng của cốt thép chịu kéo ở giữa nhịp được ghi nhận bằng một SG (Hình 1). Ba SG được sử dụng cho các tấm CFRP dọc với vị trí được thể hiện trong (Hình 2). Biến dạng bê tông ở giữa nhịp được đo bằng một SG (Hình 2). Kích thủy lực được sử dụng để tác dụng tải trọng lên dầm và tải trọng được ghi lại bằng cảm biến tải trọng. Chuyển vị của dầm được ghi lại bằng các chuyển vị kế (LVDT) với vị trí được thể hiện ở (Hình 2). Tất cả dữ liệu thí nghiệm được thu thập tự động thông qua một thiết bị thu thập dữ liệu ngoại trừ chiều rộng vết nứt được đo thủ công bằng kính hiển vi chuyên dụng.

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

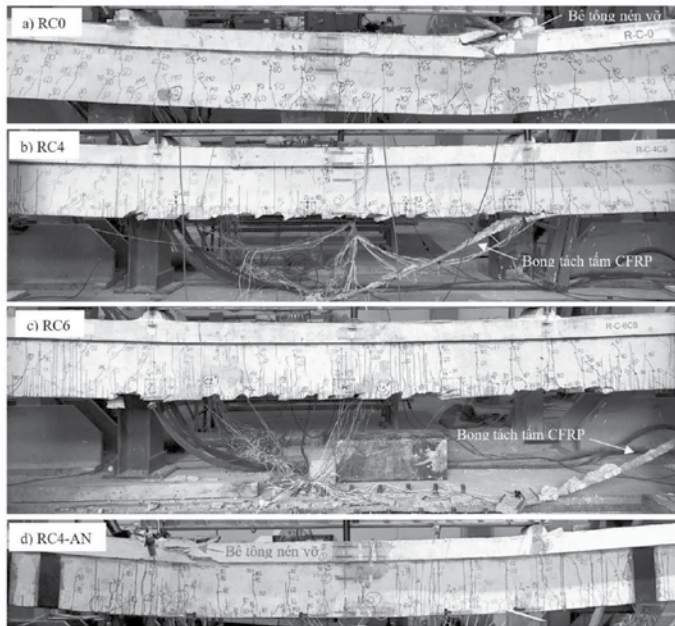
3.1. Hình thái vết nứt và kiểu phá hoại

Dạng phá hoại của tất cả các dầm được thể hiện trong (Hình 3) và kết quả thí nghiệm được tổng hợp trong (Bảng 1). Hình thái phá hoại của dầm đối chứng không được gia cường RC0 là kiểu phá hoại uốn với bê tông bị nén vỡ và cốt thép và cáp bị chảy dẻo (Hình 3(a)). Bề rộng vết nứt uốn lớn nhất trong dầm ($w_{cr,u}$) được xác định ở mức tải trọng bằng khoảng 95% tải trọng phá hủy của dầm (P_u), theo đó $w_{cr,u}$ của dầm RC0 là 1,5 mm (Bảng 1).

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm

Dầm	P_{ro} (kN)	P_{ser} (kN)	P_u (kN)	δ_u (mm)	$\varepsilon_{p,u}$ (‰)	$\varepsilon_{f,u}$ (‰)	$w_{cr,u}$ (mm)	Dạng phá hoại
RC0	25	51	126	109	8.5	-	1.5	CC+RY+TY
RC4	30	63	156	84	7.5	7.2	0.7	CD+RY
RC6	33	63	173	89	7.7	4.9	0.7	CD+RY
RC4-AN	30	64	180	131	8.8	11.2	1.2	CC+RY+TY+LD

Ghi chú: P_{ro} , P_{ser} và P_u lần lượt là tải mở lại vết nứt, tải giới hạn sử dụng và tải phá hoại của dầm; δ_u là chuyển vị lớn nhất của dầm; $\varepsilon_{p,u}$ là ứng suất lớn nhất của cáp; $\varepsilon_{f,u}$ là biến dạng lớn nhất của tấm CFRP; $w_{cr,u}$ là bề rộng vết nứt uốn lớn nhất; CC = bê tông bị nén vỡ; RY = cốt thép chảy; TY = cáp chảy; CD = tấm bong tách hoàn toàn; và LD = tấm bong tách cục bộ.



Hình 3. Hình thái phá hoại của dầm (a) RC0, (b) RC4, (c) RC6 và (d) RC4-AN

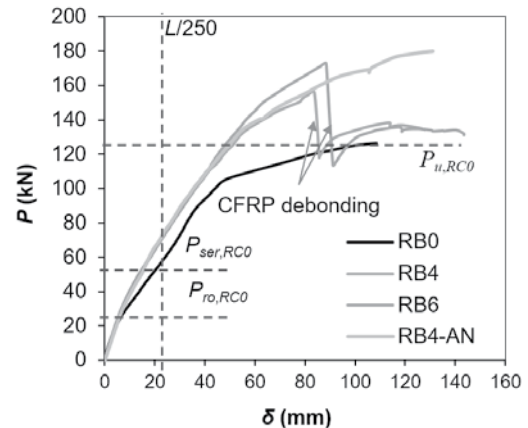
Dạng phá hoại của dầm gia cường không neo (dầm RC4 và RC6) cũng là dạng uốn, tuy nhiên khác so với dầm không gia cường. Dầm RC4 và RC6 bị phá hoại do cốt thép chịu kéo chảy dẻo và bong tách của tấm gia cường CFRP Hình 3(b) và (c). Bong tách của tấm CFRP bắt nguồn trong nhịp uốn của dầm (giữa hai điểm chịu tải) do các vết nứt có bề rộng lớn tại đây gây ra và sau đó lan sang hai gối tựa. Cả hai dầm RC4 và RC6 đều có chiều rộng vết nứt lớn nhất ($w_{cr,u}$) là 0,7 mm (Bảng 1). Sau khi tấm CFRP bị bong tách, dầm RC4 và RC6 vẫn còn khả năng chịu lực dư tương tự như dầm không được gia cường RC0 như được thể hiện trong mối quan hệ giữa tải trọng tác dụng và chuyển vị của dầm (Hình 4(a)).

Dầm gia cường có neo (dầm RC4-AN) cũng có dạng phá hoại uốn với cốt thép và cáp bị chảy dẻo và bê tông trong vùng nén bị nứt vỡ (Hình 3(d)). Không giống như tấm CFRP dán dọc bị bong tách hoàn toàn trong dầm gia cường không neo, tấm CFRP trong dầm có neo chỉ bị bong tách cục bộ trong nhịp chịu uốn vì sự bong tách này đã bị ngăn chặn bởi hệ neo dạng U được bố trí ở hai đầu dầm. Các neo dạng U vẫn còn nguyên vẹn sau khi dầm bị phá hoại. Do đó, hệ gia cường bằng tấm CFRP trong dầm RC4-

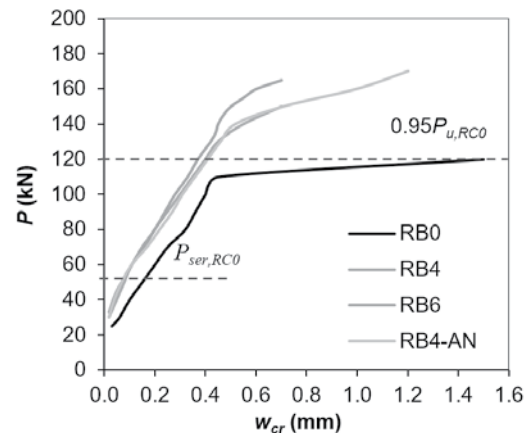
AN vẫn còn khả năng làm việc sau khi dầm bị phá hoại. Bề rộng vết nứt uốn lớn nhất trong dầm RC4-AN là 1,2 mm (Bảng 1). Nhìn chung, hệ neo dạng U ảnh hưởng đáng kể đến dạng phá hoại của dầm bằng cách ngăn chặn sự bong tách sớm của tấm CFRP và do đó cải thiện hiệu quả gia cường so với trường hợp không sử dụng hệ neo.

3.2. Quan hệ giữa lực với chuyển vị và bề rộng vết nứt

Mối quan hệ của tải trọng tác dụng với độ võng và chiều rộng vết nứt uốn của các mẫu dầm UPC bị nứt trước được thể hiện trong Hình 4 và 5. Chuyển vị của dầm có thể được chia thành ba giai đoạn khác nhau: giai đoạn tuyến tính, giai đoạn sử dụng và giai đoạn cực hạn. Giai đoạn tuyến tính bắt đầu từ tải trọng bằng 0 cho đến tải trọng mở lại vết nứt P_{ro} (mức tải trọng làm cho vết nứt mở lại). Giai đoạn sử dụng nằm trong khoảng từ P_{ro} đến tải trọng giới hạn sử dụng P_{ser} – tải trọng tương ứng với độ võng của dầm bằng với giới hạn khả năng sử dụng $L/250 = 22$ mm theo EN 1992-1-1 [26]. Giai đoạn cực hạn dao động từ P_{ser} đến P_u (tải trọng phá hoại của dầm). Trước khi mở lại các vết nứt, ứng xử của tất cả các mẫu dầm UPC gần như giống nhau, cho thấy hệ gia cường bằng tấm CFRP không có tác dụng đáng kể trong giai đoạn này. Tải trọng mở lại vết nứt P_{ro} của dầm gia cường trung bình lớn hơn 22% so với P_{ro} của dầm không gia cường (Bảng 1). Khi tải trọng tác dụng tăng lên, hệ gia cường bằng tấm CFRP làm việc hiệu quả hơn.



Hình 4. Quan hệ giữa lực và chuyển vị giữa nhịp

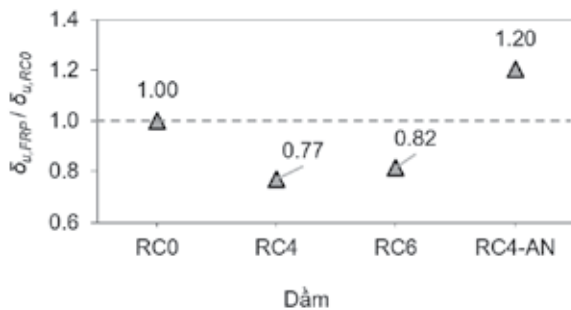


Hình 5. Quan hệ giữa lực và bề rộng vết nứt uốn

Trong giai đoạn sử dụng, dầm được gia cường bằng tấm CFRP làm việc tốt hơn hơn so với dầm RC0 không được gia cường về ứng xử võng và nứt như được thể hiện trong Hình 4 và 5. Vì

tấm CFRP tham gia vào việc kháng lại ứng suất kéo, nên sự phát triển của các vết nứt trong các dầm được gia cường, kiểm soát tốt hơn so với dầm RC0 không được gia cường. Điều này đã được chứng minh thông qua bề rộng vết nứt của dầm được gia cường nhỏ hơn khi xét ở cùng mức tải trọng như trong Hình 5. Kết quả là, độ cứng chống uốn của dầm được gia cường cao hơn so với dầm RC0 thể hiện qua độ võng nhỏ hơn dưới cùng một tải trọng tác dụng. Ở tải trọng giới hạn sử dụng của dầm RC0 ($P_{ser,RC0}$), độ võng của dầm RC0 là 22 mm trong khi độ võng của dầm được gia cường bằng tấm CFRP thấp hơn trung bình 20% (Hình 4). Số lớp gia cường và neo dạng U không có ảnh hưởng đáng kể trong giai đoạn này.

Trong giai đoạn cực hạn, hệ gia cường bằng tấm CFRP tăng đáng kể khả năng làm việc của dầm UPC bị nứt trước. Ứng xử nứt của dầm được cải thiện đáng kể với việc sử dụng tấm gia cường CFRP. Ví dụ, ở 95% tải trọng tối đa của dầm RC0 ($0,95 P_{u,RC0}$), bề rộng vết nứt uốn của dầm được gia cường với bốn lớp tấm CFRP (dầm RC4) đã giảm 72% và khi sử dụng sáu lớp tấm CFRP (dầm RC6), mức giảm là 76% (Hình 5). Với tác dụng kiểm soát vết nứt, tấm CFRP giúp giảm sự suy giảm độ cứng và do đó giúp giảm độ võng của dầm được gia cường (Hình 4). Ví dụ, tại $P_{u,RC0}$, độ võng của dầm RC4 và RC6 lần lượt nhỏ hơn so với dầm RC0 là 50% và 55%. Tuy nhiên, việc sử dụng tấm CFRP làm giảm khả năng biến dạng (độ võng tối đa) của dầm, điều này là do sự bong tách sớm của tấm CFRP. So với dầm RC0, độ võng tối đa của dầm RC4 và RC6 đã giảm lần lượt là 22% và 18% (Hình 6). Đáng chú ý là sau khi tấm CFRP bong tách, dầm RC4 và RC6 vẫn có độ bền dư tương tự như dầm không gia cường RC0 như được thể hiện trong Hình 4.



Hình 6. Chuyển vị lớn nhất của dầm gia cường so với dầm không gia cường

Ghi chú: $\delta_{u,FRP}$ và $\delta_{u,RC0}$ lần lượt là chuyển vị giữa nhịp lớn

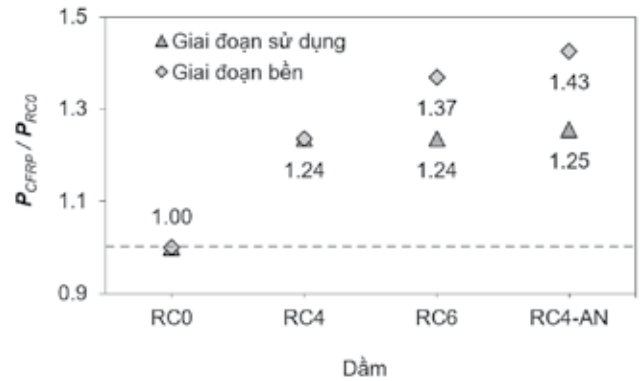
nhất của dầm gia cường và dầm RC0.

Việc sử dụng các cơ cấu neo bọc dạng U không cải thiện được độ cứng uốn của dầm do ứng xử chuyển vị của các dầm được gia cường có hoặc không có neo dạng U là tương tự nhau cho đến khi tấm CFRP bị bong tách (Hình 4). Neo dạng U đã giúp tăng cường liên kết giữa tấm CFRP và bê tông [18] và ngăn chặn sự bong tách sớm của tấm CFRP. Điều này cũng được thể hiện qua biến dạng lớn nhất của tấm CFRP ($\epsilon_{f,u}$) trong dầm có neo lớn hơn trung bình 16% so với dầm không neo (Bảng 1). Việc sử dụng hệ neo dạng U, do đó, cải thiện đáng kể khả năng biến dạng của dầm. Trung bình, neo dạng U tăng độ võng tối đa của dầm RC4-AN lên 56% so với dầm RC4 không có neo và 20% so với dầm RC0 không được gia cường (Hình 6).

3.3. Khả năng chịu lực

Sự cải thiện về khả năng chịu tải ở giai đoạn sử dụng và giai đoạn cực hạn nhờ hệ gia cường bằng tấm CFRP được trình bày trong Hình 7. Khả năng chịu tải của dầm trong giai đoạn sử dụng

bằng với tải trọng giới hạn sử dụng P_{ser} và khả năng chịu tải cực hạn bằng với tải trọng phá hoại P_u . Trong giai đoạn sử dụng, như đã đề cập trong phần trước, ứng xử các dầm được gia cường là tương tự nhau bất kể số lớp gia cường và việc sử dụng neo dạng U. Kết quả là khả năng chịu lực ở giai đoạn sử dụng của tất cả các dầm được gia cường bằng tấm CFRP cao hơn khoảng 24% so với dầm không được gia cường RC0 (Hình 7).



Hình 7. So sánh giữa khả năng chịu lực của dầm gia cường và dầm không gia cường

Ghi chú: P_{CFRP} và P_{RC0} lần lượt là khả năng chịu lực của dầm gia cường và dầm không gia cường RC0

Ở giai đoạn cực hạn, việc sử dụng bốn lớp tấm CFRP đã cải thiện 24% khả năng chịu lực cực hạn của dầm so với dầm RC0 (Hình 7). Tăng số lớp gia cường lên sáu giúp tăng mức cải thiện về khả năng chịu lực cực hạn của dầm lên 37% (Hình 7). Do neo dạng U ngăn chặn hiệu quả sự bong tách sớm của tấm CFRP, nên các dầm được gia cường có neo có khả năng chịu lực cực hạn lớn hơn 43% so với dầm RC0 (Hình 7).

4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày khảo sát thực nghiệm khả năng làm việc của dầm UPC chữ T bị nứt sẵn được gia cố bằng hệ gia cường sử dụng tấm CFRP chịu tải trọng uốn. Hiệu quả gia cường uốn của tấm CFRP, ảnh hưởng của neo dạng U và số lớp gia cường là các thông số được nghiên cứu. Dựa trên các kết quả thu được, một số kết luận được rút ra như sau:

- Dầm bị nứt trước không được gia cường có dạng phá hoại uốn với cốt thép chịu kéo và cáp chằng dẻo, và bê tông bị nén vỡ. Dạng phá hoại của dầm bị nứt trước được gia cường bằng tấm CFRP không neo là do tấm CFRP bị bong tách và cốt thép bị chảy. Neo bọc dạng U ảnh hưởng đáng kể đến dạng phá hoại của dầm vì hệ neo này ngăn chặn hiệu quả sự bong tách sớm của tấm CFRP. Do đó, dầm được gia cường có neo có dạng phá hoại tương tự như dầm không được gia cường.

- Hệ gia cường bằng tấm CFRP chỉ hiệu quả sau khi các vết nứt mở lại. Trong giai đoạn sử dụng, hệ gia cường kháng lại ứng suất kéo, làm chậm quá trình phát triển của vết nứt và giảm sự suy giảm độ cứng của dầm. So với dầm không được gia cường, chuyển vị của dầm được gia cường giảm tới 20% và khả năng chịu lực ở giai đoạn sử dụng tăng khoảng 24%. Neo dạng U và số lớp gia cường không có ảnh hưởng đáng kể trong giai đoạn sử dụng.

- Hệ gia cường bằng tấm CFRP có hiệu quả đáng kể trong giai đoạn cực hạn. So với dầm không được gia cường, bề rộng vết nứt uốn và độ võng của dầm giảm tới 72%/76% và 50%/55% khi sử dụng bốn/sáu lớp tấm CFRP. Khả năng chịu tải cực hạn của dầm tăng 24%/37% khi sử dụng bốn/sáu lớp tấm CFRP. Tuy nhiên, sự bong tách sớm của tấm CFRP làm giảm khả năng biến dạng của

dầm gia cường, thể hiện qua việc giảm 22%/18% độ võng tối đa của dầm được gia cường với bốn/sáu lớp tấm CFRP so với dầm không gia cường. Neo dạng U đã ngăn chặn hiệu quả hiện tượng bong tách sớm của tấm CFRP và do đó tăng khả năng chịu tải cực hạn và độ võng tối đa của dầm lần lượt là 43% và 20% so với dầm không được gia cường.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn Trường Đại học Mở TP.HCM đã tài trợ nghiên cứu này trong khuôn khổ Đề tài mã số: **E2022.01.1**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. ACI 319-19 (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, MI.
- [2]. ACI 440.4R-04 (2004). *Prestressing concrete structures with FRP tendons*. American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Michigan.
- [3]. ASTM D3039/D3039M-17 (2017). *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [4]. Cerullo D., Sennah K., Azimi H., Lam C., Fam A., and Tharmabala B. (2013). Experimental Study on Full-Scale Pretensioned Bridge Girder Damaged by Vehicle Impact and Repaired with Fiber-Reinforced Polymer Technology. *Journal of Composites for Construction*, 17(5):662-672. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000383](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000383).
- [5]. Do-Dai T., Chu-Van T., Tran D.T., Nassif A.Y., and Nguyen-Minh L. (2022). Efficacy of CFRP/BFRP laminates in flexurally strengthening of concrete beams with corroded reinforcement. *Journal of Building Engineering*, 53:104606. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104606>.
- [6]. Dang T.D., Tran D.T., Nguyen-Minh L., and Nassif A.Y. (2021). Shear resistant capacity of steel fibres reinforced concrete deep beams: An experimental investigation and a new prediction model. *Structures*, 33:2284-2300. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.05.091>.
- [7]. Do-Dai T., Tran D.T., and Nguyen-Minh L. (2021). Effect of fiber amount and stirrup ratio on shear resistance of steel fiber reinforced concrete deep beams. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 15(2):1-13. [https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15\(2\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15(2)-01).
- [8]. Di Ludovico M., Prota A., Manfredi G., and Cosenza E. (2010). FRP Strengthening of Full-Scale PC Girders. *Journal of Composites for Construction*, 14(5):510-520. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000112](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000112).
- [9]. El Meski F. and Harajli M. (2013). Flexural Behavior of Unbonded Posttensioned Concrete Members Strengthened Using External FRP Composites. *Journal of Composites for Construction*, 17(2):197-207. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000330](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000330).
- [10]. EN 1992-1-1 (2004). *Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- [11]. Huynh-Xuan T., Do-Dai T., and Nguyen-Minh L. (2023). Experimental Behavior of Corroded Reinforced Concrete Columns Strengthened by CFRP Sheets Under Eccentric-Compressive Loads. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 17(1V):24-41. [https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2023-17\(1V\)-03](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2023-17(1V)-03).
- [12]. Nguyen T.H., Pham X.D., and Tran K.D. (2021). Experimental study on the behavior of eccentrically compressed reinforced concrete columns strengthened with CFRP composite sheets. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 15(4):172-181. [https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(4\)-15](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(4)-15).
- [13]. Nguyen-Minh L., Vo-Le D., Tran-Thanh D., Pham T.M., Ho-Huu C., and Rovňák M. (2018). Shear capacity of unbonded post-tensioned concrete T-beams strengthened with CFRP and GFRP U-wraps. *Composite Structures*, 184:1011-1029. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.072>.
- [14]. Nguyen-Minh L., Phan-Vu P., Tran-Thanh D., Phuong Thi Truong Q., Pham T.M., Ngo-Huu C., et al. (2018). Flexural-strengthening efficiency of CFRP sheets for unbonded post-tensioned concrete T-beams. *Engineering Structures*, 166:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.065>.
- [15]. Phan-Vu P., Tran D.T., Ngo-Huu C., Dang T.D., and Nguyen-Minh L. (2018). Flexural behaviour of unbonded post-tensioned concrete T-beams strengthened with CFRP sheets under repeated loading. In *7th International Conference on Protection of Structures against Hazards (PSH2018)*. Hanoi, Vietnam, CI-Premier Pte Ltd, Singapore.
- [16]. Pino V., Nanni A., Arboleda D., Roberts-Wollmann C., and Cousins T. (2017). Repair of Damaged Prestressed Concrete Girders with FRP and FRCM Composites. *Journal of Composites for Construction*, 21(3):04016111. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000773](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000773).
- [17]. Phan-Vu P., Tran D.T., Pham T.M., Dang T.D., Ngo-Huu C., and Nguyen-Minh L. (2021). Distinguished bond behaviour of CFRP sheets in unbonded post-tensioned reinforced concrete beams versus single-lap shear tests. *Engineering Structures*, 234:111794. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111794>.
- [18]. TCVN 8862:2011. *Standard test method for splitting tensile strength of aggregate material bonded by adhesive binders*. Viet Nam Standards and Quality Institute (VSQI), Ha Noi, Vietnam.
- [19]. TCVN 10303:2014. *Concrete - Control and assessment of compressive strength*. Viet Nam Standards and Quality Institute (VSQI), Ha Noi, Vietnam.
- [20]. Reed Calvin E. and Peterman Robert J. (2004). Evaluation of Prestressed Concrete Girders Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets. *Journal of Bridge Engineering*, 9(2):185-192. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2004\)9:2\(185\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2004)9:2(185)).
- [21]. Tran D.T., Pham T.M., Hao H., and Chen W. (2021). Numerical study on bending response of precast segmental concrete beams externally prestressed with FRP tendons. *Engineering Structures*, 241:112423. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112423>.
- [22]. Tran D.T., Pham T.M., Hao H., Do T.V., and Tran T.T. (2023). Blast Behaviour of Precast Segmental vs Monolithic Concrete Beams Prestressed with Unbonded Tendons: A Numerical Investigation. *International Journal of Impact Engineering*, 173:104434. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104434>.
- [23]. Truong Q.P.T., Phan-Vu P., Tran-Thanh D., Dang T.D., and Nguyen-Minh L. (2018). Flexural Behavior of Unbonded Post-Tensioned Concrete T-Beams Externally Bonded With CFRP Sheets Under Static Loading. In *International Conference on Advances in Computational Mechanics 2017 (ACOME 2017). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Phu Quoc Island, Vietnam, Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7149-2_19.
- [24]. Tran D.T., Pham T.M., Hao H., and Chen W. (2021). Numerical Investigation of Flexural Behaviours of Precast Segmental Concrete Beams Internally Post-tensioned with Unbonded FRP Tendons under Monotonic Loading. *Engineering Structures*, 249:113341. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113341>.
- [25]. Tran D.T., Phan-Vu P., Pham T.M., Dang T.D., and Nguyen-Minh L. (2020). Repeated and Post-Repeated Flexural Behavior of Unbonded Post-Tensioned Concrete T-Beams Strengthened with CFRP Sheets. *Journal of Composites for Construction*, 24(2):04019064. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000996](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000996).
- [26]. Vo-Le D., Tran D.T., Pham T.M., Ho-Huu C., and Nguyen-Minh L. (2022). Re-evaluation of shear contribution of CFRP and GFRP sheets in concrete beams post-tensioned with unbonded tendons. *Engineering Structures*, 259:114173. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114173>.