

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM SỰ LÀM VIỆC CHỊU UỐN CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT HỖN HỢP THÉP VÀ POLYME CỐT SỢI THỦY TINH (GFRP) BỊ ĂN MÒN BỞI ION CLORUA

Nguyễn Tuấn Ninh^a, Trịnh Hoài Linh^a, Đỗ Văn Hải^a, Khúc Văn Tài^a, Nguyễn Trung Hiếu^{a,*}

^a*Khoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 31/05/2021, Sửa xong 21/06/2021, Chấp nhận đăng 23/06/2021

Tóm tắt

Thanh polymer cốt sợi thủy tinh (GFRP) với những ưu điểm như cường độ cao, không bị ăn mòn, không từ tính có thể được sử dụng như cốt chịu lực trong các kết cấu công trình bằng bê tông làm việc trong môi trường xâm thực. Bài báo này trình bày nghiên cứu thực nghiệm ứng xử uốn của dầm bê tông cốt hỗn hợp thép-thanh GFRP (hay cốt SGFRP) bị ăn mòn bởi ion clorua. 02 mẫu dầm bê tông cốt SGFRP được chế tạo. Bên cạnh đó, để có sự đánh giá tương quan ảnh hưởng của thanh GFRP đến ứng xử của dầm, 02 mẫu dầm bê tông cốt thép thường có cùng cấu tạo cốt thép như dầm bê tông cốt hỗn hợp cũng được chế tạo. Thí nghiệm ăn mòn đẩy nhanh bằng phương pháp ăn mòn điện hóa được tiến hành trên 04 mẫu dầm, cho đến khi xuất hiện các vết nứt trên bề mặt dầm, do cốt thép bị ăn mòn gây ra. Tiếp đến, các mẫu dầm bị ăn mòn được thí nghiệm uốn bốn điểm cho đến khi phá hoại. Kết quả thực nghiệm thu được cho phép làm rõ ứng xử uốn của dầm bê tông cốt SGFRP khi cốt thép bị ăn mòn cũng như vai trò của thanh GFRP trong việc phân tán các vết nứt do uốn và gia tăng khả năng chịu lực của dầm.

Từ khoá: ăn mòn; cốt hỗn hợp thép - GFRP; ứng xử uốn; nứt.

EXPERIMENTAL STUDY ON FLEXURAL BEHAVIOR OF CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH HYBRID GFRP AND STEEL BARS CORRODED BY CHLORIDE ION

Abstract

Glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars with its advantages of high strength, corrosion-resistance, and nonmagnetic can be used as reinforcement in concrete structures working in corrosive environments. This paper presents an experimental research on flexural behavior of hybrid concrete beams reinforced with steel and GFRP bars (referred to SGFRP). Two hybrid concrete beams SGFRP were made. Beside that, to have a correlative assesment of the influence of GFRP bars on concrete beam behavior, two normal concrete beams having the same reinforcing steel bars were made. Accelerated corrosion test by electro-chemical corrosion method was conducted on 04 beam samples, until cracks, caused by corroded steel bars, appeared on the beam surfaces. Next, the corroded beams were subjected to a four-point bending test until failure. The obtained experimental results allow to clarify the flexural behavior of SGFRP concrete beams when the reinforcement is corroded as well as the role of GFRP bars in dispersing flexural cracks and increasing the bearing capacity of the beams.

Keywords: corrosion; hybrid steel-GFRP bar; flexural behavior; crack.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15\(3V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15(3V)-02) © 2021 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hieunt@nuce.edu.vn (Hiếu, N. T.)

1. Đặt vấn đề

Ăn mòn cốt thép trong kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) là một trong những nguyên nhân cơ bản gây ra hư hỏng của các kết cấu công trình. Hư hỏng do ăn mòn cốt thép xảy ra chủ yếu với các công trình xây dựng ở các khu vực chịu nhiều tác động của các yếu tố hóa học như khu vực ven biển với sự có mặt của ion clorua, khu vực các nhà máy công nghiệp sử dụng hóa chất (nhà máy giấy, nhà máy phân bón...), khu vực đô thị chịu tác động của khí các-bo-níc (CO_2). Theo thống kê của nhiều tổ chức nghiên cứu trên thế giới, ăn mòn cốt thép là nguy cơ hàng đầu gây ra hư hỏng công trình. Ở nước ta, một số nghiên cứu đã thực hiện cho thấy có đến 90% các công trình xây dựng nhà ở vùng ven biển không đảm bảo yêu cầu về chiều dày lớp bê tông bảo vệ cốt thép và số lượng các công trình bị hư hỏng nặng sau 10 năm sử dụng chiếm một số lượng đáng kể [1].

Trên Hình 1 trình bày một số hình ảnh hư hỏng kết cấu BTCT có nguyên nhân do ăn mòn cốt thép gây ra. Hình 1(a) là hình ảnh hư hỏng điển hình của cột BTCT, sự tăng thể tích cốt thép khi xảy ra ăn mòn làm nứt, bong tách lớp bê tông bảo vệ dọc theo cốt thép. Sự ăn mòn có thể xảy ra ở một vùng tiết diện (cạnh cột) hoặc trên toàn tiết diện. Hình 1(b) và Hình 1(c) cho thấy sự ăn mòn xảy ra trên kết cấu dầm và sàn BTCT chịu uốn, lớp bê tông bảo vệ bị bong vỡ, cốt thép bị suy giảm tiết diện và với mức độ ăn mòn lớn thì có thể gây ra đứt cốt thép chịu kéo. Có thể thấy điểm chung của sự hư hỏng kết cấu BTCT do ăn mòn cốt thép là sự suy giảm tiết diện bê tông và tiết diện cốt thép, suy giảm lực bám dính giữa cốt thép và bê tông, dẫn đến sự suy giảm khả năng chịu lực của kết cấu.



(a) Cột BTCT bị nứt vỡ dọc theo cốt thép



(b) Dầm BTCT bị bong, vỡ lớp bê tông bảo vệ, cốt thép dọc bị gỉ



(c) Cốt thép chịu kéo trong sàn bị gỉ, đứt

Hình 1. Một số hình ảnh hư hỏng kết cấu BTCT do ăn mòn cốt thép

Thanh polyme cốt sợi thủy tinh GFRP (Glass Fiber-Reinforced Polymer) là sản phẩm dạng thanh tạo nên bởi các sợi thủy tinh được dính kết và bao bọc bởi một chất nhựa tổng hợp polyme tạo nên cốt chịu lực. Các nghiên cứu sử dụng thanh GFRP làm cốt chịu lực trong kết cấu bê tông cho thấy tuổi thọ của vật liệu GFRP trong bê tông dài hơn nhiều so với cốt thép truyền thống và cốt GFRP là giải pháp đảm bảo độ bền cho kết cấu bê tông trong môi trường bị ăn mòn [2–6]. Hiện nay, ở nhiều nước trên thế giới đã ban hành các chỉ dẫn kỹ thuật cho việc áp dụng thanh GFRP làm cốt chịu lực cho kết cấu bê tông, điển hình như ACI 440.1R [2], CSA-S806-12 [3], FIB.10 [4].

Mặc dù có những ưu điểm nói trên, thanh GFRP lại là vật liệu hoàn toàn đàn hồi tuyến tính cho đến khi phá hoại và có độ dẻo kém hơn nhiều với các thanh thép truyền thống [2, 7, 8]. Đây là một

nhược điểm khi sử dụng thanh GFRP làm cốt chịu lực trong kết cấu bê tông. Qua các nghiên cứu đã được thực hiện cho thấy, khi áp dụng thanh GFRP làm cốt chịu lực cho kết cấu bê tông chịu uốn, thì mặc dù kết cấu có khả năng chịu tải cực hạn cao nhưng lại có độ võng và bề rộng vết nứt lớn do thanh GFRP có mô đun đàn hồi thấp [8–11]. Các kết cấu chịu uốn thường bị giới hạn bởi điều kiện sử dụng theo trạng thái giới hạn thứ hai nên khó phát huy được đặc tính cường độ chịu kéo cao của thanh GFRP. Đồng thời phá hoại của kết cấu bê tông chịu uốn sử dụng thanh GFRP là dạng phá hoại đột ngột và không có tính cảnh báo [8–10].

Để khắc phục những điểm hạn chế nêu trên của thanh GFRP, giải pháp sử dụng kết hợp cốt thép và cốt GFRP (viết tắt cốt SGFRP) làm cốt chịu lực trong kết cấu bê tông làm việc chịu uốn đã được nhiều tác giả nghiên cứu, mà điển hình là các kết quả trình bày trong các tài liệu [8–17]. Các kết quả thu được đều cho thấy, sử dụng cốt SGFRP làm cốt chịu lực trong kết cấu bê tông chịu uốn có thể khắc phục được những nhược điểm của việc sử dụng hoàn toàn cốt GFRP, nhất là trong việc hạn chế tình trạng nứt và phá hoại đột ngột. Đồng thời, sử dụng cốt SGFRP với cốt GFRP đặt phía ngoài, là một giải pháp phù hợp cho kết cấu bê tông làm việc trong môi trường xâm thực [18].

Nội dung bài báo trình bày một nghiên cứu thực nghiệm sự làm việc của dầm bê tông cốt SGFRP trong trường hợp dầm bị hư hỏng do ăn mòn cốt thép chịu lực. Thí nghiệm ăn mòn cốt thép đẩy nhanh thông qua ăn mòn điện hóa trong môi trường dung dịch NaCl 5% được tiến hành cho đến khi các mẫu dầm xuất hiện vết nứt trên bề mặt bê tông do ăn mòn cốt thép gây ra. Tiếp đó, thí nghiệm uốn bốn điểm trên các mẫu dầm được tiến hành cho phép nghiên cứu ứng xử của các dầm bê tông cốt SGFRP đã bị ăn mòn cốt thép. Các nghiên cứu thực nghiệm trên được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm và Kiểm định công trình (LAS-XD 125), Trường Đại học Xây dựng.

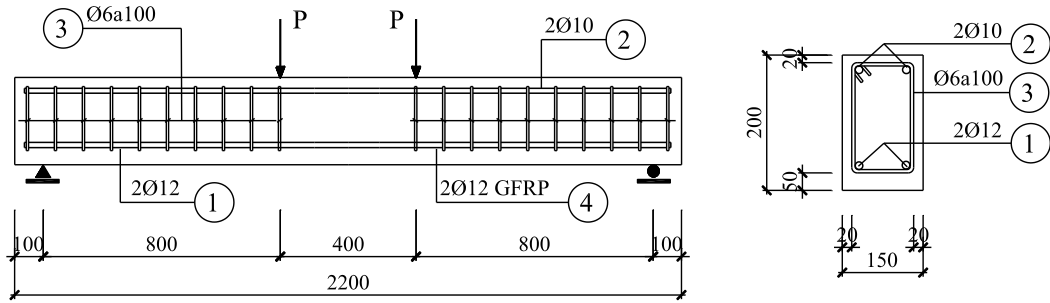
2. Nghiên cứu thực nghiệm

Nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành với các nội dung chính sau: (1) chế tạo các mẫu dầm thí nghiệm; (2) thực hiện thí nghiệm ăn mòn đẩy nhanh bằng phương pháp ăn mòn điện hóa trong môi trường dung dịch NaCl 5% trên các mẫu dầm thí nghiệm; (3) thí nghiệm uốn các mẫu dầm bê tông cốt thép và cốt SGFRP bị ăn mòn nhằm đánh giá ứng xử uốn của các mẫu dầm cũng như xác định sự làm việc của cốt hỗn hợp SGFRP.

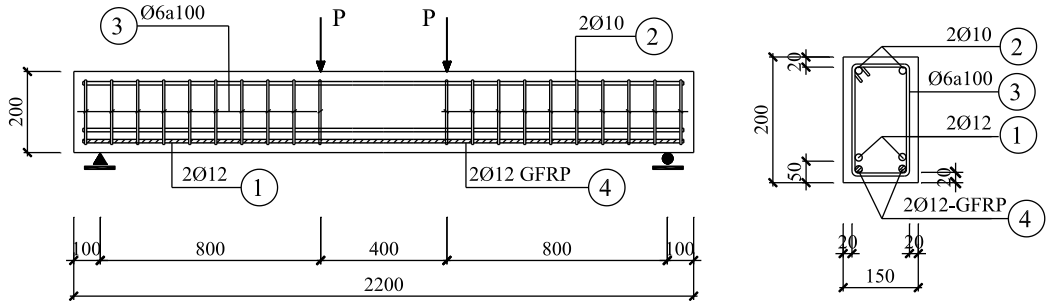
2.1. Mẫu thí nghiệm và vật liệu chế tạo

Trong nghiên cứu này, 04 mẫu dầm có cùng kích thước hình học được chế tạo. Các mẫu dầm có chiều dài 2200 mm, kích thước tiết diện ngang $b \times h = 150 \times 200$ mm và được chế tạo với cùng một loại bê tông. Liên quan đến cốt chịu lực của các dầm thí nghiệm, 02 mẫu dầm, ký hiệu D-05-1, D-05-2, sử dụng cốt thép thường và 02 mẫu dầm, ký hiệu D-G-05-1, D-G-05-2, sử dụng cốt SGFRP. Việc tiến hành đồng thời thí nghiệm trên các mẫu dầm BTCT thông thường và dầm bê tông cốt SGFRP cho phép đánh giá được rõ hơn sự tham gia của thanh GFRP và của cốt hỗn hợp SGFRP vào ứng xử uốn của dầm bê tông cốt SGFRP. Với dầm bê tông cốt SGFRP, thanh GFRP được đặt ở phía ngoài cốt thép. Chi tiết kích thước hình học và cấu tạo cốt chịu lực của các mẫu dầm thí nghiệm được trình bày ở Hình 2 và Hình 3.

Trên Bảng 1 giới thiệu thành phần cấp phối vật liệu chế tạo bê tông và kết quả thí nghiệm nén xác định cường độ chịu nén của bê tông, thực hiện trên 03 mẫu thử hình trụ $D \times H = 150 \times 300$ mm ở tuổi 28 ngày. Đối với cốt thép $\varnothing 12$, giới hạn chảy của thép, xác định từ thí nghiệm kéo, bằng 515 MPa. Đối với cốt GFRP $\varnothing 12$, cường độ chịu kéo thu được từ thí nghiệm kéo khi mẫu thí nghiệm bị phá hoại bằng 900 MPa.



Hình 2. Chi tiết cấu tạo dầm D-05-1 và D-05-2



Hình 3. Chi tiết cấu tạo dầm D-G-05-1 và D-G-05-2

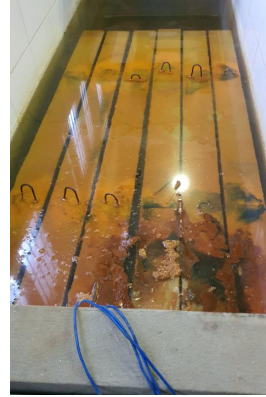
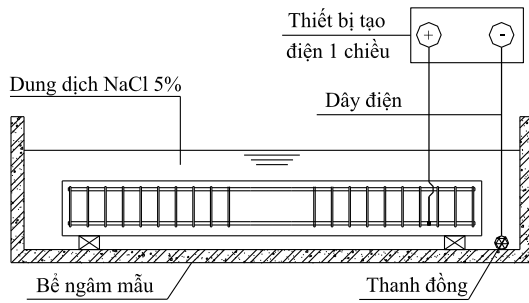
Bảng 1. Thành phần cấp phối vật liệu chế tạo bê tông (đơn vị kg/m³)

Xi măng PCB 30 (kg)	Cát vàng (kg)	Đá dăm 1 × 2 (kg)	Nước (kg)	Cường độ chịu nén R28 (MPa)
390	680	1210	185	31,5

2.2. Thí nghiệm ăn mòn đẩy nhanh bằng phương pháp ăn mòn điện hóa

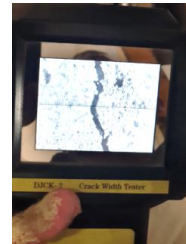
Trên Hình 4 trình bày sơ đồ thí nghiệm ăn mòn đẩy nhanh đối với cốt thép trong các mẫu dầm theo phương pháp ăn mòn điện hóa. Sau khi chế tạo 28 ngày, tất cả các mẫu dầm thí nghiệm được đặt vào trong bể chứa và ngâm trong dung dịch NaCl 5%. Một đoạn dây dẫn điện gắn chặt với hai thanh cốt thép Ø12 (gắn trước khi đổ bê tông các mẫu dầm) được đấu vào cực dương của thiết bị tạo dòng điện một chiều tạo ra điện cực dương (anot), còn cực âm của thiết bị được đấu với một dây dẫn có một đầu gắn chặt vào thanh đồng (đặt trong bể ngâm mẫu) tạo ra điện cực âm (catot). Trong thí nghiệm ăn mòn đẩy nhanh, cường độ dòng điện một chiều được lựa chọn sao cho quá trình ăn mòn đẩy nhanh gây ra tình trạng ăn mòn cốt thép phù hợp với thực tế hư hỏng của kết cấu công trình BTCT trong môi trường thực. Dựa trên cơ sở một số nghiên cứu [19–23], đồng thời để thời gian tiến hành thí nghiệm không quá dài, cường độ dòng điện một chiều được lựa chọn, trên cơ sở diện tích tiết diện của cốt thép, bằng 25 $\mu\text{A}/\text{mm}^2$, và được duy trì trong suốt thời gian thực hiện thí nghiệm.

Thí nghiệm ăn mòn được thực hiện cho đến khi xuất hiện các vết nứt trên bề mặt bê tông của các dầm thí nghiệm và có thể quan sát được bằng mắt thường. Thời gian tiến hành thí nghiệm đối với các mẫu dầm là 60 ngày. Sau khi kết thúc thí nghiệm, các mẫu dầm được vớt ra khỏi bể, để khô và tiến hành đo vẽ sơ đồ phân bố vết nứt do cốt thép bị ăn mòn gây ra trên bề mặt dầm (Hình 5). Chi tiết kết quả được trình bày ở Hình 7. Đối với sự mất mát khối lượng cốt thép do ăn mòn, thông số này được



Hình 4. Sơ đồ thí nghiệm ăn mòn đẩy nhanh bằng phương pháp ăn mòn điện hóa

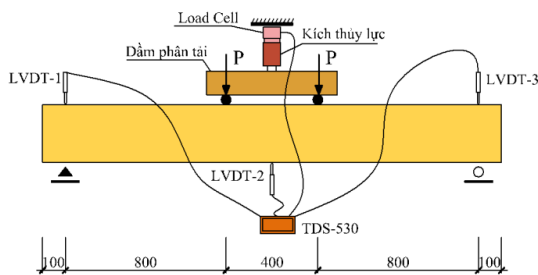
xác định sau khi tiến hành thí nghiệm uốn các mẫu đầm. Sau thí nghiệm uốn, đập vỡ các mẫu đầm để lấy cốt thép bị ăn mòn. Sau khi làm sạch gỉ trên các thanh cốt thép, tiến hành cân xác định lại khối lượng của các thanh thép.



Hình 5. Đo đạc bề rộng vết nứt trên đầm bằng thiết bị đo quang học

2.3. Thí nghiệm xác định sự làm việc chịu uốn của các mẫu đầm bị ăn mòn

Các mẫu đầm sau khi tiến hành thí nghiệm ăn mòn, để khô trong vòng 14 ngày, sau đó tiếp tục tiến hành thí nghiệm uốn. Trên Hình 6 trình bày sơ đồ thí nghiệm. Các mẫu đầm được thí nghiệm theo sơ đồ uốn bốn điểm, dưới tác dụng của hai tải trọng tập trung P , có độ lớn bằng nhau và cách đều gối tựa mỗi bên một đoạn bằng 800 mm. Sử dụng kích thủy lực, trạm bơm dầu và đầm phân tải để tạo ra hai tải trọng này (tải trọng đầu kích có giá trị bằng $2P$). Giá trị tải trọng tác dụng lên đầm



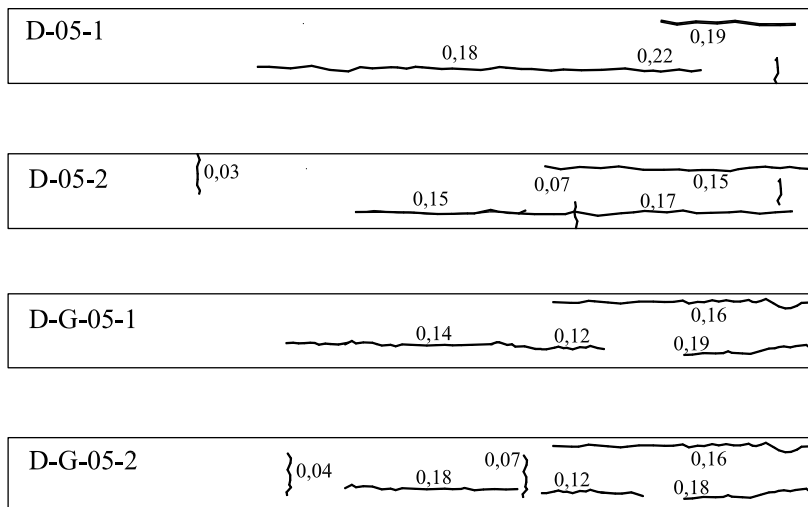
Hình 6. Sơ đồ thí nghiệm uốn bốn điểm các mẫu đầm

được xác định thông qua dụng cụ đo lực điện tử (Load cell). Để đo chuyển vị của dầm dưới tác dụng của tải trọng, sử dụng 03 thiết bị đo chuyển vị điện tử, ký hiệu LVDT-1, LVDT-2 và LVDT-3, bố trí ở hai gối tựa và ở tiết diện giữa dầm. Từ số đo trên 03 thiết bị đo này cho phép xác định độ võng lớn nhất ở tiết diện giữa dầm. Các dụng cụ đo lực, đo chuyển vị được kết nối với bộ thu thập và xử lý số liệu TDS 530 (do hãng Tokyo Sokki của Nhật Bản sản xuất) cho phép ghi nhận tự động và đồng thời các số liệu thí nghiệm (01 giây/lần ghi).

3. Phân tích và đánh giá kết quả

3.1. Tình trạng nứt do ăn mòn và mức độ ăn mòn

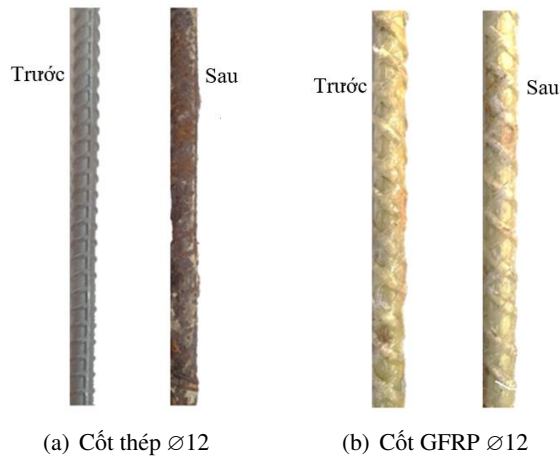
Khi cốt thép bị ăn mòn, sẽ dẫn đến tạo gỉ thép làm tăng thể tích cốt thép, gây ra lực đẩy có thể gây ra nứt, vỡ lớp bê tông bảo vệ. Sau thời gian thí nghiệm ăn mòn đẩy nhanh 60 ngày, cả 04 mẫu dầm đều xuất hiện vết nứt trên bề mặt dầm và có thể quan sát được bằng mắt thường. Trên Hình 7 trình bày sơ đồ vết nứt xuất hiện ở mặt bên, (phía mặt bên xuất hiện nhiều vết nứt nhất) của 04 mẫu dầm thí nghiệm. Ở mặt phía dưới đáy dầm và mặt trên của các mẫu dầm, tình trạng nứt xảy ra ít hơn đáng kể, chỉ xuất hiện một vài vết nứt ngắn, dọc theo cốt thép có bề rộng từ 0,02 đến 0,05 mm. Các vết nứt do ăn mòn cốt thép chủ yếu ở mặt bên của dầm, xuất hiện ở cao độ cốt thép vùng chịu kéo và vùng chịu nén, dọc theo chiều dài thanh cốt thép, có bề rộng nằm trong khoảng 0,12 mm đến 0,19 mm. Bên cạnh đó, xuất hiện một số vết nứt cục bộ, theo phương thẳng đứng, có bề rộng nhỏ. Trong trường hợp này, do chiều dày lớp bê tông bảo vệ ở mặt bên của cả 04 mẫu dầm thí nghiệm đều như nhau nên có thể thấy tình trạng nứt khá tương đồng trên các mẫu dầm BTCT và dầm cốt SGFRP. Sự có mặt của thanh GFRP đặt ở phía ngoài cốt thép không có ảnh hưởng đáng kể đến tình trạng nứt trên bề mặt dầm do cốt thép bị ăn mòn gây ra.



Hình 7. Sơ đồ vết nứt ở mặt bên của các mẫu dầm thí nghiệm

Để xác định tình trạng ăn mòn cốt thép, sau khi tiến hành thí nghiệm uốn, tiến hành đập vỡ các mẫu dầm để lấy các thanh cốt thép. Có thể thấy tình trạng ăn mòn xảy ra trên các cốt thép dọc vùng kéo ($\varnothing 12$), vùng nén ($\varnothing 10$) và cốt thép đai. Trên Hình 8 trình bày hình ảnh của thanh cốt thép $\varnothing 12$ và thanh GFRP trước và sau khi tiến hành thí nghiệm ăn mòn đẩy nhanh. Có thể thấy thanh GFRP

không bị ăn mòn bởi ion clorua. Như đã trình bày ở trên, ưu điểm này cho thấy khả năng sử dụng thanh GFRP làm cốt chịu lực trong kết cấu bê tông ở môi trường xâm thực.



Hình 8. Hình ảnh cốt thép và cốt GFRP trước và sau thí nghiệm ăn mòn điện hóa

Đối với mỗi mẫu thí nghiệm, để xác định đến sự hao hụt khối lượng (hay sự suy giảm đường kính) của các thanh cốt thép Ø12 do ăn mòn, lấy 02 mẫu thép để xác định khối lượng. Các mẫu thép có chiều dài 1000 mm, được lấy ở vùng giữa nhịp dầm (để có cơ sở phân tích sự làm việc chịu uốn của các mẫu dầm này). Sau khi làm sạch bề mặt các thanh cốt thép (sử dụng chất tẩy gỉ thép chuyên dụng B05 do Viện KHCN Xây dựng IBST sản xuất để làm sạch gỉ trên bề mặt cốt thép, sau đó rửa bằng nước sạch), tiến hành cân xác định trong lượng bằng cân điện tử (độ chính xác đến 1 gam). Kết quả xác định sự hao hụt khối lượng của cốt thép trong các mẫu dầm được trình bày trong Bảng 2.



Hình 9. Cân xác định khối lượng thanh cốt thép sau khi bị ăn mòn

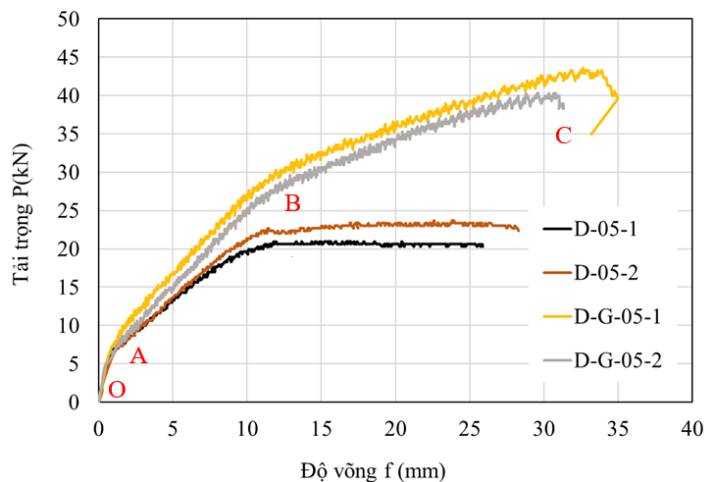
Bảng 2. Đánh giá mức độ ăn mòn cốt thép Ø12

Mẫu dầm thí nghiệm	Khối lượng ban đầu (kg/m)	Khối lượng sau khi bị ăn mòn (kg/m)	Suy giảm khối lượng (%)
D-05-1	858	795,4	7,2
D-05-2	858	810,3	5,6
D-G-05-1	858	805,5	6,1
D-G-05-2	858	818,5	4,6

3.2. Ứng xử chịu uốn của các mẫu đầm thí nghiệm

a. Quan hệ tải trọng chuyển vị của các mẫu đầm thí nghiệm

Trên Hình 10 trình bày các biểu đồ quan hệ giữa tải trọng và độ võng ($P - f$) của 04 mẫu đầm thí nghiệm. Các giá trị tải trọng và độ võng đặc trưng của các mẫu đầm thí nghiệm được trình bày ở Bảng 3. Đây đều là các mẫu đầm đã có các vết nứt trước do cốt thép bị ăn mòn gây ra. Có thể thấy sự làm việc của các mẫu đầm bê tông cốt thép và bê tông cốt hỗn hợp đều có chung các giai đoạn sau: Giai đoạn làm việc ban đầu, tương ứng với đoạn OA. Điểm A có sự thay đổi độ dốc của biểu đồ $P - f$ cho thấy đây là thời điểm xuất hiện thêm các vết nứt mới do mô men uốn gây ra trên đầm. Trong giai đoạn này, có thể quan hệ tải trọng độ võng của cả 04 đầm không có sự chênh lệch. Điều này cho thấy, khi tải trọng còn nhỏ, hầu như thanh GFRP chưa tham gia làm việc, ứng xử của đầm bê tông cốt SGFRP tương tự như đầm BTCT. Giai đoạn tiếp theo là giai đoạn AB, trong đó B là điểm thay đổi độ dốc lần thứ 2 của biểu đồ $P - f$, tương ứng với thời điểm cốt thép chịu kéo bị chảy dẻo. Tại điểm này, xác định được giá trị tải trọng gây chảy dẻo cốt thép, ký hiệu P_y . Trong giai đoạn này, có thể thấy độ cứng của các mẫu đầm cốt SGFRP cao hơn so với đầm BTCT thông qua việc giảm độ võng của đầm bê tông cốt hỗn hợp so với đầm BTCT ở cùng cấp tải trọng. Điều này cho thấy sự tham gia làm việc của thanh GFRP góp phần gia tăng độ cứng của đầm. Như vậy, trong trường hợp đầm cốt SGFRP bị ăn mòn, vai trò của thanh GFRP vẫn được phát huy tương tự như kết quả thu được khi thí nghiệm các mẫu đầm bê tông cốt SGFRP không bị ăn mòn [8–14]. Giai đoạn BC là giai đoạn sau khi cốt thép vùng chịu kéo bị chảy dẻo. Với đầm BTCT cốt thép, đây là giai đoạn thể hiện sự làm việc của bê tông vùng nén, tuy nhiên có thể thấy sự tham gia chịu lực của bê tông vùng nén là không đáng kể. Với đầm bê tông cốt SGFRP, giai đoạn này thể hiện rõ sự tham gia chịu lực của thanh GFRP. Điểm C ứng với thời điểm bê tông vùng nén bị ép vỡ, cho phép xác định tải trọng cực hạn gây phá hoại đầm, P_{ul} . Theo kết quả trình bày ở Bảng 3, tỷ số giữa tải trọng cực hạn và tải trọng gây chảy dẻo cốt thép P_{ul}/P_y có giá trị trung bình bằng 1,55. So với các kết quả thu được trong nghiên cứu [8], với đầm bê tông sử dụng cốt SGFRP tương tự, có tỷ số trên bằng 1,92, thì có thể nhận thấy với đầm cốt SGFRP khi bị ăn mòn, sự tham gia chịu lực của thanh GFRP bị suy giảm. Điều này được giải thích do sự suy giảm khả năng bám dính giữa thanh GFRP với bê tông vùng chịu kéo do đã xuất hiện các vết nứt do cốt thép bị ăn mòn gây ra.



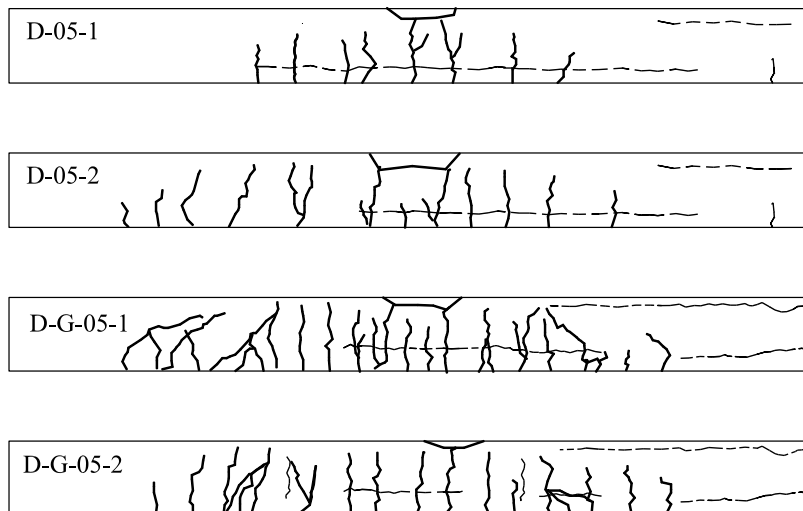
Hình 10. Quan hệ tải trọng – độ võng của các mẫu đầm thí nghiệm

Bảng 3. Các giá trị tải trọng và độ võng đặc trưng

Mẫu dầm thí nghiệm	Tải trọng gây chảy cốt thép P_y (kN)	Độ võng khi cốt thép chảy (mm)	Tải trọng gây phá hoại P_{ul} (kN)	Độ võng khi dầm bị phá hoại (mm)
D-05-1	21,0	12,0	21,5	26,0
D-05-2	22,5	11,5	24,0	25,5
D-G-05-1	26,5	12,0	40,0	31,0
D-G-05-2	27,5	11,8	44,0	33,5

b. Sự phát triển vết nứt và cơ chế phá hoại của các mẫu dầm

Trên Hình 11 trình bày sơ đồ vết nứt trên các mẫu dầm dưới tác dụng của tải trọng thí nghiệm. Có thể thấy với 02 mẫu dầm bê tông cốt SGFRP, số lượng vết nứt xuất hiện nhiều hơn so với hai mẫu dầm BTCT. Sự bám dính giữa thanh GFRP và bê tông có vai trò trong việc tăng cường sự làm việc của bê tông vùng chịu kéo, qua đó giúp phân tán các vết nứt nhiều hơn và hạn chế sự mở rộng của các vết nứt. Với hai mẫu dầm bê tông cốt SGFRP, số lượng vết nứt trên dầm D-G-05-1 nhiều hơn hẳn so với dầm D-G-05-2. Kết quả này cũng phù hợp với các biểu đồ tải trọng – độ võng của 02 dầm này được trình bày trên Hình 9 trong đó ứng xử uốn của dầm D-G-05-1 tốt hơn so với dầm D-G-05-2.



Hình 11. Sơ đồ vết nứt trên các mẫu dầm khi thí nghiệm uốn

Cơ chế phá hoại của các mẫu dầm BTCT D-05-1 và D-05-2 là phá hoại dẻo, do cốt thép vùng kéo bị chảy dẻo và bê tông vùng nén bị ép vỡ. Với 02 mẫu dầm cốt SGFRP, sự phá hoại là phá hoại giòn, do bê tông vùng nén bị ép vỡ (Hình 12). Tại thời điểm này, thanh GFRP chưa bị đứt. Cơ chế phá hoại này cũng tương tự như đối với các dầm cốt SGRP không bị ăn mòn [7–14]. Như vậy, với dầm bê tông cốt SGFRP bị ăn mòn, cần phải lưu ý dạng phá hoại này vì đây là dạng phá hoại đột ngột, không có cảnh báo trước.



(a) Dầm D-05-1



(b) Dầm D-G-05-1

Hình 12. Phá hoại điển hình của dầm BTCT và cốt SGFRP do bê tông vùng nén bị ép vỡ

4. Kết luận

Nội dung bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm ứng xử của dầm bê tông cốt SGFRP bị ăn mòn. Dựa trên các kết quả đạt được, có thể rút ra những kết luận chính sau đây:

- Thông qua thí nghiệm ăn mòn cốt thép đẩy nhanh, cho phép tạo ra được tình trạng nứt trên kết cấu dầm bê tông cốt thép và dầm bê tông cốt SGFRP. Với dầm bê tông cốt SGFRP, khi thí nghiệm ăn mòn điện hóa, thanh GFRP không bị ăn mòn và không ảnh hưởng tình trạng nứt trên bề mặt dầm do ăn mòn cốt thép gây ra.

- Ứng xử uốn của dầm bê tông cốt SGFRP bị ăn mòn cốt thép gồm các giai đoạn làm việc đặc trưng tương tự với dầm bê tông cốt SGFRP không bị ăn mòn cốt thép. Sự có mặt của thanh GFRP góp phần làm tăng độ cứng của dầm. Đồng thời, thông qua sự bám dính giữa GFRP và bê tông cho phép phân tán đều các vết nứt vùng kéo do mô men uốn gây ra, hạn chế độ mở rộng của vết nứt.

- Do bê tông vùng kéo bị nứt do ăn mòn cốt thép, nên khả năng tham gia chịu lực của thanh GFRP có sự suy giảm so với trường hợp dầm không hư hỏng do ăn mòn. Bên cạnh đó, cần lưu ý dạng phá hoại của dầm SGFRP bị ăn mòn là phá hoại dòn, do bê tông vùng nén bị ép vỡ. Đây là điều cần lưu ý khi áp dụng giải pháp cốt SGFRP cho kết cấu dầm bê tông.

Tài liệu tham khảo

- [1] Khoan, P. V., Thắng, N. N. (2010). Tình trạng ăn mòn cốt thép ở vùng biển Việt Nam và một số kinh nghiệm sử dụng chất ức chế ăn mòn canxi nitrit. *Tạp chí Khoa học công nghệ Xây dựng, Viện Khoa học công nghệ xây dựng IBST*.
- [2] ACI 440.1R (2015). *Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars*. Report by ACI Committee 440, American Concrete Institute.
- [3] CAN/CSA-S806-12 (2012). *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*. Canadian Standards Association.
- [4] FIB.40 (2007). *FRP Reinforcement in RC Structures*. Bulletin No. 40, International Federation for Structural Concrete.
- [5] FIB (2010). *Model Code for Concrete Structures*. International Federation for Structural Concrete.
- [6] JSCE (1997). *Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials*. Concrete Engineering Series 23. Japan Society of Civil Engineers Machida, A. ed., Tokyo, Japan.

- [7] GangaRao, H. V. S., Taly, N., Vijay, P. V. (2007). *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*. CRC Press.
- [8] Tuấn, P. M. *Nghiên cứu sự làm việc chịu uốn của dầm bê tông cốt hỗn hợp thép và polyme cốt sợi thủy tinh*. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật. Đại học Xây dựng.
- [9] Tuấn, P. M. (2019). [Khả năng chịu mô men uốn của dầm bê tông cốt hỗn hợp thép và GFRP theo TCVN 5574:2018](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 13(4V):73–81.
- [10] Leung, H. Y. (2004). [Flexural capacity of concrete beams reinforced with steel and fibre-reinforced polymer \(FRP\) bars](#). *Journal of Civil Engineering and Management*, 10(3):209–215.
- [11] Ge, W., Zhang, J., Dai, H., Tu, Y. (2011). Experimental Study on the Flexural Behavior of Concrete Beam Hybrid Reinforced with FRP Bars and Steel Bars. *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, 301–303.
- [12] Ge, W., Zhang, J., Cao, D., Tu, Y. (2015). [Flexural behaviors of hybrid concrete beams reinforced with BFRP bars and steel bars](#). *Construction and Building Materials*, 87:28–37.
- [13] Jia, B., Liu, S., Liu, X., Wang, R. (2014). [Flexural capacity calculation of hybrid bar reinforced concrete beams](#). *Materials Research Innovations*, 18(sup2):S2–836–S2–840.
- [14] Kara, I. F., Ashour, A. F., Koroğlu, M. A. (2015). [Flexural behavior of hybrid FRP/steel reinforced concrete beams](#). *Composite Structures*, 129:111–121.
- [15] Lau, D., Pam, H. J. (2010). [Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams](#). *Engineering Structures*, 32(12):3857–3865.
- [16] Mustafa, S. A. A., Hassan, H. A. (2018). [Behavior of concrete beams reinforced with hybrid steel and FRP composites](#). *HBRC Journal*, 14(3):300–308.
- [17] Sun, Z., Fu, L., Feng, D.-C., Vatuloka, A. R., Wei, Y., Wu, G. (2019). [Experimental study on the flexural behavior of concrete beams reinforced with bundled hybrid steel/FRP bars](#). *Engineering Structures*, 197: 109443.
- [18] Zhou, Y., Zheng, Y., Sui, L., Hu, B., Huang, X. (2020). [Study on the Flexural Performance of Hybrid-Reinforced Concrete Beams with a New Cathodic Protection System Subjected to Corrosion](#). *Materials*, 13(1):234.
- [19] Vu, N. S. (2018). *Experimental and analytical investigations on seismic behavior of corroded reinforced concrete members*. Doctoral thesis, Nanyang Technological University, Singapore.
- [20] Fang, C., Lundgren, K., Chen, L., Zhu, C. (2004). [Corrosion influence on bond in reinforced concrete](#). *Cement and Concrete Research*, 34(11):2159–2167.
- [21] Lee, H. S., Tomosawa, F., Noguchi, T. (1996). Effects of rebar corrosion on the structural performance of singly reinforced beams. *Durability of building materials and components*, 7(1):571–580.
- [22] Azad, A. K., Ahmad, S., Azher, S. A. (2007). [Residual Strength of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams](#). *ACI Materials Journal*, 104(1):40–47.
- [23] Long, Đ. V., Hùng, P. V., Thắng, N. K. T., Đông, N. V., Hoàng, P. C. (2020). *Nghiên cứu thực nghiệm ứng xử của cột BTCT chịu nén lệch tâm bị hư hỏng do ăn mòn cốt thép và hiệu quả gia cường bằng vật liệu tấm sợi composite*. Báo cáo tổng kết đề tài NCKH sinh viên, mã số XD-2020-31, Trường Đại học Xây dựng.