



Nghiên cứu thực nghiệm đánh giá hiệu quả tăng cường sức kháng uốn cho dầm bê tông cốt thép đã bị nứt bằng bê tông cốt lưới dệt carbon với tải trọng được duy trì

Experimental assessment of flexural enhancement in cracked reinforced concrete beams using carbon textile-reinforced concrete under sustained service loading

Nguyễn Huy Cường^{1*}, Trần Duy Long¹, Lê Hoàng Nhân²

¹Trường Đại học Giao thông vận tải.

²Sở Xây dựng Tỉnh An Giang.

Từ khóa: TÓM TẮT

Bê tông cốt lưới dệt carbon
Tăng cường uốn
Cấu hình chữ U
Tải duy trì

Bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm đánh giá hiệu quả tăng cường uốn của dầm bê tông cốt thép (BTCT) đã nứt trước bằng bê tông cốt lưới dệt (BTCLD) carbon trong điều kiện duy trì tải. Ba dầm được thí nghiệm uốn bốn điểm, gồm mẫu đối chứng (F0), mẫu tăng cường hai lớp dạng phẳng (F1) và mẫu một lớp cấu hình chữ U (F2). Hai mẫu F1 và F2 được gây nứt trước ở mức 75% tải trọng cực hạn của mẫu đối chứng và duy trì tải 55% trong suốt quá trình thi công và bảo dưỡng nhằm mô phỏng điều kiện sửa chữa thực tế. Kết quả cho thấy BTCLD carbon cải thiện đáng kể khả năng chịu uốn và kiểm soát vết nứt. Tải trọng phá hoại tăng 45,1% (F1) và 47,2% (F2), trong khi bề rộng vết nứt giảm khoảng 30–50%. Cấu hình chữ U cho hiệu quả phân tán vết nứt tốt hơn, với vết nứt chính được phân tán thành nhiều vết nứt nhỏ hơn. Kết quả khẳng định BTCLD carbon là giải pháp tăng cường uốn hiệu quả trong điều kiện không thể dỡ tải hoàn toàn.

Keywords: ABSTRACT

Textile-reinforced concrete
Carbon fiber
Flexural strengthening
U-shaped configuration
Sustained loading

This paper presents an experimental study on the flexural strengthening of pre-cracked reinforced concrete (RC) beams using carbon textile-reinforced concrete (TRC) under sustained loading conditions. Three beams were tested under four-point bending, including a control specimen (F0), a beam strengthened with two layers of flat TRC (F1), and a beam strengthened with a single-layer U-shaped TRC configuration (F2). The strengthened beams were preloaded to 75% of the ultimate load of the control beam and maintained at 55% during strengthening and curing to simulate realistic repair conditions. The results show that carbon TRC significantly improves both flexural capacity and crack control. The ultimate load increased by 45.1% for F1 and 47.2% for F2, while crack widths were reduced by approximately 30–50%. The U-shaped configuration provided better crack distribution, with primary cracks subdivided into multiple finer cracks. These findings confirm that carbon TRC is an effective strengthening solution when complete unloading is not feasible.

* Nguyễn Huy Cường. Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: nguyenhuycuong@utc.edu.vn

<https://www.doi.org/10.55228/JTST150304>

Ngày nhận bài: 24/02/2026; Ngày nhận bài sửa: 15/04/2026; Ngày chấp nhận đăng: 15/04/2026

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/05/2026

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Trong quá trình khai thác, nhiều kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) xuất hiện vết nứt do tác động của tải trọng lặp lại, suy giảm vật liệu, ăn mòn cốt thép hoặc thay đổi yêu cầu sử dụng. Khi vết nứt phát triển vượt quá giới hạn cho phép, khả năng chịu lực và độ bền lâu dài của kết cấu bị suy giảm đáng kể. Do đó, nhu cầu sửa chữa và tăng cường các cấu kiện BTCT, đặc biệt là dầm chịu uốn, ngày càng trở nên cấp thiết.

Các phương pháp tăng cường truyền thống như dán bản thép, tăng tiết diện hoặc căng ngoài đã được áp dụng rộng rãi. Tuy nhiên, bản thép dán ngoài dễ bị ăn mòn, trong khi giải pháp FRP sử dụng nhựa epoxy mặc dù có ưu điểm nhẹ và cường độ cao nhưng lại tồn tại các hạn chế về khả năng chịu nhiệt, độ bền trong môi trường ẩm và tính tương thích với nền bê tông [1], [2]. Trong bối cảnh đó, bê tông cốt lưới dệt (BTCLD – Textile Reinforced Concrete) đã được phát

triển như một hệ vật liệu composite vô cơ thay thế, gồm lưới sợi liên tục (carbon, thủy tinh, bazan, PBO...) nhúng trong bê tông hạt mịn hoặc vữa gốc xi măng [3], [4].

BTCLD có nhiều ưu điểm nổi bật: tính tương thích cao với bê tông nền, khả năng thi công trên bề mặt ẩm, chịu nhiệt tốt và cho phép khuếch tán hơi nước, nhờ đó cải thiện độ bền lâu dài của kết cấu [5]. Ngoài ra, do lưới sợi được phân bố dày đặc và có mô đun đàn hồi cao, lớp BTCLD thể hiện cơ chế “bắc cầu vết nứt”, góp phần phân tán ứng suất kéo và làm giảm độ mở rộng vết nứt [6]. Các nghiên cứu thực nghiệm trong hơn một thập kỷ qua đã chứng minh hiệu quả của BTCLD trong việc tăng khả năng chịu uốn của dầm và bản BTCT, với mức tăng tải trọng phá hoại dao động từ 20% đến trên 50% tùy theo số lớp lưới và cấu hình tăng cường [7], [8].



Hình 1. Ứng dụng BTCLD để sửa chữa cầu Krumbach ở Vorarlberg (Áo).

Một ví dụ tiêu biểu cho ứng dụng BTCLD để sửa chữa và cải thiện độ bền cho công trình cầu bê tông ở nơi có khí hậu băng, tuyết là dự án sửa chữa công trình cầu Krumbach ở Vorarlberg (Áo). Cầu có chiều dài 120 m, với 3 nhịp dầm BTCT dự ứng lực, đã xuất hiện một số vết nứt có thể quan sát được ở sườn dầm. Cầu được sửa chữa và tăng cường với gần 6000 m² BTCLD lưới sợi các bon, với mục tiêu duy trì quá trình sử dụng thêm 50 năm nữa (Hình 1).

Tuy nhiên, ứng xử phá hoại của dầm tăng cường BTCLD phụ thuộc mạnh vào cơ chế dính bám giữa lớp tăng cường và bê tông nền. Các dạng phá hoại thường gặp bao gồm: kéo tuột sợi khỏi ma trận vữa, bong tách tại mặt tiếp xúc, tách lớp trong BTCLD hoặc kéo đứt lưới sợi [9], [10]. Trong nhiều trường hợp, đặc biệt với cấu hình dán phẳng ở đáy dầm, hiện tượng bong tách tại mép lớp tăng cường chi phối khả năng

chịu lực cuối cùng. Vì vậy, các cấu hình neo bổ sung như bọc chữ U hoặc sử dụng neo cơ học đã được đề xuất nhằm tăng diện tích dính bám và cải thiện khả năng truyền lực [11].

Mặc dù số lượng nghiên cứu về tăng cường uốn bằng BTCLD ngày càng gia tăng, phần lớn các thí nghiệm được thực hiện trên dầm chưa nứt hoặc được tăng cường trong điều kiện không chịu tải. Trong thực tế, việc tháo tải hoàn toàn trước khi sửa chữa là khó khả thi, đặc biệt đối với kết cấu cầu và công trình đang khai thác. Khi đó, dầm đã tồn tại trạng thái nứt và vẫn chịu một phần tải trọng tĩnh trong suốt quá trình thi công và bảo dưỡng. Tình trạng này có thể ảnh hưởng đến khả năng phục hồi độ cứng, cơ chế kích hoạt lưới sợi và hiệu quả dính bám của hệ tăng cường [12].

Một số nghiên cứu gần đây đã bắt đầu xem xét ảnh hưởng của tải duy trì và môi trường xâm thực đến

hiệu quả tăng cường bằng BTCLD, cho thấy lớp lưới sợi vẫn có khả năng kiểm soát vết nứt và cải thiện phân bố ứng suất ngay cả khi kết cấu đã nứt trước [8], [12]. Tuy nhiên, các kết quả còn phân tán và chưa làm rõ sự khác biệt giữa các cấu hình tăng cường, đặc biệt là giữa dạng phẳng và dạng chữ U trong điều kiện dầm đã nứt.

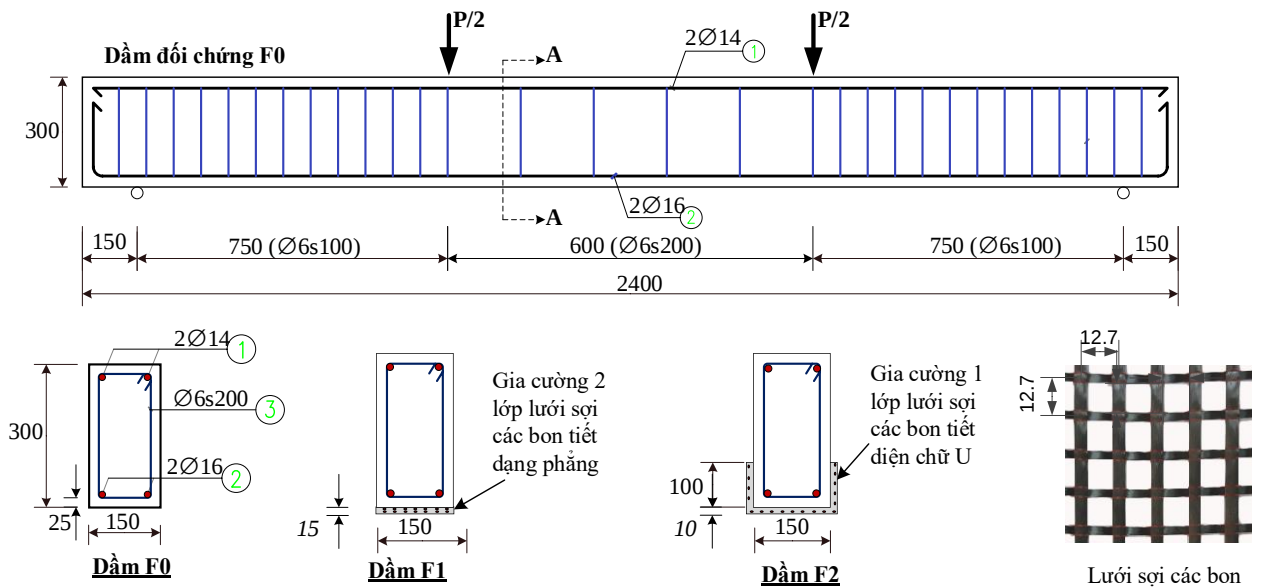
Từ những vấn đề trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá thực nghiệm hiệu quả của BTCLD carbon trong việc tăng cường uốn dầm BTCT đã nứt trước, dưới điều kiện duy trì tải trọng trong quá trình thi công. Hai cấu hình tăng cường được xem xét gồm: lớp BTCLD dạng phẳng và lớp BTCLD dạng chữ U. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ cơ chế làm việc của BTCLD trong điều kiện sửa chữa thực tế, đồng thời

cung cấp cơ sở tham khảo cho thiết kế và ứng dụng trong các công trình xây dựng tại Việt Nam.

2. Nghiên cứu thực nghiệm

2.1. Cấu tạo mẫu thí nghiệm

Chương trình thí nghiệm được thực hiện trên ba dầm bê tông cốt thép dạng giản đơn, có cùng cấu tạo và kích thước hình học. Mỗi dầm có chiều dài tổng thể 3000 mm, tiết diện chữ nhật kích thước 150 mm × 300 mm (rộng × cao), với chiều dài nhịp tính toán 2700 mm (Hình 2). Các dầm được thiết kế nhằm đảm bảo phá hoại xảy ra theo cơ chế uốn, phục vụ mục tiêu đánh giá hiệu quả tăng cường chịu uốn bằng bê tông cốt lưới dệt (BTCLD).



Hình 2. Cấu tạo ba dầm thí nghiệm.

Thí nghiệm uốn bốn điểm được lựa chọn để tạo vùng mô men uốn thuần túy tại khu vực giữa nhịp. Khoảng cách từ gối tựa đến điểm đặt tải là 850 mm, tạo nên vùng mô men uốn thuần túy dài 1000 mm ở giữa dầm. Tỷ số a/d (chiều dài chịu cắt trên chiều cao có hiệu) xấp xỉ 3,0, đủ lớn để loại trừ khả năng phá hoại cắt và đảm bảo ứng xử uốn chi phối.

Hệ cốt thép dọc gồm hai thanh thép đường kính 16 mm bố trí ở thớ dưới chịu kéo và hai thanh thép đường kính 14 mm bố trí ở thớ trên chịu nén. Hàm lượng cốt thép chịu uốn tương ứng khoảng 1,15%. Các thanh cốt thép dọc được uốn neo tại hai đầu nhằm đảm bảo điều kiện dính bám và truyền lực đầy đủ. Cốt đai đường kính 6 mm được bố trí dày trong

vùng chịu cắt để ngăn ngừa phá hoại cắt sớm, tạo điều kiện đánh giá chính xác ứng xử chịu uốn của dầm.

Ba mẫu dầm được ký hiệu lần lượt là F0, F1 và F2. Trong đó, F0 là mẫu đối chứng không tăng cường; F1 là mẫu được tăng cường bằng hai lớp BTCLD dạng phẳng bố trí ở đáy dầm; và F2 là mẫu được tăng cường bằng một lớp BTCLD theo cấu hình chữ U. Dù có khác biệt về số lớp lưới, nhưng diện tích lưới sợi sử dụng trong 2 phương án này là xấp xỉ nhau. Hai mẫu F1 và F2 đều được gây nứt trước khi tiến hành tăng cường nhằm mô phỏng điều kiện sửa chữa thực tế.

Lớp tăng cường BTCLD bao gồm lưới sợi carbon hai phương nhúng trong bê tông hạt mịn. Bê tông nền

sử dụng cho các dầm có cường độ nén trung bình 42,4 MPa, được xác định trên mẫu trụ tròn $\varnothing 150 \times 300$ mm ở tuổi 28 ngày. Cốt thép dọc $\varnothing 14$ và $\varnothing 16$ có giới hạn chảy trung bình lần lượt là 453,7 MPa và 459,2 MPa, trong khi cốt thép đai $\varnothing 6$ có giới hạn chảy khoảng 372,1 MPa.

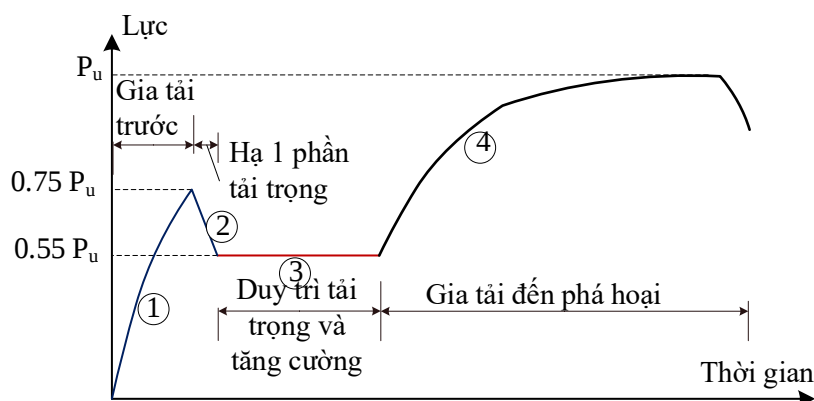
Bê tông hạt mịn dùng cho lớp BTCLD được chế tạo từ xi măng Portland PC40, cát mịn có kích thước hạt tối đa 0,63 mm, tro bay, phụ gia siêu dẻo và phụ gia polyme nhằm cải thiện tính công tác và độ bám dính. Kết quả thí nghiệm trên mẫu lăng trụ $40 \times 40 \times 160$ mm ở tuổi 28 ngày cho thấy cường độ chịu nén đạt 52,2 MPa và cường độ kéo uốn đạt 6,3 MPa.

Lưới sợi carbon sử dụng là loại lưới trục hướng dệt từ sợi carbon cường độ cao, có diện tích mặt cắt $141,02 \text{ mm}^2/\text{m}$, khoảng cách bó sợi theo hai phương $10 \times 18 \text{ mm}$. Mô đun đàn hồi của sợi khoảng 185 GPa và cường độ chịu kéo đạt xấp xỉ 2700 MPa. Lưới được phủ polymer gốc styrene nhằm tăng cường khả năng dính bám với bê tông hạt mịn và cải thiện cơ chế truyền lực giữa sợi và ma trận.

Đối với mẫu F1, lớp BTCLD được thi công dạng phẳng ở đáy dầm, phủ toàn bộ vùng mô men uốn thuần túy nhằm tăng cường khả năng chịu kéo ở thớ dưới. Trong khi đó, mẫu F2 được bố trí BTCLD theo tiết diện chữ U, với lớp tăng cường bao phủ đáy và kéo lên hai mặt bên dầm khoảng 100 mm. Cấu hình chữ U này không chỉ nhằm tăng diện tích tiếp xúc và cải thiện điều kiện neo của lớp tăng cường, mà còn cho phép khảo sát ảnh hưởng của hình học tăng cường đến cơ chế phân tán vết nứt và ứng xử chịu uốn của dầm sau tăng cường.

2.2. Quy trình thí nghiệm

Quy trình thí nghiệm được triển khai qua bốn giai đoạn chính nhằm mô phỏng đầy đủ quá trình làm việc của dầm từ khi chế tạo, gây nứt trước, tăng cường đến khi phá hoại (Hình 3). Trình tự này cho phép đánh giá một cách hệ thống ảnh hưởng của tải duy trì và cấu hình tăng cường đến ứng xử chịu uốn của dầm.



Hình 3. Các giai đoạn thí nghiệm.

Trong giai đoạn thứ nhất, lồng cốt thép được lắp dựng hoàn chỉnh bên ngoài trước khi đặt vào ván khuôn. Các lá điện trở đo biến dạng (strain gauge) được gắn tại những vị trí quan trọng để theo dõi ứng xử của vật liệu trong quá trình gia tải. Cụ thể, một cảm biến được dán trên thanh cốt thép dọc chịu kéo tại giữa nhịp, một cảm biến khác được gắn lên một thanh cốt đai trong vùng chịu cắt, và một cảm biến được bố trí trên bề mặt bê tông vùng nén tại giữa nhịp. Ba dầm được đúc đồng thời nhằm đảm bảo tính đồng nhất về vật liệu và điều kiện thi công, sau đó được bảo dưỡng ẩm tiêu chuẩn đến tuổi 28 ngày trước khi tiến hành thí nghiệm.

Giai đoạn thứ hai là gia tải gây nứt trước. Tất cả các dầm được thí nghiệm uốn bốn điểm theo phương pháp kiểm soát lực (Hình 4), với bước tăng tải nhỏ khoảng 1 kN nhằm theo dõi chính xác sự hình thành và phát triển vết nứt. Trong suốt quá trình thí nghiệm, hai thông số chính được ghi nhận liên tục gồm tải trọng tác dụng (đo bằng loadcell) và độ võng giữa nhịp (đo bằng LVDT). Mẫu đối chứng F0 được gia tải đến khi phá hoại hoàn toàn để xác định tải trọng cực hạn P_u , xấp xỉ 100 kN. Giá trị này được sử dụng làm cơ sở thiết lập mức tải gây nứt trước cho các mẫu tăng cường.

Hai mẫu F1 và F2 được gia tải đến 75% P_u nhằm tạo hệ thống vết nứt uốn phát triển đầy đủ nhưng vẫn đảm bảo cốt thép chịu kéo chưa chảy. Việc lựa chọn mức tải này dựa trên nhận định rằng trong điều kiện khai thác, kết cấu thường xuất hiện vết nứt ở trạng thái giới hạn sử dụng với bề rộng khoảng 0,3–0,4 mm,

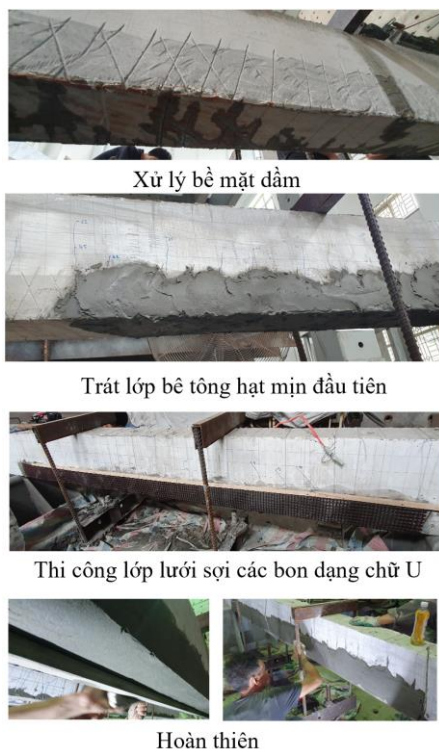
tương ứng với ứng suất trong cốt thép chịu kéo xấp xỉ $0,6f_y$. Do đó, mức $0,75 P_u$ (với P_u tương ứng khi cốt thép đạt trạng thái chảy) được xem là đủ để hình thành hệ vết nứt điển hình của cầu kiện đã bị suy giảm nhưng chưa mất khả năng làm việc.



Hình 4. Gia tải gây nứt, và duy trì tải trọng trong quá trình thi công sửa chữa dầm.

Sau khi đạt mức tải này, tải trọng được giảm xuống 55% P_u và duy trì không đổi trong suốt quá trình thi công và bảo dưỡng. Mức tải duy trì này nhằm mô phỏng điều kiện sửa chữa thực tế, trong đó kết

cấu thường được giảm tải một phần (tĩnh tải và hoạt tải) nhưng không thể tháo tải hoàn toàn, dẫn đến trạng thái ứng suất trong cốt thép giảm xuống mức làm việc điển hình.



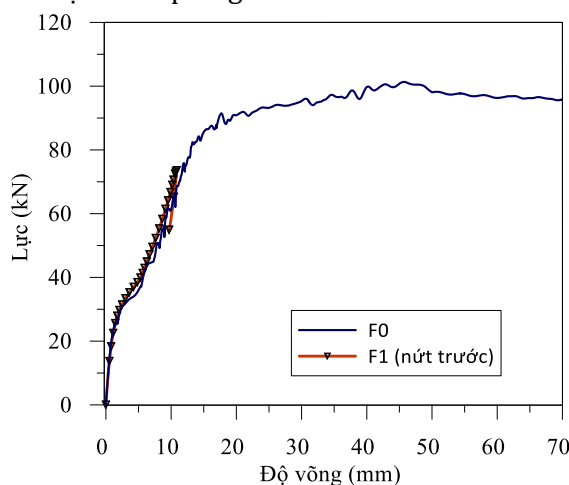
Hình 5. Quá trình thi công.

Giai đoạn thứ ba là thi công tăng cường BTCLD trong điều kiện dầm vẫn chịu tải duy trì 55% P_u . Lớp tăng cường được thi công theo hướng dẫn kỹ thuật

ACI 549.4R-20. Trước tiên, bề mặt bê tông nền được làm sạch và tạo nhám để tăng cường khả năng dính bám, sau đó được làm ẩm trước khi trát. Một lớp bê

tông hạt mịn dày khoảng 4–5 mm được trát lên bề mặt, tiếp theo là đặt lưới sợi carbon và miết nhẹ để đảm bảo sự tiếp xúc và thấm nhập đầy đủ của vữa vào các bó sợi. Lớp bê tông hạt mịn tiếp theo được phủ lên khi lớp trước còn ở trạng thái “tươi”, đảm bảo liên kết tốt giữa các lớp (Hình 5). Đối với mẫu F1, hai lớp lưới được bố trí nối tiếp theo phương dọc dầm, tạo thành lớp tăng cường dạng phẳng ở đáy. Đối với mẫu F2, lưới được bọc liên tục theo tiết diện chữ U, bao gồm đáy và hai mặt bên dầm. Sau khi hoàn thiện, các dầm tiếp tục được bảo dưỡng trong 28 ngày trong điều kiện vẫn duy trì tải 55% P_u nhằm phản ánh sát thực tế sửa chữa khi không thể tháo tải hoàn toàn.

Giai đoạn cuối cùng là gia tải đến phá hoại. Sau thời gian bảo dưỡng, các dầm được gia tải trở lại theo quy trình uốn bốn điểm tương tự giai đoạn gây nứt trước. Hệ thống đo bao gồm loadcell để ghi nhận tải trọng, LVDT để đo độ võng giữa nhịp và các strain gauge để theo dõi biến dạng của cốt thép và bê tông. Sự phát triển, phân bố và bề rộng vết nứt được quan sát và đo đạc bằng kính đo vết nứt tại mỗi cấp tải giữ.



Hình 6. Lực – chuyển vị của dầm F0 và dầm F1 được gây nứt trước.

Hai dầm tăng cường F1 và F2 thể hiện sự cải thiện rõ rệt về khả năng chịu uốn. Ở giai đoạn đầu của quá trình gia tải lại sau bảo dưỡng, độ cứng ban đầu của F1 và F2 thấp hơn một chút so với F0 do ảnh hưởng của trạng thái nứt trước đó. Tuy nhiên, khi tải trọng vượt qua mức tải duy trì và lớp BTCLD bắt đầu tham gia chịu kéo tích cực, độ cứng của hai dầm tăng cường tăng lên đáng kể so với dầm đối chứng. Mẫu F1 đạt tải trọng phá hoại khoảng 147,2 kN, tương đương mức tăng khoảng 45,1% so với F0. Mẫu F2 đạt tải trọng cực hạn cao hơn, khoảng 149,5 kN, tương ứng mức tăng 47,2%. Điều này cho thấy cấu hình chữ U dù sử

Dữ liệu thu được trong giai đoạn này là cơ sở để phân tích sự cải thiện khả năng chịu uốn, độ cứng sau nứt và cơ chế phá hoại của các dầm sau tăng cường.

3. Kết quả thí nghiệm

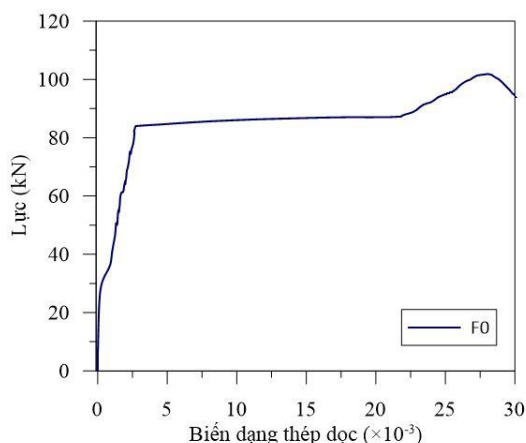
3.1 Dầm đối chứng F0

Quan hệ lực – chuyển vị giữa nhịp của ba dầm thể hiện rõ sự khác biệt về độ cứng và khả năng chịu lực sau tăng cường. Đối với mẫu đối chứng F0, đường cong lực – chuyển vị gồm ba giai đoạn điển hình: (i) giai đoạn đàn hồi tuyến tính trước nứt, (ii) giai đoạn sau nứt với độ cứng suy giảm dần do sự hình thành và phát triển vết nứt uốn, và (iii) giai đoạn sau khi cốt thép chịu kéo chảy, chuyển vị tăng nhanh cho đến khi bê tông vùng nén bị nghiền và dầm phá hoại (Hình 6). Tải trọng nứt ban đầu của F0 vào khoảng 28 kN, trong khi tải trọng phá hoại đạt xấp xỉ 101,5 kN. Sau khi cốt thép chảy (khoảng 83 kN), độ võng tăng mạnh, phản ánh sự suy giảm đáng kể độ cứng tổng thể của tiết diện.

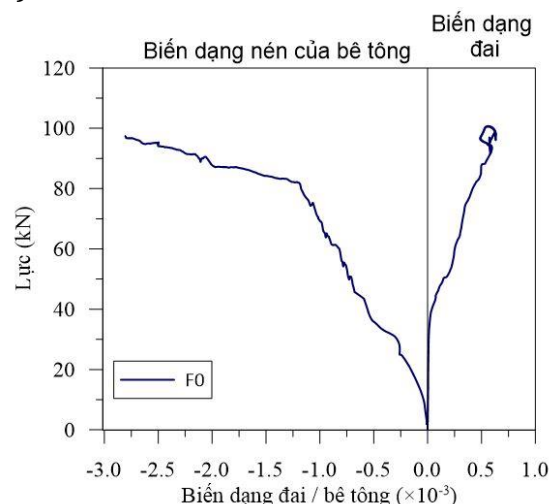
dụng 1 lớp lưới sợi nhưng mang lại hiệu quả tăng cường tốt hơn so với cấu hình phẳng hai lớp.

Về biến dạng kéo của cốt thép dọc tại giữa nhịp, dầm F0 cho thấy sự gia tăng biến dạng tương đối tuyến tính đến khi đạt giới hạn chảy (Hình 7-a). Sau điểm này, biến dạng tăng nhanh trong khi tải trọng tăng không đáng kể, phản ánh quá trình chảy dẻo của cốt thép và sự phân phối lại nội lực trong tiết diện. Tại thời điểm phá hoại, biến dạng kéo của cốt thép vượt quá giới hạn chảy đáng kể, trong khi bê tông vùng nén đạt biến dạng tới hạn (Hình 7-b).

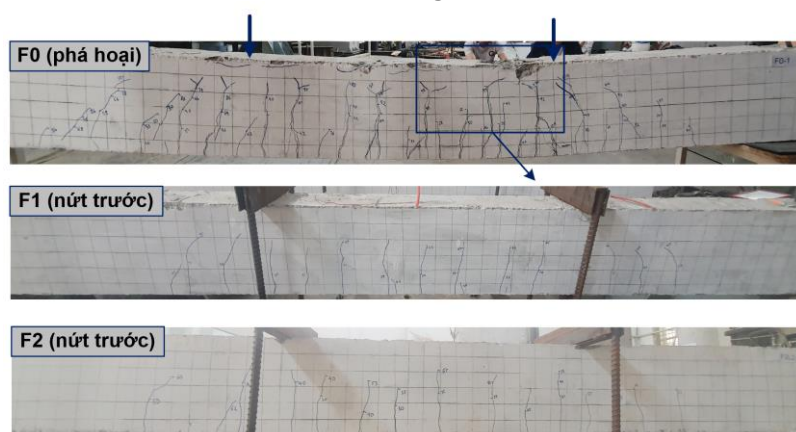
a)



b)



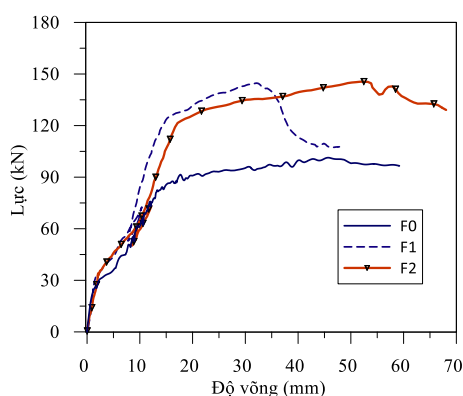
Hình 7. Lực biến dạng của dầm F0. (a) Lực biến dạng thép dọc, (b) Lực – biến dạng thép đai/ biến dạng nén của bê tông.



Hình 8. Cấu trúc vết nứt dầm F0 lúc bị phá hoại, và dầm F1, F2 khi được gia tải gây nứt trước.

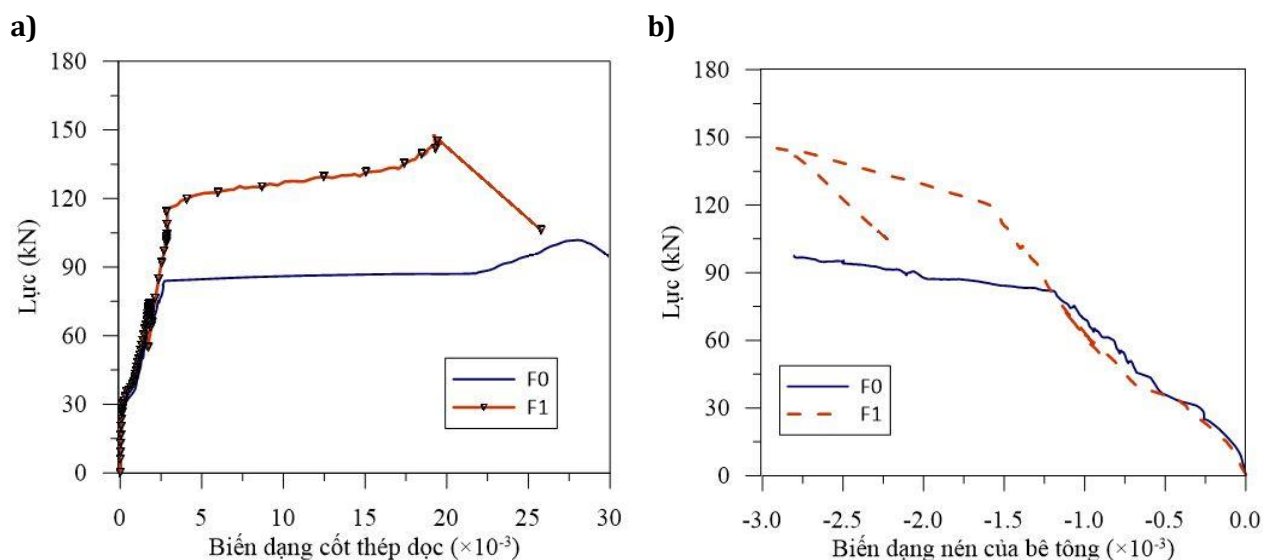
Ở dầm F0, các vết nứt uốn tập trung chủ yếu tại vùng mô men lớn nhất, khoảng cách vết nứt tương đối thưa và bề rộng vết nứt tăng nhanh khi tải tăng (Hình 8). Vết nứt chính giữa nhịp phát triển rộng và kéo dài về phía vùng nén khi tiến gần tới phá hoại. Dạng phá hoại đặc trưng là nghiền bê tông vùng nén kết hợp với biến dạng dẻo lớn của cốt thép.

3.2 Dầm được tăng cường F1 và F2



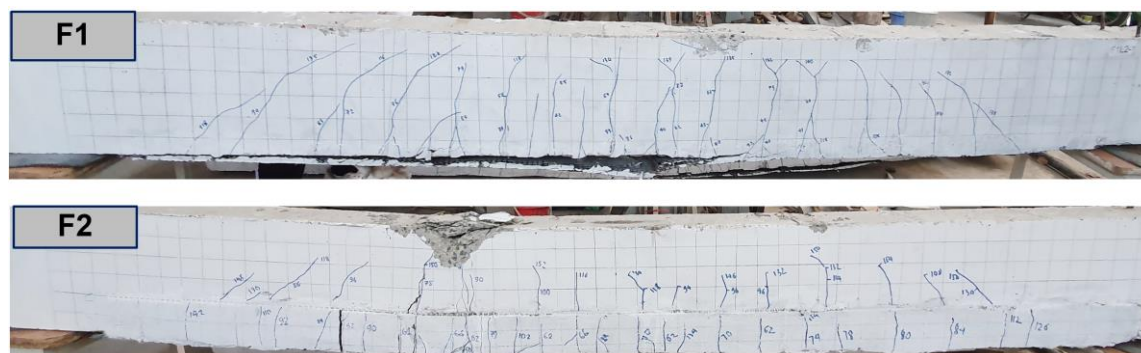
Hình 9. Lực – chuyển vị của ba dầm được thí nghiệm.

Hình 9 trình bày các đường cong quan hệ lực – chuyển vị của ba dầm được thí nghiệm. Hình 10 so sánh quan hệ lực – biến dạng của dầm F1 được tăng cường với dầm đối chứng F0. Đối với dầm F1 và F2, biến dạng kéo của cốt thép phát triển chậm hơn trong cùng mức tải so với F0. Điều này chứng tỏ một phần nội lực kéo đã được chuyển sang lớp BTCLD. Ở mẫu F1, cốt thép vẫn đạt trạng thái chảy trước khi dầm phá hoại, tuy nhiên giá trị tải trọng tại thời điểm chảy cao hơn đáng kể so với F0. Điều này cho thấy lớp BTCLD dạng phẳng đã làm tăng khả năng chịu kéo tổng hợp của tiết diện và trì hoãn quá trình chảy của cốt thép. Ở mẫu F2, sự gia tăng tải trọng tại thời điểm cốt thép bắt đầu chảy còn rõ rệt hơn. Đồng thời, sự xuất hiện phá hoại do kéo đứt lưới sợi cho thấy lớp BTCLD đã được huy động gần như toàn bộ khả năng chịu kéo trước khi mất khả năng làm việc.



Hình 10. So sánh quan hệ lực – biến dạng của dầm F1 được tăng cường với dầm đối chứng F0. (a) Lực – biến dạng kéo của cốt thép dọc, (b) Lực – biến dạng nén của bê tông.

Quan sát hệ thống vết nứt cho thấy sự khác biệt đáng kể giữa ba mẫu, như thể hiện ở Hình 11. Ở mẫu F1, hệ vết nứt phân bố dày hơn so với F0 và bề rộng từng vết nứt nhỏ hơn đáng kể tại cùng mức tải. Khi tải tăng, lớp BTCLD ở đáy dầm thể hiện cơ chế bắc cầu vết nứt, làm hạn chế sự mở rộng cục bộ của các vết nứt chính. Tuy nhiên, tại tải trọng gần cực hạn, xuất hiện hiện tượng bong tách cục bộ lớp BTCLD khỏi bê tông nền tại một số vị trí, đặc biệt gần mép lớp tăng cường và vùng chịu tải. Sự bong tách này làm giảm khả năng huy động toàn bộ cường độ kéo của lưới sợi và chi phối dạng phá hoại của mẫu F1.



Hình 11. Cấu trúc vết nứt dầm F1 và F2 lúc bị phá hoại.

Mẫu F2 với cấu hình chữ U cho thấy hiệu quả phân tán vết nứt nổi bật. Khi vết nứt chính hình thành và truyền đến lớp BTCLD, các bó sợi được neo qua hai mặt bên đã góp phần phân phối lại ứng suất kéo theo phương dọc dầm. Kết quả là mỗi vết nứt chính được phân tách thành nhiều vết nứt thứ cấp nhỏ hơn, với bề rộng giảm rõ rệt. Khoảng cách vết nứt nhỏ và tương đối đồng đều trên vùng mô men thuần túy. Đáng chú ý, hiện tượng bong tách lớp tăng cường hầu như không quan sát thấy trước khi đạt tải cực hạn; thay vào đó, phá hoại xảy ra do kéo đứt lưới sợi kết hợp với nghiền bê tông vùng nén. Điều này chứng tỏ

cấu hình chữ U đã cải thiện đáng kể điều kiện neo và giảm tập trung ứng suất tại mặt tiếp xúc.

Tổng hợp các kết quả cho thấy BTCLD carbon có khả năng nâng cao đáng kể khả năng chịu uốn và cải thiện cơ chế làm việc sau nứt của dầm BTCT đã nứt trước. Cấu trúc tăng cường không chỉ ảnh hưởng đến mức tăng tải trọng phá hoại mà còn quyết định cơ chế phân tán vết nứt và dạng phá hoại cuối cùng của dầm. Trong nghiên cứu này, cấu trúc chữ U thể hiện hiệu quả toàn diện hơn về khả năng chịu lực, kiểm soát vết nứt và huy động tối đa cường độ lưới sợi.

4. Phân tích và thảo luận

Kết quả thí nghiệm ở Bảng 1 cho thấy sự chênh lệch về tải trọng phá hoại giữa hai cấu hình tăng cường F1 (45,1%) và F2 (47,2%) là tương đối nhỏ, mặc dù hình học bố trí và số lớp lưới sợi có sự khác biệt đáng kể. Điều này có thể được lý giải trên cơ sở cơ chế truyền lực và điều kiện neo của lớp BTCLD. Đối với mẫu F1, mặc dù sử dụng hai lớp lưới ở đáy dầm, nhưng hiệu quả chịu kéo bị hạn chế bởi hiện tượng bong tách cục bộ tại mép lớp tăng cường, làm giảm khả năng huy động toàn bộ cường độ của lưới sợi. Ngược lại, ở mẫu F2, cấu hình chữ U giúp tăng diện tích tiếp xúc và cải thiện điều kiện neo thông qua hai mặt bên, từ đó hạn chế tập trung ứng suất và cho phép huy động hiệu quả hơn khả năng chịu kéo của lưới sợi. Do đó, dù chỉ sử dụng một lớp lưới, mẫu F2 vẫn đạt khả năng chịu lực tương đương, thậm chí nhỉnh hơn so với mẫu F1.

Bảng 1. Tổng hợp kết quả thí nghiệm.

Dầm	Lực lớn nhất (kN)	Mức tăng (%)	Dạng phá hoại
F0	101,5	–	Bê tông vùng nén bị ép vỡ, cốt thép dọc bị kéo chảy
F1	147,2	+45,1%	Bê tông vùng nén bị ép vỡ, lớp BTCLD bị bong tách, cốt thép dọc bị kéo chảy
F2	149,5	+47,2%	Bê tông vùng nén bị ép vỡ, lưới sợi bị kéo đứt, cốt thép dọc bị kéo chảy

Ngoài ra, kết quả cũng cho thấy sự tham gia chịu lực của lớp BTCLD không xảy ra ngay từ đầu mà chỉ được “kích hoạt” rõ rệt sau khi tải trọng vượt qua mức tải duy trì. Hiện tượng này có thể được giải thích bởi trạng thái nứt sẵn có của dầm trước khi gia cường. Khi tải trọng còn nằm trong khoảng tải duy trì ($\approx 55\% P_u$), các vết nứt hiện hữu chưa phát triển đáng kể, dẫn đến biến dạng tương đối nhỏ tại vùng kéo và lớp BTCLD chưa được huy động đầy đủ. Khi tải trọng tăng vượt ngưỡng này, các vết nứt mở rộng nhanh hơn, làm gia tăng biến dạng kéo và kích hoạt cơ chế bắc cầu vết nứt của lưới sợi, từ đó đóng góp đáng kể vào khả năng chịu lực và độ cứng sau nứt của dầm.

5. Kết luận

Nghiên cứu thực nghiệm đã đánh giá hiệu quả tăng cường uốn dầm bê tông cốt thép đã nứt trước bằng bê tông cốt lưới dệt (BTCLD) carbon với hai cấu hình khác nhau: dạng phẳng hai lớp (F1) và dạng chữ U một lớp (F2). Trên cơ sở phân tích quan hệ lực – chuyển vị, biến dạng cốt thép và đặc trưng vết nứt, có thể rút ra các kết luận chính sau:

Tăng cường BTCLD làm tăng đáng kể khả năng chịu uốn của dầm đã nứt trước. So với dầm đối chứng F0 có tải trọng phá hoại xấp xỉ 101,5 kN, dầm F1 đạt tải trọng phá hoại khoảng 147,2 kN, tương đương mức tăng khoảng 45,1% so với F0. Tương tự, dầm F2 đạt tải trọng cực hạn cao hơn, khoảng 149,5 kN, tương ứng mức tăng 47,2%.

Lớp BTCLD cải thiện đáng kể độ cứng sau nứt và trì hoãn quá trình chảy của cốt thép. Ở cùng mức tải trọng, biến dạng kéo của cốt thép trong các dầm F1 và F2 thấp hơn so với F0, chứng tỏ một phần nội lực kéo đã được chuyển sang lớp lưới carbon.

Cấu hình tăng cường ảnh hưởng trực tiếp đến cơ chế phá hoại. Dầm F1 phá hoại chủ yếu do nghiền bê tông vùng nén kết hợp bong tách cục bộ lớp BTCLD tại mặt tiếp xúc. Trong khi đó, dầm F2 xuất hiện phá hoại do kéo đứt lưới sợi sau khi bê tông vùng nén bị nghiền, cho thấy lớp tăng cường đã được huy động gần như toàn bộ cường độ chịu kéo. Điều này phản ánh điều kiện neo và truyền lực của cấu hình chữ U hiệu quả hơn so với cấu hình phẳng.

Hiệu quả kiểm soát vết nứt được cải thiện rõ rệt sau tăng cường. So với dầm đối chứng, bề rộng vết nứt lớn nhất của dầm F1 giảm khoảng 30–50% tại cùng mức tải, trong khi dầm F2 cho thấy khả năng phân tán vết nứt vượt trội, với mỗi vết nứt chính được chia thành 5–8 vết nứt thứ cấp có bề rộng nhỏ hơn và phân bố đều hơn. Cấu hình chữ U giúp giảm tập trung ứng suất tại mép lớp tăng cường và tăng khả năng bắc cầu vết nứt.

Tăng cường trong điều kiện duy trì tải không làm suy giảm khả năng chịu lực cuối cùng. Mặc dù hai dầm F1 và F2 được gây nứt trước ở mức 75% P_u và duy trì tải 55% P_u trong suốt quá trình thi công và bảo dưỡng, tải trọng phá hoại cuối cùng vẫn tăng đáng kể so với dầm đối chứng. Điều này cho thấy BTCLD carbon có thể phát huy hiệu quả ngay cả trong điều

kiện sửa chữa thực tế khi không thể tháo tải hoàn toàn.

Tuy nhiên, do số lượng mẫu còn hạn chế, các kết luận rút ra chủ yếu mang tính xu hướng và cần được kiểm chứng thêm bằng các nghiên cứu với quy mô mẫu lớn hơn trong thời gian tới.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Nguyễn Huy Cường: Phương pháp, Phân tích chính thức, Điều tra, Phản hồi ý kiến phản biện, Viết – bản thảo gốc. **Trần Duy Long:** Thực hiện thí nghiệm, Phân tích dữ liệu, Điều tra, Viết – bản thảo gốc. **Lê Hoàng Nhân:** Phân tích dữ liệu, chỉnh sửa bản thảo.

Tài liệu tham khảo

- [1] T. Triantafyllou, *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, Woodhead Publishing, 2016.
- [2] S. M. Raoof, L. N. Koutas, and D. A. Bournas, "Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams," *Construction and Building Materials*, vol. 151, pp. 279–291, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.023.
- [3] A. Peled, B. Mobasher, and A. Bentur, *Textile Reinforced Concrete*, 1st ed. CRC Press, 2017. doi: 10.1201/9781315119151.
- [4] W. Brameshuber, *Textile Reinforced Concrete – State of the Art*, Report of RILEM TC 201-TRC, RILEM Publications, 2006.
- [5] ACI Committee 549, *ACI 549.4R-20: Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Systems*, American Concrete Institute, 2020.
- [6] [1] C. G. Papanicolaou and I. C. Papantoniou, "Mechanical Behavior of Textile Reinforced Concrete (TRC) / Concrete Composite Elements," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 35–47, Feb. 2010, doi: 10.3151/jact.8.35.
- [7] A. D'Ambrisi and F. Focacci, "Flexural Strengthening of RC Beams with Cement-Based Composites," *Journal of Composites for Construction*, vol. 15, no. 5, pp. 707–720, Oct. 2011, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000218.

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Các tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

1st Nguyen Huy Cuong*. *University of Transport and Communications*

2nd Tran Duy Long. *University of Transport and Communications*

3rd Le Hoang Nhan. *An Giang Provincial Department of Construction*

*Corresponding author:

nguyenhuycuong@utc.edu.vn

- [8] S. Weiland, *Flexural Strengthening of RC Structures by Textile Reinforced Concrete*, PhD Dissertation, TU Dresden, 2009.
- [9] T. D'Antino, F. Focacci, L. H. Sneed, and C. Carloni, "Relationship between the effective strain of PBO FRCM-strengthened RC beams and the debonding strain of direct shear tests," *Engineering Structures*, vol. 216, p. 110631, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110631.
- [10] L. Ombres, "Flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with a cement based high strength composite material," *Composite Structures*, vol. 94, no. 1, pp. 143–155, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.compstruct.2011.07.008.
- [11] A. Brückner, R. Ortlepp, and M. Curbach, "Anchoring of shear strengthening for T-beams made of textile reinforced concrete (TRC)," *Materials and Structures*, vol. 41, no. 2, pp. 407–418, Mar. 2008, doi: 10.1617/s11527-007-9254-9.
- [12] S. Yin, Y. Yu, and M. Na, "Flexural properties of load-holding reinforced concrete beams strengthened with textile-reinforced concrete under a chloride dry-wet cycle," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 14, p. 1558925019845902, Jan. 2019, doi: 10.1177/1558925019845902.