

# NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM GIA CƯỜNG SỨC KHÁNG UỐN CHO DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP BẰNG TẤM CFRP ỨNG SUẤT TRƯỚC

Hồ Mạnh Hùng<sup>a,\*</sup>, Phạm Ngọc Phương<sup>a</sup>, Phan Hoàng Nam<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng,  
54 đường Nguyễn Lương Bằng, quận Liên Chiểu, Đà Nẵng, Việt Nam*

*Nhận ngày 27/9/2021, Sửa xong 17/11/2021, Chấp nhận đăng 18/11/2021*

---

## Tóm tắt

Phương pháp gia cường kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) sử dụng vật liệu composite cốt sợi carbon (CFRP) ứng suất trước đã được áp dụng rộng rãi trong nhiều năm qua. Phương pháp này cho phép vật liệu composite phát huy tối đa khả năng làm việc của nó trong việc nâng cao cường độ, giảm độ võng, hạn chế và giảm bề rộng vết nứt. Bên cạnh đó, việc tạo ứng suất trước trong vật liệu composite cũng có tác dụng cải thiện sự dính bám giữa vật liệu composite và bề mặt bê tông. Nghiên cứu này đề xuất mô hình thực nghiệm gia cường sức kháng uốn cho dầm BTCT sử dụng tấm CFRP ứng suất trước xét tới ảnh hưởng của lực kéo trước trong việc nâng cao sức kháng uốn cho dầm. Tổ hợp gồm bốn dầm được chế tạo, trong đó một dầm không được gia cường đóng vai trò là dầm đối chứng, một dầm có gia cường CFRP không tạo ứng suất trước và hai dầm gia cường CFRP có tạo ứng suất trước. Kết quả thực nghiệm cho thấy sức kháng uốn của dầm gia cường theo phương pháp này tăng hơn 2 lần so với dầm không gia cường và tăng gần 1,2 lần so với dầm gia cường không tạo ứng suất trước trong tấm CFRP.

*Từ khoá:* gia cường; sức kháng uốn; tấm CFRP ứng suất trước; vật liệu composite; dầm BTCT.

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE FLEXURAL STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS USING PRESTRESSED CFRP PLATES

## Abstract

Strengthening techniques using prestressed carbon fiber reinforced polymer (CFRP) in reinforced concrete (RC) members have widely been used for many years. This technique allows composite materials to utilize their capacity more efficiently, and thus improves strengths, decreases deformations and crack openings in strengthened members. On the other hand, the prestressing technique also improves the bond strength between composite materials and strengthening members. This study aims to investigate the flexural strength of RC beams strengthened with prestressed CFRP plates through flexural loading tests. A total of four beam specimens are fabricated, in which the first one is not strengthened (i.e., the reference beam), the second one is strengthened by non-prestressed CFRP plates, and the other ones are strengthened with prestressed CFRP plates. The results show that the flexural strength of the strengthened beam with prestressed CFRP increases by two times compared with the reference beam and 1,2 times compared with the one strengthened by non-prestressed CFRP plates.

*Keywords:* strengthening; flexural strength; prestressed CFRP plates; composite material; RC beam.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(7V\)-10](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(7V)-10) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

---

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [hnhung@dut.udn.vn](mailto:hnhung@dut.udn.vn) (Hùng, H. M.)

## 1. Giới thiệu

Phương pháp sử dụng vật liệu composite dạng sợi gốc polyme (fiber reinforced polymer, viết tắt là FRP) để gia cường và sửa chữa kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) đã được ứng dụng rộng rãi trên thế giới từ hơn hai thập kỷ qua [1–5]. Vật liệu composite gốc polyme với những đặc tính cơ lý như cường độ cao, trọng lượng nhẹ, không bị ăn mòn, không có từ tính, chịu môi trường tốt đã tỏ ra là một loại vật liệu rất tiềm năng trong việc gia cường kết cấu. Những kết quả nghiên cứu đã được công bố chỉ rõ rằng phương pháp này góp phần nâng cao khả năng chịu uốn, chịu cắt, khả năng chịu mỏi cũng như hiệu quả khai thác của kết cấu [6–9]. Vật liệu composite gốc polyme có thể bao gồm sợi carbon (CFRP), sợi thủy tinh (GFRP) hay sợi aramid (AFRP), trong số này thì vật liệu composite sợi carbon do có các đặc tính tốt hơn nên được sử dụng rất phổ biến làm vật liệu gia cường kết cấu [10]. Tuy nhiên một số nghiên cứu đã chỉ ra phương pháp sử dụng sợi composite này có một hạn chế là không phát huy hết khả năng làm việc của vật liệu composite [11–13]. Triantafillou [14] đã chỉ ra rằng khi sử dụng vật liệu composite để gia cường kết cấu, ứng suất trong cốt thép dọc đạt đến giới hạn chảy thì ứng suất trong vật liệu composite mới đạt 20% cường độ giới hạn của nó, điều này làm cho vật liệu composite không phát huy tối đa khả năng làm việc của nó trong việc nâng cao cường độ và giảm biến dạng và vết nứt. Từ đó, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng gia cường kết cấu sử dụng vật liệu composite sẽ phát huy hiệu quả hơn nhiều nếu nó được tạo ứng suất trước trong vật liệu composite [15–17].

Nội dung của phương pháp này là tạo ra một lực căng trước trong vật liệu composite trước khi nó được dán vào bề mặt bê tông của dầm gia cường bằng keo epoxy. Sau khi lớp keo đông cứng thì vật liệu composite cùng làm việc với dầm, lực căng trước sẽ truyền vào dầm bê tông và tạo ra một ứng suất nén trước tại thớ dưới của dầm từ đó giúp cho dầm gia cường nâng cao khả năng chịu lực, giảm độ võng và vết nứt. Ngoài ra, việc tạo ứng suất trước cho vật liệu composite còn có tác dụng trong việc cải thiện sự dính bám giữa vật liệu composite và bề mặt bê tông. Ngày nay phương pháp gia cường kết cấu sử dụng vật liệu composite ứng suất trước được áp dụng rất rộng rãi trong nhiều kết cấu như dầm cầu, sàn bê tông [18–20]. Có 3 cách thường được sử dụng để tạo ra lực căng trước trong vật liệu composite: (i) lực căng trước thu được bằng cách tạo độ võng ngược cho dầm, (ii) lực căng trước sẽ được truyền trực tiếp vào vật liệu composite nhờ các hệ khung truyền lực ngoài và (iii) lực căng trước được tạo bởi kích. Trong các phương pháp trên thì phương pháp thứ hai được sử dụng phổ biến nhất. Rất nhiều các hệ căng trước cho vật liệu composite phát triển bởi các nhà nghiên cứu đã được công bố như You et al. [11], Woo et al. [13], Xue et al. [17], Piyong Yu et al. [21]. Hiện nay, nhiều hãng sản xuất đã chế tạo và thương mại hóa các bộ thiết bị căng và neo cho tấm CFRP ứng suất trước và đã được sử dụng rất nhiều ở các nước trên thế giới như Sika Stresshead [22], Sika Leoba [22], S&P FRP systems [23]. Nhờ các bộ thiết bị này mà việc căng kéo tấm CFRP được tiến hành khá thuận lợi và nhanh chóng trong việc gia cường cho các hệ kết cấu nói chung như dầm, sàn hay cột.

Ở nước ta, thực tế trong những năm gần đây nhu cầu sử dụng các loại vật liệu composite gốc polyme trong gia cường kết cấu ngày một tăng lên tuy nhiên do một số khó khăn nhất định nên việc áp dụng chưa phổ biến. Bên cạnh đó các nghiên cứu về lý thuyết tính toán và đặc biệt là thực nghiệm về loại vật liệu này còn rất hạn chế [24–27].

Trong bài báo này, một chương trình thí nghiệm gia cường dầm BTCT sử dụng tấm CFRP ứng suất trước được đề xuất. Bên cạnh đó, một hệ thống khung căng bằng thép cũng được phát triển để căng kéo vật liệu composite và kiểm soát lực căng trong quá trình căng kéo. Ảnh hưởng của ứng lực trước đối với hiệu quả của phương pháp gia cường cũng được đánh giá thông qua thí nghiệm uốn. Kết quả nghiên cứu chỉ rõ được sự làm việc của dầm gia cường bằng vật liệu FRP nói chung và FRP ứng suất trước nói riêng, góp phần tăng tính ứng dụng loại vật liệu composite gốc polyme với nhiều hình thức khác nhau trong thực tiễn.

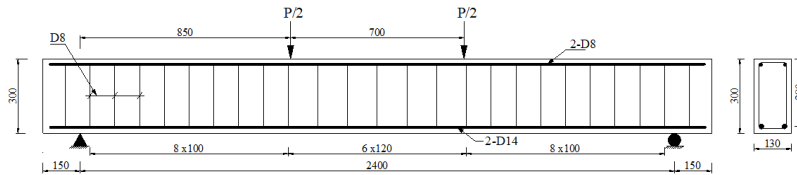
## 2. Mô hình thí nghiệm

### 2.1. Vật liệu thí nghiệm

Vật liệu bê tông có cường độ nén được xác định trên 5 mẫu lập phương tiêu chuẩn kích thước  $150 \times 150 \times 150$  mm sau 28 ngày kể từ ngày đúc mẫu và có cường độ chịu nén trung bình là 35 MPa. Cốt thép dọc sử dụng thép thanh đường kính 14 mm cho cốt thép chịu kéo và 8 mm cho cốt thép chịu nén. Giới hạn chảy và giới hạn bền của cốt thép lần lượt là 500 MPa và 720 MPa. Tấm CFRP sử dụng để gia cường cho dầm sử dụng Sika Cabondur S1012, có kích thước bề rộng là 100 mm và chiều dày 1,2 mm. Cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của tấm CFRP lần lượt là 3400 MPa và 165 GPa, biến dạng cực hạn của tấm CFRP là 1,8%. Để dán tấm CFRP vào bề mặt bê tông, keo sikadur-30 được sử dụng. Cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của keo sikadur-30 sau 7 ngày tương ứng là 3,5 MPa và 33,8 MPa.

### 2.2. Mô hình thí nghiệm

Tổng cộng có 4 dầm được chế tạo, chiều dài và kích thước mặt cắt ngang của dầm thí nghiệm được mô tả ở Hình 1. Trong đó một dầm không được gia cường, kí hiệu là BC, đóng vai trò là dầm kiểm chứng. Một dầm có gia cường bằng tấm CFRP không tạo ứng suất trước (BR0) và hai dầm còn lại được gia cường bằng tấm CFRP ứng suất trước với lực căng trước trong tấm CFRP là 60 kN và 80 kN, ký hiệu là BR60 và BR80, tương ứng với 60% và 80% khả năng chịu lực của dầm đối chứng (BC). Chi tiết các dầm được thể hiện trong Bảng 1.



Hình 1. Kích thước dầm thí nghiệm

Bảng 1. Chi tiết dầm thí nghiệm

Dầm	BC	BR0	BR60	BR80
Cốt thép dọc	2 Ø14	2 Ø14	2 Ø14	2 Ø14
$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	3,08	3,08	3,08	3,08
CFRP	-	1	1	1
$A_F$ (mm <sup>2</sup> )	-	100 × 1,2	100 × 1,2	100 × 1,2
Lực căng trước (kN)	-	0	60	80

### 2.3. Quá trình căng kéo tấm CFRP

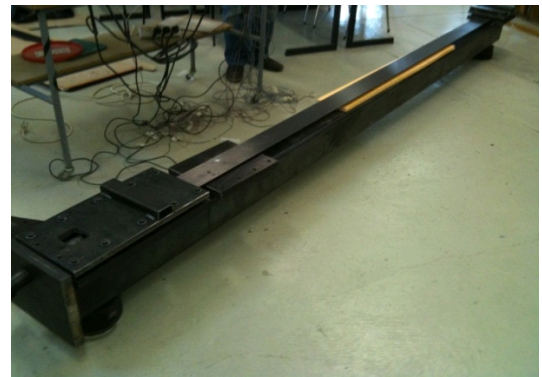
Trong nghiên cứu này, một hệ thống khung ngoại bằng thép dùng để căng kéo và kiểm soát lực căng của tấm CFRP được chế tạo. Hệ thống này bao gồm một ngàm cố định ở một đầu để cố định một đầu tấm CFRP. Ở phía đầu còn lại, tấm CFRP được liên kết cố định với đầu neo thứ hai, ở phía đầu

neo này, neo có thể trượt qua lại và lực ứng suất trước sẽ truyền vào tấm CFRP ở phía đầu neo này (Hình 2). Tấm CFRP sau khi cố định một đầu thì lực ứng suất trước sẽ được truyền vào tấm CFRP nhờ các kích thủy lực được bố trí ở đầu neo thứ hai. Khi lực kích đạt đến giá trị yêu cầu, tiến hành neo cố định tấm CFRP tại đầu neo thứ hai.

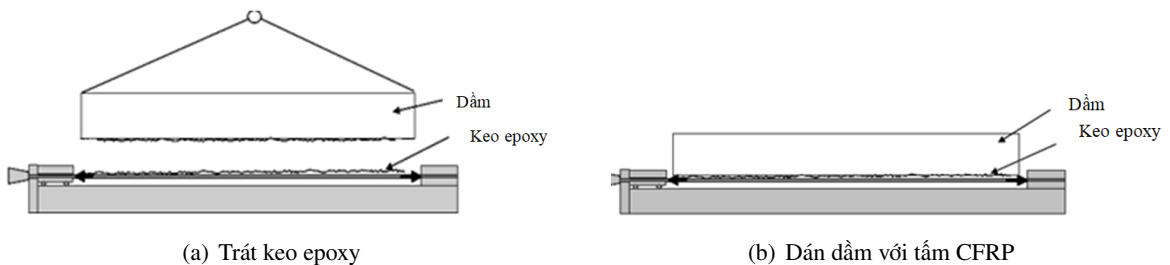


Hình 2. Mô hình thiết bị tạo lực ứng suất trước trong tấm CFRP

Ở bước tiếp theo của quá trình gia cường, tiến hành công tác dán đầm và tấm CFRP đã căng kéo theo trình tự như sau: (i) sau khi xử lý bề mặt của đầm BTCT, tiến hành trát một lớp keo epoxy lên bề mặt, đồng thời cũng tiến hành trát 1 lớp keo epoxy lên bề mặt của tấm CFRP đã căng kéo; (ii) di chuyển đầm đặt lên trên tấm CFRP, trong quá trình hạ đầm, dưới tác dụng của trọng lượng bản thân đầm, lớp keo epoxy ở bề mặt tiếp xúc của đầm và tấm CFRP sẽ bị nén lại và trải đều trên toàn bộ bề mặt tiếp xúc. Chiều dày trung bình của lớp epoxy được kiểm soát bằng cách điều chỉnh cao độ của đầm để đảm bảo chiều dày lớp epoxy khoảng 2 mm (Hình 4). Tiến hành bảo dưỡng đầm trong vòng 72 giờ ở nhiệt độ 20oC để lớp keo epoxy đông cứng và hình thành cường độ. Sau đó tiến hành xả kích và cắt tấm CFRP, tấm CFRP sẽ được cắt 2 đầu cách một đoạn 20 cm so với đầu đầm. Lực ứng suất trước từ tấm CFRP sẽ truyền trực tiếp vào đầm. Trong quá trình gia cường, tình trạng dính bám giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông sau khi xả kích và cắt tấm cần được theo dõi đầy đủ. Quan sát trực quan cho thấy tình trạng dính bám là đảm bảo, không có hiện tượng trượt giữa tấm CFRP và bê tông, bề mặt lớp keo epoxy là đồng đều, không xuất hiện nứt hay bóc tách giữa tấm CFRP và đầm bê tông. Tại hai đầu tấm CFRP, nơi ứng suất cắt giữa tấm CFRP và đầm là lớn nhất, thực tế quan sát vẫn không xuất hiện sự bóc tách hay co ngán. Do vậy, việc sử dụng keo epoxy đã tạo dính bám tốt giữa tấm CFRP và bê tông.



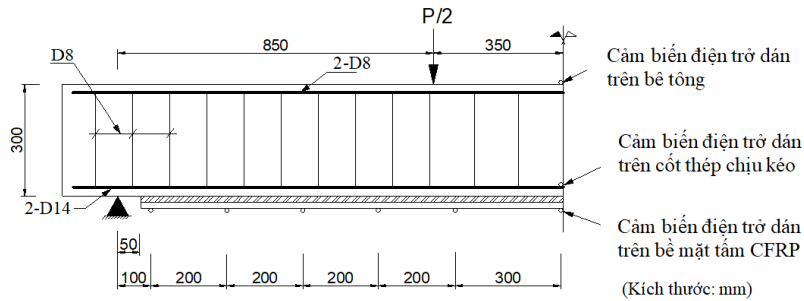
Hình 3. Thiết bị tạo lực ứng suất trước trong tấm CFRP



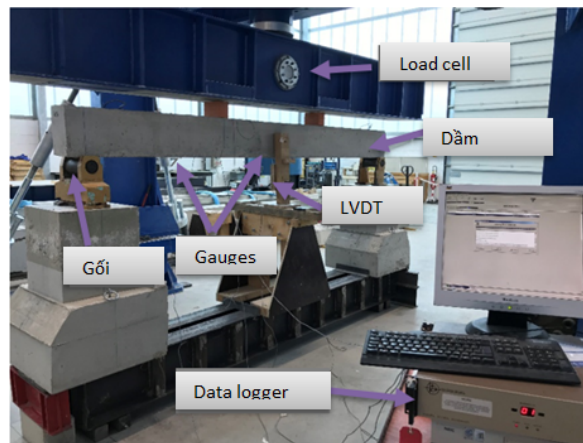
Hình 4. Quá trình dán tấm CFRP vào đầm bê tông

## 2.4. Thí nghiệm dầm

Dầm gia cường được gia tải với sơ đồ bốn điểm uốn dưới tác dụng của tải trọng tăng dần cho đến khi phá hoại. Tải trọng được gia tải lên dầm nhờ hệ khung và cảm biến lực với tốc độ gia tải là 200 N/s. Trong quá trình gia tải, các cảm biến điện trở (strain gauges) được dán trên bề mặt của tấm CFRP, trong cốt thép dọc và trên bề mặt bê tông để xác định sự thay đổi của ứng suất dưới tác dụng của tải trọng. Sơ đồ vị trí các cảm biến điện trở được thể hiện ở Hình 5. Chuyển vị ở tiết diện giữa dầm được đo bởi cảm biến đo chuyển vị (LVDT) đặt ở giữa nhịp. Chi tiết thí nghiệm dầm được mô tả ở Hình 6.



Hình 5. Sơ đồ bố trí các cảm biến điện trở trên dầm



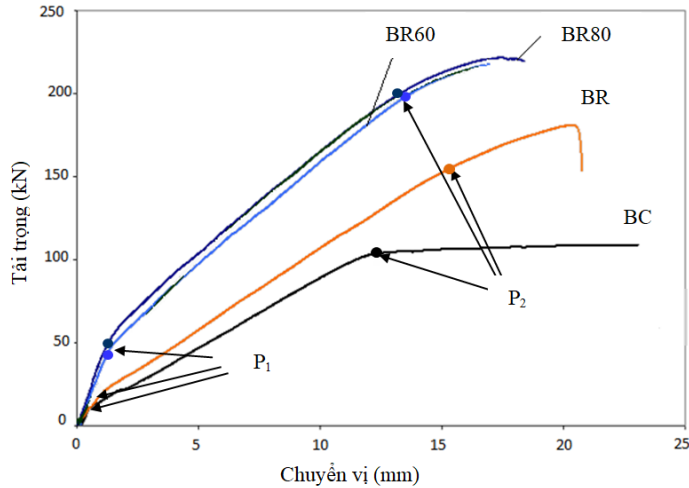
Hình 6. Thí nghiệm dầm

## 3. Kết quả và thảo luận

### 3.1. Quan hệ tải trọng và chuyển vị của dầm

Hình 7 thể hiện quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị của mẫu dầm thí nghiệm. Đồ thị chỉ ra rằng việc gia cường dầm bằng CFRP đem lại hiệu quả nổi bật trong việc cải thiện sức kháng uốn so với dầm đối chứng BC.

Tuy nhiên đối với dầm được gia cường bằng CFRP thì mức độ tăng của sức kháng uốn là không lớn so với dầm gia cường bằng CFRP ứng suất trước. Sự làm việc của dầm có thể được thể hiện theo ba giai đoạn bao gồm đàn hồi, chảy và phá hoại. Giá trị lực và chuyển vị trong từng giai đoạn được thể hiện trong Bảng 2.



Hình 7. Biểu đồ tải trọng – chuyển vị của dầm thí nghiệm

Bảng 2. Tải trọng và chuyển vị của dầm theo các giai đoạn làm việc

Dầm	Giai đoạn đàn hồi		Giai đoạn chảy		Giai đoạn phá hoại	
	$P_1$ (kN)	$D_1$ (mm)	$P_2$ (kN)	$D_2$ (mm)	$P_3$ (kN)	$D_3$ (mm)
BC	12,3	0,68	103,5	10,82	109,06	12,16
BR0	15,2	0,81	150,0	11,77	175,57	16,12
BR60	46,3	1,35	198,78	13,57	217,72	16,94
BR80	50,65	1,38	200,51	13,03	221,63	17,28

$P_1$ ,  $P_2$  và  $P_3$  lần lượt là tải trọng gây nứt, tải trọng gây chảy cốt thép và tải trọng phá hoại của dầm;  $D_1$ ,  $D_2$  và  $D_3$  lần lượt là giá trị chuyển vị tương ứng với tải trọng  $P_1$ ,  $P_2$  và  $P_3$ .

Dựa vào kết quả ở Bảng 2, một số nhận xét chính như sau:

Trong giai đoạn làm việc đàn hồi,  $P_1$  là tải trọng tương ứng với thời điểm bắt đầu xuất hiện vết nứt trong dầm. Đối với dầm gia cường bằng CFRP,  $P_1$  đạt 15,2 kN, tăng 24% so với dầm đối chứng BC. Trong khi đó, đối với dầm gia cường bằng CFRP ứng suất trước, giá trị  $P_1$  của dầm BR60 và BR80 tăng lần lượt là 3,76 và 4,12 lần so với dầm đối chứng. Sự tăng lên đáng kể này có thể được giải thích là do ứng lực trước trong tấm CFRP gây ra một ứng suất nén ban đầu trong vùng bê tông dầm chịu kéo và ứng suất này sẽ giúp giảm độ võng và làm chậm lại quá trình hình thành vết nứt trong dầm dưới tác dụng của tải trọng.

Đối với giai đoạn chảy, lực chảy  $P_2$  của dầm gia cường bằng tấm CFRP ứng suất trước BR60 và BR80 tăng lần lượt là 1,92 và 1,94 lần so với dầm đối chứng. Trong khi đó, mức tăng này đối với dầm gia cường bằng tấm CFRP là 1,45 lần.

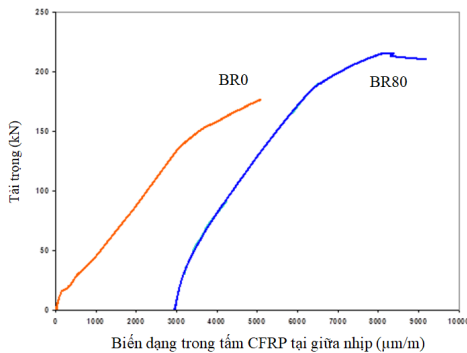
Ở giai đoạn phá hoại, tải trọng cực hạn của dầm gia cường BR60 và BR80 lần lượt là 217,7 kN và 221,6 kN, tương ứng với mức tăng 24% và 26,2% so với dầm gia cường bằng tấm CFRP (BR0). Trong khi đó, nếu so sánh với dầm đối chứng BC, mức độ tăng của dầm gia cường BR60 và BR80 lần lượt là 99,6% và 103,2%.

Bên cạnh đó, sự sai khác giữa các tải trọng ở các giai đoạn làm việc của dầm gia cường tấm CFRP ứng suất trước với với lực căng trước 60 kN và lực căng 80 kN là không đáng kể, ngoại trừ tải trọng trong giai đoạn đàn hồi có sự sai khác là 9,4%.

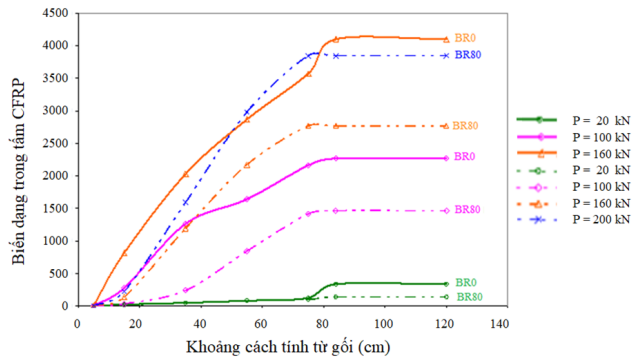


### 3.2. Biến dạng của tấm CFRP

Sự thay đổi biến dạng trong tấm CFRP tại giữa nhịp của dầm gia cường CFRP (BR0) và dầm gia cường bằng CFRP ứng suất trước với lực căng 80 kN (BR80) được thể hiện ở Hình 8. Có thể thấy rằng đối với dầm gia cường bằng CFRP ứng suất trước ghi nhận giá trị biến dạng ban đầu trong tấm CFRP do tác dụng của lực ứng suất trước. Bên cạnh đó biến dạng lớn nhất trong tấm CFRP của dầm BR0 và dầm BR80 tại thời điểm phá hoại lần lượt là 5100  $\mu\text{m/m}$  và 9250  $\mu\text{m/m}$ , tương ứng với 24,8% và 44,6% giá trị biến dạng cực hạn của tấm CFRP. Điều này cho thấy việc căng trước tấm CFRP góp phần phát huy hiệu quả làm việc của vật liệu composite hơn nhiều so với khi không áp dụng căng trước.



Hình 8. Biến dạng trong tấm CFRP tại giữa nhịp

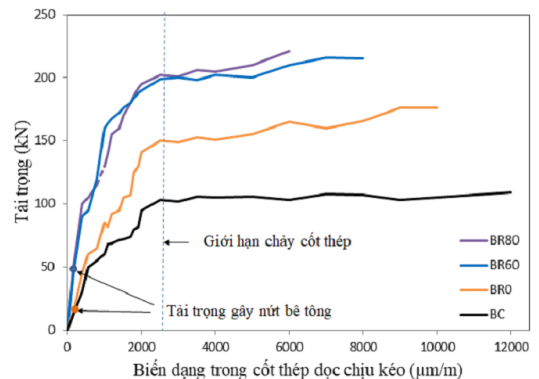


Hình 9. Biến dạng trong tấm CFRP

Hình 9 thể hiện sự thay đổi biến dạng trong tấm CFRP theo từng cấp tải trọng tương ứng của dầm gia cường bằng tấm CFRP (BR0) và dầm gia cường bằng tấm CFRP ứng suất trước với lực căng 80 kN (BR80). Có thể nhận thấy rằng biến dạng trong tấm CFRP tăng tuyến tính trong phạm vi từ gối đến vị trí cách gối 80 cm; đây chính là vị trí của tải trọng tập trung và trong phạm vi giữa hai tải trọng tập trung thì biến dạng trong tấm CFRP là không đổi. Khi so sánh biến dạng trong tấm CFRP trong cùng một cấp tải trọng thì dầm gia cường bằng tấm CFRP ứng suất trước có giá trị nhỏ hơn so với dầm gia cường bằng tấm CFRP. Khi cấp tải trọng càng tăng thì sự sai khác giữa biến dạng trong tấm CFRP lại càng lớn. Điều này cho thấy sự làm việc hiệu quả của tấm CFRP ứng suất trước so với tấm CFRP không có ứng suất trước. Lực ứng suất trước trong tấm CFRP góp phần làm tăng độ cứng, giảm độ võng và vết nứt trong dầm gia cường.

### 3.3. Biến dạng của cốt thép dọc chịu kéo

Quan hệ giữa biến dạng trong cốt thép dọc chịu kéo và tải trọng của dầm đối chứng và các dầm gia cường bằng tấm CFRP và tấm CFRP ứng suất trước được thể hiện ở Hình 10. Từ đồ thị có thể thấy rằng trong giai đoạn đầu của quá trình gia tải, tốc độ tăng biến dạng trong cốt thép chịu kéo của dầm gia cường bằng tấm CFRP ứng suất trước chậm hơn so với dầm gia cường bằng tấm CFRP và dầm đối chứng, điều này có thể được giải thích là do lực căng trước trong tấm CFRP tạo ra vùng ứng suất nén trước tại cốt thép dọc chịu kéo, ứng



Hình 10. Biến dạng trong cốt thép dọc chịu kéo

suất nén này sẽ cân bằng và triệt tiêu một phần ứng suất kéo trong cốt thép do tải trọng gây ra trong giai đoạn đầu truyền lực. Ngoài ra, việc tạo ra ứng suất nén trước trong vùng cốt thép chịu kéo góp phần làm cho tải trọng gây chảy trong cốt thép chịu kéo tăng lên đáng kể so với dầm gia cường bằng tấm CFRP và dầm đối chứng, tải trọng gây chảy của dầm BR60 và BR80 lần lượt đạt giá trị 198,78 kN và 200,51 kN, tăng tương ứng 24,5% và 25,2% so với dầm gia cường bằng tấm CFRP. Trong khi đó, nếu so sánh với dầm đối chứng, tải trọng gây chảy của dầm gia cường bằng tấm CFRP ứng suất trước tăng gần 2 lần. Mặt khác, biến dạng lớn nhất trong cốt thép chịu kéo tại thời điểm dầm phá hoại của dầm BR60 và BR80 đạt giá trị lần lượt là 0,0082 và 0,0061, giá trị này đối với dầm BR0 là 0,0102, cho thấy tại thời điểm phá hoại cốt thép chịu kéo trong các dầm gia cường đã vượt qua giới hạn chảy của cốt thép.

### 3.4. Các dạng phá hoại

Theo kết quả thí nghiệm thì hai dạng phá hoại của dầm thí nghiệm là: (i) phá hoại của vùng bê tông chịu nén và (ii) sự bóc tách giữa tấm CFRP và bê tông. Đối với dầm đối chứng BC, ứng xử của dầm thể hiện đặc trưng của dầm BTCT dưới tác dụng của tải trọng. Sau khi tải trọng vượt qua giá trị chảy dẻo của cốt thép, độ cứng của dầm sẽ giảm nhanh và dầm bị phá hoại bởi sự ép vỡ của bê tông vùng chịu nén (Hình 11(a)). Đối với các dầm gia cường với tấm CFRP và CFRP ứng suất trước, nhờ sự tham gia cùng làm việc của tấm CFRP với cốt thép chịu kéo, dưới tác dụng của tải trọng, sẽ có sự phân bố lực tốt hơn giữa vùng kéo và vùng nén, độ cứng tăng lên, độ võng và vết nứt giảm. Kết quả là tải trọng phá hoại sẽ tăng lên và dạng phá hoại của các dầm gia cường xảy ra do sự bóc tách giữa tấm CFRP và bê tông (Hình 11(b)). Bảng 3 tổng hợp các dạng phá hoại của các dầm thí nghiệm.



(a) Bê tông vùng nén bị ép vỡ



(b) Bóc tách giữa CFRP và bê tông

Hình 11. Các dạng phá hoại của dầm

Bảng 3. Các dạng phá hoại của dầm

Dầm	Lực căng trước (kN)	Tải trọng phá hoại (kN)	Dạng phá hoại
BC	-	109,06	Bê tông bị ép vỡ
BR0	-	175,57	Bóc tách CFRP và bê tông
BR60	60	217,72	Bóc tách CFRP và bê tông
BR80	80	221,63	Bóc tách CFRP và bê tông



#### 4. Kết luận

Bài báo đã trình bày kết quả nghiên cứu thí nghiệm gia cường dầm BTCT bằng tấm CFRP ứng suất trước. Bên cạnh đó nghiên cứu cũng đã đề xuất một hệ thống khung thép để căng kéo tấm CFRP và kiểm soát lực căng trong quá trình gia cường. Từ kết quả thí nghiệm, có thể đưa ra được một số kết luận dưới đây:

- Việc sử dụng tấm CFRP ứng suất trước để gia cường dầm BTCT mang lại hiệu quả cao trong nâng cao khả năng chịu uốn của dầm gia cường. Độ cứng, tải trọng phá hoại cũng như ứng xử của dầm gia cường bằng tấm CFRP ứng suất trước tăng lên đáng kể so với dầm gia cường bằng tấm CFRP và dầm đối chứng.

- Với việc sử dụng phương pháp ứng suất trước, tải trọng gây nứt tăng 3,76 và 4,12 lần tương ứng với cấp ứng suất trước 60 kN và 80 kN so với dầm đối chứng.

- Tải trọng phá hoại theo phương pháp này tăng hai lần so với dầm đối chứng. Trong khi đó nếu so với dầm gia cường bằng tấm CFRP, phương pháp này giúp cho tải trọng phá hoại tăng lên gần 25%.

- Các giá trị tải trọng trong các giai đoạn làm việc của hai dầm gia cường ứng suất trước với lực kéo trước là 60 kN và 80 kN có sự sai khác không đáng kể, ngoại trừ tải trọng tương ứng với giới hạn đàn hồi của bê tông có sự sai khác là 9,4%.

#### Lời cảm ơn

Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng với đề tài có mã số T2021-02-14: Nâng cao hiệu quả chịu uốn của dầm bê tông cốt thép gia cố bằng tấm CFRP.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] Meier, U. (1995). [Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites](#). *Construction and Building Materials*, 9(6):341–351.
- [2] Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V. L., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H., Triantafillou, T. C. (2002). [Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review](#). *Journal of Composites for Construction*, 6(2):73–87.
- [3] Motavalli, M., Czaderski, C. (2007). FRP composites for retrofitting of existing civil structures in Europe: State-of-the-art review. *International Conference of Composites & Polycon*, American Composites Manufacturers Association Tampa, FL, USA, 17–19.
- [4] Einde, L. V. D., Zhao, L., Seible, F. (2003). [Use of FRP composites in civil structural applications](#). *Construction and Building Materials*, 17(6-7):389–403.
- [5] Ngô, Q. T. (2007). Sửa chữa và gia cố công trình bê tông cốt thép bằng phương pháp dán nhò sử dụng vật liệu FRP. *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ*, 10:39–51.
- [6] Jumaat, M. Z., Rahman, M. M., Rahman, M. A. (2011). Review on bonding techniques of CFRP in strengthening concrete structures. *International Journal of Physical Sciences*, 6(15):3567–3575.
- [7] Nguyễn, T. H. (2015). Nghiên cứu hiệu quả gia cường kháng uốn cho dầm bê tông cốt thép bằng vật liệu tấm sợi các bon. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 1:3–9.
- [8] De Lorenzis, L., Nanni, A., La Tegola, A. (2000). Flexural and shear strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods. *Proceedings of third international conference on advanced composite materials in bridges and structures, Ottawa, Canada*, 521–528.
- [9] Trịnh, Q. M., Kiều, M. T., Vũ, D. P. (2013). Sử dụng thanh composite cốt sợi các-bon để tăng cường khả năng chịu lực cắt của dầm bê tông cốt thép. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, 42:65–70.
- [10] Hiếu, N. T., Cường, L. T. (2019). Nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả gia cường dầm bê tông bị nứt bằng vật liệu tấm sợi các bon CFRP. *Tạp chí Khoa học & Công nghệ Việt Nam*, 61(3):32–35.

- [11] You, Y.-C., Choi, K.-S., Kim, J. (2012). [An experimental investigation on flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed CFRP strips using a durable anchorage system](#). *Composites Part B: Engineering*, 43(8):3026–3036.
- [12] Gao, P., Gu, X., Mosallam, A. S. (2016). [Flexural behavior of preloaded reinforced concrete beams strengthened by prestressed CFRP laminates](#). *Composite Structures*, 157:33–50.
- [13] Woo, S.-K., Nam, J.-W., Kim, J.-H. J., Han, S.-H., Byun, K. J. (2008). [Suggestion of flexural capacity evaluation and prediction of prestressed CFRP strengthened design](#). *Engineering Structures*, 30(12): 3751–3763.
- [14] Triantafillou, T. C., Deskovic, N., Deuring, M. (1992). [Strengthening of Concrete Structures With Prestressed Fiber Reinforced Plastic Sheets](#). *ACI Structural Journal*, 89(3):235–244.
- [15] Quantrill, R. J., Hollaway, L. C. (1998). [The flexural rehabilitation of reinforced concrete beams by the use of prestressed advanced composite plates](#). *Composites Science and Technology*, 58(8):1259–1275.
- [16] Garden, H. N., Hollaway, L. C. (1998). [An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates](#). *Composites Part B: Engineering*, 29(4): 411–424.
- [17] Xue, W., Tan, Y., Zeng, L. (2010). [Flexural response predictions of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates](#). *Composite Structures*, 92(3):612–622.
- [18] cai Deng, Z., Xiao, R. (2011). [Flexural Performance of RC Beams Strengthened with Prestressed AFRP Sheets: Part I. Experiments](#). *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, 699–703.
- [19] Aslam, M., Shafigh, P., Jumaat, M. Z., Shah, S. N. R. (2015). [Strengthening of RC beams using prestressed fiber reinforced polymers – A review](#). *Construction and Building Materials*, 82:235–256.
- [20] Gao, P., Gu, X., Mosallam, A. S. (2016). [Flexural behavior of preloaded reinforced concrete beams strengthened by prestressed CFRP laminates](#). *Composite Structures*, 157:33–50.
- [21] Yu, P., Silva, P. F., Nanni, A. (2003). Flexural performance of RC beams strengthened with prestressed CFRP sheets. *Center for Infrastructure and Engineering Studies Department of Civil, Architectural, and Environmental Engineering University of Missouri-Rolla Rolla, MO*, 65409–0030.
- [22] Sika, A. G. (2020). [Prestressing systems for structural strengthening with sika carbodur CFRP Plate](#). Zurich, SZ.
- [23] S&P Reinforcement (2018). [Basics for S&P FRP-Systems](#). Switzerland.
- [24] Dũng, N. T., Mọi, N. V., Hoa, H. P. (2011). Nghiên cứu giải pháp gia cường dầm bê tông cốt thép bằng tấm vật liệu composite sợi carbon. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng*, 3(44):36–42.
- [25] Tuấn, N. H., Hoạt, Đ. N. (2015). Phân tích một số yếu tố ảnh hưởng tới hiệu quả gia cường dầm BTCT bằng tấm chất dẻo có cốt sợi. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 4:21–35.
- [26] Phong, N. H. (2014). Nghiên cứu thực nghiệm về gia cường kháng cắt cho dầm bê tông cốt thép bằng tấm sợi thủy tinh. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 3:23–29.
- [27] 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) - ĐHXDHN*, 15(2V):1–11.