

Ảnh hưởng của tuổi thọ dầm bê tông ứng suất trước căng sau sử dụng cáp không bám dính đến hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP

Influence of lifespan of unbonded prestressed concrete beams on flexurally-strengthening effectiveness of CFRP laminates

> PHAN VŨ PHƯƠNG^{1,*}, PHẠM ĐÌNH TRUNG NGHĨA²

¹GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mở TP.HCM; *Email: phuong.pv@ou.edu.vn

²HVCH Khoa Sau Đại học, Trường Đại học Mở TP.HCM

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của tuổi thọ dầm đến hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm sợi FRP trên các dầm bê tông ứng suất trước căng sau cáp không bám dính (UPC). Quá trình thí nghiệm được thực hiện trên tám dầm UPC chữ T kích thước lớn, chia thành hai nhóm và tiến hành trong hai giai đoạn, mỗi nhóm được gia cường bằng các tấm sợi CFRP tại các khoảng thời gian khác nhau, cách nhau khoảng 2400 ngày. Kết quả thí nghiệm nhóm dầm trong giai đoạn đầu đã được các tác giả trình bày trong nghiên cứu trước. Trong giai đoạn này, các kết quả thí nghiệm được so sánh với kết quả giai đoạn đầu và cho thấy thời điểm áp dụng gia cường CFRP trên dầm UPC lâu hơn dẫn đến giảm hiệu quả gia cố của các tấm sợi CFRP, giảm khả năng kiểm soát vết nứt, kiểm soát độ võng và khả năng hấp thụ năng lượng.

Từ khóa: Khả năng chịu uốn; dầm bê tông ứng suất trước căng sau cáp không bám dính (UPC); tuổi thọ dầm; các công trình cũ, tấm sợi CFRP; hiệu quả gia cường.

ABSTRACT

This paper presents an experimental study on influence of lifespan of beams on flexurally-strengthening effectiveness of CFRP laminates on unbonded prestressed concrete (UPC) beams. The testing program was carried out on eight (08) large-scale UPC T-beams divided in to two groups and conducted in two stages, each group was strengthened with CFRP laminates at different intervals of about 2400 days. The experimental results of the beam group in the first stage were presented in the authors' published article. In this stage, the experimental results are compared to first stage results and showed that the increase of long-term use led to a decrease in strengthening effectiveness of CFRP laminates, controlling cracking, controlling deflection, and the energy absorption capacity. A new procedure for predicting the flexural resistance of aged UPC beams strengthened with CFRP laminates is proposed with high reliability.

Keywords: Flexural resistance; unbonded prestressed concrete (UPC) beams; lifespan of beams; old structures, CFRP laminates; strengthening effectiveness.

1. GIỚI THIỆU

Cấu kiện bê tông căng sau dùng cáp không bám dính (UPC) với những ưu điểm như tính kinh tế cao (do không phải tốn chi phí và thời gian cho công tác bơm vữa), có tổn hao ứng suất căng do ma sát thấp, khả năng thay thế và quan trắc ứng suất cáp trong suốt thời gian sử dụng, đã cho thấy một giải pháp kết cấu hiệu quả bên cạnh cấu kiện bê tông ứng suất trước dùng cáp bám dính (BPC) và đã được sử dụng từ những năm 1960 (Abdullah và cộng sự 2017, Mieszczyk, M. 2018). Để kéo dài tuổi thọ của các cấu kiện UPC sau thời gian sử dụng kéo dài, việc gia cường là cần thiết để chống lại sự xuống cấp của vật liệu, suy giảm ứng suất trước, hoặc nâng cao chất lượng kỹ thuật. Tận dụng các thuộc tính kỹ thuật vượt trội của vật liệu CFRP, bao gồm độ bền cao, trọng lượng nhẹ, không dẫn

điện, không từ tính, chống ăn mòn và dễ lắp đặt, việc sử dụng vật liệu CFRP để nâng cấp hoặc gia cố các cấu trúc BPC và UPC đã chứng minh hiệu quả cao so với các phương pháp truyền thống như mở rộng diện tích mặt cắt với các lớp bê tông cốt thép bổ sung (RC), gắn các tấm thép vào mặt chịu kéo, hoặc tích hợp các sợi cáp bên ngoài (Nanni 1995, Hassan 2002, Nguyen-Minh và cộng sự 2018).

Nghiên cứu về tăng cường độ bền uốn của các cấu kiện BPC sử dụng tấm sợi CFRP liên kết ngoài dưới tải trọng đơn điệu hoặc tải trọng lặp đã bắt đầu cách đây gần được 20 năm (Reed và Peterman 2004, Rosenboom và cộng sự 2007, Rosenboom và cộng sự 2009, Kim và cộng sự 2008, Ludovico và cộng sự 2010, Cerullo và cộng sự 2013, Kasan và cộng sự 2014, Nguyen và cộng sự 2014, Afefy và

cộng sự 2016, Pino và cộng sự 2017, Larson và cộng sự 2005, Rosenboom và Rizkalla 2006, Miller và cộng sự 2006, Rasheed và cộng sự 2006, ElSafy và cộng sự 2014). Trong khi đó, các nghiên cứu tập trung vào đánh giá hiệu quả gia cường kháng uốn của các cấu kiện UPC bắt đầu muộn hơn và còn khá ít (Nguyen-Minh và cộng sự 2018, Chakrabari 2005, Meski và Harajli 2013, 2015, Ghasemi và cộng sự 2016, Tran và cộng sự 2020, Phan-Vu và cộng sự 2021, Tung và cộng sự 2022). Các nghiên cứu này phần lớn được thực hiện trên các dầm mới, ngay sau khi đúc mẫu. Đối với cấu kiện PC nói chung và UPC nói riêng, quá trình sử dụng lâu dài thường dẫn đến sự suy giảm lực căng của cáp do sự gia tăng của tổn hao ứng suất như chùng cáp, trượt neo hay cáp bị ăn mòn (Naaman (2004). Sự thay đổi ứng suất trước trong các sợi cáp của các cấu kiện BPC đóng vai trò quan trọng trong việc ảnh hưởng đến kiểm soát vết nứt, khả năng chịu uốn, độ cứng, ứng xử nứt và độ dẻo của các dầm (Abdelrahman và cộng sự 2011, Zhao và cộng sự 2020). Mức độ ứng suất trước được dự đoán sẽ giảm dần theo tuổi thọ của kết cấu do những tổn thất phụ thuộc vào thời gian do chùng cáp và những thay đổi của bê tông do từ biến và co ngót (Abdel-Jaber và Glisic 2019). Trong các cấu kiện UPC, sự thay đổi trong ứng suất trước cũng ảnh hưởng đến ứng xử nứt (số lượng, chiều rộng và khoảng cách của các vết nứt) cũng như cơ chế phá hoại (Kim và Lee 2020, Tang và cộng sự 2021, Tung và cộng sự 2022). Các thay đổi được mô tả trong ứng xử nứt, hình thái vết nứt và cơ chế phá hoại của các dầm UPC do sự thay đổi trong ứng suất trước có thể có ảnh hưởng đáng kể đến sự biến dạng và sự bong tách của tấm CFRP khi các lớp này được dán chặt vào thớ chịu kéo của cấu kiện. Điều này có thể ảnh hưởng đến hiệu suất tổng thể và hiệu quả gia cường của tấm CFRP (Tung và cộng sự 2022). Các nghiên cứu trước đây về hiệu quả kháng uốn của các cấu kiện UPC được gia cường bằng các tấm CFRP đã đề cập đến những điểm này trước đây, trong đó Meski và Harajli (2013) là bài báo duy nhất tập trung vào yếu tố hàm lượng cáp (lực ứng suất trước), và Tung và cộng sự (2022) là bài báo duy nhất tập trung vào việc suy giảm lực ứng suất trước. Tuy nhiên, các bài báo này không đánh giá ảnh

hưởng của các tổn hao ứng suất trước theo thời gian cũng như hiệu quả gia cường của tấm CFRP, mới đây nhất là nghiên cứu của nhóm tác giả Wu, J., Zhu, Y., & Li, C. (2023). Việc làm rõ ảnh hưởng của yếu tố này có ý nghĩa quan trọng, có thể giúp xây dựng được các điều khoản tính toán an toàn và hợp lý cho công tác thiết kế gia cường cấu kiện UPC dùng vật liệu CFRP dán ngoài trong thực tế trong bối cảnh thiếu vắng các điều khoản thiết kế gia cường cho cấu kiện UPC dùng tấm CFRP trong các tiêu chuẩn hiện hành như ACI 440.2R-17 (2017), CNR DT200R1/2013 (2013), và TR 55 (2012).

Bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của tuổi thọ dầm đến hiệu quả gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP dán ngoài lên các dầm bê tông ứng suất trước căng sau dùng cáp không bám dính. Chương trình thí nghiệm được thực hiện trên tám dầm lớn UPC chữ T, chia thành hai nhóm và tiến hành trong hai giai đoạn, mỗi nhóm được gia cường bằng các tấm sợi CFRP tại các khoảng thời gian khác nhau, cách nhau khoảng 2400 ngày. Kết quả giai đoạn đầu tiên đã được trình bày trong nghiên cứu của Nguyen-Minh và cộng sự (2018). Mục tiêu chính của bài báo là làm rõ tác động dài hạn lên ứng xử uốn của các dầm UPC được gia cường bằng tấm sợi CFRP.

2. CHƯƠNG TRÌNH THỰC NGHIỆM

2.1. Vật liệu

Các dầm thí nghiệm sử dụng bê tông với cấp phối được trình bày ở Bảng 1. Các thông số cơ học của bê tông, cáp, tấm sợi CFRP, keo epoxy, và cốt thép được tổng hợp ở Bảng 2.

Bảng 1. Cấp phối bê tông cho dầm thí nghiệm

| Thành phần | Đơn vị | Số lượng |
|---------------------|-------------------|----------|
| Xi măng PC40 | kg/m ³ | 410 |
| Đá 1x2 (22 mm) | kg/m ³ | 1028 |
| Cát sông (0÷4 mm) | kg/m ³ | 550 |
| Cát nghiền (0÷2 mm) | kg/m ³ | 247 |
| Phụ gia dẻo | l/m ³ | 5.5 |

Bảng 2. Tính chất cơ học của của bê tông, cáp, tấm sợi CFRP, keo epoxy và cốt thép

| | Bê tông | | Cáp ^a | | | CFRP ^a | | | Keo epoxy resin (A-B) | | Cốt thép dọc | | | Cốt thép đai | |
|-------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------------|----------------|-------------------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|
| | f_c (MPa) | f_{sp} (MPa) | f_{pu} (MPa) | f_{py} (GPa) | E_p (%) | f_{ffu} (MPa) | E_f (GPa) | ϵ_{ffu} (%) | f_e (MPa) | E_e (GPa) | f_u (MPa) | f_y (MPa) | E_s (GPa) | f_{uw} (MPa) | f_{yw} (MPa) |
| Mean | 47.2 | 5.8 | 1860 | 1675 | 195 | 4900 | 240 | 2.1 | 60 | 3-3.5 | 600 | 430 | 200 | 463 | 342 |
| COV | 0.02 | 0.05 | | | | | | | | | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.03 |

Ghi chú: ^a Giá trị được cung cấp bởi nhà sản xuất.

Trong Bảng 2, f_c và f_{sp} tương ứng là cường độ chịu nén và kéo chế của bê tông, MPa; f_{py} (MPa), f_{pu} (MPa) và E_p (GPa) lần lượt là giới hạn chảy quy ước, giới hạn bền và mô đun đàn hồi của cáp; f_{ffu} (MPa), E_f (GPa) và ϵ_{ffu} lần lượt là cường độ kéo đứt, mô đun đàn hồi và biến dạng kéo đứt của tấm CFRP; f_e (MPa) và E_e (GPa) lần lượt là cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của keo epoxy; f_y và f_u tương ứng là giới hạn chảy và giới hạn bền của cốt thép dọc; f_{yw} và f_{uw} tương ứng là giới hạn chảy và giới hạn bền của cốt thép đai (MPa).

2.2. Mẫu thí nghiệm

Chương trình thực nghiệm được tiến hành trên tám mẫu dầm UPC chữ T kích thước lớn lớn, điển hình trong các công trình dân dụng, $b \times h \times b_f \times h_f \times L_0 = 110 \times 360 \times 200 \times 90 \times 6000$ mm, theo tỷ lệ mô hình 1:2 so với dầm thực (theo nhịp dầm), được phân loại thành hai nhóm: Nhóm M và Nhóm L (xem Bảng 3). Việc phân loại này nhằm mục đích nghiên cứu tác động dài hạn lên ứng xử uốn của các dầm UPC chữ T được gia cố bằng tấm sợi CFRP, thời gian nghiên cứu khoảng 2400

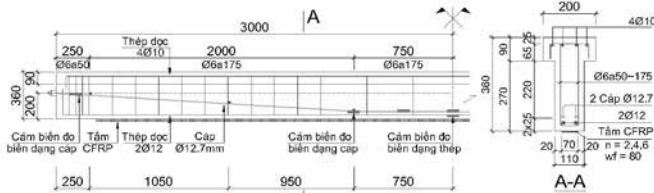
ngày (mỗi nhóm được gia cố bằng tấm sợi CFRP vào các khoảng thời gian cách nhau khoảng 2400 ngày). Trong mỗi nhóm, có bốn dầm: một dầm không được gia cố bằng tấm sợi CFRP (dầm đối chứng), ba dầm còn lại được gia cố bằng tấm sợi CFRP dọc theo đáy dầm. Số lớp tấm sợi CFRP được áp dụng cho các dầm gồm có: 4 lớp có hệ neo CFRP dạng U, 4 và 6 lớp không có hệ neo. Sau 28 ngày, các dầm được căng sau bằng hai cấp loại 7 sợi, đường kính 12,7 mm, không bám dính, theo quỹ đạo cong (Hình 1). Mỗi sợi cáp được căng bằng lực căng (F_{pi}) là 128,5 kN. Các dầm được thiết kế dựa trên ACI 318 (2019) theo kiểu U, không nứt. Vì vậy, lực căng ban đầu trong cáp được thiết kế sao cho thỏa điều kiện $f_t < 0,62(f_c')^{0,5}$, với f_t là ứng suất kéo lớn nhất trong tiết diện bê tông và f_c' là cường độ chịu nén của bê tông xác định trên mẫu lăng trụ. Kích thước hình học, thông số kỹ thuật về cáp, cốt thép và tấm CFRP được tổng hợp trong Bảng 2 và Bảng 3. Hình dạng tiết diện, sự phân bố cáp, cốt thép và sơ đồ dán tấm CFRP trong dầm được thể hiện qua Hình 1 và 2.

Bảng 3. Các thông số kỹ thuật của mẫu dầm thí nghiệm

| Nhóm | Mẫu dầm | $b \times h \times b_p \times h_p \times L_0$ (mm) | f_c (MPa) | ρ_s % | ρ_{sw} % | ρ_p % | T_s (ngày) | n_{FRP} | w_f (mm) | s_f (mm) | t_f (mm) | a_f (mm) | | | | | | |
|--------------------------------------|---------|---|----------------|---------------|------------------|---------------|-----------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|------|---|-----|-----|-------|----|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| M (Nguyễn Minh và cộng sự (2018)) | M0 | $110 \times 360 \times 200 \times 90 \times 6000$ | 47,2 | 0,47 | 0,29 | 0,41 | | | | | | | | | | | | |
| | M4 | | | | | | | | | | | | - | 0 | - | - | 0,166 | 70 |
| | M6 | | | | | | | | | | | | 1 | 4 | - | - | 0,166 | 70 |
| | M4-AN2 | | | | | | | | | | | | 1 | 4 | 100 | 150 | 0,166 | 70 |
| L | L0 | $110 \times 360 \times 200 \times 90 \times 6000$ | 47,2 | 0,47 | 0,29 | 0,41 | | | | | | | | | | | | |
| | L4 | | | | | | | | | | | | 2400 | 4 | - | - | 0,166 | 70 |
| | L6 | | | | | | | | | | | | 2400 | 6 | - | - | 0,166 | 70 |
| | L4-AN2 | | | | | | | | | | | | 2400 | 4 | 100 | 150 | 0,166 | 70 |

Ghi chú: T_s là thời điểm áp dụng gia cường bằng tấm sợi CFRP (sau khi căng cáp) (ngày); f_c là cường độ chịu nén bê tông mẫu lập phương (MPa); n_{FRP} là số lớp CFRP; w_f là bề rộng của neo CFRP dạng U (mm); s_f là khoảng cách giữa các neo CFRP dạng U (mm); t_f là độ dày của một lớp sợi CFRP (mm); a_f là bề rộng của các tấm sợi CFRP gia cường kháng uốn (mm); ρ_s là hàm lượng cốt thép dọc (%); ρ_{sw} là hàm lượng cốt thép đai (%); ρ_p là hàm lượng cáp ứng suất trước (%).

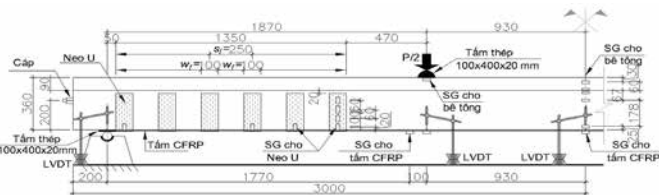
Việc áp dụng gia cường kháng uốn bằng tấm sợi CFRP được thực hiện vào thời điểm một ngày và hai ngàn bốn trăm ngày sau khi căng cáp, tương ứng với dầm nhóm M và nhóm L. Quá trình gia cường được thực hiện theo ACI 440.2R-17 (2017). Quá trình chuẩn bị mẫu thí nghiệm được thực hiện trong phòng thí nghiệm ở nhiệt độ trung bình là 28°C và độ ẩm tương đối khoảng 75%. Thời gian để đảm bảo cho tấm gia cường đạt đến cường độ cần thiết là 7 ngày.



Hình 1. Cấu tạo của dầm thí nghiệm: (a) Cấu tạo dầm và chi tiết bố trí cảm biến đo biến dạng của cáp và cốt dọc chịu kéo; (b) Mặt cắt giữa nhịp dầm

2.3. Quy trình thí nghiệm và bố trí thiết bị đo

Dầm đối chứng L0 được thí nghiệm chịu tải trọng lặp trong 3 chu kỳ (với cấp tải từ 0 đến 80 kN) trước khi tiến hành thí nghiệm phá hủy, nhằm xác định tải trọng mở rộng lại vết nứt của dầm thí nghiệm P_{ro} , sau đó xác định lực căng cáp hữu hiệu, P_e , theo Rosenboom và Rizkalla (2006).

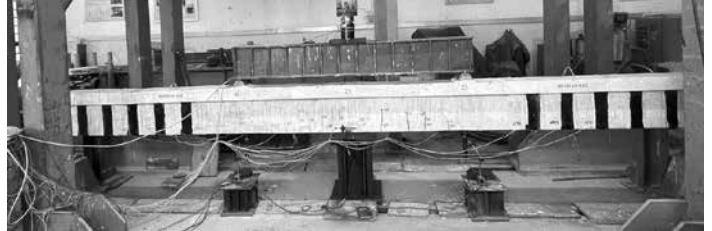


Hình 2. Sơ đồ thí nghiệm và chi tiết bố trí thiết bị đo đặc cho dầm

Dầm được thí nghiệm theo sơ đồ dầm đơn giản chịu uốn bốn điểm thể hiện ở Hình 2 và 3. Vị trí điểm đặt lực cách gối tựa gần nhất một khoảng 1870mm. Biến dạng của tấm CFRP kháng uốn dọc theo nhịp dầm được xác định dựa trên bốn cảm biến điện trở (SG) dán trên bề mặt của tấm tại các vị trí giữa nhịp (hai cảm biến) và tại vị trí hai điểm đặt lực. Biến dạng của cáp UST được xác định thông qua ba cảm biến trong vùng mô men không đổi. Biến dạng của cốt dọc trong thớ kéo được xác định qua một cảm biến dán tại vị trí giữa nhịp. Biến dạng của bê tông được đo trên năm cảm biến dán ở thớ chịu nén và thớ chịu kéo của dầm ở vị trí giữa nhịp dọc theo chiều cao dầm. Chuyển vị dầm được xác định dựa trên năm chuyển vị kế điện tử (LVDTs) bố trí tại giữa nhịp, điểm đặt tải, và tại hai gối tựa. Các dầm được gia tải dự kiến với cấp tải 5 kN trong giai đoạn trước khi vết nứt uốn xuất hiện, sau đó giá trị mỗi cấp tải được tăng lên 10 kN. Sau mỗi cấp tải, tải trọng được giữ trong thời

gian khoảng ba phút để tiến hành đo chuyển vị, biến dạng của bê tông, thép dọc, thép đai, tấm CFRP và bề rộng khe nứt.

Tất cả các giá trị lực, chuyển vị và biến dạng đều được đo tự động thông qua thiết bị thu nhận số liệu. Sơ đồ và vị trí lắp đặt thiết bị đo đặc được thể hiện trên Hình 1 và 2.



Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm của dầm trong phòng thí nghiệm

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hình thái vết nứt và kiểu phá hoại của dầm thí nghiệm

Kết quả của tất cả các dầm thí nghiệm được tổng hợp trong Bảng 4. Trong Nhóm M, dầm đối chứng bị phá hoại do uốn với biến dạng của cáp vượt qua giá trị biến dạng chảy danh nghĩa và sau đó bê tông vùng nén của dầm bị vỡ tại giữa nhịp dầm. Trong khi đó, dầm đối chứng trong Nhóm L bị phá hoại do uốn, với bê tông vùng nén của dầm bị vỡ tại giữa nhịp dầm (Hình 4a). Kiểu phá hoại của các dầm đối chứng có xu hướng giòn hơn so với các dầm gia cường CFRP, thể hiện qua tốc độ phát triển của vết nứt nhanh hơn, số lượng vết nứt ít hơn, nhưng có bề rộng lớn hơn so với dầm gia cường. Ở cấp tải khoảng 32% và 30% so với tải phá hoại của chính nó (tương ứng với nhóm M và L), dầm bắt đầu xuất hiện vết nứt uốn đầu tiên ở gần giữa nhịp dầm. Bề rộng vết nứt ở cấp tải lớn nhất đạt khoảng 1,4 và 1,6mm (tương ứng với nhóm M và L).

Các dầm gia cường CFRP trong Nhóm M bị phá hoại do uốn, với cáp bị chảy dẻo và sau đó là bong tách hoặc đứt gãy của tấm sợi CFRP. Ngược lại, các dầm gia cường CFRP trong Nhóm L bị phá hoại do uốn, với sự bong tách hoặc đứt gãy của tấm sợi CFRP (Hình 4b-d). Vết nứt uốn đầu tiên trong các dầm gia cường CFRP xuất hiện ở mức tải trung bình từ 29% đến 32% tải phá hoại của chính nó. Bề rộng vết nứt lớn nhất quan sát được trong các dầm gia cường của Nhóm M dao động từ 0,74mm đến 0,9mm, tương ứng với 53% đến 64% bề rộng vết nứt lớn nhất quan sát được trong dầm đối chứng. Tương tự, bề rộng vết nứt lớn nhất trong các dầm gia cường của Nhóm L dao động từ 0,8mm đến 1,1mm, tương ứng với 50% đến 69% bề rộng vết nứt lớn nhất quan sát được trong dầm đối chứng.

Tỷ số của bề rộng vết nứt lớn nhất giữa các dầm trong Nhóm L và Nhóm M dao động từ 1,08 đến 1,22. Tương tự, tỷ số của tải trọng gây nứt giữa các dầm trong Nhóm L và Nhóm M dao động từ 0,91 đến 0,95. Có thể thấy rằng tác động dài hạn có ảnh hưởng đáng kể đến kiểu phá hoại, và ảnh hưởng mạnh mẽ đến ứng xử nứt của các dầm thí nghiệm.



Hình 4. Hình thái vết nứt và kiểu phá hoại của các dầm thí nghiệm Nhóm L

Bảng 4. Tổng hợp kết quả thí nghiệm

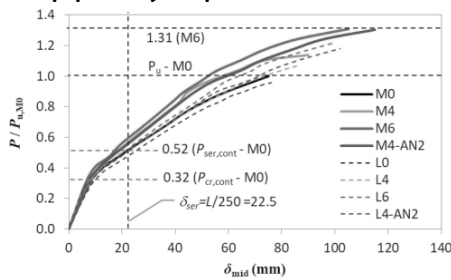
| Nhóm | Mẫu dầm | $P_{cr,exp}$ | $P_{u,exp}$ | $\delta_{u,mid}$ | ϵ_{cu} | $\Delta\epsilon_{pu}$ | ϵ_{pu} | ϵ_{fu} | $w_{cr,u}$ | E_b | Kiểu phá hoại |
|-----------------------------------|---------|--------------|-------------|------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|------------|-------------------------|---------------|
| | | (kN) | (kN) | (mm) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (Nmm x10 ³) | |
| M (Nguyen-Minh và cộng sự (2018)) | M0 | 46 | 145 | 75 | 3,5 | 3,8 | 8,9 | - | 1,40 | 7152 | C+YS |
| | M4 | 53 | 165 | 90 | 2,2 | 4,2 | 9,3 | 11,4 | 0,74 | 10438 | FD+YS |
| | M6 | 58 | 190 | 105 | 2,7 | 4,7 | 9,8 | 8,1 | 0,90 | 13873 | FD+YS |
| | M4-AN2 | 55 | 189 | 115 | 2,5 | 5,7 | 10,8 | 13,2 | 0,90 | 15029 | R+YS |
| L | L0 | 42 | 139 | 87 | 3,9 | 3,7 | 7,9 | - | 1,60 | 6850 | C |
| | L4 | 50 | 155 | 86 | 2,7 | 3,3 | 7,5 | 10,9 | 0,80 | 8755 | FD |
| | L6 | 55 | 176 | 99 | 2,8 | 3,9 | 8,1 | 8,7 | 1,10 | 11421 | FD |
| | L4-AN2 | 50 | 171 | 102 | 2,9 | 4,0 | 8,2 | 11,5 | 1,05 | 11515 | R |

Trong đó: YS - Cáp chảy; C - Bê tông vùng nén bị nén vỡ; R - Tấm CFRP bị đứt; và FD - Tấm CFRP bong tách hoàn toàn.

Ghi chú: $\Delta\epsilon_{pu}$, ϵ_{pu} và ϵ_{fu} lần lượt là biến dạng tăng thêm lớn nhất trong cáp, biến dạng kéo lớn nhất của cáp và tấm gia cường kháng uốn CFRP tại vị trí giữa nhịp dầm (%). $w_{cr,u}$ là bề rộng vết nứt lớn nhất khi dầm phá hoại (mm). E_b là khả năng hấp thụ năng lượng (Nmm). $P_{cr,exp}$ và $P_{u,exp}$ lần lượt là lực gây vết nứt uốn đầu tiên, và lực lớn nhất gây phá hoại dầm (kN). $\delta_{u,mid}$ là chuyển vị giữa nhịp lớn nhất của dầm (mm). ϵ_{cu} là biến dạng nén lớn nhất của bê tông (%).

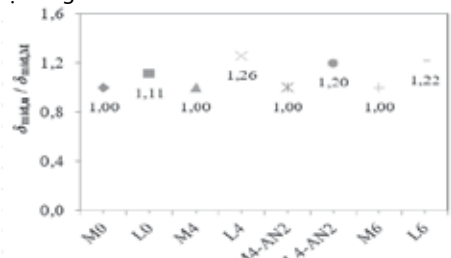
Khả năng hấp thụ năng lượng, E_b , được định nghĩa là diện tích bên dưới đường cong lực - chuyển vị cho đến cấp tải phá hoại.

3.2. Quan hệ lực - chuyển vị



Hình 5. Quan hệ lực và chuyển vị tại giữa nhịp dầm của các dầm thí nghiệm

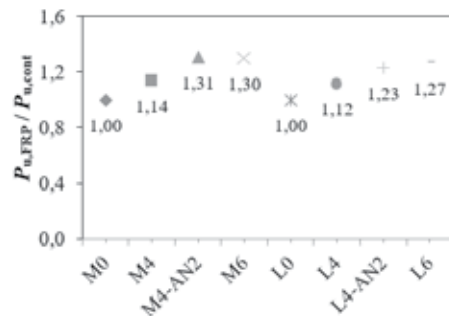
Ảnh hưởng của tác động dài hạn đến chuyển vị của các dầm được thể hiện thông qua Hình 6. Khi xem xét các dầm có cùng cấu hình gia cường, trong giai đoạn đầu trước khi chuyển vị của dầm vượt quá giới hạn cho phép ($L/250 = 22,5\text{mm}$), các dầm áp dụng gia cường tấm sợi CFRP vào các thời điểm khác nhau ứng xử gần như giống nhau. Tuy nhiên, ở các cấp tải tiếp theo khi chuyển vị của dầm vượt quá giới hạn sử dụng cho phép, chuyển vị của các dầm có xu hướng gia tăng theo ảnh hưởng của tác động dài hạn. Cụ thể, xét tại cấp tải lớn nhất của các dầm với thời gian áp dụng gia cường tấm sợi CFRP lâu hơn (Nhóm L) đã cho thấy chuyển vị tăng so với các dầm với thời gian áp dụng gia cường tấm sợi CFRP ngắn hơn (Nhóm M), với giá trị lần lượt là 11%, 26%, 20% và 22% lần lượt cho các dầm L0, L4, L4-AN2 và L6. Hiện tượng này có thể do ảnh hưởng của tác động dài hạn, thời gian sẽ làm thay đổi đặc tính của bê tông, làm giảm ứng suất hữu hiệu trong cáp (tổn hao ứng suất tăng) và gây ra hiện tượng từ biến trong bê tông, từ đó làm giảm độ cứng của dầm.



Hình 6. Sự gia tăng chuyển vị của các dầm do ảnh hưởng của tác động dài hạn

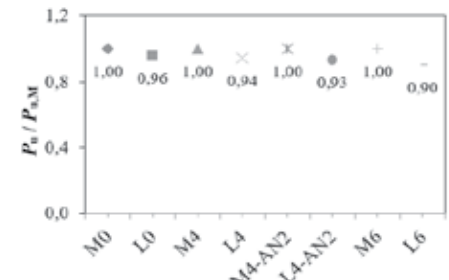
3.3. Hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP, khả năng hấp thụ năng lượng của dầm

Khả năng kháng uốn của các dầm gia cường được cải thiện đáng kể nhờ tấm CFRP, với sự cải thiện được quan sát khi số lớp gia cường tăng lên. Sự gia tăng khả năng kháng uốn cũng cho thấy một mối tương quan tích cực nhẹ với số lớp CFRP và sự có mặt của neo CFRP dạng U (Hình 7). Đặc biệt trong giai đoạn bền (tương ứng với các cấp tải gây nên chuyển vị dầm $> L/250 = 22,5\text{mm}$), hiệu quả gia cường của tấm CFRP đáng kể hơn, thể hiện qua sự gia tăng khả năng kháng uốn của dầm dao động từ 14% đến 30% đối với Nhóm M và từ 12% đến 27% đối với Nhóm L (Hình 7). Các kết quả này cho thấy hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP có xu hướng giảm khi thời gian áp dụng gia cường tấm sợi CFRP tăng lên.



Hình 7. Sự cải thiện về khả năng kháng uốn của các dầm được gia cường

Tác động dài hạn ảnh hưởng tiêu cực đến ứng xử của các dầm UPC và ảnh hưởng đến khả năng kháng uốn của chúng (Hình 8). Xét các dầm có cùng cấu hình gia cường CFRP, thời gian áp dụng gia cường tấm sợi CFRP càng lâu, khả năng kháng uốn của chúng càng giảm. Theo đó, các dầm trong nhóm L (áp dụng gia cường tấm sợi CFRP vào thời điểm 2400 ngày sau khi căng cáp) giảm khả năng kháng uốn từ 4-10% so với các dầm trong nhóm M (áp dụng gia cường tấm sợi CFRP vào thời điểm 1 ngày sau khi căng cáp).

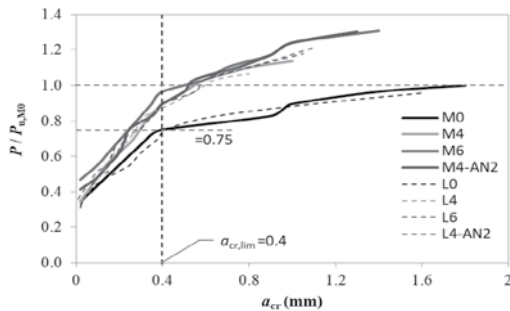


Hình 8. Sự suy giảm khả năng kháng uốn của các dầm UPC theo thời gian

Ngoài ra, tấm sợi CFRP cũng cải thiện đáng kể khả năng hấp thụ năng lượng (E_b) của các dầm, như được thể hiện trong Bảng 4. Theo đó, tấm sợi CFRP làm tăng E_b của dầm từ 46% đến 110% đối với Nhóm M và từ 28% đến 68% đối với Nhóm L.

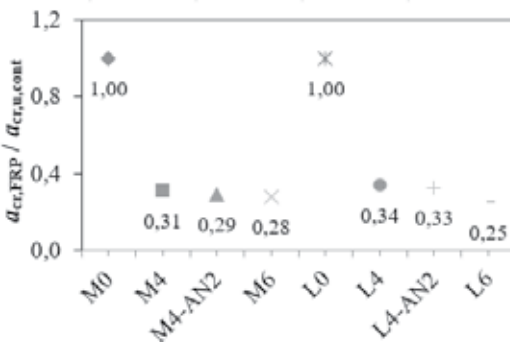
3.4. Ứng xử nứt của dầm thí nghiệm

Tấm CFRP cho thấy sự hiệu quả của nó trong việc kiểm soát nứt và trì hoãn quá trình phát triển; từ đó làm giảm mạnh bề rộng của vết nứt trong dầm (Hình 9). Số lớp gia cường càng lớn, bề rộng vết nứt càng giảm nhưng với mức độ chiết giảm nhỏ dần. Vết nứt uốn trong các dầm gia cường xuất hiện trễ hơn so với trong dầm đối chứng. Lực gây nứt uốn đầu tiên, $P_{cr,CFRP}$, của dầm gia cường trong nhóm Nhóm M và L lớn hơn so với dầm không gia cường lần lượt từ 15-26% và 9-20% (Bảng 4). Số lớp CFRP gia cường và sự xuất hiện của neo CFRP dạng U ảnh hưởng nhẹ đến lực gây vết nứt uốn đầu tiên; ngoài ra, thời gian áp dụng gia cường tấm sợi CFRP càng lâu, vết nứt uốn đầu tiên xuất hiện càng sớm. Cụ thể, trong Nhóm L (áp dụng gia cường tấm sợi CFRP vào thời điểm 2400 ngày sau khi căng cáp), lực gây vết nứt uốn đầu tiên thấp hơn so với các dầm trong Nhóm M lần lượt: 9%, 6%, 9% và 5% tương ứng cho các dầm L0, L4, L4-AN2 và L6.



Hình 9. Quan hệ lực - bề rộng vết nứt của các dầm thí nghiệm

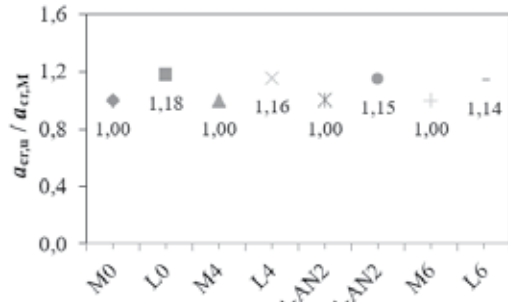
Tại cấp tải gây nên vết nứt cho phép, $a_{cr,lim} = 0,4\text{mm}$ của các dầm không gia cường ($0,75P_{u,MO}$ đối với Nhóm M và $0,72P_{u,MO}$ đối với Nhóm L - Hình 9), bề rộng của vết nứt lớn nhất đo được của các dầm gia cường lần lượt nhỏ hơn so với của dầm không gia cường từ 26-39% đối với Nhóm M và 35-41% đối với Nhóm L. Tại cấp tải phá hoại của các dầm đối chứng, $P_{u,Cont}$, bề rộng vết nứt của các dầm gia cường giảm rất mạnh so với của dầm đối chứng, từ 3,0-4,1 lần cho Nhóm L và từ 3,3-3,6 lần cho Nhóm M. Hình 10 cho thấy bề rộng vết nứt trong các dầm gia cường giảm dần theo sự gia tăng số lớp gia cường. Nguyên nhân là do độ cứng dọc trục ($E_f A_f$) của tấm tăng khi số lớp gia cường tăng (E_f và A_f là mô-đun đàn hồi và diện tích tiết diện tấm CFRP), làm giảm ứng suất kéo trong tấm và từ đó làm giảm bề rộng vết nứt của dầm. Đáng lưu ý rằng, mức độ chiết giảm bề rộng vết nứt nhỏ dần khi số lớp CFRP gia cường tăng.



Hình 10. Sự chiết giảm bề rộng vết nứt của dầm gia cường tấm CFRP so với của dầm đối chứng trong cùng nhóm dầm tại cấp tải phá hoại của dầm đối chứng

Đối với các dầm có cùng số lớp gia cường, trong giai đoạn đầu trước khi các dầm vượt quá bề rộng vết nứt cho phép, các dầm có thời điểm áp dụng gia cường tấm sợi CFRP khác nhau có quan hệ lực và bề rộng vết nứt gần như giống nhau. Tuy nhiên, ở các cấp tải

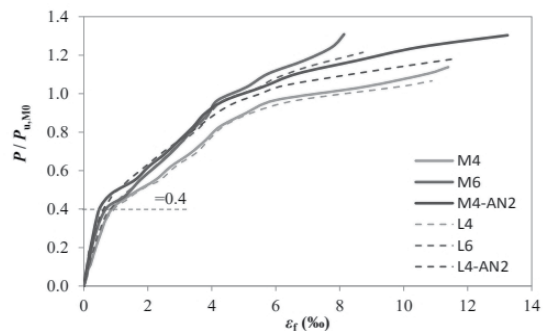
tiếp theo, khi bề rộng vết nứt vượt quá giới hạn cho phép, bề rộng vết nứt có xu hướng tăng theo thời gian áp dụng gia cường tấm sợi CFRP. Cụ thể, xét tại cấp tải lớn nhất của các dầm nhóm L với thời gian áp dụng tấm sợi CFRP lâu hơn (2400 ngày sau khi căng cáp), bề rộng vết nứt của các dầm này tăng so với các dầm áp dụng gia cường tấm sợi CFRP tại thời điểm chỉ một ngày sau khi căng cáp (nhóm M) lần lượt là: 9%, 6%, 9% và 5% tương ứng với các dầm L0, L4, L4-AN2 và L6 (Hình 11).



Hình 11. Sự gia tăng bề rộng vết nứt của các dầm có cùng số lớp gia cường do ảnh hưởng của tác động dài hạn

3.5. Biến dạng của tấm gia cường kháng uốn CFRP

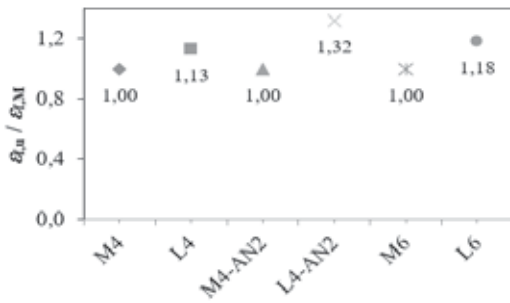
Quan hệ lực và biến dạng tấm CFRP của các dầm thí nghiệm được thể hiện ở Hình 12. Ở giai đoạn đầu (xấp xỉ 29%-40% tải phá hoại của dầm M0), biến dạng của tấm CFRP là không đáng kể. Từ cấp tải gây nứt trở đi, tấm CFRP làm việc nhiều hơn, dẫn đến sự gia tăng đáng kể biến dạng của tấm CFRP, nhưng mức độ tăng giảm dần khi số lớp CFRP tăng và có sự xuất hiện của các neo U. Tốc độ biến dạng của tấm CFRP trong các dầm với các thời điểm áp dụng gia cường tấm sợi CFRP khác nhau gần tương đồng; tuy nhiên, ở cùng một mức tải trọng, các dầm áp dụng gia cường tấm sợi CFRP lâu hơn cho thấy biến dạng của tấm sợi CFRP cao hơn so với dầm đối chứng. Biến dạng cuối cùng của tấm CFRP trong các dầm gia cường với 4 lớp CFRP có neo U, 4 và 6 lớp CFRP không có neo U lần lượt là 13,2‰, 11,4‰ và 8,1‰ cho Nhóm M, 11,5‰, 10,9‰ và 8,7‰ cho Nhóm L, đạt từ 39-63% biến dạng kéo đứt của của tấm ($\epsilon_{fu} = 21‰$). Như vậy, việc tăng số lớp CFRP gia cường từ bốn lớp lên sáu lớp làm giảm đáng kể biến dạng cuối cùng của tấm CFRP trung bình 25%. Biến dạng lớn nhất trong tấm CFRP giảm khi số lớp gia cường tăng là do sự gia tăng độ cứng dọc trục của tấm CFRP thể hiện qua sự giảm độ dốc trong biểu đồ quan hệ lực - biến dạng tấm CFRP (Hình 12).



Hình 12. Quan hệ lực - biến dạng tấm CFRP giữa nhịp

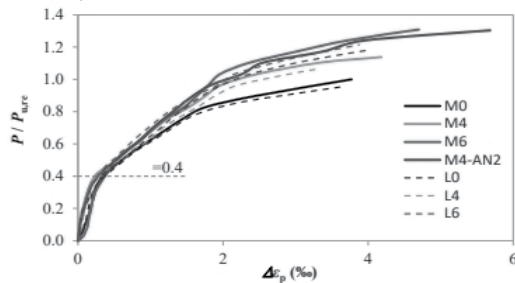
Khi so sánh các dầm có cùng số lớp gia cường trong các nhóm M và L, biến dạng trong tấm sợi CFRP là tương đồng trong giai đoạn đầu trước khi dầm vượt quá chuyển vị giới hạn cho phép ($L/250 = 22,5\text{mm}$). Khi chuyển vị vượt quá giới hạn cho phép, thời gian áp dụng gia cường tấm sợi CFRP lâu hơn dẫn đến biến dạng

lớn hơn trong tấm sợi CFRP. Cụ thể, xét tại cấp tải lớn nhất của các dầm áp dụng gia cường tấm sợi CFRP lâu hơn (Nhóm L), biến dạng tấm CFRP của các dầm này tăng so với những dầm áp dụng tấm sợi CFRP trong thời gian ngắn (Nhóm M), với các giá trị lần lượt là 13%, 32% và 18% tương ứng với các dầm L4, L4-AN2, L6 (Hình 13). Hiện tượng này có thể được lý giải là do sự suy giảm độ cứng của dầm do ảnh hưởng của tác động dài hạn như đã đề cập ở trên, dẫn đến gia tăng chuyển vị của dầm, từ đó dẫn đến tăng biến dạng trong tấm CFRP.

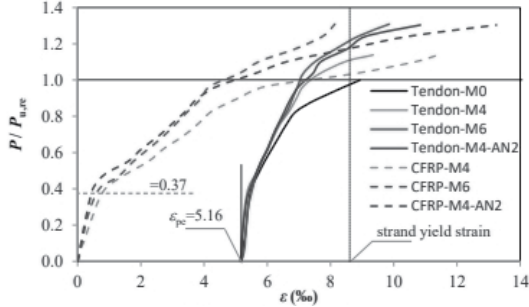


Hình 13. Sự gia tăng biến dạng của tấm CFRP do ảnh hưởng của tác động dài hạn

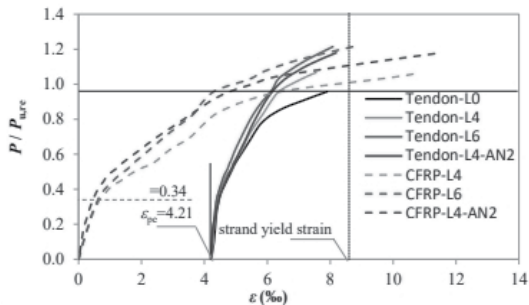
3.6. Biến dạng của cáp và tương tác giữa tấm CFRP và cáp



Hình 14. Quan hệ lực - biến dạng cáp của các dầm thí nghiệm



(a) Các dầm nhóm M



(b) Các dầm nhóm L

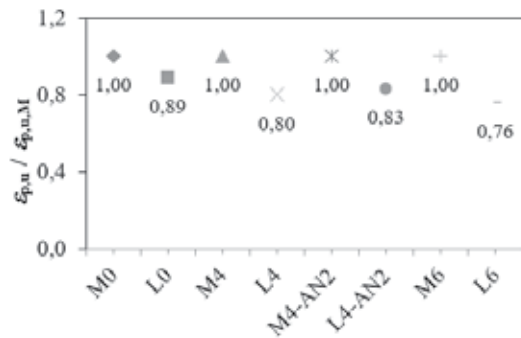
Hình 15. Tương tác giữa biến dạng giữa tấm CFRP và cáp

Trước khi xuất hiện vết nứt trong dầm, ứng xử của cáp trong các dầm tương đồng nhau. Sau khi vết nứt xuất hiện (ở cấp tải khoảng (29-40%) $P_{u,M0}$), cáp bắt đầu làm việc nhiều hơn. Tốc độ gia tăng biến dạng cáp trong các dầm gia cường nhỏ hơn so với dầm

đối chứng ở cùng một cấp tải và có xu hướng giảm dần theo sự gia tăng của số lớp CFRP gia cường (Hình 14). Biến dạng tăng thêm của cáp trong dầm không gia cường dầm nhóm M (M0) đạt xấp xỉ 1,43‰ tại cấp tải mà bề rộng vết nứt trong dầm không gia cường đạt tới $a_{cr,lim} = 0,4mm$ (75% $P_{u,M0}$). Trong khi đó, biến dạng tăng thêm của cáp trong các dầm gia cường với 4-6 lớp CFRP trong cùng nhóm dao động từ 1,17-1,23‰, giảm tương ứng 14-18% so với dầm không gia cường. Tương tự, tại cấp tải mà bề rộng vết nứt trong dầm không gia cường nhóm L (L0) đạt $a_{cr,lim} = 0,4mm$ (72% $P_{u,M0}$), biến dạng tăng thêm của cáp trong các dầm gia cường (4-6 lớp CFRP) trong nhóm L giảm từ 10-26% so với dầm không gia cường. Ở các cấp tải lớn hơn, biến dạng của cáp trong các dầm gia cường có xu hướng giảm mạnh hơn. Cụ thể, tại cấp tải phá hoại của các dầm không gia cường, $P_{u,Cont}$, biến dạng tăng thêm của cáp trong các dầm gia cường với 4-6 lớp CFRP giảm từ 41-50% cho nhóm M và từ 41-49% cho nhóm L, so với dầm không gia cường.

Các kết quả trên cho thấy, nhờ vào cơ chế kiểm soát hiệu quả ứng xử nứt trong dầm như đã được trình bày, tấm CFRP làm chậm tốc độ suy giảm độ cứng dầm, từ đó giúp ứng suất kéo trong dầm phân bố được đều đặn hơn, giảm thiểu được ứng xử nứt cục bộ trong bê tông dầm và biến dạng cục bộ trong cáp. Điều này đã giúp làm giảm biến dạng trong cáp và quan trọng hơn là giúp trì hoãn thời điểm xuất hiện biến dạng chảy danh nghĩa trong cáp như thể hiện trên Hình 15.

Biến dạng hữu hiệu của cáp sau khi căng của các dầm trong nhóm M là 5,16‰; trong khi đó, giá trị này trong nhóm L là 4,21‰ (trong đó lực căng cáp hữu hiệu, P_e , được xác định theo Rosenboom và Rizkalla (2006)). Như vậy, biến dạng hữu hiệu của cáp suy giảm 18,4% sau 2400 ngày (khoảng 6,5 năm) sau khi căng cáp trong dầm, kết quả này khá tương đồng với nghiên cứu của Páez và Sensale (2018), tổn hao ứng suất trong cáp đo được sau 6,5 năm là 22%. Có thể thấy rằng, có sự suy giảm biến dạng lớn nhất trong cáp khi thời gian áp dụng gia cường tấm CFRP tăng lên. Xét các dầm trong nhóm L, biến dạng cáp lớn nhất trong các dầm đều nhỏ hơn biến dạng chảy danh định của cáp xấp xỉ từ 4-8% (Hình 15).



Hình 16. Sự suy giảm biến dạng cáp lớn nhất của các dầm do ảnh hưởng của tác động dài hạn.

Xét các dầm có cùng số lớp gia cường, trong giai đoạn đầu trước khi dầm đạt chuyển vị sử dụng cho phép ($L/250 = 22,5mm$), các dầm với các thời điểm áp dụng gia cường tấm sợi CFRP khác nhau (dầm nhóm L và M) có ứng xử gần như giống nhau. Tuy nhiên, ở các cấp tải tiếp theo khi chuyển vị của dầm vượt quá giới hạn cho phép, thời gian áp dụng gia cường tấm sợi CFRP lâu hơn đã gây ra sự gia tăng đáng kể biến dạng tăng thêm của cáp. Cụ thể, biến dạng tăng thêm của cáp tại cấp tải lớn nhất trong các dầm có thời gian áp dụng gia cường tấm sợi CFRP lâu hơn (dầm nhóm L) cao hơn đáng kể so với các dầm có thời gian áp dụng tấm sợi CFRP ngắn hơn, dao động từ 11-24% (Hình 16).

4. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày một nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của tuổi thọ dầm đến hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm sợi FRP trên các dầm bê tông ứng suất trước căng sau cấp không bám dính (UPC). Căn cứ trên kết quả đạt được từ nghiên cứu này, một số kết luận có thể được rút ra như sau:

(1) Tuổi thọ dầm có ảnh hưởng đáng kể đến kiểu phá hoại và ảnh hưởng khá rõ ràng đến hình thái vết nứt của dầm thí nghiệm, nó cũng làm tăng chuyển vị của dầm (11% đến 22%), bề rộng vết nứt (5% đến 9%), biến dạng trong tấm CFRP (13% đến 32%), biến dạng tăng thêm trong cáp (11% đến 24%);

(2) Tuổi thọ dầm ảnh hưởng tiêu cực đến ứng xử của dầm UPC và ảnh hưởng đến khả năng kháng uốn của dầm UPC. Các dầm có cùng cấu hình gia cường CFRP, thời gian áp dụng gia cường tấm CFRP càng lâu thì khả năng kháng uốn của chúng càng giảm. Dầm áp dụng gia cường tấm CFRP tại thời điểm 2400 ngày sau khi căng cáp, có khả năng kháng uốn giảm 4-10% so với dầm áp dụng gia cường tấm CFRP tại thời điểm 01 ngày sau khi căng cáp; Hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP là đáng kể, thể hiện qua sự gia tăng khả năng uốn từ 14% đến 30% đối với Nhóm M và 12% đến 27% đối với Nhóm L. Kết quả này cho thấy hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP có xu hướng nhỏ hơn khi thời gian áp dụng gia cường tấm CFRP tăng lên (từ 2% đến 8%);

(3) Biến dạng hữu hiệu trong cáp suy giảm 18,4% sau khoảng 2400 ngày căng cáp trong dầm. Và sau 2400 ngày căng cáp trong dầm, kết quả cho thấy có sự suy giảm biến dạng lớn nhất trong cáp, với biến dạng cáp lớn nhất của các dầm đều nhỏ hơn biến dạng chảy danh định của cáp xấp xỉ từ 4-8%.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện bởi sự hỗ trợ từ nguồn kinh phí nghiên cứu khoa học cho Đề tài khoa học công nghệ cấp Bộ (Mã số: B2023-MBS-02) của Bộ Giáo dục và Đào tạo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Wu, J., Zhu, Y., & Li, C. (2023). Experimental Investigation of Fatigue Capacity of Bending-Anchored CFRP Cables. *Polymers*, 15(11), 2483. <https://doi.org/10.3390/polym15112483>
- [2] Tung, D. D., Tu, C. V., Phung, H. T. K., & Long, N. M. (2022). Effect of prestressing force on flexural behavior of unbonded prestressed concrete beams strengthened by CFRP sheets. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, 16(1), 1-18. [https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(1\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(1)-01).
- [2] Phan-Vu, P., Tran, D. T., Pham, T. M., Dang, T. D., Ngo-Huu, C., & Nguyen-Minh, L. (2021). Distinguished bond behaviour of CFRP laminates in unbonded post-tensioned reinforced concrete beams versus single-lap shear tests. *Engineering Structures*, 234, 111794.
- [3] Kim, M. S., & Lee, Y. H. (2020). Flexural behavior of posttensioned concrete beams with unbonded high-strength strands. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020.
- [4] Abdel-Jaber, H., & Glisic, B. (2019). Monitoring of prestressing forces in prestressed concrete structures-An overview. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(8), e2374.
- [5] Tran, D. T., Phan-Vu, P., Pham, T. M., Dang, T. D., & Nguyen-Minh, L. (2020). Repeated and post-repeated flexural behavior of unbonded post-tensioned concrete T-beams strengthened with CFRP laminates. *Journal of Composites for Construction*, 24(2), 4019064.
- [6] Abdullah, A. B. M., Rice, J. A., Bhatia, R., Brenkus, N. R., & Hamilton, H. R. (2017). Unbonded Strands as an Alternative for Bonded Strands in Post-Tensioned Bridges: Constructability, Structural Performance, and Monitoring. *Structures Congress 2017*, 506-516.
- [7] Mieszczak, M. (2018). Unbonded prestressing strands and their role in the construction of slender elements of buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 324(1), 12017.

[8] 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.

[9] Nguyen-Minh, L., Phan-Vu, P., Tran-Thanh, D., Phuong Thi Truong, Q., Pham, T. M., Ngo-Huu, C., & Rovňák, M. (2018). Flexural-strengthening efficiency of CFRP laminates for unbonded post-tensioned concrete T-beams. *Engineering Structures*, 166, 1-15.

[10] Reed, C. E., & Peterman, R. J. (2004). Evaluation of Prestressed Concrete Girders Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates. *Journal of Bridge Engineering*, 9(2), 185-192.

[11] Rosenboom, O., Hassan, T. K., & Rizkalla, S. (2007). Flexural behavior of aged prestressed concrete girders strengthened with various FRP systems. *Construction and Building Materials*, 21(4), 764-776.

[12] Cerullo, D., Sennah, K., Azimi, H., Lam, C., Fam, A., & 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.

[13] Kasan, J. L., Harries, K. A., Miller, R., & Brinkman, R. J. (2014). Repair of prestressed-concrete girders combining internal strand splicing and externally bonded CFRP techniques. *Journal of Bridge Engineering*, 19(2), 200-209.

[14] Nguyen, T. T. D., Matsumoto, K., Sato, Y., Asami, I., Tsutsumi, T., & Niwa, J. (2014). Effects of Externally Bonded CFRP Laminates on Flexural Strengthening of Pretensioned Prestressed Concrete Beams Having Ruptured Strands. *Journal of JSCE*, 2(1), 25-38.

[15] Afefy, H. M., Sennah, K., & Cofini, A. (2016). Retrofitting actual-size precracked precast prestressed concrete double-Tee girders using externally bonded CFRP laminates. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(2), 4015020.

[16] Miller, A., Rosenboom, O., & Rizkalla, S. (2006). Fatigue Behavior of Impact Damaged Prestressed Concrete Bridge Girder Repaired With Cfrp Laminates. *7th International Conference on Short and Medium Span Bridges*, 1-10.

[17] Rasheed, H. a., Larson, K. H., & Peterman, R. J. (2006). Analysis and Design Procedure for FRP-Strengthened Prestressed Concrete T-Girders Considering Strength and Fatigue. *Journal of Composites for Construction*, 10(5), 419-432.

[18] ElSafty, A., Graeff, M. K., & Fallaha, S. (2014). Behavior of Laterally Damaged Prestressed Concrete Bridge Girders Repaired with CFRP Laminates Under Static and Fatigue Loading. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(1), 43-59.

[19] Chakrabari, P. R. (2005). Behavior of Un-Bonded Post-Tensioned Beams Repaired and Retrofitted with Composite Materials. *Structures Congress 2005: Metropolis and Beyond*, 1-11.

[20] TR 55 (2012). *Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials*. The Concrete Society, Camberley, UK.