



EXPERIMENTAL STUDY ON SHEAR BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH CORRODED STIRRUPS STRENGTHENED WITH CARBON TEXTILE REINFORCED CONCRETE

Nguyen Huy Cuong^{1*}, Dinh Huu Tai¹, Le Minh Canh²

¹University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

²Campus in Ho Chi Minh city, University of Transport and Communications, 450-451 Le Van Viet Street, Ho Chi Minh city, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 13/07/2021

Revised: 27/09/2021

Accepted: 15/10/2021

Published online: 15/02/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.2.2>

* *Corresponding author*

Email: nguyenhuycuong@utc.edu.vn; Tel: +8498 983 2425

Abstract. Corrosion of embedded reinforcing steel is widely accepted as the primary contributor causing premature damage to reinforced concrete (RC) structures. The Textile Reinforced Concrete (TRC) system is a relatively new technology in repairing and strengthening concrete structures, including flexure, shear, and confinement. This paper reports an experimental investigation on the shear behavior of the corroded RC beams with stirrups having different levels of corrosion. The shear resistance contributions from the corroded RC beams and carbon TRC at various volume ratios were carefully examined. Eighteen beams were tested, including twelve beams subjected by an electrochemically accelerated aging technique for 60 and 90 days to obtain the theoretical mass loss in their stirrups of 10% and 20%, respectively. The stirrups were locally corroded in the shear span. A three-point bending test was applied to observe the shear behavior of the corroded beams. Eight corroded RC beams were strengthened with 2 and 3 layers of carbon textile in the form of U-wraps. The objective of the test program was to investigate the shear performances of strengthened beams loaded up to failure, including load-deflection behavior, crack patterns, ultimate capacities, and modes of failure. For the severely damaged beams, the shear strength in the specimen was strengthened by the 2-layers and 3-layers improved 42.5% and 60.6%.

Keywords: textile-reinforced concrete, strengthen, corroded stirrups, carbon textile.



NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH ỨNG XỬ CHỊU CẮT CỦA DẦM BÊ TÔNG CÓ CỐT THÉP ĐAI BỊ ĂN MÒN ĐƯỢC TĂNG CƯỜNG BẰNG BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT

Nguyễn Huy Cường^{1*}, Đinh Hữu Tài¹, Lê Minh Cảnh²

¹Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

²Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải, 450-451 Lê Văn Việt, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 13/07/2021

Ngày nhận bài sửa: 27/09/2021

Ngày chấp nhận đăng: 15/10/2021

Ngày xuất bản Online: 15/02/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.2.2>

* Tác giả liên hệ

Email: nguyenhuycuong@utc.edu.vn; Tel: +84989832425

Tóm tắt. Ăn mòn cốt thép trong bê tông là một trong những nguyên nhân chính gây ra hư hỏng và suy thoái cho kết cấu bê tông cốt thép. Bê tông cốt lưới dệt (TRC) là một công nghệ mới trong việc sửa chữa và tăng cường kết cấu bê tông, bao gồm cả tăng cường sức kháng uốn, sức kháng cắt và sức kháng nén. Bài báo này trình bày một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm để xác định ứng xử chịu cắt của dầm bê tông có cốt thép đai bị ăn mòn được tăng cường bằng bê tông cốt lưới dệt (TRC). Sức kháng cắt của các dầm BTCT bị ăn mòn và của lớp TRC với hàm lượng cốt lưới dệt thay đổi sẽ được đánh giá chi tiết. Trong nghiên cứu này, có 18 dầm được thí nghiệm, trong đó có 12 dầm được gia tốc quá trình ăn mòn điện hóa trong thời gian 60 và 90 ngày để đạt được mức độ mất mát khối lượng lý thuyết 10% và 20% với cốt thép đai. Quá trình điện hóa được thực hiện đối với cốt thép đai trong đoạn chiều dài chịu cắt của dầm thí nghiệm. Các dầm đối chứng được thí nghiệm uốn ba điểm để xác định sức kháng cắt. Tám dầm BTCT bị ăn mòn được tăng cường với 2 và 3 lớp lưới sợi các bon, có cấu trúc dạng chữ U. Mục tiêu nghiên cứu của chương trình thí nghiệm này là xác định ứng xử chịu cắt của các dầm được tăng cường, bao gồm quan hệ lực – độ võng, cấu trúc vết nứt, sức kháng cắt và các dạng phá hoại. Kết quả thí nghiệm cho thấy, đối với các dầm bị ăn mòn mạnh, sức kháng cắt của các dầm được tăng cường bằng 2 và 3 lớp lưới sợi đã tăng lên 42,5% và 60,6%.

Từ khóa: bê tông cốt lưới dệt, tăng cường, cốt đai bị ăn mòn, cốt lưới dệt các bon.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ăn mòn cốt thép trong bê tông là một trong những nguyên nhân chính gây hư hỏng và phá hủy kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) ở Việt Nam cũng như trên thế giới. Quá trình cốt thép bị ăn mòn sẽ gây nứt lớp bê tông bảo vệ, gây ra mất mát diện tích tiết diện cốt thép, làm giảm sức kháng xuống tới mức gây nguy hiểm cho trạng thái giới hạn chịu lực. Tuy nhiên, việc thay thế các công trình này đòi hỏi không chỉ kinh phí xây dựng lớn mà còn nhiều vấn đề phát sinh khi phá bỏ công trình cũ đi và thay thế bằng công trình mới, đặc biệt là vấn đề đảm bảo giao thông đối với các công trình cơ sở hạ tầng đường bộ, đường sắt. Do đó, trên thế giới đã phát triển nhiều loại vật liệu tiên tiến, có tính năng tốt để sửa chữa và tăng cường khả năng chịu lực cho kết cấu bê tông cũ. Hiện nay, đã có nhiều công nghệ sửa chữa, tăng cường kết cấu BTCT được ứng dụng ở Việt Nam, bao gồm: công nghệ bọc “áo” BTCT (reinforced concrete jacketing), dán bản thép, dự ứng lực ngoài, dán bằng vật liệu polymer cốt sợi FRP (fiber reinforced polymer) v.v. Các công nghệ này đều có những ưu điểm và nhược điểm riêng, hầu hết đều tập trung vào việc cải thiện khả năng chịu lực cho kết cấu. Tuy nhiên, nhìn chung các loại vật liệu này chưa thể ứng dụng hiệu quả trong các điều kiện môi trường khắc nghiệt, cũng như tính ăn mòn mạnh. Do đó, các phương pháp này còn nhiều hạn chế trong việc sửa chữa và tăng cường kết cấu BTCT ở vùng ven biển.

Bê tông cốt lưới dệt (Textile Reinforced Concrete, TRC) là một loại bê tông hạt mịn có cốt dạng lưới được dệt từ sợi các bon hay sợi thủy tinh kháng kiềm. Lưới sợi dệt là vật liệu có nhiều ưu điểm đặc biệt như có cường độ cao, trọng lượng nhẹ và có độ bền với môi trường rất cao [1]. Hiện nay, đã có một số nghiên cứu về ứng dụng TRC trong việc tăng cường, sửa chữa kết cấu cũ ở nhiều nước trên thế giới [1-3]. TRC có thể sử dụng để tăng cường hiệu quả các kết cấu dầm, cột, bản chịu uốn, cắt, nén và xoắn, không chỉ ở trạng thái giới hạn cường độ mà còn cải thiện khả năng chống nứt tốt cho kết cấu. Các kết quả nghiên cứu còn cho thấy, TRC phù hợp để áp dụng phương pháp bảo vệ ca tốt để chống ăn mòn cho cốt thép trong bê tông. Với phương pháp này, TRC vừa đóng vai trò tăng cường chịu lực vừa đóng vai trò chống ăn mòn cho cốt thép [4]. Hiện nay, đã có một số lượng lớn nghiên cứu sử dụng TRC để tăng cường sức kháng cắt của dầm BTCT chưa bị ăn mòn [5-8]. Blanksvärd [5], Azam [6], Escrig [7] và Tzoura [8] đã khảo sát hiệu quả tăng cường sức kháng cắt cho dầm BTCT với nhiều loại lưới sợi khác nhau, bao gồm: sợi thủy tinh, sợi các bon, sợi PBO, sợi bazan. Trong các nghiên cứu này, TRC được “trát” lên các mặt của dầm để các bó sợi làm việc tương tự như cốt thép đai hay cốt thép xiên. Đồng thời, các tác giả đã nghiên cứu ảnh hưởng cấu trúc tăng cường khác nhau như tăng cường ở 2 mặt, 3 mặt và 4 mặt của dầm [5]; thay đổi loại lưới sợi, số lớp lưới sợi, phương của lưới sợi [6]; thay đổi loại bê tông hạt mịn [5]; so sánh hiệu quả tăng cường với vật liệu FRP [8] v.v.

Trong khoảng 10 năm qua, đã có một số ít nghiên cứu đã thực hiện để đánh giá ứng xử chịu uốn của kết cấu dầm BTCT đã bị ăn mòn, được tăng cường bằng TRC [9-11]. Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu nào được thực hiện để tăng cường sức kháng cắt cho kết cấu dầm BTCT đã bị ăn mòn. Elghazy [9] đã thực hiện việc gia cường cho dầm BTCT bị ăn mòn bằng TRC sợi các bon và cho thấy, việc gia cường đã khôi phục cả độ cứng và sức kháng uốn của kết cấu dầm. EI-Maaddawy [10] nghiên cứu ứng xử chịu uốn của dầm BTCT tiết diện chữ T đã bị ăn mòn, được sửa chữa và gia cường bằng TRC sợi các bon và sợi bazan. Kết quả nghiên cứu cho thấy, TRC sợi bazan đã không khôi phục toàn bộ sức kháng uốn của dầm bị ăn mòn, trong khi TRC sợi các bon có thể khôi phục đến 109% sức kháng. Oluwadahunsi [12] sử dụng TRC để tăng cường sức kháng uốn cho các dầm BTCT có mức độ ăn mòn cốt thép là 10 và 20%. Sau khi tăng cường, sức kháng của dầm có thể tăng từ 5,3 đến 26%.

Trong thực tế, hầu hết các kết cấu cần được sửa chữa và tăng cường đều xuất hiện sự hư hỏng do ăn mòn cốt thép trong bê tông. Tuy nhiên, cho đến nay, trên thế giới chưa có nghiên cứu nào được thực hiện để đánh giá hiệu quả tăng cường sức kháng cắt cho dầm BTCT có cốt thép bị ăn mòn bằng TRC. Bài báo này sẽ trình bày một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm để xác định ứng xử chịu cắt của dầm bê tông có cốt thép đai bị ăn mòn được tăng cường bằng TRC sử dụng lưới sợi các bon. Các tham số thay đổi trong nghiên cứu này là mức độ ăn mòn, hàm lượng cốt lưới dệt được tăng cường, loại tải trọng tác dụng. Ngoài 6 dầm đối chứng, có 12 dầm được gia tốc quá trình ăn mòn điện hóa đối với cốt thép trong bê tông nhằm đạt được mức độ mất mát khối lượng cốt thép đai lần lượt là 10% và 20%. Tám dầm BTCT bị ăn mòn sẽ được tăng cường với 2 và 3 lớp lưới sợi các bon, có cấu trúc dạng chữ U.

2. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

2.1. Quy hoạch thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, 3 nhóm dầm với tổng cộng 18 dầm BTCT dạng giản đơn được thí nghiệm uốn 3 điểm, dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng lặp không đổi chiều (Bảng 1). Trong nhóm G1, 6 dầm không bị ăn mòn được sử dụng để làm dầm đối chứng. Trong đó, dầm R01 và R02 là dầm không có cốt thép đai, được thí nghiệm để xác định sự đóng góp sức kháng cắt của bê tông khi không có cốt thép đai. Dầm R1-1 và R1-2 là các dầm đối chứng được gia tải tĩnh, với mục tiêu xác định khả năng chịu lực (P_u) của dầm BTCT. Từ kết quả giá trị lực lớn nhất P_u , phổ tải trọng lặp được thiết kế để áp dụng cho các dầm còn lại. Tương tự, dầm R2-1 và R2-2 là các dầm đối chứng được gia tải lặp không đổi chiều, nhằm so sánh với các dầm bị ăn mòn và các dầm được tăng cường bằng TRC trong các chuỗi thí nghiệm tiếp theo. Các nhóm dầm G2 và G3 đều có 6 dầm, được gia tốc quá trình ăn mòn cốt thép với thời gian lần lượt là 60 và 90 ngày, với mục tiêu đạt được mức độ ăn mòn đáng kể cho cốt thép đai trong bê tông, tương ứng mức độ mất mát khối lượng lý thuyết là 10 và 20%. Trong nhóm G2, có 2 dầm L1R1 và L1R2 là các dầm ăn mòn được sử dụng làm đối chứng. Các dầm còn lại được tăng cường với 2 và 3 lớp lưới sợi các bon. Nguyên tắc này cũng được thực hiện với chuỗi 6 dầm trong nhóm G3. Đối với mỗi trường hợp, có 2 mẫu sẽ được thí nghiệm.

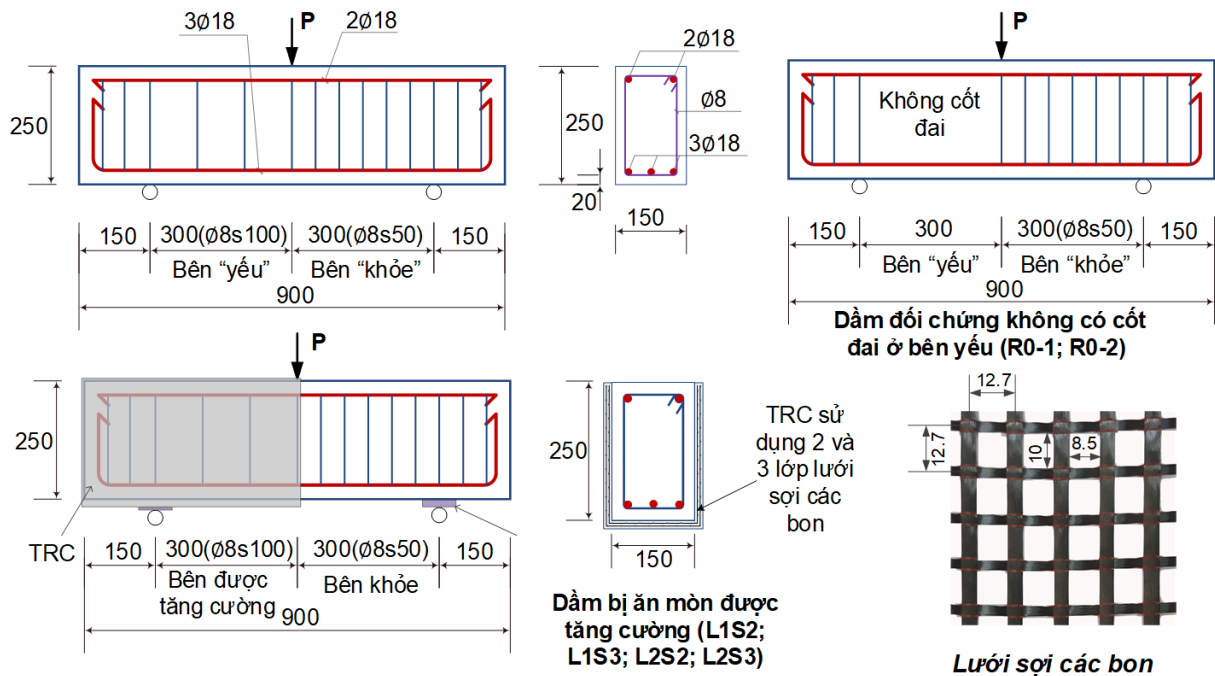
Bảng 1. Các nhóm mẫu thí nghiệm.

Nhóm	Dầm	Loại tải trọng	Mô tả
G1: không bị ăn mòn	R0-1, R0-2	Tĩnh	Không có cốt đai ở bên “yếu”
	R1-1, R1-2	Tĩnh	Dầm đối chứng chịu tải trọng tĩnh, để xác định khả năng chịu lực (P_u)
	R2-1, R2-2	Lặp	Dầm đối chứng không bị ăn mòn
G2: Bị ăn mòn mức độ 1 (trung bình)	L1R1, L1R2	Lặp	Dầm bị ăn mòn, là đối chứng của nhóm 2
	L1S2-1, L1S2-2	Lặp	Dầm bị ăn mòn, được tăng cường 2 lớp lưới
	L1S3-1, L1S3-2	Lặp	Dầm bị ăn mòn, được tăng cường 3 lớp lưới
G3: Bị ăn mòn mức độ 2 (nặng)	L2R1, L2R2	Lặp	Dầm bị ăn mòn, là đối chứng của nhóm 3
	L2S2-1, L2S2-2	Lặp	Dầm bị ăn mòn, được tăng cường 2 lớp lưới
	L2S3-1, L2S3-2	Lặp	Dầm bị ăn mòn, được tăng cường 3 lớp lưới

2.2. Cấu tạo mẫu thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, tất cả các dầm đều có cùng kích thước 150 mm × 250 mm × 900 mm, với lớp bê tông bảo vệ cốt thép đai là 20 mm. Các dầm được thí nghiệm uốn 3 điểm, với

chiều dài nhịp là 600 mm, tương ứng với tỷ lệ chiều dài chịu cắt trên chiều cao làm việc (a/d) bằng 1,36. Hình 1 trình bày cấu tạo các dầm được thí nghiệm. Tất cả các dầm, trừ dầm R0-1 và R0-2, đều có cùng cấu tạo với ba thanh cốt thép đường kính 18 mm ở thớ dưới, hai thanh cốt thép đường kính 18 mm ở thớ trên. Dầm được chia thành hai nửa, được đặt tên là “bên khỏe” (bên đặt cốt đai dày), và “bên yếu” (bên đặt cốt thép đai thưa) với mục đích để dầm bị phá hoại ở bên yếu. Cụ thể, ở bên khỏe được đặt cốt thép đai đường kính 8 mm, khoảng cách 50 mm. Ngược lại, bên yếu được đặt cốt thép đai 8 mm với khoảng cách 100 mm. Cần lưu ý rằng, chỉ có bên yếu của dầm được ngâm trong dung dịch NaCl, và cốt thép đai ở bên yếu sẽ được gia tốc quá trình ăn mòn. Việc tăng cường cũng được thực hiện ở bên yếu này. Hai dầm còn lại của nhóm G1 (R0-1 và R0-2) không được đặt cốt thép đai ở bên yếu, với mục tiêu xác định sức kháng cắt của dầm khi không có cốt thép đai.

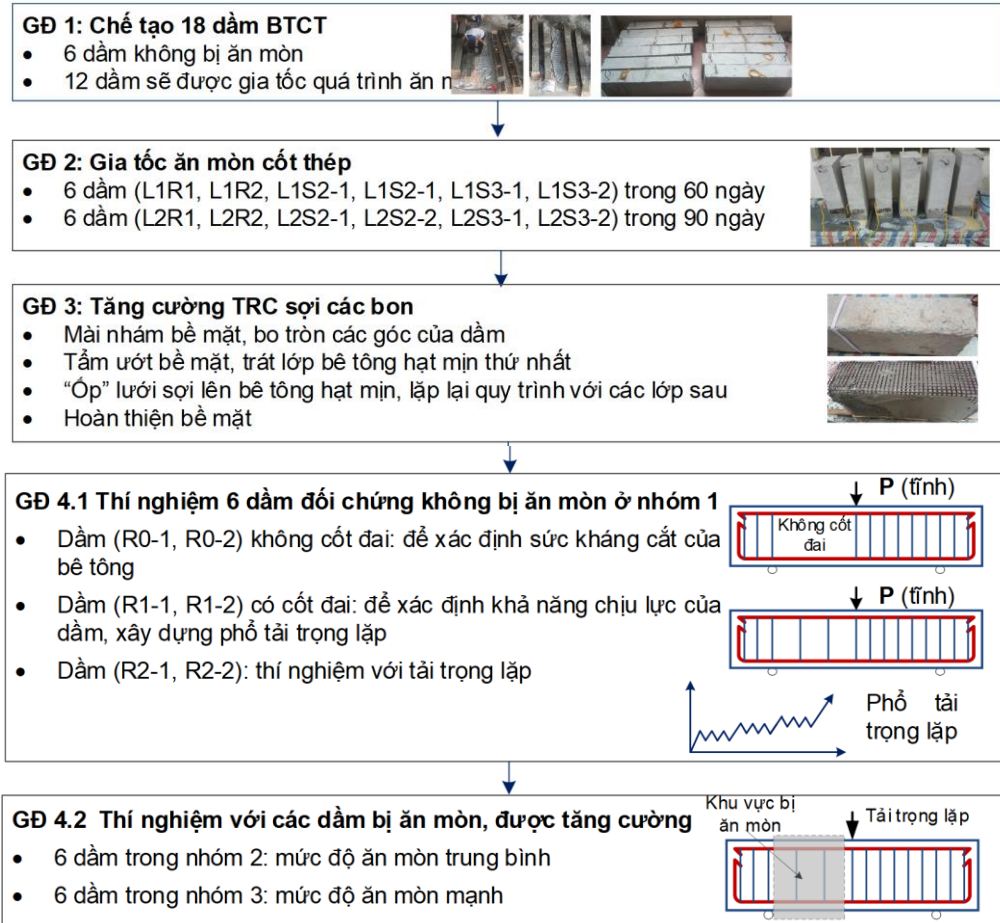


Hình 1. Cấu tạo các dầm thí nghiệm.

Tất cả các mẫu thí nghiệm đều sử dụng bê tông thường, có cường độ chịu nén trung bình ở tuổi 28 ngày là 38,5 MPa. Cốt thép dọc đường kính 18 mm và cốt thép đai đường kính 8 mm có cường độ chịu kéo lần lượt là 429,4 MPa và 363,1 MPa. Bê tông hạt mịn được sử dụng trong nghiên cứu này có đường kính hạt lớn nhất là 0,6 mm. Cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo uốn trung bình của bê tông hạt mịn lần lượt là 45,2 MPa và 5,3 MPa. Trong nghiên cứu này, lưới sợi cacbon mã hiệu SITgrid017 được sử dụng để tăng cường sức kháng cắt cho dầm (Hình 1). Các bó sợi cacbon có độ mịn 3200 tex, với khoảng cách giữa các bó sợi là 12,7 mm, diện tích mỗi bó sợi là 1,808 mm². Cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của lưới sợi lần lượt là 2890 MPa và 185 GPa.

2.3. Quy trình thí nghiệm

Quy trình thí nghiệm bao gồm bốn giai đoạn chính được trình bày ở Hình 2. Trong giai đoạn một, 18 dầm BTCT được chế tạo và bảo dưỡng đủ 28 ngày. Giai đoạn hai là quá trình gia tốc ăn mòn cho 12 dầm (nhóm G2 và G3). Giai đoạn ba là quá trình tăng cường cho các dầm bị ăn mòn bằng lớp TRC có tiết diện chữ U ở “bên yếu”. Giai đoạn bốn là thí nghiệm cơ học cho 18 dầm. Sau khi thí nghiệm, cốt thép đai đã bị ăn mòn sẽ được tách ra khỏi các dầm.



Hình 2. Quy trình thí nghiệm.

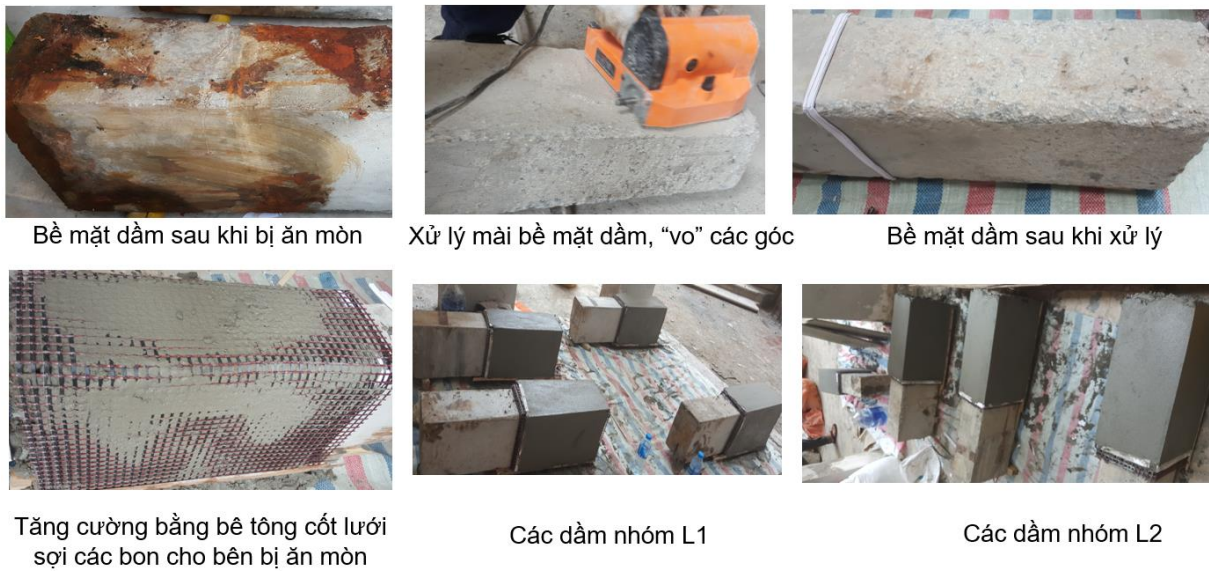
Ở giai đoạn một, cốt thép được chế tạo thành các khung hoàn chỉnh, được gắn các lá điện trở đo biến dạng cho cả cốt thép dọc và cốt đai (Hình 3-a). Đồng thời, để gia tốc quá trình ăn mòn, các dây điện được nối trực tiếp vào cả các nhánh đai ở “bên yếu”. Các dầm được đổ bê tông cùng một thời điểm, và được bảo dưỡng trong điều kiện thí nghiệm đến 28 ngày.



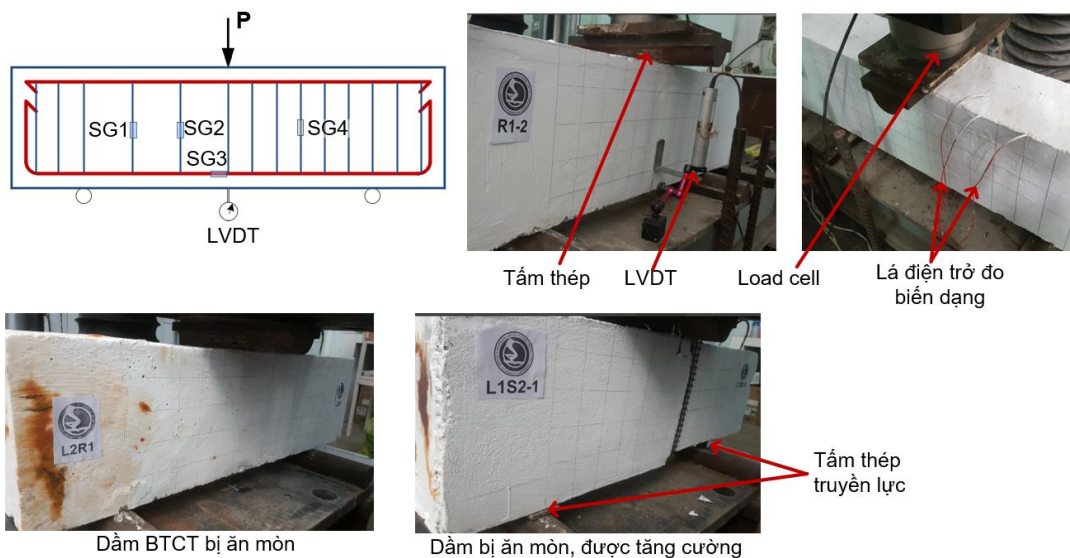
Hình 3. Chế tạo mẫu thí nghiệm và quá trình gia tốc ăn mòn cốt thép trong bê tông.

Ở giai đoạn hai, kỹ thuật gia tốc ăn mòn được áp dụng bằng cách đưa một nguồn điện 1 chiều vào trong cốt thép đai (nằm trong bê tông). Mười hai dầm, được chia làm hai nhóm, lần lượt được ngâm trong bể chứa dung dịch NaCl 5%. Trong đó, nhóm G2 được ngâm trong 60 ngày và nhóm G4 được ngâm trong 90 ngày (Hình 3-b). Mật độ dòng điện được lựa chọn là $400 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, được tính toán theo công thức điện hóa của Faraday. Các dầm được ngâm để ngập 1/2 chiều dài dầm (xấp xỉ 450 mm). Điện áp được ghi và kiểm tra hàng ngày. Hàng tuần, các dầm được nâng lên khỏi bể chứa để quan sát vết nứt và đo bề rộng vết nứt do ăn mòn.

Ở giai đoạn 3, sau khi hoàn thành quá trình gia tốc ăn mòn, 4/6 dầm trong nhóm G2 và G3 sẽ được tăng cường bằng TRC với 2 và 3 lớp lưới sợi các bon. Quy trình tăng cường được thực hiện dựa trên chỉ dẫn kỹ thuật ACI 549.4R-13 [1]. Để đảm bảo dính bám giữa TRC với bê tông nền, bề mặt dầm ở bên yếu (bên có cốt thép bị ăn mòn) sẽ được mài. Đồng thời, các góc dầm sẽ được bo tròn với bán kính cong 30 mm nhằm hạn chế việc suy giảm cường độ chịu kéo của lưới sợi khi quán xung quanh dầm theo tiết diện chữ U.

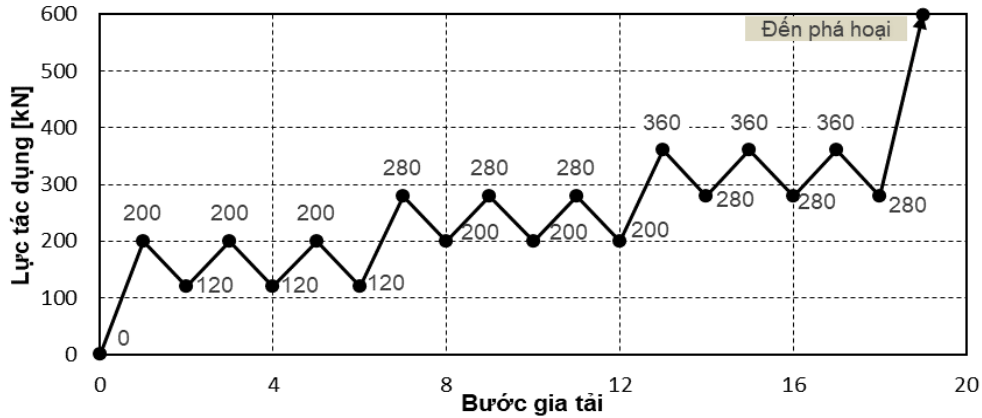


Hình 4. Quy trình tăng cường sức kháng cắt cho dầm bị ăn mòn bằng TRC.



Hình 5. Thiết lập thí nghiệm.

Ở giai đoạn 4, tất cả các dầm được thí nghiệm tại Phòng thí nghiệm Vật liệu và kết cấu của Trường Đại học Giao thông Vận tải. Thí nghiệm uốn ba điểm được thực hiện theo phương pháp kiểm soát bằng lực, với tốc độ gia tải 0,5 kN/s, trên máy kéo nén SANS 3000 kN. Sơ đồ bố trí và thiết lập thí nghiệm được thể hiện trong Hình 5. Một LVDT và một loadcell đã được lắp đặt để đo độ võng giữa nhịp và tải trọng tác dụng lên dầm. Các lá điện trở được gắn trong cốt thép để đo biến dạng của cốt dọc và cốt đai trong quá trình thí nghiệm.

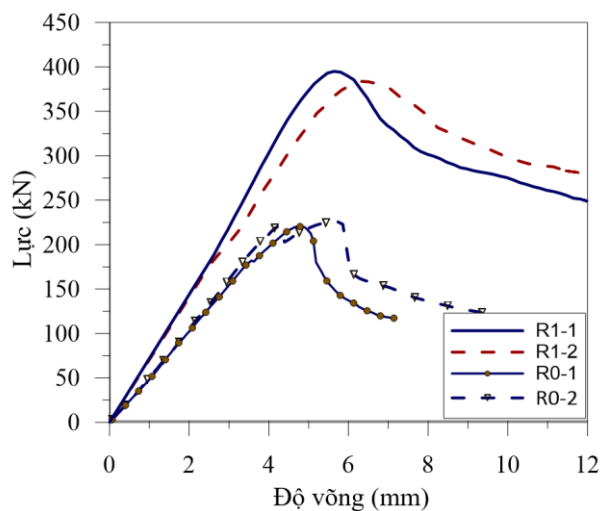


Hình 6. Phổ tải trọng lặp.

Bốn dầm đầu tiên trong nhóm G1 được thí nghiệm tĩnh, mười bốn dầm còn lại sẽ được thí nghiệm dưới tác dụng của tải trọng lặp ở giai đoạn đầu và sau đó được gia tải cho đến khi bị phá hoại. Căn cứ vào giá trị tải trọng lớn nhất P_u ghi nhận từ dầm R1-1 và R1-2 (được xác định xấp xỉ 400 kN từ thí nghiệm), một phổ tải trọng lặp không đổi chiều được xác định như trên Hình 6. Ba cấp tải trọng lặp được xây dựng, tương ứng với $(0,3-0,5 P_u)$, $(0,5-0,7 P_u)$, và $(0,7-0,9 P_u)$. Các cấp lực này lần lượt mô tả các cấp độ khai thác cấu kiện trong thực tế (cấp tải trọng khai thác, mức quá tải thấp, và mức quá tải cao).

3. PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

3.1 Các dầm không bị ăn mòn (nhóm G1)

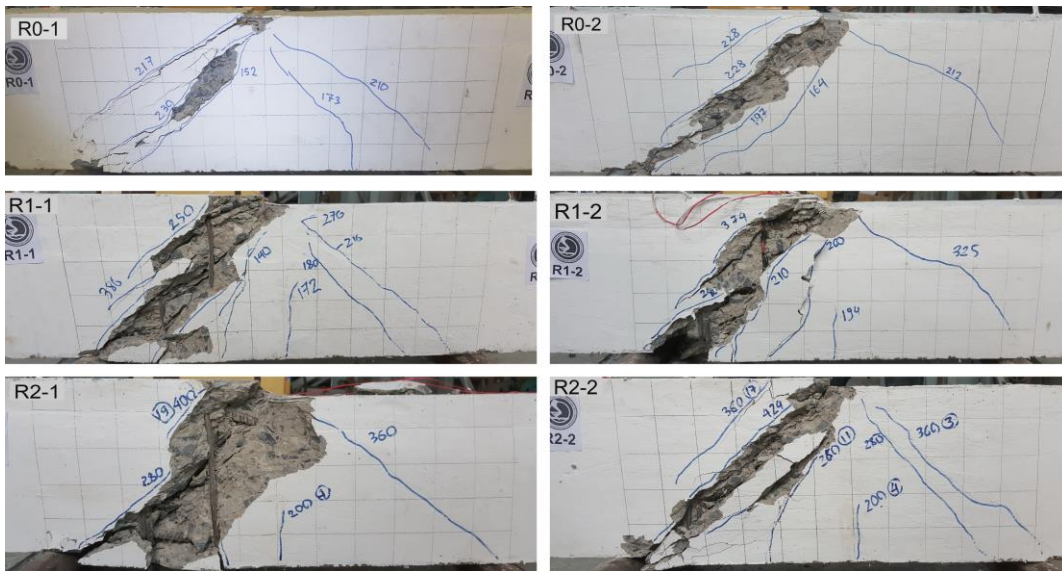


Hình 7. Quan hệ lực – độ võng của 4 dầm không bị ăn mòn chịu tải trọng tĩnh trong nhóm G1.

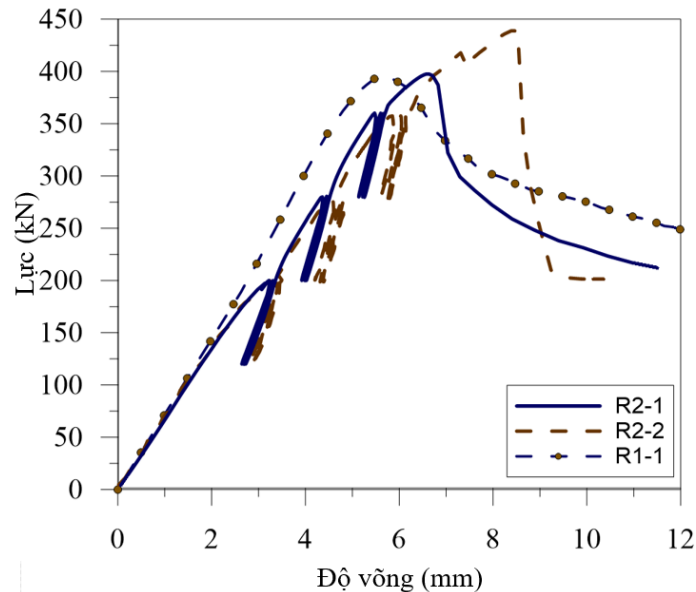
Hình 7 và Hình 9 trình bày quan hệ lực - độ võng giữa nhịp và cấu trúc vết nứt của 6 dầm

đôi chứng không bị ăn mòn. Tất cả 6 dầm đều bị phá hoại do cắt, với vết nứt nghiêng lớn mở rộng ở “bên yếu”, được thể hiện ở Hình 8. Trong quá trình thí nghiệm, một số vết nứt uốn và vết nứt uốn-cắt xuất hiện. Tuy nhiên, ở giai đoạn phá hoại, chỉ có các vết nứt nghiêng do cắt mở rộng lớn và gây nên sự phá hoại cho tất cả các dầm.

Đầu tiên, thí nghiệm tĩnh được thực hiện với các dầm đối chứng R0-1 và R0-2, là những dầm không bố trí cốt thép đai ở “bên yếu”. Các vết nứt nghiêng nhỏ xuất hiện ở bụng dầm, ở mức tải trọng từ 152-164 kN. Sau đó, khi tải trọng tiếp tục gia tăng, nhiều vết nứt nghiêng lớn bắt đầu xuất hiện và lan truyền theo đường chéo từ bụng dầm đến gối gia tải và gối đỡ (Hình 9). Sau khi đạt đến mức tải trọng lớn nhất (xấp xỉ 222 kN), các vết nứt nghiêng chính sẽ mở rộng và dầm bị phá hoại đột ngột.



Hình 8. Cấu trúc vết nứt của các dầm không bị ăn mòn trong nhóm G1.



Hình 9. Quan hệ lực – độ võng của dầm R2-1 và R2-2 (không bị ăn mòn) chịu tải trọng lặp.

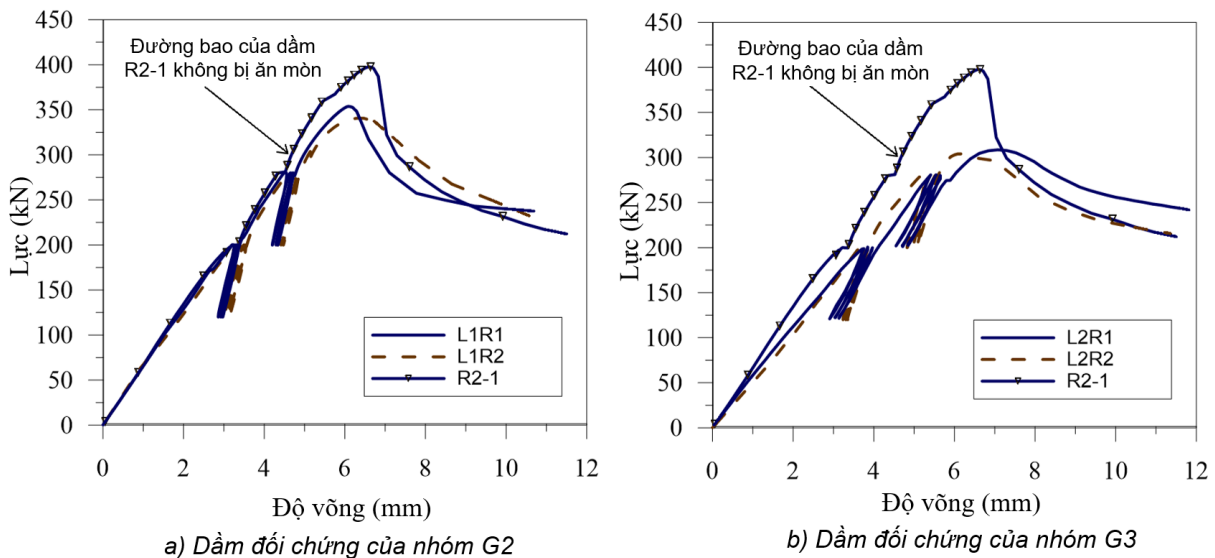
Đối với hai dầm R1-1 và R1-2 (có cốt thép đai ở “bên yếu”), vết nứt đầu tiên xuất hiện tại vị trí giữa dầm, theo phương vuông góc với trục dầm, ở mức tải trọng lần lượt là 172 và 194

kN. Các vết nứt nghiêng do cắt đầu tiên hình thành tại vị trí bụng dầm ở tải trọng 180 và 210 kN (Hình 8). Sau khi xuất hiện vết nứt nghiêng, tải trọng vẫn tiếp tục tăng lên bởi lực cắt vẫn có thể truyền qua vết nứt nhờ hiệu ứng cài khóa cốt liệu, hiệu ứng chốt của các thanh thép dọc, và sự cùng làm việc của cốt đai. Khi tải trọng tăng, các vết nứt nghiêng này tiếp tục mở rộng và phát triển từ bụng dầm đến gối đỡ và vị trí gia tải. Độ cứng của các dầm, được thể hiện qua độ dốc của các đường quan hệ giữa tải trọng và độ võng, lớn hơn đáng kể so với các mẫu dầm R0-1 và R0-2. Các dầm này đều bị phá hoại ở “bên yếu”, ở các mức tải trọng lần lượt là 398,6 và 384,3 kN. So sánh giữa dầm R1-1 và R0-1, mẫu có cốt thép đai có khả năng kháng cắt lớn hơn đến 74,5%. Dầm bị phá hoại đột ngột ở mức tải trọng xấp xỉ 400 kN. Căn cứ vào mức tải trọng lớn nhất này, phổ tải trọng lặp được xây dựng như đã trình bày ở Hình 6.

Đối với các mẫu R2-1 và R2-2 chịu tải trọng lặp, các vết nứt dạng thẳng góc (với trục dầm) được hình thành trước tiên ở mức tải trọng xấp xỉ 200 kN. Sau đó, các vết nứt do uốn-cắt bắt đầu xuất hiện ở khoảng tải trọng từ 200-280 kN. Các vết nứt nghiêng do cắt bắt đầu xuất hiện ở tải trọng tác dụng là 280 kN bên phía dầm yếu hơn và 360 kN bên phía dầm khỏe hơn. Khi tiếp tục tăng tải trọng, nhiều vết nứt nhỏ xuất hiện xung quanh và song song với các vết nứt chính (Hình 8). Độ võng trên các dầm chịu tải trọng lặp lớn hơn so với dầm chịu tải trọng tĩnh đó là do sự xuất hiện, tích lũy của nhiều vết nứt. Sau khi kết thúc các chu kỳ tải trọng lặp, lực tác dụng tăng cho đến khi dầm bị phá hoại. Sự phá hoại ở dầm này xảy ra khi vết nứt nghiêng mở rộng ở “bên yếu” ở mức tải trọng xấp xỉ 409 kN.

3.2 Các dầm bị ăn mòn, không được tăng cường (dầm đối chứng)

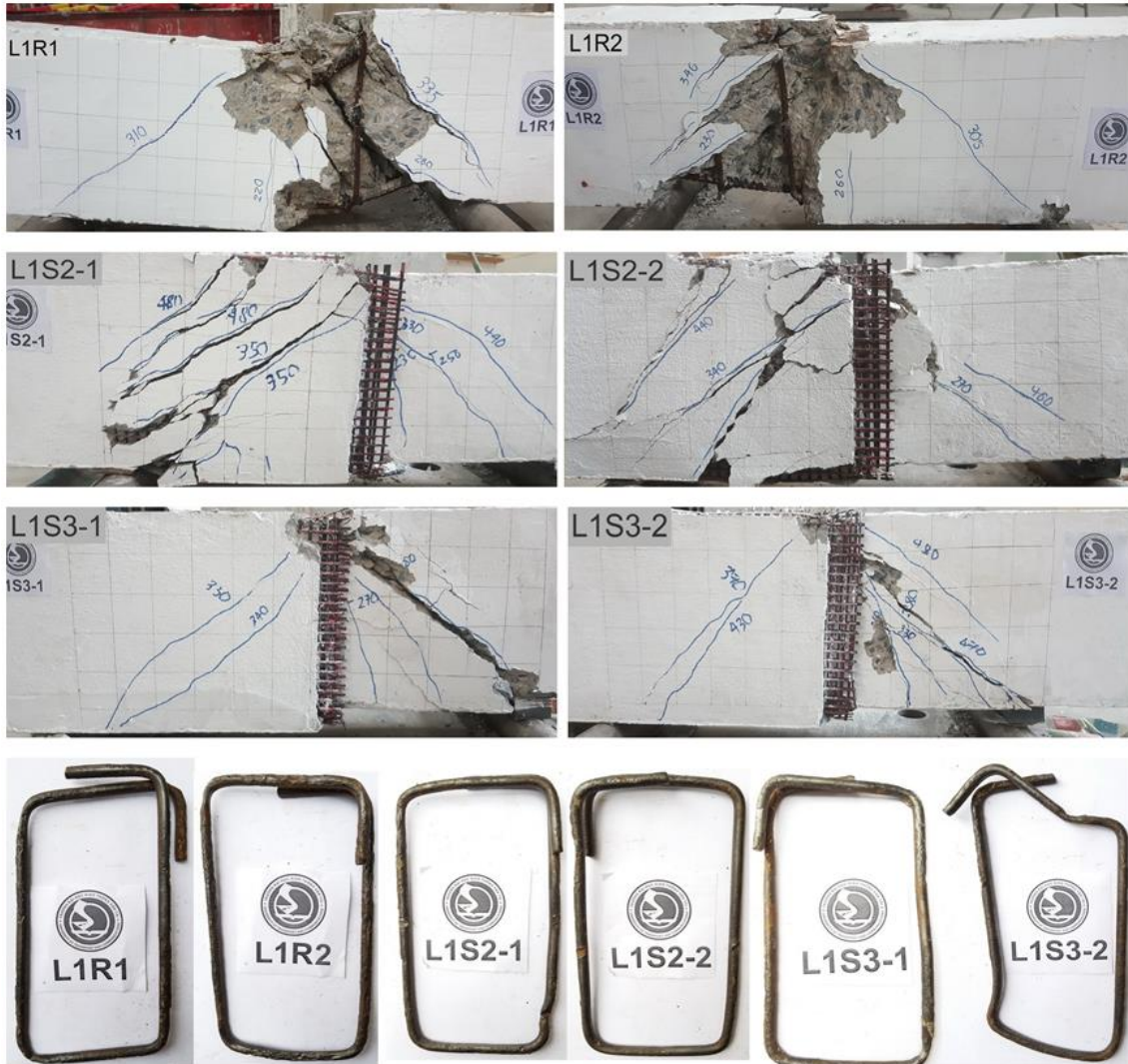
Nhóm G2 và G3 có 12 dầm có cốt thép đai bị ăn mòn ở 2 mức độ, chịu tải trọng lặp. Trong đó, mỗi nhóm có 2 dầm bị ăn mòn và không được tăng cường, được sử dụng làm dầm đối chứng. Hình 10 trình bày quan hệ giữa lực – độ võng giữa nhịp của 4 dầm đối chứng này. Cấu trúc vết nứt của 4 dầm đối chứng bị ăn mòn được thể hiện ở Hình 11 và Hình 14. Sau thí nghiệm, cốt thép đai được tách khỏi dầm để đánh giá sự mất mát khối lượng do quá trình ăn mòn (Bảng 2).



Hình 10. Ứng xử chịu cắt của các dầm đối chứng, bị ăn mòn trong nhóm G2 và G3.

Mức độ ăn mòn được tính toán dựa trên khối lượng cốt thép đai bị mất mát do quá trình ăn mòn. Mức độ ăn mòn dao động từ 12,3 đến 23,6% đối với cốt thép đai trong dầm ở nhóm thứ 2 (Bảng 2). Sự phá hoại do ăn mòn thường lan rộng (khá đều) dọc theo chiều dài của cốt

thép đai đối với các mẫu L1R1 và L1R2. Tuy nhiên, một vài vị trí cốt thép đai trong mẫu L2R1 và L2R2 bị suy giảm tiết diện đáng kể là do sự ăn mòn mang tính cục bộ (ăn mòn điểm).



Hình 11. Cấu trúc vết nứt của các dầm trong nhóm G2 và cốt thép đai bị ăn mòn được tách ra khỏi dầm.

Bảng 2. Tóm tắt kết quả thí nghiệm.

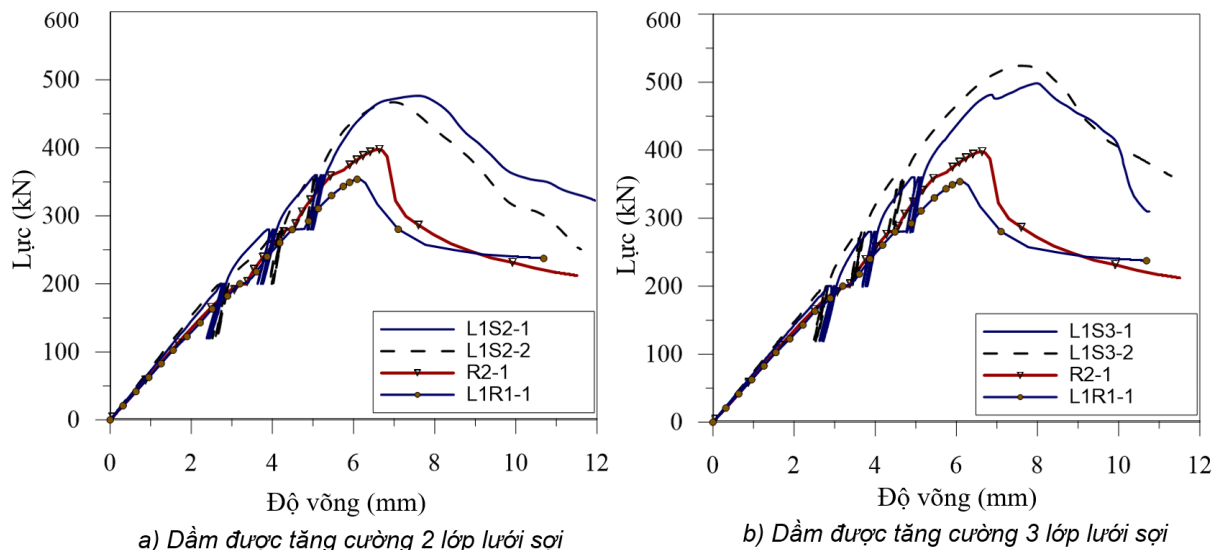
Nhóm	Dầm	Mất mát khối lượng (%)	Lực lớn nhất (kN)
G1: Không bị ăn mòn	R0-1	Không	220,6
	R0-2		226,2
	R1-1		395,6
	R1-2		384,3
	R2-1		398,6
	R2-2		429,5
G2: Bị ăn mòn mức 1 (mức trung bình)	L1R1	12,3	353,4
	L1R2	14,7	340,7
	L1S2-1	12,8	476,5
	L1S2-2	13,6	467,0

G3: Bị ăn mòn mức 2 (mức nặng)	L1S3-1	12,5	498,4
	L1S3-2	11,9	524,1
	L2R1	23,6	313,5
	L2R2	21,9	304,0
	L2S2-1	19,8	449,2
	L2S2-2	21,7	430,6
	L2S3-1	23,3	501,5
	L2S3-2	22,9	490,2

Tất cả bốn dầm đối chứng bị ăn mòn trong nhóm G2 và G3 có ứng xử chịu cắt khá tương đương, với các vết nứt do cắt lớn phát triển vượt trội so với các vết nứt do uốn. Tuy nhiên, các mẫu L2R1 và L2R2 có độ cứng nhỏ hơn so với các dầm không bị ăn mòn. Điều này càng được thể hiện rõ hơn với các dầm có cốt thép đai bị ăn mòn “mạnh”. Nói cách khác, sự ăn mòn cốt thép đai có xu hướng làm giảm độ cứng của các dầm BTCT. Khả năng chịu cắt lớn nhất của dầm L2R1 và L2R2 khi chịu tải trọng lặp là 313,5 và 304,2 kN, giảm 25,3% so với các dầm đối chứng.

3.2 Các dầm bị ăn mòn, không được tăng cường

Hình 11 và Hình 14 thể hiện cấu trúc vết nứt và dạng phá hoại của các dầm bị ăn mòn, được tăng cường bằng TRC. Nhìn chung, dạng phá hoại xảy ra do vết nứt nghiêng lớn ở bên yếu, kèm theo lưới sợi bị kéo đứt đối với các dầm được tăng cường bằng 2 lớp lưới sợi các bon. Ngược lại, với các dầm được tăng cường bằng 3 lớp lưới sợi các bon, dầm bị phá hoại do cắt bởi sự ép vỡ của thanh nén ở bên khỏe. Hình 12 và Hình 13 trình bày quan hệ giữa lực – độ võng của các dầm được tăng cường, và so sánh với dầm đối chứng. Có thể thấy, việc tăng cường bằng TRC đã cải thiện độ cứng, khả năng chịu lực của các dầm bị ăn mòn.



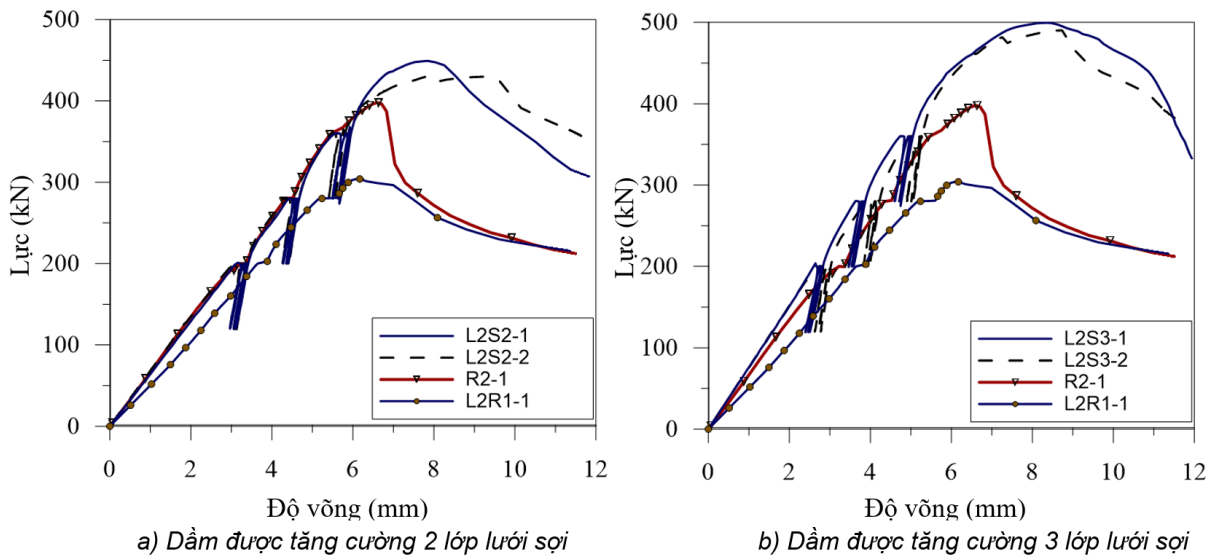
Hình 12. Quan hệ lực – độ võng của các dầm được tăng cường trong nhóm G2.

Đối với các dầm được tăng cường ở nhóm G2 (ăn mòn trung bình), các vết nứt uốn phát triển sớm nhất. Do sự có mặt của lớp TRC, độ cứng ban đầu của các dầm này lớn hơn so với dầm đối chứng bị ăn mòn. Khi tải trọng tăng lên, các vết nứt uốn bắt đầu nghiêng góc, hình thành nên các vết nứt do uốn-cắt. Các vết nứt cắt xuất hiện ở mức tải trọng lớn hơn so với dầm đối chứng. Cụ thể, vết nứt nghiêng do cắt có thể quan sát được ở các mẫu L1S2-1, L1S2-2, L1S3-1, và L1S3-2 lần lượt ở các mức tải trọng 240kN, 210kN, 270, và 255kN. So sánh giữa các mẫu L1S2-1 and L1S3-1, việc tăng số lớp lưới sợi các bon đã làm tăng mức tải trọng

gây ra vết nứt cắt. Trong mẫu L1S2-1 và L1S2-2, lưới sợi bị kéo đứt dọc theo vết nứt nghiêng tại thời điểm dầm bị phá hoại. So với các dầm đối chứng (L1R1 và L2R2), sức kháng cắt của các dầm L1S2-1 và L1S2-2 tăng lần lượt là 37,3% và 34,6%. Sau khi dầm bị phá hoại, tải trọng suy giảm đột ngột và duy trì ở mức tải trọng nhỏ hơn. Cần lưu ý rằng, mức tải trọng duy trì này vẫn lớn hơn so với các dầm đối chứng bởi có một số bó sợi ngang có chiều dài dính bám nhỏ vẫn còn làm việc.

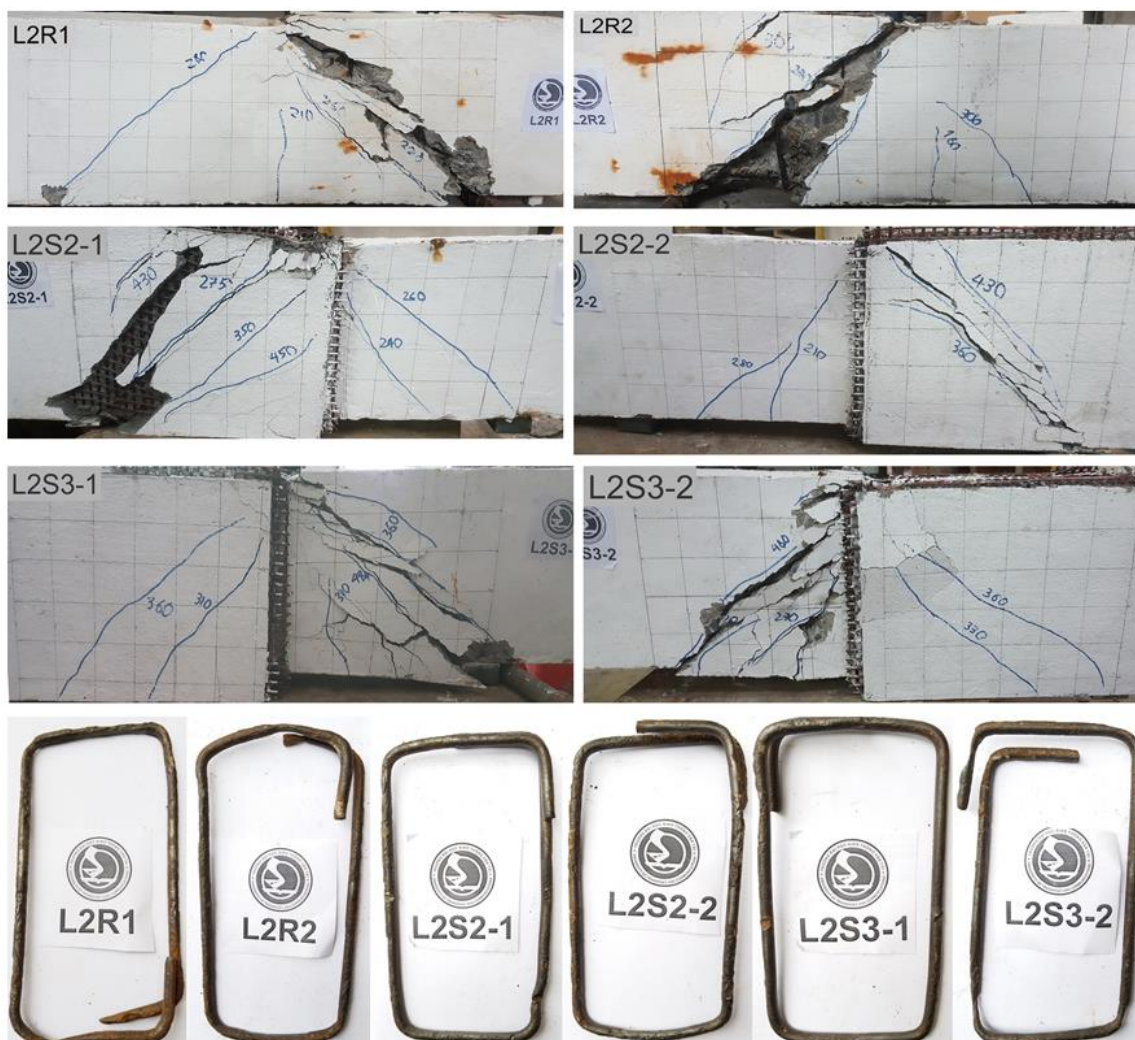
Tương tự, việc tăng cường bằng 3 lớp lưới sợi ở mẫu L1S3-1 và L1S3-2 đã cải thiện đến 43,6% và 51,0% sức kháng cắt khi so sánh với dầm bị ăn mòn không được tăng cường. Tuy nhiên, dạng phá hoại do thanh nén của bê tông bị ép vỡ xảy ra ở bên khỏe, trong khi lưới sợi các bon ở bên yếu chưa bị kéo đứt. Nói cách khác, lưới sợi chưa phát huy hết khả năng chịu lực.

Khi cốt thép đai bị ăn mòn nặng (dao động từ 19,8% đến 23,3%) trong nhóm G3, các vết nứt do uốn và vết nứt do uốn-cắt xuất hiện ở mức tải trọng nhỏ hơn so với nhóm G2. Có thể quan sát ở Hình 13 và Bảng 2, lớp TRC đã cải thiện đáng kể sức kháng cắt và độ cứng của các dầm bị ăn mòn. Tuy nhiên, biến dạng (độ võng) tại giá trị lực lớn nhất không có sự khác biệt đáng kể giữa các mẫu thí nghiệm trong nhóm này. Tương tự như các dầm không được tăng cường, các mẫu L2S2-1 và L2S2-2 bị phá hoại khi vết nứt nghiêng mở rộng lớn ở bên yếu. Tuy nhiên, số lượng vết nứt ở các mẫu được tăng cường bằng 2 lớp lưới sợi phân tán hơn nhiều so với các dầm đối chứng. Điều này chứng tỏ hiệu quả của lớp TRC trong việc cải thiện khả năng chịu cắt của dầm. Hai dầm này bị phá hoại ở mức tải trọng 449,2 và 430,6kN, lớn hơn 42,5% so với các dầm đối chứng trong nhóm G3. Trong khi đó, sức kháng cắt của các dầm được tăng cường bằng 3 lớp lưới sợi tăng lên đến 60,6% so với các dầm đối chứng. Cần lưu ý rằng, mức độ mất mát khối lượng trung bình do ăn mòn cốt thép đai của nhóm G3 là 22,6%, lớn hơn so với nhóm G2 (12,7%).



Hình 13. Quan hệ lực – độ võng của các dầm được tăng cường trong nhóm G3.

Kết quả thí nghiệm từ 4 dầm được tăng cường ở nhóm G3 cho thấy, lớp TRC đã làm cải thiện cả sức kháng cắt, độ cứng của các dầm đối chứng (kể cả dầm bị ăn mòn và dầm không bị ăn mòn). Khi sử dụng 3 lớp lưới sợi, do hàm lượng lưới sợi đủ lớn, dạng phá hoại đã thay đổi từ vết nứt nghiêng mở rộng lớn ở bên yếu thành phá hoại do thanh nén của bê tông bị ép vỡ ở bên khỏe. Điều này chứng tỏ lưới sợi các bon chưa phát huy hết khả năng chịu lực.



Hình 14. Cấu trúc vết nứt của các dầm trong nhóm G3 và cốt thép đại bị ăn mòn.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm nhằm đánh giá hiệu quả tăng cường sức kháng cắt của TRC đối với dầm BTCT có cốt thép đại bị ăn mòn. Đối tượng nghiên cứu là kết cấu dầm giản đơn, nhịp ngắn, có kích thước tiết diện tương đối nhỏ. Đối với kết cấu và vật liệu đã thí nghiệm, một số kết luận chính được rút ra từ các kết quả thí nghiệm như sau:

Sức kháng cắt của các dầm được có cốt thép đại lớn hơn 74,5% so với các dầm đối chứng không có cốt thép đại. Đối với các dầm không bị ăn mòn cốt thép, dầm chịu tải trọng tĩnh và chịu tải trọng lặp có sự tương đồng về dạng phá hoại, với các vết nứt nghiêng do cắt mở rộng lớn. Tuy nhiên, các vết nứt do cắt ở các dầm chịu tải trọng lặp phát triển mạnh hơn về cả số lượng và bề rộng vết nứt so với các dầm chịu tải trọng tĩnh.

Đối với các dầm có cốt thép đại bị ăn mòn, sức kháng cắt của dầm càng giảm khi mức độ ăn mòn cốt thép tăng lên. So với các mẫu đối chứng, sức kháng cắt trung bình của các mẫu bị ăn mòn giảm đến 16,08 và 25,34%, tương ứng với mức độ ăn mòn cốt thép từ 12,3-23,6% về khối lượng. Sự ăn mòn cốt thép có xu hướng làm giảm độ cứng của dầm BTCT một cách

đáng kể ở mức độ ăn mòn cốt thép cao. Ngược lại, độ cứng của các dầm có cốt thép đã bị ăn mòn L1R1 và L1R2 (với mức độ ăn mòn nhỏ) không bị ảnh hưởng nhiều mặc dù khả năng kháng cắt của chúng đã bị suy giảm đáng kể.

Các kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng, lớp TRC tiết diện chữ U đã cải thiện cả độ cứng và khả năng chịu lực của các dầm bị ăn mòn. Đối với các dầm bị ăn mòn ở mức trung bình trong nhóm G2, so với các dầm đối chứng, sức kháng cắt của các dầm được tăng cường đã tăng lên đến 34,6% và 51,0%. Đối với các dầm bị ăn mòn mạnh trong nhóm G3, sức kháng cắt của các dầm được tăng cường bằng 2 và 3 lớp lưới sợi đã tăng lên 42,5% và 60,6%. Điều này chứng tỏ, lớp TRC sợi các bon đã khôi phục và cải thiện đáng kể sức kháng cắt cho các dầm bị ăn mòn. Đối với các dầm được tăng cường 3 lớp lưới sợi trong cả nhóm G2 và G3, do hàm lượng lưới sợi đủ lớn, dạng phá hoại đã thay đổi từ phá hoại do vết nứt nghiêng mở rộng lớn kèm lưới sợi bị kéo đứt ở bên yếu thành phá hoại do thanh nén bê tông bị ép vỡ ở bên khỏe.

Hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ được triển khai trong thời gian tới là đánh giá ứng xử chịu cắt của kết cấu dầm BTCT nhịp ngắn có kích thước lớn (kích thước đầy đủ, full-scale) có cốt thép đai và cốt thép dọc đã bị ăn mòn, và được tăng cường bằng TRC.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2019-KTXD-07TD.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. W. Brameshuber, Textile Reinforced Concrete. State-of-the Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC, 1st ed. Bagnex, vol. 36: RILEM Publications S.A.R.L., 2006.
- [2]. Zulassung Z-31.10-182, Gegenstand: Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (Textilbewehrter Beton), Prüfstelle: DIBt, Antragsteller: TUDAG TU Dresden Aktiengesellschaft, 2015.
- [3]. ACI Committee, ACI 549.4R-13: Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures, American Concrete Institute, 2013.
- [4]. A. Asgharzadeh, M. Raupach, Damage Mechanisms of Polymer Impregnated Carbon Textiles Used as Anode Material for Cathodic Protection, Applied Sciences, 9 (2019) 110. <https://doi.org/10.3390/app9010110>
- [5]. T. Blånkvard , B. Täljsten, A. Carolin , Shear strengthening of concrete structures with the use of mineral based composites, Journal of Composites for Construction, 13 (2009) 25-34. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2009\)13:1\(25\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2009)13:1(25))
- [6]. R. Azam, K. Soudki, FRCM strengthening of shear-critical RC beams, Journal of Composites in Construction, 18 (2014) 1-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000464](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000464)
- [7]. C. Escrig, L. Gil, E. Bernat-Maso, F. Puigvert, Experimental and analytical study of reinforced concrete beams shear strengthened with different types of textile-reinforced mortar, Construction and Building Materials, 83 (2015) 248-260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.013>
- [8]. E. Tzoura, T. C. Triantafillou, Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets, Materials and Structures, 49 (2016) 17–28. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0470-9>
- [9]. M. Elghazy, A. El-Refai, U. Ebead, A. Nanni, Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams Repaired with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM), Journal of Composites for Construction, 22 (2018) 04018039. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000873](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000873)

- [10]. T. El-Maaddawy, A. El-Refai, Innovative Repair of Severely Corroded T-Beams Using Fabric-Reinforced Cementitious Matrix, *Journal of Composites for Construction*, 20 (2016) 04015073. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000641](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000641)
- [11]. L. Fang, T. Zhou, D. Yi, W. Yi, Experimental Study on Flexural Capacity of Corroded RC Slabs Reinforced with Basalt Fiber Textile, *Applied Sciences*, 11 (2020) 144. <https://doi.org/10.3390/app11010144>
- [12]. S. Oluwadahunsi, C.K.S Mo, Performance of Corroded Reinforced-Concrete Beams in Flexure Strengthened Using Different Basalt Fiber Textile-Reinforced Mortar Schemes, *Journal of Composites for Construction*, 24(2020) 04020061. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001075](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001075)