

Nghiên cứu thực nghiệm xác định sức kháng cắt còn lại của dầm bê tông cốt thép nhịp ngắn đã bị ăn mòn cốt đai

Nguyễn Huy Cường^{1*}, Đinh Hữu Tài¹, Nguyễn Công Hậu²

¹Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Giao thông Vận tải

²Khoa Công trình, Trường Đại học Giao thông Vận tải TP Hồ Chí Minh

Ngày nhận bài 7/6/2021; ngày chuyển phản biện 10/6/2021; ngày nhận phản biện 8/7/2021; ngày chấp nhận đăng 15/7/2021

Tóm tắt:

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm xác định sức kháng cắt còn lại của dầm bê tông cốt thép (BTCT) có cốt đai đã bị ăn mòn ở các mức độ khác nhau. Trong nghiên cứu này, có 10 dầm đã được thí nghiệm uốn 3 điểm, trong đó có 4 dầm được gia tốc quá trình ăn mòn cốt thép trong 60 và 80 ngày để đạt được mức độ mất mát khối lượng cốt thép đai lần lượt là 10 và 20%. Ứng xử chịu lực của dầm bao gồm quan hệ lực - độ võng, cấu trúc vết nứt, sức kháng cắt còn lại và dạng phá hoại sẽ được phân tích. So với các dầm đối chứng không bị ăn mòn, sức kháng cắt của các dầm bị ăn mòn suy giảm đến 16,08 và 25,34%, tương ứng với mức độ ăn mòn theo khối lượng của cốt thép đai là 12,3 và 23,6%.

Từ khóa: ăn mòn, dầm, nhịp ngắn, sức kháng cắt.

Chỉ số phân loại: 2.1

Đặt vấn đề

Việt Nam là quốc gia có bờ biển dài hơn 3.200 km với hàng nghìn hòn đảo lớn nhỏ, nhiều công trình BTCT ở những vùng ven biển đang chịu tác động của môi trường xâm thực. Sự phá hoại đối với kết cấu BTCT do cốt thép bị ăn mòn thể hiện qua việc giảm tiết diện thép và hình thành gỉ sắt bên trong bê tông, từ đó gây nứt, vỡ lớp bê tông bảo vệ. Điều này cũng dẫn đến giảm hiệu ứng kiểm chế và giảm lực dính bám giữa cốt thép với bê tông. Các nguyên nhân này đều có thể gây giảm khả năng chịu lực của kết cấu BTCT, rút ngắn tuổi thọ và tăng chi phí bảo trì kết cấu so với dự tính. Khi có thể phát hiện ra sự hư hại của các kết cấu BTCT dưới tác động của việc cốt thép bị ăn mòn, thì sự suy thoái của các kết cấu này thường đã bước qua giai đoạn nghiêm trọng, thậm chí là quá muộn để có thể thực hiện bất kỳ biện pháp phòng ngừa hoặc bảo vệ có hiệu quả. Do đó, để có thể dự đoán được tuổi thọ còn lại của một cấu kiện đã bị ăn mòn cốt thép, thì việc xác định được khả năng chịu lực còn lại hay ứng xử chịu lực của cấu kiện đó là rất quan trọng và cần thiết.

Hầu hết, các nghiên cứu về dầm BTCT có cốt bị ăn mòn đã được thực hiện đều dựa trên việc gia tốc quá trình ăn mòn bằng phương pháp sử dụng dòng điện ngoài, nhằm hình thành quá trình ăn mòn trong một thời gian ngắn. Định luật Faraday thường được sử dụng để dự đoán sự hao hụt khối lượng của cốt thép dựa trên mật độ dòng điện áp dụng và thời gian ăn mòn. Đã có nhiều nghiên cứu về ứng xử

chịu lực của kết cấu dầm BTCT bị ăn mòn, tuy nhiên, hầu hết mới chỉ tập trung vào ứng xử chịu uốn [1, 2]. Cho đến hiện nay, có rất ít công trình nghiên cứu được công bố về ứng xử chịu cắt của dầm BTCT bị hư hỏng bởi sự ăn mòn cốt thép đai. Cần lưu ý rằng, sự ăn mòn cốt thép đai có thể nhanh chóng làm giảm sức kháng cắt hơn cả sự suy giảm sức kháng uốn. Trên thực tế, cốt thép đai thường có lớp bê tông bảo vệ nhỏ hơn so với lớp bê tông bảo vệ của cốt thép dọc. Do đó, cốt thép đai thường sẽ bị ăn mòn sớm hơn cốt thép dọc. El-Sayed và cs (2016) [3] đã nghiên cứu ứng xử chịu cắt của dầm BTCT có cốt thép đai bị ăn mòn, với các mức độ ăn mòn, khoảng cách cốt đai và tỷ lệ giữa chiều dài nhịp cắt (a) và chiều cao làm việc (d) khác nhau. Trong đó, chiều cao làm việc (d) là khoảng cách từ mép chịu nén đến trọng tâm của nhóm cốt thép chịu kéo của dầm. Kết quả nghiên cứu cho thấy, sức kháng cắt của dầm BTCT bị ăn mòn đã giảm 8-24% so với dầm đối chứng không bị ăn mòn. Đồng thời, các dầm có tỷ lệ chiều dài nhịp cắt và chiều cao làm việc (a/d) càng nhỏ thì mức độ suy giảm khả năng kháng cắt càng lớn [4]. Nghiên cứu thực nghiệm của Suffern và cs (2010) [5] cũng chỉ ra khả năng chịu cắt của các dầm có cốt thép đã bị ăn mòn có thể nhỏ hơn mẫu đối chứng không bị ăn mòn lên đến 53%. Bên cạnh đó, dạng phá hoại của dầm có thể bị thay đổi từ phá hoại dẻo do uốn sang phá hoại giòn do cắt sau khi cốt thép đai trong dầm bị ăn mòn.

Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm xác định sức kháng cắt còn lại của dầm BTCT nhịp ngắn (dầm cao) có cốt thép đai bị ăn mòn

*Tác giả liên hệ: Email: nguyenhuycuong@utc.edu.vn

Experimental investigation on residual shear strength of short-span reinforced concrete beams with corroded stirrups

Huy Cuong Nguyen^{1*}, Huu Tai Dinh¹,
Cong Hau Nguyen²

¹Faculty of Construction Engineering,
University of Transport and Communications

²Faculty of Civil Engineering,
Ho Chi Minh city University of Transport

Received 7 June 2021; accepted 15 July 2021

Abstract:

This paper reports an experimental investigation on the residual shear strength of the corroded RC beams with stirrups having different levels of corrosion. A total of ten beams was tested, including four beams were subjected to an electrochemically accelerated aging technique for 60 and 80 days to obtain the theoretical mass loss in their stirrups of 10 and 20%, respectively. The objective of the test program was to investigate the shear performances of strengthened beams loaded up to failure, including load-deflection behaviour, crack patterns, ultimate capacities, and modes of failure. Compared to the un-corroded specimens, the average shear strength of corroded specimens decreased by 16.08 and 25.34%, corresponding to the degree of corrosion of 12.3 and 23.6%.

Keywords: beam, corroded, shear strength, short-span.

Classification number: 2.1

và so sánh với các dầm đối chứng không bị ăn mòn. Nghiên cứu này là giai đoạn đầu của một dự án lớn hơn, tập trung vào việc tăng cường khả năng chịu lực của dầm BTCT có cốt thép đã bị ăn mòn bằng một loại vật liệu mới (bê tông cốt lưới dệt). Ở giai đoạn tiếp theo, các dầm BTCT sau khi được gia tốc quá trình ăn mòn cốt thép sẽ được tăng cường khả năng chịu cắt bằng bê tông cốt lưới dệt.

Nghiên cứu thực nghiệm

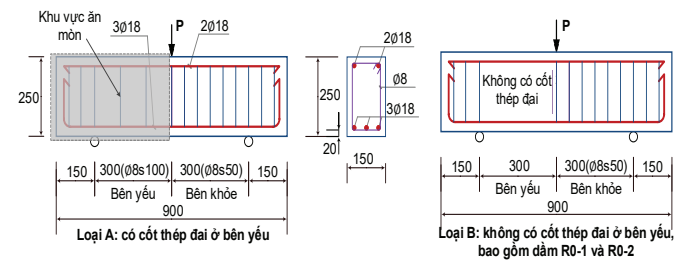
Các mẫu thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, 10 dầm BTCT có kích thước 150×250×900 mm được thí nghiệm uốn 3 điểm với chiều dài là 600 mm. Nhịp cắt được chọn là 300 mm, tương ứng với tỷ lệ (a/d) bằng 1,36. Các mẫu thí nghiệm được chia thành hai nhóm, như trình bày ở bảng 1. Nhóm thứ nhất bao

gồm 6 dầm đối chứng, không bị ăn mòn. 4 dầm còn lại thuộc nhóm thứ 2 đã được gia tốc quá trình ăn mòn nhằm đạt đến mức độ hao hụt khối lượng cốt thép đai được tính toán là 10 và 20%. Mỗi tổ mẫu sẽ có 2 dầm được thí nghiệm.

Bảng 1. Các nhóm dầm được thí nghiệm.

Nhóm	Tên dầm	Loại	Tải trọng	Mô tả
G1: không bị ăn mòn	R0-1, R0-2	B	Tĩnh	Không có cốt thép đai ở “bên yếu”
	R1-1, R1-2	A	Tĩnh	Dầm đối chứng, chịu tải trọng tĩnh, nhằm xác định khả năng chịu lực của dầm (P_u)
	R2-1, R2-2	A	Lập	Dầm đối chứng, không bị ăn mòn, chịu tải trọng lập
G2: bị ăn mòn	L1R1, L1R2	A	Lập	Dầm bị ăn mòn ở mức độ 1
	L2R1, L2R2	A	Lập	Dầm bị ăn mòn ở mức độ 2



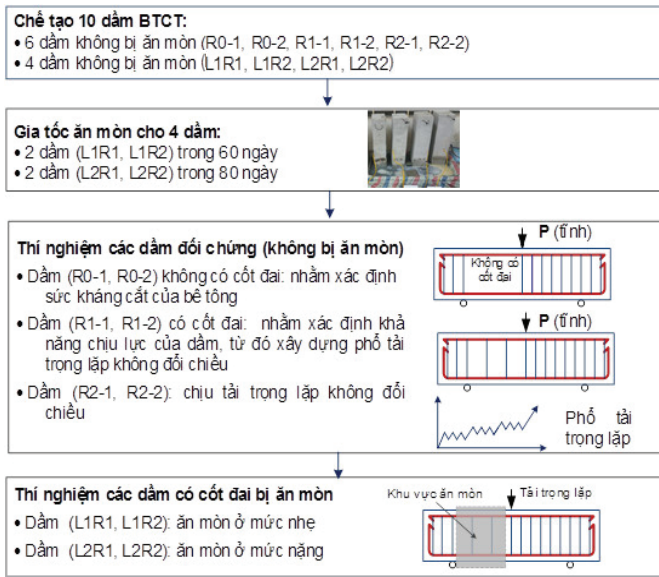
Hình 1. Cấu tạo mẫu thí nghiệm.

2 dầm (R0-1 và R0-2, thuộc loại B) không có cốt thép đai ở “bên yếu”, được thiết kế để xác định sức kháng cắt của dầm khi không đặt cốt thép đai. Tám dầm còn lại đều có cấu tạo giống nhau (loại A), được trình bày như ở hình 1. Các dầm sử dụng 3 thanh thép D18 ở dưới và 2 thanh D18 ở trên, kết hợp với cốt thép đai D8. Tất cả các dầm đều được chế tạo bằng bê tông thông thường, có cường độ chịu nén là 38,5 MPa ở tuổi 28 ngày. Cốt thép dọc D18 có cường độ chịu kéo trung bình là 429,4 MPa, còn cốt thép đai có cường độ chịu kéo trung bình là 363,1 MPa.

Các dầm được thiết kế để đảm bảo chúng sẽ bị phá hoại do cắt trước khi bị phá hoại do uốn. Các dầm thí nghiệm được bố trí cốt thép đai với mục đích hướng sự phá hoại bởi lực cắt đến một nửa của nhịp dầm (cụ thể là “bên yếu”), trong khi nửa còn lại được gia cường nhiều cốt đai (bên khỏe). Vì lý do này, “bên yếu” sẽ bố trí cốt đai với khoảng cách 100 mm, còn bên khỏe sẽ bố trí dày hơn với 10 đai có khoảng cách 50 mm. Quá trình gia tốc ăn mòn chỉ thực hiện đối với cốt thép đai ở “bên yếu”.

Quy trình thí nghiệm

Quy trình thí nghiệm bao gồm 3 giai đoạn chính được trình bày ở hình 2. Trong giai đoạn 1, 10 dầm BTCT được chế tạo và bảo dưỡng đủ 28 ngày. Giai đoạn 2 là quá trình gia tốc ăn mòn cho 4 dầm. Giai đoạn 3 là thí nghiệm cho 6 dầm đối chứng không bị ăn mòn và 4 dầm có cốt thép bị ăn mòn.



Hình 2. Quy trình thí nghiệm.



Hình 3. Chế tạo 10 dầm BTCT.

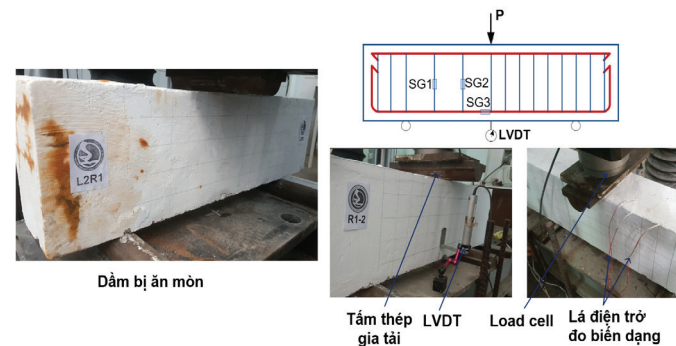
Ở giai đoạn 1, cốt thép được chế tạo thành các khung hoàn chỉnh, được gắn các lá điện trở đo biến dạng cho cả cốt thép dọc và cốt thép đai (hình 3). Đồng thời, để gia tốc quá trình ăn mòn, các dây điện được nối trực tiếp vào cả các nhánh đai ở “bên yếu”. Các dầm được đổ bê tông cùng một thời điểm, và được bảo dưỡng trong điều kiện thí nghiệm đến 28 ngày.

Ở giai đoạn 2, 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). 4 dầm BTCT được ngâm trong bể chứa dung dịch NaCl 5%, trong đó 2 dầm được ngâm trong 60 ngày và 2 dầm được ngâm trong 80 ngày (hình 4). 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.



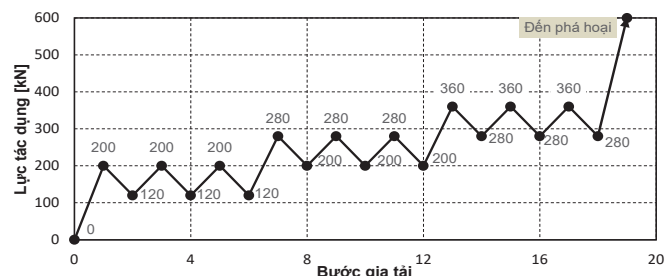
Hình 4. Quá trình gia tốc ăn mòn cốt thép cho 4 dầm L1R1, L1R2, L2R1 và L2R2.

Ở giai đoạn 3, tất cả các dầm được thí nghiệm tại Phòng Thí nghiệm Kết cấu của Trường Đại học Giao thông Vận tải. Thí nghiệm uốn 3 điểm được thực hiện theo phương pháp kiểm soát bằng lực, với tốc độ gia tải $0,5 \text{ kN/s}$, trên máy kéo nén SANS 3000 kN. Sơ đồ bố trí và thiết lập thí nghiệm được thể hiện trong hình 5. Một LVDT (máy biến áp vi sai tuyến tính) 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 5. Thiết lập thí nghiệm.

4 dầm đầu tiên trong nhóm 1 được thí nghiệm tĩnh, 6 dầm còn lại 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. 3 cấp tải trọng lặp được xây dựng, tương ứng với $0,3-0,5, 0,5-0,7$ 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).

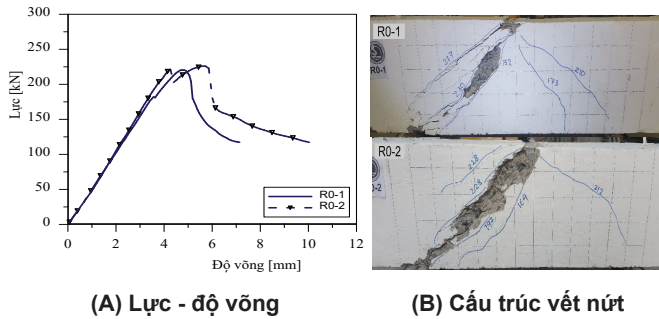


Hình 6. Phổ tải trọng lặp.

Phân tích và đánh giá kết quả thực nghiệm

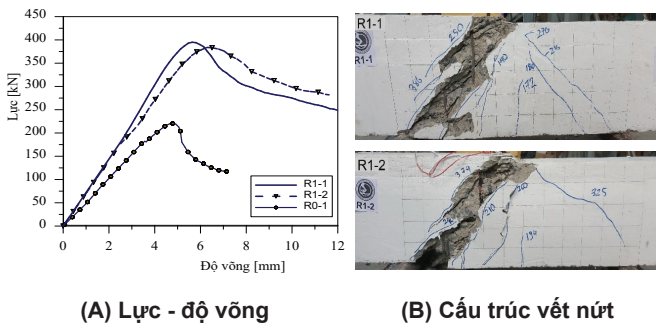
Nhóm mẫu không bị ăn mòn (nhóm 1)

Các hình 7, 8 và 9 trình bày quan hệ lực - độ võng giữa nhịp và cấu trúc vết nứt của 6 dầm đối 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”. 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.

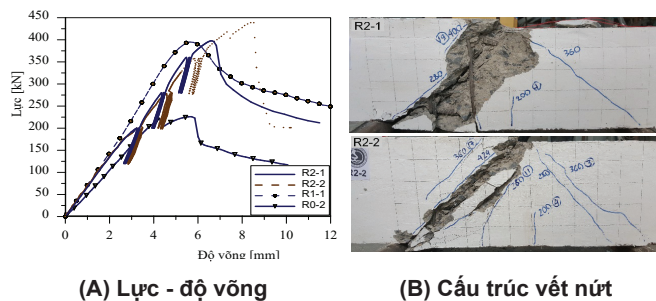


Hình 7. Ứng xử chịu cắt của dầm không có cốt đai R0-1 và R0-2.

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 7B). 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. Dầm đối chứng không bị ăn mòn R1-1 và R1-2 (chịu tải trọng tĩnh).

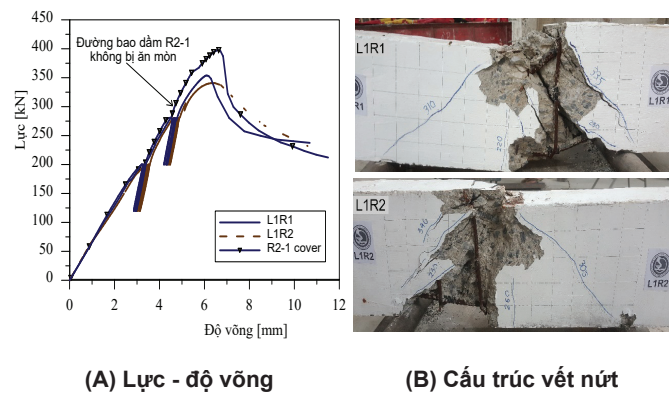


Hình 9. Dầm đối chứng R2-1 và R2-2 chịu tải trọng lặp.

Đối với 2 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 8B). 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 cái 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 (hình 8A), 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 9B). 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.

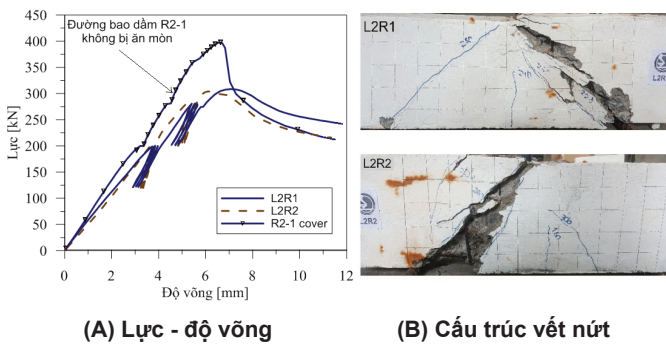
Dầm có cốt thép bị ăn mòn (nhóm 2)



Hình 10. Dầm ăn mòn ở cấp độ 1 (L1R1 và L1R2).

Nhóm thứ hai gồm 4 dầm có cốt đai đã bị ăn mòn ở 2 mức độ, được chịu tác dụng của tải trọng lặp (hình 10, 11). Sau thí nghiệm, cốt thép đai được tách khỏi dầm để đánh giá sự mất mát khối lượng do quá trình ăn mòn (hình 12). Các vết nứt thẳng góc xuất hiện đầu tiên ở các dầm L1R1 và L1R2, tại mức tải trọng lần lượt là 165 và 182 kN, nhỏ hơn so với các dầm đối chứng không bị ăn mòn. Các vết nứt

nứt nghiêng do cắt đầu tiên có thể quan sát được ở các cấp tải trọng 214 và 226 kN tại vị trí bụng dầm. Có thể thấy, do ảnh hưởng của cốt thép đai bị ăn mòn, mức tải trọng gây ra vết nứt nghiêng nhỏ hơn khá nhiều so với các mẫu đối chứng không bị ăn mòn. Độ cứng của dầm có cốt thép đai đã bị ăn mòn L1R1 và L1R2 hầu như không bị ảnh hưởng nhiều bởi sự ăn mòn mặc dù khả năng chịu cắt bị giảm một cách đáng kể. Điều này có thể được giải thích là bởi với mức độ ăn mòn trung bình (xấp xỉ 10%), chất lượng dính bám giữa thép và bê tông chưa suy giảm đáng kể. Cả 2 dầm đều bị phá hoại do cắt ở mức tải 353,4 và 340,7 kN, không đạt đến khoảng tải trọng lặp (0,7-0,9 Pu). Khi so sánh với các mẫu đối chứng (R2-1 và R2-2), khả năng kháng cắt của mẫu L1R1 và L1R2 giảm lần lượt là 14,5 và 17,6%.



Hình 11. Dầm có cốt đai bị ăn mòn ở mức độ 2 (L2R1 và L2R2).



Hình 12. Cốt thép đai được bóc tách khỏi bê tông sau khi thí nghiệm.

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).

Tất cả 4 dầm bị ăn mòn trong nhóm 2 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.

Bảng 2. Tóm tắt kết quả thí nghiệm.

Nhóm	Dầm	Loại tải trọng	Dầm	Mức độ ăn mòn (%)	Lực lớn nhất (kN)
G1: không bị ăn mòn	R0-1	Tĩnh	R0-1		220,6
	R0-2	Tĩnh	R0-2		226,2
	R1-1	Tĩnh	R1-1	NA	395,6
	R1-2	Tĩnh	R1-2		384,3
	R2-1	Lặp	R2-1		398,6
	R2-2	Lặp	R2-2		429,5
G2: bị ăn mòn	L1R1	Lặp	L1R1	12,3	353,4
	L1R2	Lặp	L1R2	14,7	340,7
	L2R1	Lặp	L2R1	23,6	313,5
	L2R2	Lặp	L2R2	21,9	304,0

Kết luận

Bài báo đã trình bày một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm đối với 10 dầm BTCT nhằm đánh giá ảnh hưởng của sự ăn mòn cốt thép đai đến sức kháng cắt của dầm. Dựa vào các kết quả thí nghiệm, một số kết luận được rút ra như sau:

Sức kháng cắt của các dầm có cốt thép đai lớn hơn 74,5% so với các dầm đối chứng không có cốt thép đai. 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 đai 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 16,08 và 25,34%, tương ứng với mức độ ăn mòn cốt thép 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.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] F. Jnaid, R.S. Aboutaha (2016), “Residual flexural strength of corroded reinforced concrete beams”, *Engineering Structures*, **119**, pp.198-216.

[2] A. Alaskar, A.S. Alqarni (2021), “Performance evaluation of reinforced concrete beams with corroded web reinforcement: experimental and theoretical study”, *Journal of Building Engineering*, **35**, DOI: 10.1016/j.jobe.2020.102038.

[3] A.K. El-Sayed, R.R. Hussain, A.B. Shuraim (2016), “Influence of stirrup corrosion on shear strength of reinforced concrete slender beams”, *ACI Structural Journal*, **113**, pp.1223-1232.

[4] A.K. El-Sayed, R.R. Hussain, A.B. Shuraim (2015), “Effect of stirrup corrosion on the shear strength of reinforced concrete short beams”, *Journal of Civil Engineering and Management*, **22**, pp.491-499.

[5] C. Suffern, A. El-Sayed, K. Soudki (2010), “Shear strength of disturbed regions with corroded stirrups in reinforced concrete beams”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, **37(8)**, pp.1045-1056.