

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM HIỆU QUẢ GIA CƯỜNG KHÁNG UỐN CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP BỊ ĂN MÒN BẰNG TẦM SỢI COMPOSITE CFRP

Trần Hoài Anh^{a,b}, Nguyễn Hoàng Giang^{b,*}, Nguyễn Ngọc Tân^b

^a Cục Giám định nhà nước về công trình xây dựng, Bộ Xây dựng,
số 37 Lê Đại Hành, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^b Khoa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng,
số 55 Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 15/12/2020, Sửa xong 21/01/2021, Chấp nhận đăng 25/01/2021

Tóm tắt

Ăn mòn cốt thép là một trong những nguyên nhân chính gây ra những hư hỏng, giảm khả năng chịu lực cũng như tuổi thọ của các công trình thực tế. Bài báo trình bày các kết quả thực nghiệm thu được trên sáu dầm BTCT có các kích thước $150 \times 200 \times 2200$ mm, trong đó bốn dầm bị gia tốc ăn mòn bằng phương pháp điện hóa. Các dầm ăn mòn có mức độ ăn mòn cốt thép trung bình trong khoảng từ 9% đến 10% dựa trên khối lượng kim loại bị mất đi do ăn mòn. Các dầm thí nghiệm được chia làm ba nhóm mẫu, mỗi nhóm gồm hai dầm có cùng trạng thái như sau: (i) nhóm dầm đối chứng, (ii) nhóm dầm ăn mòn, không gia cường, (iii) nhóm dầm gia cường bằng phương pháp dán tấm sợi CFRP. Mỗi quan hệ giữa tải trọng và độ võng của từng dầm đã được xác định thông qua thí nghiệm uốn bốn điểm. Những kết quả thu được cho phép phân tích ứng xử uốn của dầm dưới tác động của quá trình ăn mòn cốt thép do xâm nhập của các ion clorua và xác định hiệu quả gia cường kháng uốn bằng phương pháp dán tấm sợi CFRP đối với dầm ăn mòn.

Từ khóa: dầm bê tông cốt thép; ứng xử uốn; ăn mòn cốt thép; tấm sợi CFRP; gia cường.

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE FLEXURAL STRENGTHENING OF CORRODED RC BEAMS USING EXTERNALLY CFRP SHEET

Abstract

The steel corrosion is one of the major reasons that causes damages and decrease in the performance and the service life of existing structures. This paper presents the experimental results obtained on a series of six reinforced concrete beams with the dimensions of $150 \times 200 \times 2200$ mm, in which four beams were corroded using an accelerated corrosion method. The corroded beams had degrees of corrosion ranging from 9% to 10% on average by mass loss. These experimental beams were divided into three sample groups: (i) the control beams, (ii) the corroded beams without strengthening, (iii) the corroded beams strengthened with externally CFRP sheet. The relationship between load and deflection was determined for each beam through a four-point bending test. The obtained results allow analyzing the flexural behavior of reinforced concrete beams attacked by chloride ions and to determine the flexural strengthening of corroded beams using an externally CFRP sheet.

Keywords: reinforced concrete beam; flexural behavior; steel corrosion; CFRP sheet; strengthening.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15\(1V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15(1V)-01) © 2021 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: giangnh@nuce.edu.vn (Giang, N. H.)

1. Mở đầu

Ăn mòn cốt thép là một trong những nguyên nhân quan trọng gây ra nhiều hư hỏng và xuống cấp trên các công trình bê tông cốt thép (BTCT). Đặc biệt, quá trình ăn mòn thường diễn ra nhanh hơn dự kiến đối với các công trình làm việc trong môi trường biển và ven biển do sự xâm nhập của các ion clorua tồn tại trong nước biển hoặc khuếch tán trong không khí. Sự tấn công của ion clorua vào trong kết cấu, làm thay đổi điều kiện môi trường của lớp bê tông bảo vệ, dẫn đến thay đổi lớp màng thụ động bảo vệ cốt thép và thúc đẩy quá trình ăn mòn diễn ra. Đặc trưng của ăn mòn do xâm nhập ion clorua là sự xuất hiện của các điểm ăn mòn cục bộ (pitting corrosion) dọc theo chiều dài thanh thép. Trên kết cấu công trình bị ăn mòn, những hư hỏng thường gặp đó là: lớp bê tông bảo vệ bị nứt, thậm chí bị bong tách hoàn toàn do sự trương nở thể tích của các sản phẩm ăn mòn; diện tích tiết diện của cốt thép bị suy giảm và biến động do hiện tượng ăn mòn điểm. Những hư hỏng này không chỉ ảnh hưởng đến tính thẩm mỹ của công trình, mà dẫn đến sự suy giảm khả năng chịu lực, tính ổn định và độ bền vững của công trình theo thời gian. Hơn nữa, kinh nghiệm của các nước trên thế giới chỉ ra rằng các công việc bảo trì, sửa chữa và gia cường kết cấu công trình bị ăn mòn cốt thép đòi hỏi nguồn tài chính rất lớn và ngày càng tăng lên do số lượng lớn công trình xây dựng cũ [1].

Trên thế giới, sự xuống cấp của các công trình BTCT trong môi trường biển đã bắt đầu được điều tra, khảo sát kể từ những năm 1950 [2, 3]. Kể từ đó đến nay, các nghiên cứu về ăn mòn kim loại trong bê tông và ứng xử cơ học của kết cấu BTCT bị ăn mòn luôn luôn là một chủ đề được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu. Phần lớn nghiên cứu về chủ đề này đã được thực hiện ở Trung Quốc, Pháp, Nhật Bản, Ý và một số nước khác [4]. Nghiên cứu thực nghiệm trên kết cấu ăn mòn được thực hiện dựa trên ba phương pháp chính, đó là: (i) cấu kiện bị ăn mòn trong thời gian ngắn bằng thí nghiệm gia tốc ăn mòn [5, 6]; (ii) cấu kiện bị ăn mòn trong thời gian dài dưới tác động của môi trường nhân tạo mô tả giống như tự nhiên [7, 8]; (iii) cấu kiện được lấy từ một công trình thực tế bị ăn mòn trong điều kiện khí hậu tự nhiên [9]. Trong đó, phương pháp gia tốc ăn mòn được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu gần đây, do dễ dàng thực hiện trong phòng thí nghiệm và đạt được mức độ ăn mòn lớn trong thời gian ngắn.

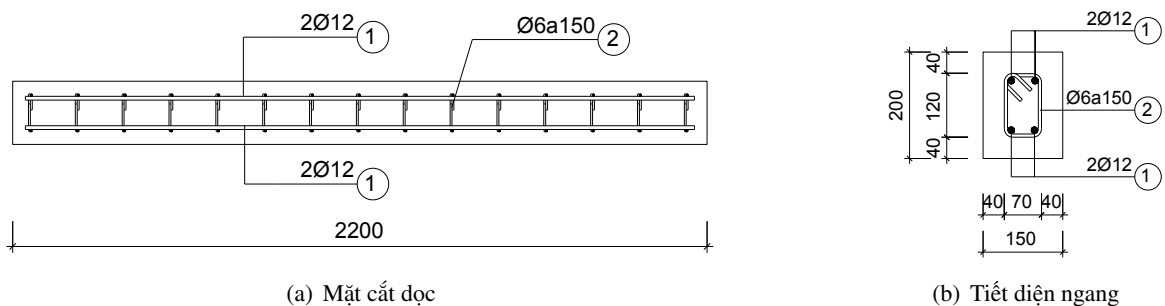
Ở Việt Nam, với đường bờ biển dài khoảng 3260 km và khí hậu nhiệt đới ẩm (nhiệt độ cao, độ ẩm lớn) là những điều kiện thuận lợi làm đẩy nhanh quá trình ăn mòn diễn ra trên công trình thực tế. Một số khảo sát về những hư hỏng do ăn mòn trên các công trình thực tế đã được thực hiện vào đầu những năm 2000 [10, 11]. Nhiều công trình BTCT đã bị ăn mòn ở mức độ nghiêm trọng sau 20 – 25 năm đưa vào sử dụng, thậm chí chỉ sau 10 – 15 năm sử dụng. Thực tế này đặt ra vấn đề cấp thiết phải thực hiện nhiều hơn các nghiên cứu khoa học và đề xuất các giải pháp sửa chữa và gia cường đối với kết cấu công trình đã bị ăn mòn. Gần đây, một số nghiên cứu thực nghiệm đã được thực hiện trong phòng thí nghiệm nhằm đánh giá ảnh hưởng của ăn mòn cốt thép đến ứng xử của kết cấu BTCT [12–15]. Đồng thời, một số nghiên cứu cũng đã được thực hiện bằng phương pháp số nhằm dự báo khả năng chịu lực còn lại của các kết cấu bị ăn mòn [16, 17]. Trong khi đó, các công trình BTCT thường được gia cường bằng một trong ba phương pháp chính là: (a) Bọc ngoài bằng bê tông/bê tông cốt thép; (b) Bọc ngoài bằng bản thép; (c) Bọc ngoài bằng vật liệu composite FRP (Fiber Reinforced Polymer). Phương pháp gia cường bằng dán tấm sợi composite đã được áp dụng tương đối phổ biến trong thực tế cho công trình cầu, nhà cao tầng... Tuy nhiên, nước ta chưa có tiêu chuẩn thiết kế và thi công gia cường kết cấu BTCT. Do đó, các tính toán gia cường kết cấu được thực hiện theo các tiêu chuẩn nước ngoài như ACI 440.2R-17 [18], FIB 14 [19], JSCE [20]. Một số các nghiên cứu thực nghiệm về gia cường kết cấu bằng vật liệu sợi composite cũng đã được tiến hành [21, 22], tuy nhiên chỉ được thực hiện trên cấu kiện không bị ăn mòn cốt thép và số lượng còn rất hạn chế.

Trong nghiên cứu này, sáu dầm BTCT có các kích thước $150 \times 200 \times 2200$ mm đã được chế tạo trong phòng thí nghiệm, trong đó bốn dầm đã được tiến hành gia tốc ăn mòn cốt thép bằng phương pháp điện hóa. Các dầm ăn mòn này có mức độ ăn mòn cốt thép trung bình trong khoảng 9 – 10%, xác định dựa trên khối lượng kim loại bị mất đi do ăn mòn so với khối lượng kim loại ban đầu. Sáu dầm được chia làm ba nhóm mẫu, mỗi nhóm gồm hai dầm có cùng trạng thái như sau: (i) nhóm dầm đối chứng, (ii) nhóm dầm ăn mòn, không gia cường, (iii) nhóm dầm gia cường bằng phương pháp dán tấm sợi CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Thí nghiệm uốn bốn điểm đã được tiến hành trên từng dầm cho đến phá hoại nhằm phân tích ứng xử uốn của dầm dưới tác động của quá trình ăn mòn cốt thép do xâm nhập của các ion clorua và xác định hiệu quả gia cường kháng uốn bằng phương pháp dán tấm sợi CFRP đối với dầm ăn mòn.

2. Chương trình thực nghiệm

2.1. Dầm thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, sáu dầm thí nghiệm có các kích thước $150 \times 200 \times 2200$ mm đã được chế tạo trong phòng thí nghiệm. Mỗi dầm thí nghiệm được đúc bằng bê tông thường có cấp độ bền nén thiết kế B30, cốt thép dọc là $4\phi 12$ và cốt thép đai là $\phi 6a150$. Cấu tạo chi tiết của mỗi dầm thí nghiệm được thể hiện chi tiết như Hình 1. Lớp bê tông bảo vệ có chiều dày $a = 40$ mm đến mặt ngoài của cốt thép đai, nhằm đảm bảo yêu cầu cấu tạo đối với kết cấu BTCT chịu tác động của tác nhân gây ăn mòn theo tiêu chuẩn TCVN 9346:2012 [23].



Hình 1. Kích thước và cấu tạo cốt thép của dầm thí nghiệm

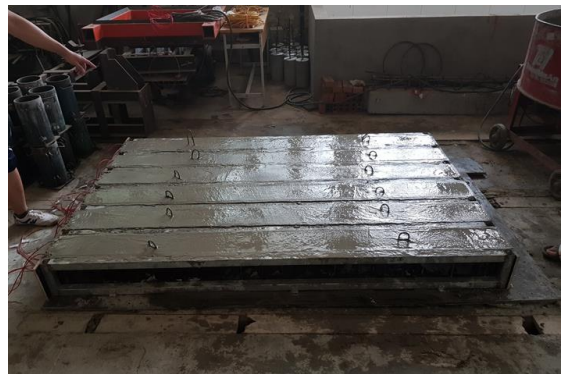
Đồng thời với quá trình chế tạo các dầm thí nghiệm, các mẫu thử bê tông hình lập phương có kích thước $150 \times 150 \times 150$ mm cũng đã được chế tạo và bảo dưỡng trong cùng điều kiện khí hậu của phòng thí nghiệm. Thí nghiệm nén đã được thực hiện tuân theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 3118:1993 [24] để xác định cường độ chịu nén thực tế của bê tông ở 28 ngày tuổi. Các kết quả thu được chỉ ra rằng bê tông có cường độ chịu nén trung bình bằng 40,9 MPa, với một hệ số biến động tương đối nhỏ bằng 1,6% [14].

Tương tự, thí nghiệm kéo thép cũng đã được thực hiện tuân theo tiêu chuẩn TCVN 197-1:2014 [25] trên một tổ mẫu cốt thép dọc có đường kính danh nghĩa $\phi 12$ mm để xác định các tính chất cơ học của vật liệu thép. Những kết quả thu được chỉ ra rằng ứng suất chảy và ứng suất bền của cốt thép dọc có các giá trị trung bình lần lượt là 374,3 MPa và 543,2 MPa [14]. Các mẫu thí nghiệm đều có giới hạn chảy lớn hơn 300 MPa và có giới hạn bền lớn hơn 450 MPa, do đó cốt thép sử dụng được phân loại thuộc nhóm thép CB300-V theo tiêu chuẩn TCVN 1651-2:2018 [26].

Hình 2 giới thiệu một số công tác chính trong quá trình chế tạo các dầm thí nghiệm. Trong nghiên cứu này, sáu mẫu dầm sẽ được phân loại thành ba nhóm mẫu, mỗi nhóm mẫu gồm hai dầm thí nghiệm có cùng trạng thái: (i) Nhóm dầm đối chứng gồm hai dầm ký hiệu là S1-NC và S2-NC, không bị ăn mòn cốt thép; (ii) Nhóm dầm ăn mòn gồm hai dầm ký hiệu là S3-C và S4-C, với mức độ ăn mòn cốt thép dọc dự kiến là 9 – 10%, không được sửa chữa và không dán gia cường; (iii) Nhóm dầm gia cường gồm hai dầm ký hiệu là S5-CFRP và S6-CFRP, có mức độ ăn mòn tương tự nhóm dầm ăn mòn và được gia cường kháng uốn bằng phương pháp dán tấm sợi composite CFRP.



(a) Chuẩn bị cốt thép và cốt pha



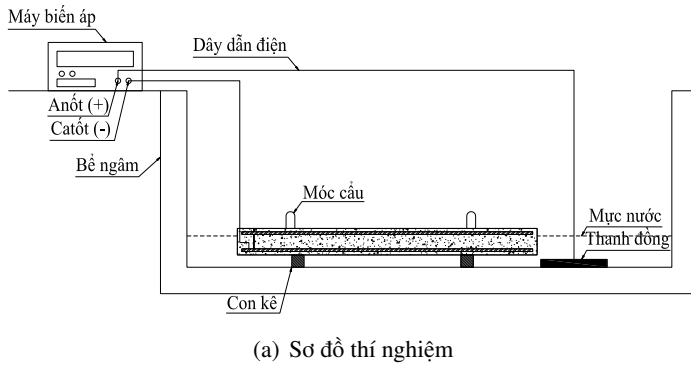
(b) Đổ bê tông

Hình 2. Chế tạo các dầm thí nghiệm trong phòng thí nghiệm

2.2. Thí nghiệm gia tốc ăn mòn điện hóa

Tại Phòng thí nghiệm và kiểm định công trình – Trường Đại học Xây dựng, một mô hình thí nghiệm gia tốc ăn mòn cốt thép bằng phương pháp điện hóa đã được xây dựng nhằm tạo ra các kết cấu thí nghiệm ở trạng thái ăn mòn mong muốn trong thời gian ngắn hơn nhiều so với thực tế [12]. Các dầm thí nghiệm được ngâm trong bể chứa dung dịch nước muối NaCl có nồng độ 3,5% (35 gram/lít), tương đương với độ mặn trung bình của nước biển ở Việt Nam. Dung dịch này đóng vai trò là dung dịch chất điện ly. Đối với từng dầm thí nghiệm, hai thanh cốt thép dọc lớp dưới được nối với cực dương của máy biến áp. Cực âm của máy biến áp nối với một thanh đồng đặt trong dung dịch nước muối. Dưới tác dụng của dung dịch chất điện ly, cặp điện cực kim loại khác nhau là cốt thép và thanh đồng tạo nên dòng điện một chiều và các phản ứng oxi hóa làm cho cốt thép bị ăn mòn điện hóa. Hình 3 minh họa sơ đồ và hình ảnh thực tế của thí nghiệm gia tốc ăn mòn điện hóa đã được thực hiện trên các dầm thí nghiệm. Khối lượng kim loại bị mất do ăn mòn (Δm) được ước lượng dựa trên định luật Faraday trong công thức (1), với I (A) là cường độ dòng điện, t (giây) là thời gian ăn mòn, M là khối lượng nguyên tử của sắt lấy bằng 56, n là số lượng electron trao đổi lấy bằng 2, và F là hằng số Faraday lấy bằng 96485 C/mol. Trong nghiên cứu này, cường độ dòng điện tác dụng lên mỗi thanh cốt thép dọc là 1,0 A và được duy trì không đổi trong suốt quá trình thí nghiệm ăn mòn điện hóa. Thời gian thực hiện thí nghiệm là 575 giờ để đạt được mức độ ăn mòn trung bình trong khoảng 9 – 10% theo khối lượng kim loại bị mất đi do ăn mòn.

$$\Delta m = \frac{ItM}{nF} \quad (1)$$



Hình 3. Thí nghiệm gia tốc ăn mòn điện hóa trên các dầm thí nghiệm

2.3. Gia cường kháng uốn dầm ăn mòn bằng tấm sợi CFRP

Các dầm ăn mòn được tiến hành sửa chữa các vết nứt do ăn mòn bằng cách bơm keo gốc epoxy. Đối với nhóm dầm gia cường, toàn bộ bề mặt dầm được mài nhẵn bằng máy mài cầm tay. Tiến hành xẻ rãnh dọc theo chiều dài các vết nứt do ăn mòn. Sau đó, toàn vết nứt được bịt kín bằng bột trét, sử dụng loại nhựa epoxy hai thành phần, mã sản phẩm Sikadur 731 của hãng Sika. Sau khi bột trét đã khô và đạt yêu cầu về cường độ, tiến hành tạo các lỗ khoan dọc theo chiều dài vết nứt để lắp đặt các đầu xy lanh bằng kim loại. Các xy lanh tạo với bề mặt bê tông một góc 45° và khoảng cách giữa chúng là 30 – 40 cm. Keo gốc epoxy được bơm vào trong dầm thí nghiệm để bịt kín các vết nứt thông qua các xy lanh. Quá trình bơm keo được kiểm soát bằng đồng hồ đo áp lực trên máy bơm. Hình 4 giới thiệu một số hình ảnh thực tế trong quá trình chuẩn bị bề mặt và bơm keo gốc epoxy để sửa chữa các vết nứt do ăn mòn.



Hình 4. Sửa chữa vết nứt do ăn mòn bằng phương pháp bơm keo gốc epoxy

Trong nghiên cứu này, hai mẫu dầm S5-CFRP và S6-CFRP được dán gia cường kháng uốn bằng tấm sợi CFRP của Hãng Toray, Nhật Bản, mã sản phẩm UT70-20G. Keo dán được sử dụng bao gồm nhựa lót hai thành phần AUP40 và nhựa phủ hai thành phần AUR80 (Hình 5). Khối lượng keo sử dụng cho lớp nhựa lót và lớp nhựa phủ được cân và pha chế đúng tỷ lệ theo hướng dẫn sử dụng của nhà sản xuất. Mỗi tấm dán CFRP có bề rộng 150 mm bằng đúng bề rộng của dầm, chiều dài là 2000 mm, cách mép đầu dầm 100 mm để tránh khu vực đặt gối tựa trong thí nghiệm uốn bốn điểm. Mỗi dầm chỉ được dán một tấm CFRP vào mặt dưới dầm tương ứng với vùng làm việc chịu kéo.



(a) Tấm sợi CFRP UT70-20G



(b) Keo tấm AUR80



(c) Keo lót AUP40

Hình 5. Các vật tư sử dụng để dán gia cường dầm ăn mòn

Bảng 1. Tính chất cơ lý của tấm sợi CFRP UT70-20G

Cường độ chịu kéo (MPa)	Mô đun đàn hồi (MPa)	Trọng lượng sợi (g/cm ²)	Tỷ trọng (g/cm ³)	Chiều dày (mm)
3400	245000	200	1,8	0,111

Trước khi thực hiện dán gia cường, bề mặt dầm được kiểm tra để đảm bảo rằng bề mặt được vệ sinh sạch sẽ, ở trạng thái khô ráo để không làm ảnh hưởng đến chất lượng bám dính giữa keo dán và bề mặt bê tông. Keo nhựa lót được sơn lên bề mặt dầm một lớp mỏng bằng con lăn sơn và có độ dày đồng đều dọc theo chiều dài dầm. Bên cạnh đó, tấm sợi CFRP được phủ một lớp keo tấm trên một mặt, thường là mặt dưới của tấm tiếp xúc với lớp nhựa lót. Khoảng 30 phút sau, tấm CFRP được dán lên dầm, bề mặt đã tẩm keo được dán lên trên lớp nhựa lót. Sau đó, sơn một lớp phủ mỏng keo tấm thứ hai lên mặt trên của tấm CFP bằng con lăn sơn. Các dầm dán gia cường được bảo quản để keo dán khô tự nhiên và tránh các tác động từ bên ngoài lên dầm trước khi tấm dán gia cường khô hoàn toàn. Hình 6 giới thiệu một số hình ảnh về công tác dán gia cường đối với hai mẫu dầm S5-CFRP và S6-CFRP.



(a) Sơn lớp nhựa lót lên đáy dầm

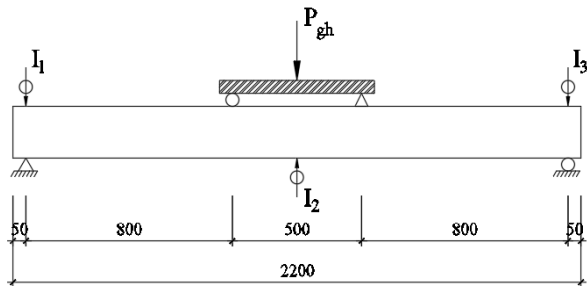


(b) Dán tấm CFRP và sơn lớp nhựa phủ

Hình 6. Dán gia cường dầm ăn mòn bằng tấm sợi CFRP

2.4. Thí nghiệm uốn bốn điểm

Thí nghiệm uốn bốn điểm được thực hiện trên từng mẫu đầm nhằm mục đích thu được biểu đồ quan hệ giữa tải trọng và độ võng. Sơ đồ thí nghiệm được minh họa trên Hình 7(a). Khoảng cách từ gối tựa đến điểm đặt lực là 800 mm. Khoảng cách giữa hai điểm đặt lực là 500 mm. Tải trọng tác dụng được tạo ra bởi kích thủy lực và trạm bơm dầu bằng tay. Lực tác dụng được xác định bằng load-cell đo lực. Trên đầm thí nghiệm bố trí ba dụng cụ đo chuyển vị LVDT, trong đó I_1 và I_3 đặt tại vị trí hai gối tựa, I_2 đặt tại vị trí giữa đầm. Tất cả các dụng cụ đo được kết nối với bộ xử lý số liệu data-logger TDS-530, để ghi nhận số liệu tự động và liên tục.



(a) Sơ đồ thí nghiệm uốn



(b) Thí nghiệm uốn đầm gia cường

Hình 7. Thí nghiệm uốn bốn điểm trên các mẫu đầm

Hình 7(b) giới thiệu hình ảnh thực tế của thí nghiệm uốn đã thực hiện trên một đầm điển hình. Quá trình gia tải, tải trọng được tăng từ từ với vận tốc đều cho đến khi đầm bị phá hoại, đảm bảo không gây ra lực xung lên đầm. Thí nghiệm được kết thúc khi đầm xuất hiện những dấu hiệu bị phá hoại như bê tông vùng nén bị vỡ, lớp dán gia cường bị bong tách hoàn toàn. Từ những kết quả thí nghiệm có thể xác định các tham số đặc trưng cho khả năng chịu uốn của đầm, bao gồm: tải trọng phá hoại (P_{ph} , kN) là tải trọng lớn nhất đầm chịu được, độ võng của đầm tại thời điểm đạt đến tải trọng phá hoại (f_{ph} , mm), và dạng phá hoại của đầm.

3. Kết quả thực nghiệm

3.1. Xác định mức độ ăn mòn cốt thép

Trong nghiên cứu này, mức độ ăn mòn của mỗi đầm thí nghiệm được xác định là giá trị trung bình của bốn thanh thép dọc, bao gồm hai thép lớp dưới và hai thanh thép lớp trên. Mức độ ăn mòn của mỗi thanh thép ký hiệu c (%), được xác định theo công thức (2), trong đó m_0 (g) là khối lượng của thanh thép trước khi ăn mòn, m (g) là khối lượng của thanh thép sau khi bị ăn mòn, Δm (g) là khối lượng kim loại bị mất đi do ăn mòn.

$$c(\%) = \frac{m_0 - m}{m_0} = \frac{\Delta m}{m_0} \quad (2)$$

Sau khi thí nghiệm uốn đến phá hoại, các mẫu đầm ăn mòn được đập vỡ hoàn toàn và thu lại các thanh thép dọc. Để xác định khối lượng kim loại thực tế bị mất đi do quá trình ăn mòn, các thanh thép dọc được vệ sinh bề mặt và tẩy sạch gỉ sắt bằng cách ngâm trong dung dịch axit HCl theo hướng dẫn của tiêu chuẩn ASTM G1-03 [27] và tiến hành cân khối lượng kim loại còn lại. Các kết quả xác

định mức độ ăn mòn cốt thép được trình bày chi tiết trong Bảng 2 đối với hai mẫu dầm S3-C và S4-C, trong Bảng 3 đối với hai mẫu dầm S5-CFRP và S6-CFRP, trong đó c_i (%) là mức độ ăn mòn của từng thanh thép, c_m (%) là mức độ ăn mòn trung bình. Đối với mỗi dầm thí nghiệm, các thanh thép dọc được đánh số thứ tự như sau bao gồm tên dầm và một chữ số, trong đó 1 và 2 là cốt thép dọc lớp dưới, 3 và 4 là cốt thép dọc lớp trên.

Bảng 2. Mức độ ăn mòn cốt thép của các dầm thí nghiệm S3-C và S4-C

Dầm TN	Mẫu thép	m_0 (g)	m (g)	Δm (g)	c_i (%)	c_m (%)
S3-C	S3-1	1807,2	1647,5	159,7	8,84	9,48
	S3-2	1809,7	1717,5	92,2	5,10	
	S3-3	1814,0	1592,0	222,0	12,24	
	S3-4	1814,0	1642,0	172,0	9,48	
S4-C	S4-1	1818,2	1694	124,2	6,83	9,37
	S4-2	1819,9	1615,5	204,4	11,23	
	S4-3	1805,5	1615,0	190,5	10,55	
	S4-4	1823,2	1661,5	161,7	8,87	

Bảng 3. Mức độ ăn mòn cốt thép của các dầm thí nghiệm S5-CFRP và S6-CFRP

Dầm TN	Mẫu thép	m_0 (g)	m (g)	Δm (g)	c (%)	c_m (%)
S5-CFRP	S5-1	1778,5	1630,5	148,0	8,32	9,36
	S5-2	1783,0	1614,5	168,5	9,45	
	S5-3	1829,5	1663,0	166,5	9,10	
	S5-4	1777,5	1590,0	187,5	10,55	
S6-CFRP	S6-1	1777,0	1564,2	212,8	11,98	9,67
	S6-2	1777,5	1604,8	172,7	9,72	
	S6-3	1823,5	1694,3	129,2	7,09	
	S6-4	1822,0	1641,4	180,6	9,91	

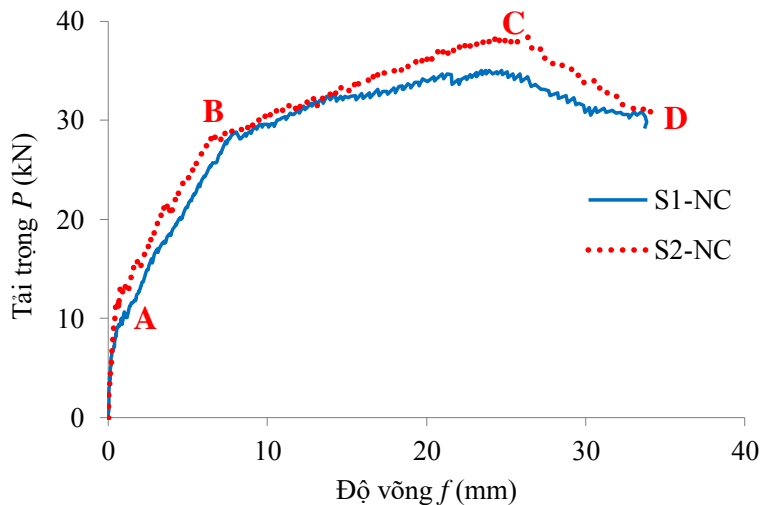
Như vậy, sau khoảng thời gian 575 giờ thực hiện thí nghiệm gia tốc ăn mòn điện hóa theo sơ đồ trên Hình 3, thì mức độ ăn mòn cốt thép khá đồng đều giữa các mẫu dầm, có giá trị trung bình trong khoảng 9,3% đến 9,7%. Quan sát bề mặt các mẫu dầm này, nhận thấy các vết nứt do ăn mòn đã xuất hiện khá nhiều, chủ yếu là các vết nứt dọc theo chiều dài thanh thép. Trên từng dầm ăn mòn, các vết nứt này có thể dễ dàng quan sát được bằng mắt thường, với bề rộng dao động chủ yếu trong khoảng 0,2 – 0,6 mm và hệ số biến động lớn lên đến 50% [15]. Tuy nhiên, lớp bê tông bảo vệ của các mẫu dầm chưa bị bong tách.

3.2. Quan hệ giữa tải trọng và độ võng

a. Kết quả nhóm dầm đối chứng

Hình 8 giới thiệu biểu đồ quan hệ giữa tải trọng và độ võng của hai mẫu dầm đối chứng S1-NC và S2-NC. Các biểu đồ thu được là tương đối đồng nhất giữa hai dầm thí nghiệm. Ứng xử của hai dầm thí nghiệm tuân theo các đặc trưng của kết cấu dầm BTCT làm việc chịu uốn, bao gồm các giai

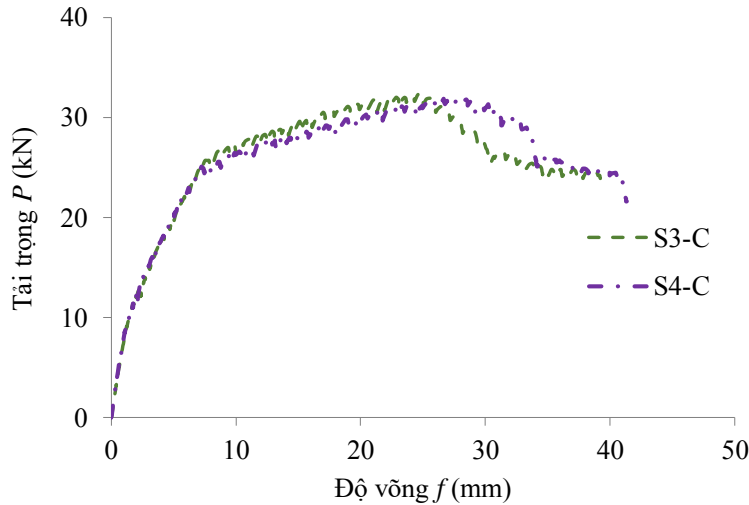
đoạn chính như sau: (i) Giai đoạn OA kết cấu làm việc đàn hồi tuyến tính cho đến khi xuất hiện vết nứt bê tông; (ii) Giai đoạn AB kết cấu làm việc phi tuyến, độ dốc của biểu đồ giảm do độ cứng của dầm giảm, kèm theo sự phát triển của các vết nứt; (iii) Giai đoạn BC cốt thép chịu kéo bị chảy dẻo, tải trọng dầm chịu được tăng chậm, trong khi độ võng của dầm tăng nhanh; (iv) Giai đoạn CD dầm bị phá hoại, vết nứt phát triển về phía vùng bê tông chịu nén cho đến khi bê tông vùng nén bị phá vỡ, thì dầm được coi như bị phá hoại. Những kết quả thí nghiệm cho phép xác định, dầm S1-NC có tải trọng phá hoại là $P_{ph} = 35,0$ kN và độ võng giữa nhịp tương ứng là $f_{ph} = 24,74$ mm. Dầm S2-NC có tải trọng phá hoại là $P_{ph} = 38,5$ kN và độ võng giữa nhịp tương ứng là $f_{ph} = 24,82$ mm. Tải trọng phá hoại của nhóm dầm đối chứng có giá trị trung bình bằng 36,8 kN, và độ võng giữa nhịp có giá trị trung bình bằng 24,78 mm.



Hình 8. Biểu đồ tải trọng – độ võng của các mẫu dầm đối chứng

b. Kết quả nhóm dầm ăn mòn

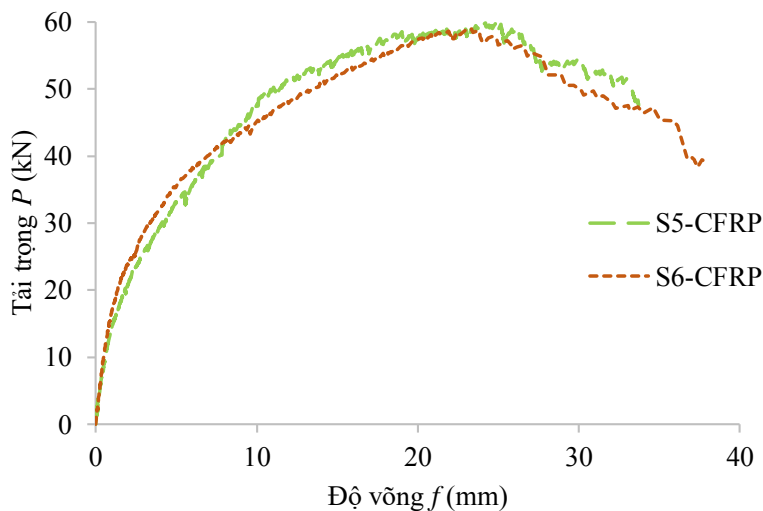
Hình 9 giới thiệu biểu đồ quan hệ giữa tải trọng và độ võng của hai mẫu dầm S3-C và S4-C, có mức độ ăn mòn cốt thép trung bình tương ứng là 9,48% và 9,37%. Kết quả thí nghiệm của hai dầm này gần như trùng khớp, đặc biệt trong các giai đoạn làm việc đầu tiên cho đến biểu đồ có sự thay đổi lớn về độ dốc, tương ứng với thời điểm tải trọng tăng chậm trong khi độ võng của dầm tăng nhanh. Khi so sánh với nhóm dầm đối chứng, nhận thấy rằng ở những cấp tải trọng từ 0 đến 30 kN, thì độ võng của các dầm S3-C và S4-C tăng nhanh hơn. Điều này có thể được giải thích bởi sự giảm độ cứng của dầm gây ra bởi sự xuất hiện của các vết nứt ăn mòn, và giảm cường độ bám dính giữa cốt thép và bê tông. Nếu giả thiết cốt thép bị ăn mòn đồng đều suốt dọc chiều dài thanh thép, thì đường kính của thanh thép giảm khoảng 5% so với trạng thái không bị ăn mòn. Những kết quả thí nghiệm cho phép xác định, dầm S3-C có tải trọng phá hoại là $P_{ph} = 32,4$ kN và độ võng giữa nhịp tương ứng là $f_{ph} = 24,88$ mm. Dầm S4-C có tải trọng phá hoại là $P_{ph} = 31,9$ kN và độ võng giữa nhịp tương ứng là $f_{ph} = 26,69$ mm. Tải trọng phá hoại của nhóm dầm ăn mòn có giá trị trung bình bằng 32,1 kN, và độ võng giữa nhịp có giá trị trung bình bằng 25,79 mm. Các hai dầm đều bị phá hoại uốn, đặc trưng bởi sự phá vỡ của bê tông vùng nén và mất khả năng chịu lực.



Hình 9. Biểu đồ tải trọng – độ võng của các mẫu dầm ăn mòn

c. Kết quả nhóm dầm gia cường

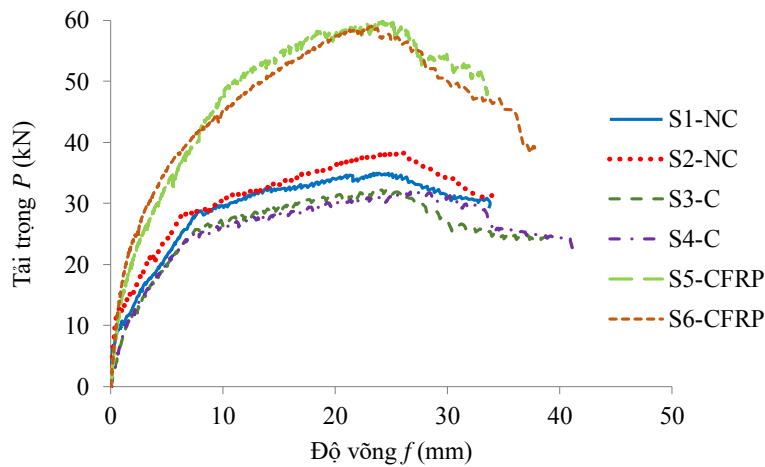
Hình 10 giới thiệu biểu đồ quan hệ giữa tải trọng và độ võng của hai dầm gia cường S5-CFRP và S6-CFRP, có mức độ ăn mòn cốt thép trung bình tương ứng là 9,36% và 9,67% và được dán gia cường một lớp tấm sợi CFRP ở đáy dầm. Khác với nhóm dầm ăn mòn, toàn bộ vết nứt do ăn mòn trên hai mẫu dầm này đã được sửa chữa bằng phương pháp bơm keo gốc epoxy như trình bày trong mục 2.3. Kết quả thu được khá đồng nhất giữa hai mẫu dầm gia cường. Quan sát trên biểu đồ nhận thấy rằng các kết cấu dầm ăn mòn sau khi gia cường có mối quan hệ phi tuyến giữa tải trọng và độ võng, không phân biệt rõ ràng các giai đoạn làm việc như trên dầm đối chứng. Tại cùng một giá trị tải trọng, độ võng của dầm gia cường nhỏ hơn đáng kể so với dầm ăn mòn không gia cường. Những kết quả thí nghiệm cho phép xác định, dầm gia cường S5-CFRP có tải trọng phá hoại là $P_{ph} = 59,9$ kN, độ võng giữa nhịp tương ứng là $f_{ph} = 24,23$ mm và độ võng lớn nhất ở trạng thái cuối cùng là $f_u = 33,73$ mm.



Hình 10. Biểu đồ tải trọng – độ võng của các mẫu dầm gia cường

Dầm S6-CFRP có tải trọng phá hoại là $P_{ph} = 59,1$ kN, độ võng giữa nhịp tương ứng là $f_{ph} = 23,19$ mm, và độ võng lớn nhất ở trạng thái cuối cùng là $f_u = 37,79$ mm. Nhờ sự tham gia làm việc chịu kéo của tấm dán gia cường ở đáy dầm, nên tải trọng thí nghiệm tăng liên tục cho đến khi dầm đạt đến tải trọng phá hoại. Tải trọng phá hoại trung bình bằng 59,5 kN, tăng 1,85 lần so với nhóm dầm ăn mòn và cao hơn tăng 1,62 lần so với nhóm dầm đối chứng.

Để so sánh khả năng chịu lực giữa các nhóm dầm, các biểu đồ quan hệ tải trọng – độ võng được tổng hợp và biểu diễn trên Hình 11. Những kết quả thí nghiệm cho tải trọng phá hoại của các dầm thí nghiệm được tóm tắt trong Bảng 4, để tính toán giá trị trung bình cho từng nhóm dầm và so sánh với nhóm dầm đối chứng. Đối với nhóm dầm ăn mòn không gia cường, tải trọng phá hoại dầm bằng 87,5% so với nhóm dầm đối chứng, tương đương giảm khả năng chịu lực khoảng 12,5%. Trong khi đó, nhóm dầm gia cường có tải trọng phá hoại tăng 1,62 lần so với nhóm dầm đối chứng và tăng 1,85 lần so với nhóm dầm ăn mòn. Như vậy, những kết quả thực nghiệm thu được chỉ ra rằng phương pháp dán tấm sợi CFRP cho phép tăng khả năng chịu uốn của dầm BTCT bị ăn mòn.



Hình 11. So sánh khả năng chịu lực giữa các dầm thí nghiệm

Bảng 4. So sánh tải trọng uốn phá hoại giữa các dầm thí nghiệm

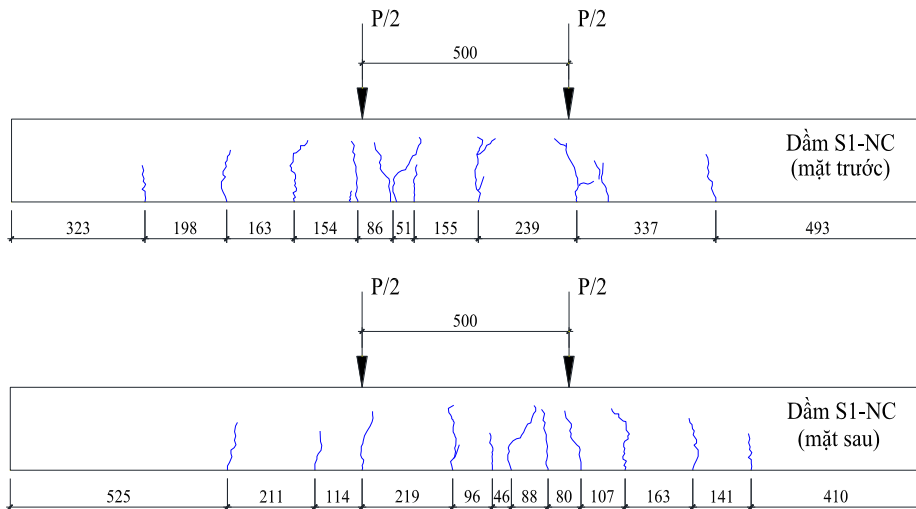
Dầm TN	Tải trọng phá hoại (kN)	Tải trọng phá hoại trung bình (kN)	Tỷ lệ tải trọng so với dầm đối chứng	Dạng phá hoại
S1-NC	35,0	36,7	1,000	Phá hoại uốn
S2-NC	38,5			Phá hoại uốn
S3-C	32,4	32,1	0,875	Phá hoại uốn
S4-C	31,9			Phá hoại uốn
S5-CFRP	59,9	59,5	1,621	Bong tách tấm dán
S6-CFRP	59,1			Bong tách tấm dán

3.3. Sơ đồ vết nứt

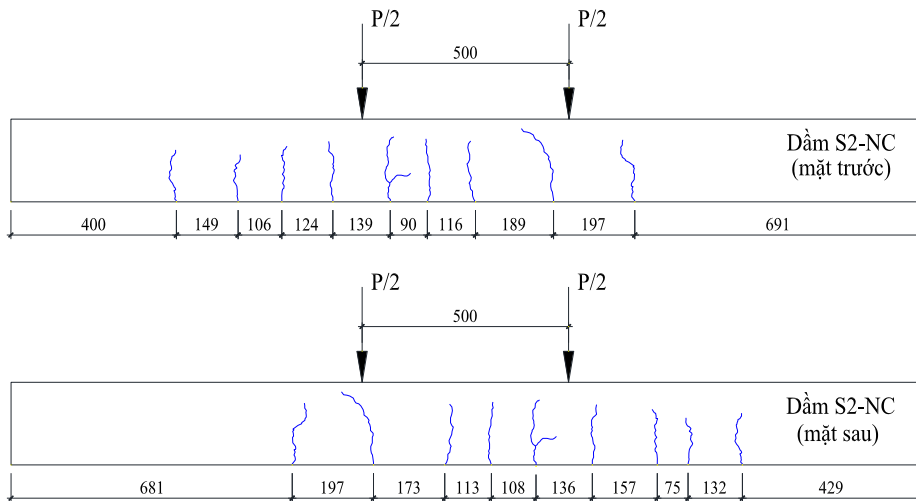
a. Kết quả nhóm dầm đối chứng

Trên các dầm đối chứng, chỉ xuất hiện các vết nứt do tải trọng, phát triển theo phương đứng trên mặt trước và mặt sau theo hướng chiều dài dầm. Vết nứt đầu tiên xuất hiện trong vùng mô men uốn

lớn nhất ở giữa hai điểm đặt lực. Tải trọng gây nứt được xác định tương ứng tại điểm A của biểu đồ tải trọng – độ võng trên Hình 8. Khi tăng tải trọng tác dụng thì mô men uốn vượt quá mô men kháng nứt, thì số lượng vết nứt xuất hiện nhiều hơn về phía hai gối tựa. Đồng thời, mỗi vết nứt phát triển chiều dài từ phía đáy dầm lên vùng bê tông chịu nén ở phía trên của dầm. Bề rộng của các vết nứt cũng tăng lên khi tăng tải trọng tác dụng. Trong quá trình thí nghiệm, sơ đồ vết nứt xuất hiện được vẽ lại trên các bề mặt dầm và được minh họa trên các hình 12 và 13 đối với hai dầm S1-NC và S2-NC. Trên mỗi dầm đối chứng xuất hiện từ 9 đến 11 vết nứt, phân bố khá đồng đều theo chiều dài dầm và khoảng cách giữa chúng trong khoảng 50 – 240 mm.



Hình 12. Sơ đồ vết nứt do tải trọng trên dầm S1-NC

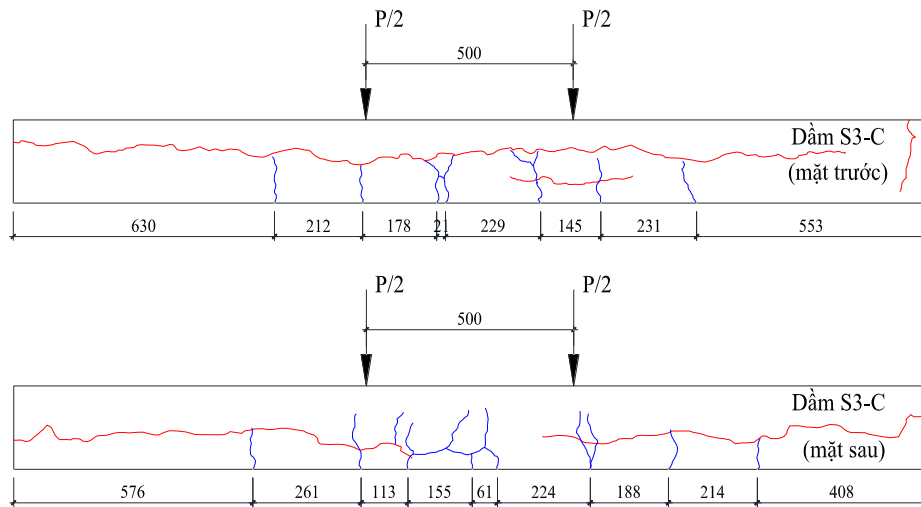


Hình 13. Sơ đồ vết nứt do tải trọng trên dầm S2-NC

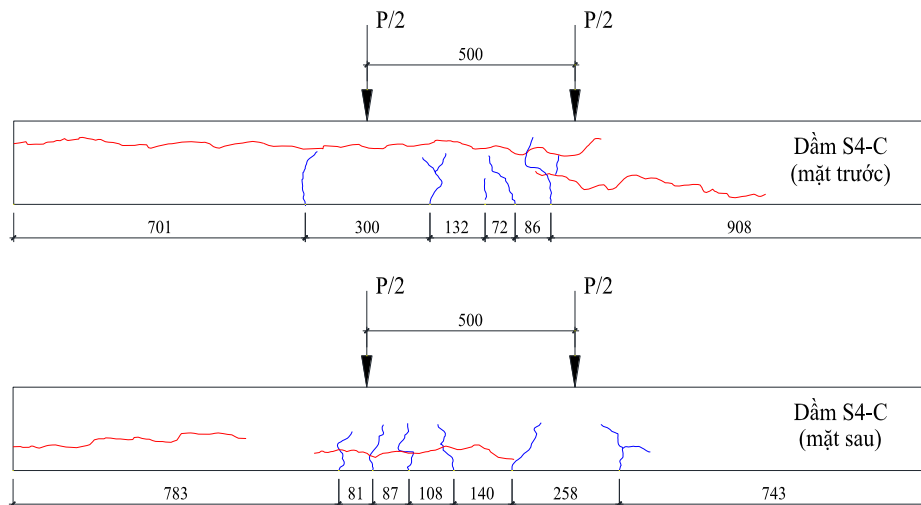
b. Kết quả nhóm dầm ăn mòn

Tương tự, các hình 14 và 15 minh họa sơ đồ vết nứt xuất hiện trên hai mẫu dầm ăn mòn S3-C và S4-C. Tuy nhiên, khác với các mẫu dầm đối chứng thì sơ đồ vết nứt trên các dầm này gồm hai loại:

(i) các vết nứt do ăn mòn vẽ bằng màu đỏ, (ii) các vết nứt do tải trọng vẽ bằng màu xanh. Các vết nứt do ăn mòn xuất hiện trong quá trình tiến hành thí nghiệm gia tốc ăn mòn điện hóa, do sự hình thành và trương nở thể tích của các sản phẩm ăn mòn (oxit sắt, hydroxit sắt) và gây ra ứng suất kéo trong bê tông. Các vết nứt này phân bố theo phương ngang, một số vết nứt có thể chạy dọc suốt chiều dài dầm. Trong khi đó, các vết nứt do tải trọng xuất hiện trong quá trình thí nghiệm uốn dầm, chủ yếu xuất hiện trong vùng giữa hai điểm đặt lực và vùng lân cận hai bên điểm đặt lực. So với các dầm đối chứng, số lượng vết nứt do tải trọng xuất hiện ít hơn, từ 5 – 8 vết nứt trên mỗi mặt bên, trong khi đó khoảng cách giữa chúng tăng lên từ 60 – 300 mm. Thông thường, các vết nứt do tải trọng phát triển theo phương đứng đến vị trí vết nứt ngang do ăn mòn trong vùng bê tông chịu nén ở phía trên của dầm.



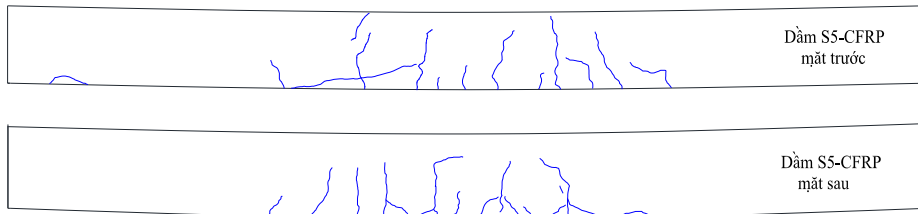
Hình 14. Sơ đồ vết nứt do ăn mòn và do tải trọng trên dầm S3-C



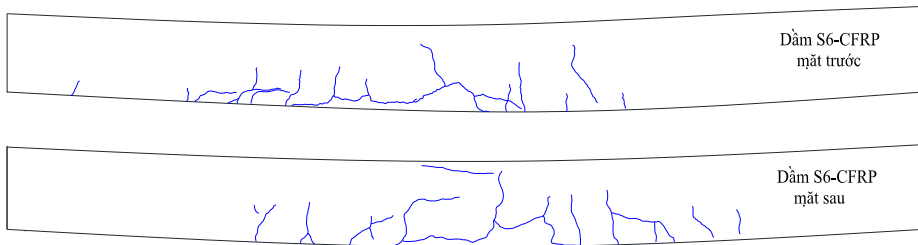
Hình 15. Sơ đồ vết nứt do ăn mòn và do tải trọng trên dầm S4-C

c. Kết quả nhóm dầm gia cường

Trước khi thực hiện thí nghiệm uốn, tất cả vết nứt do ăn mòn đã được xử lý và bịt kín bằng keo gốc epoxy như trình bày trong Mục 2.3. Do đó, các hình 16 và 17 chỉ minh họa sơ đồ vết nứt do tải trọng trên hai mẫu dầm gia cường S5-CFRP và S6-CFRP. Trên mỗi mặt bên của dầm, xuất hiện từ 10 đến 12 vết nứt do tải trọng và phát triển theo phương đứng. Các vết nứt này chủ yếu tập trung trong vùng bê tông ở giữa hai điểm đặt lực và vùng lân cận hai bên điểm đặt lực. Khoảng cách giữa các vết nứt đứng tương đối gần nhau. Ngoài ra, trên dầm còn xuất hiện vết nứt ngang ở vùng bê tông bảo vệ chịu kéo ở đáy dầm, lân cận với tấm dán CFRP.



Hình 16. Sơ đồ vết nứt do tải trọng trên dầm S5-CFRP



Hình 17. Sơ đồ vết nứt do tải trọng trên dầm S6-CFRP

Khi so sánh dạng phá hoại giữa các mẫu dầm nhận thấy rằng các dầm đối chứng và dầm ăn mòn không gia cường đều bị phá hoại uốn, đặc trưng bởi các dấu hiệu như cốt thép bị chảy dẻo và bê tông vùng nén bị vỡ. Trong khi đó, cơ chế phá hoại của các mẫu dầm gia cường là do sự bong tách tấm dán trong vùng nhịp cắt. Đầu tiên, sự bong tách giữa tấm và bê tông xuất hiện trên một nhịp cắt của dầm (bên trái hoặc bên phải). Sự bong tách này phát triển và lan truyền về phía giữa nhịp. Tiếp theo, xuất hiện một vết nứt xiên tại vùng chuyển giao giữa nhịp uốn và nhịp cắt. Vết nứt này phát triển về phía bê tông vùng nén ở giữa dầm, kéo theo sự bong tách lớp bê tông bảo vệ trong vùng chịu kéo ở giữa nhịp. Nếu tiếp tục tăng tải trọng thì bê tông vùng nén bị vỡ, và có thể xảy ra sự bong tách hoàn toàn lớp bê tông bảo vệ và tấm dán CFRP ở phía dưới dầm.

4. Kết luận

Bài báo trình bày các kết quả thực nghiệm thu được trên sáu mẫu dầm BTCT có các kích thước $150 \times 200 \times 2200$ mm, thuộc ba nhóm mẫu như sau: (i) nhóm dầm đối chứng; (ii) nhóm dầm ăn mòn với mức độ ăn mòn cốt thép trung bình 9 – 10%; (iii) nhóm dầm gia cường khả năng kháng uốn bằng phương pháp dán tấm sợi CFRP có mức độ ăn mòn cốt thép tương đương. Những kết luận chính của nghiên cứu có thể được đưa ra, đó là:

- Thí nghiệm gia tốc ăn mòn điện hóa cho phép tạo ra trong phòng thí nghiệm các kết cấu thử nghiệm có mức độ ăn mòn cốt thép tương đương trên công trình thực tế nhằm nghiên cứu ảnh hưởng của ăn mòn cốt thép đến ứng xử chịu lực của kết cấu công trình.

- Đối với các dầm ăn mòn ở mức độ 9 – 10% khối lượng kim loại bị mất đi do ăn mòn, thì khả năng chịu uốn còn lại của dầm còn khoảng 87,5% so với dầm đối chứng, tương đương với một lượng giảm khả năng chịu lực là 12,5%. Đồng thời trên bề mặt dầm đã xuất hiện các vết nứt do ăn mòn, có thể phát triển dọc theo chiều dài dầm, nhưng lớp bê tông bảo vệ ở đáy dầm vẫn chưa bị bong tách.

- Đối với các dầm gia cường được sửa chữa vết nứt bằng bơm keo gốc epoxy và dán gia cường kháng uốn bằng tấm sợi CFRP, thì khả năng chịu uốn có thể tăng lên 1,85 lần so với dầm ăn mòn và 1,62 lần so với dầm đối chứng. Đồng thời, độ võng của các dầm gia cường trước khi bị phá hoại cũng nhỏ hơn các dầm ăn mòn và dầm đối chứng. Những kết quả này minh chứng hiệu quả gia cường của phương pháp dán tấm sợi composite đối với kết cấu BTCT bị ăn mòn.

Lời cảm ơn

Các tác giả xin chân thành cảm ơn Công ty TORAY, Nhật Bản (Toray International, Inc.) đã tài trợ vật tư gia cường cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Ollivier, J.-P., Vichot, A. (2008). *La durabilité des bétons: bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*. Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées.
- [2] Halstead, S., Woodworth, L. A. (1955). The deterioration of reinforced concrete structures under coastal conditions. *Civil Engineering*, 5(10):353–372.
- [3] Stratfull, R. F. (1957). [The corrosion of steel in a reinforced concrete bridge](#). *Corrosion*, 13(3):43–48.
- [4] Soltani, M., Safiey, A., Brennan, A. (2019). [A State-of-the-Art Review of Bending and Shear Behaviors of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams](#). *ACI Structural Journal*, 116(3):53–64.
- [5] El Maaddawy, T., Soudki, K., Topper, T. (2005). Long-term performance of corrosion-damaged reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 102(5):649–656.
- [6] Du, Y., Clark, L. A., Chan, A. H. C. (2007). Impact of reinforcement corrosion on ductile behavior of reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 104(3):285–293.
- [7] François, R., Khan, I., Dang, V. H. (2012). [Impact of corrosion on mechanical properties of steel embedded in 27-year-old corroded reinforced concrete beams](#). *Materials and Structures*, 46(6):899–910.
- [8] Dang, V. H., Francois, R. (2013). [Influence of long-term corrosion in chloride environment on mechanical behaviour of RC beam](#). *Engineering Structures*, 48:558–568.
- [9] Tanaka, Y., Kawano, H., Watanabe, H., Kimura, T. (2001). Chloride-induced deterioration and its influence on load carrying capacity of post-tensioned concrete bridges. *Third International Conference on Concrete under Severe Conditions-Environment and Loading*, Citeseer, 495–502.
- [10] Tiên, C. D., Khoan, P. V., Hùng, L. Q., ctv (2003). *Báo cáo tổng kết dự án KT – KT chống ăn mòn và bảo vệ các công trình bê tông và BTCT vùng biển*. Viện KHCN Xây dựng.
- [11] Hai, D. T., Yamada, H., Katsuchi, H. (2007). [Present condition of highway bridges in Vietnam: an analysis of current failure modes and their main causes](#). *Structure and Infrastructure Engineering*, 3(1):61–73.
- [12] Tân, N. N. (2018). *Nghiên cứu thiết lập mô hình thí nghiệm đẩy nhanh tốc độ ăn mòn cốt thép trong bê tông phục vụ đánh giá độ bền vững công trình biển đảo*. Đề tài cấp trường trọng điểm, 150-2017/KHXD-TP, Trường ĐH Xây dựng.
- [13] Tan, N. N., Nguyen, N. D. (2019). [An experimental study on flexural behavior of corroded reinforced concrete beams using electrochemical accelerated corrosion method](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 13(1):1–11.
- [14] Anh, T. H., Tân, N. N., Giang, N. H. (2019). Nghiên cứu thực nghiệm khả năng chịu lực của dầm bê tông cốt thép bị ăn mòn trong môi trường xâm thực clorua. *Tạp chí Xây dựng Việt Nam*, (9):81–86.

- [15] Anh, T. H., Tân, N. N., Giang, N. H. (2019). Một số đặc điểm của vết nứt trên dầm bê tông cốt thép bị ăn mòn trong môi trường xâm thực clorua. *Tạp chí Xây dựng Việt Nam*, (10):101–107.
- [16] Nguyễn, N. Đ., Tân, N. N. (2019). **Dự báo khả năng chịu lực còn lại của cột BTCT chịu nén lệch tâm phẳng có cốt thép dọc bị ăn mòn.** *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐH XD*, 13(2V): 53–62.
- [17] Tan, N. N., Kien, N. T. (2020). **Modeling the flexural behavior of corroded reinforced concrete beams with considering stirrups corrosion.** *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 14(3):26–39.
- [18] ACI 440.2R-17 (2017). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute.
- [19] FIB 14 (2001). *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC structures*. Technical Report, Bulletin 14, International Federation for Structural Concrete.
- [20] JSCE (2001). *Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheet*. Concrete Engineering Series 41, Japan Society of Civil Engineering.
- [21] 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.
- [22] Hiếu, N. T., Cường, L. T. (2018). Nghiên cứu thực nghiệm gia cường dầm bê tông cốt thép chịu xoắn bằng vật liệu tấm sợi các bon CFRP. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, 60(3):29–35.
- [23] TCVN 9346:2012. *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép – Yêu cầu bảo vệ chống ăn mòn trong môi trường biển*.
- [24] TCVN 3118:1993. *Bê tông nặng – Phương pháp xác định cường độ nén của bê tông*.
- [25] TCVN 197-1:2014. *Vật liệu kim loại – Thử kéo – Phần 1: Phương pháp thử ở nhiệt độ phòng*.
- [26] TCVN 1651-2:2018. *Thép cốt bê tông – Phần 2: Thép thanh vằn*.
- [27] ASTM G1-03 (2017). *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA.