Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (5V): 1–12

ẢNH HƯỞNG CỦA CẤU HÌNH BỐ TRÍ ANODE KẼM HY SINH ĐẾN HIỆU QUẢ CHỐNG ĂN MÒN CỐT THÉP TRONG SỬA CHỮA TRÁM VÁ BÊ TÔNG CỤC BỘ

Bùi Huy Tăng[a,*]

[a]*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 06/8/2026, Sửa xong 14/10/2026, Chấp nhận đăng 28/10/2026

Tóm tắt

Ăn mòn cốt thép là một trong những nguyên nhân chính gây bong tróc, suy giảm độ bền và giảm khả năng chịu lực của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT). Bảo vệ cathode bằng anode kẽm hy sinh (Sacrificial Anode Cathodic Protection – SACP) được xem là một giải pháp hiệu quả nhằm hạn chế quá trình ăn mòn trong môi trường điện ly của bê tông. Bài báo trình bày cơ chế chống ăn mòn của hệ SACP dựa trên các nguyên lý điện hóa, đồng thời sử dụng mô phỏng số để đánh giá ảnh hưởng của các cấu hình bố trí anode kẽm và đề xuất phương án bố trí nhằm nâng cao hiệu quả bảo vệ cốt thép. Kết quả mô phỏng cho thấy việc bố trí anode kẽm dọc vùng tiếp giáp giữa bê tông cũ và vùng trám vá mới mang lại hiệu quả bảo vệ cao hơn so với phương án bố trí tập trung trong vùng trám vá. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế và thi công các giải pháp sửa chữa trám vá bền vững đối với kết cấu BTCT bị ăn mòn.

Từ khoá: ăn mòn cốt thép; bảo vệ cathode; cấu hình kẽm anode; cơ chế điện hóa; mô phỏng số.

EFFECT OF ZINC SACRIFICIAL ANODE CONFIGURATION ON THE EFFECTIVENESS OF REINFORCEMENT CORROSION PROTECTION IN LOCALISED CONCRETE PATCH REPAIR

Abstract

Reinforcement corrosion is a primary cause of spalling, strength degradation, and reduced load-bearing capacity in reinforced concrete (RC) structures. Cathodic protection using sacrificial zinc anodes (Sacrificial Anode Cathodic Protection — SACP) is considered an effective measure to mitigate corrosion processes within the electrochemical environment of concrete. This paper presents the anti-corrosion mechanism of SACP based on electrochemical principles, and employs numerical simulation to evaluate the influence of different zinc anode configurations and to propose layout strategies that enhance reinforcement protection. Simulation results indicate that routing zinc anodes along the interface between existing concrete and the repair patch provides superior protection compared with concentrating anodes solely within the patched region. The findings provide a scientific basis for the design and execution of sustainable repair schemes for corrosion-affected RC structures.

Keywords: corrosion; cathodic protection; zinc anode configuration; electrochemical mechanism; numerical model.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(5V)-01 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Ăn mòn cốt thép là một trong những nguyên nhân chủ yếu gây suy giảm độ bền và khả năng chịu lực của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT). Quá trình ăn mòn diễn ra từ bên trong kết cấu và thường chỉ được phát hiện khi xuất hiện các dấu hiệu như nứt hoặc bong tróc lớp bê tông bảo vệ. Sự hình thành gỉ thép làm gia tăng thể tích quanh cốt thép, tạo ứng suất kéo trong bê tông. Khi ứng suất này vượt quá cường độ chịu kéo của bê tông, các vết nứt xuất hiện và phát triển, dẫn đến bong tróc lớp bê tông bảo vệ và đẩy nhanh quá trình suy giảm khả năng chịu lực cũng như độ bền của kết cấu [1–3]. Trám vá cục bộ là giải pháp được áp dụng phổ biến để sửa chữa các vùng bê tông bị bong tróc do ăn mòn [4, 5]. Sau khi loại bỏ bê tông hư hỏng và làm sạch cốt thép, vùng sửa chữa được lấp đầy bằng lớp vữa mới có khả năng chống xâm nhập của các tác nhân ăn mòn tốt hơn bê tông cũ. Tuy nhiên, nhiều nghiên

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* tangbh@huce.edu.vn (Tăng, B. H.)

cứu và quan sát thực tế cho thấy sau một thời gian khai thác, các vết nứt thường xuất hiện trở lại tại vùng tiếp giáp giữa bê tông cũ và lớp vật liệu sửa chữa. Hiện tượng này, được gọi là *hiệu ứng vòng anode*, xuất phát từ sự chênh lệch điện thế giữa vùng bê tông cũ và vùng trám vá, làm hình thành dòng ăn mòn macrocell và gia tăng tốc độ ăn mòn của cốt thép trong vùng bê tông cũ [6, 7]. Để hạn chế hiện tượng này, anode hy sinh thường được kết hợp với lớp vật liệu trám vá nhằm tạo dòng điện bảo vệ cốt thép. Trong số các vật liệu anode hy sinh, kẽm được đánh giá có hiệu quả bảo vệ và độ bền phù hợp trong môi trường bê tông nên được sử dụng phổ biến trong thực tế [8, 9].

Trong những năm vừa qua, một số nghiên cứu đã được thực hiện nhằm đánh giá hiệu quả của sửa chữa trám vá và anode hy sinh trong bảo vệ cốt thép ăn mòn. Năm 2013, Cheung và cs. đã sử dụng mô hình số để nghiên cứu khả năng hạn chế ăn mòn macrocell khi sử dụng anode hy sinh và dòng điện ngoài cho kết cấu BTCT chịu xâm nhập của chloride [10]. Tuy nhiên, mô hình này chỉ đánh giá một cấu hình anode hy sinh duy nhất khi chúng được bố trí bên trong vùng trám vá. Sau đó, Lozinguez và cs. so sánh hiệu quả của hai cấu hình kẽm hy sinh thông qua mô phỏng số [11]. Mô hình thứ nhất bố trí kẽm trong vữa trám vá, trong khi chúng được đặt trong bê tông cũ xung quanh ở mô hình thứ hai. Tuy nhiên, mô hình này chỉ giới hạn ở mẫu có một cốt thép và không xem xét ảnh hưởng của ăn mòn macrocell từ các cốt thép lân cận. Gần đây, Wang và cs. thực hiện thí nghiệm nhằm so sánh hiệu quả của ba loại anode hy sinh khác nhau trong giảm thiểu ăn mòn macrocell [12]. Mặc dù, mẫu thí nghiệm lớn có thể được sử dụng để mô phỏng quá trình ăn mòn điện hóa trong kết cấu thực tế, anode hy sinh chỉ được bố trí tại chính giữa vùng trám vá mà không xem xét ảnh hưởng của các cấu hình anode hy sinh khác nhau. Từ các nghiên cứu trên có thể thấy, anode kẽm hy sinh thường được bố trí ở giữa hoặc phân bố đều trong vùng trám vá [9, 10, 13]. Tuy nhiên, cấu hình này có thể làm giảm hiệu quả bảo vệ do khoảng cách giữa anode và vùng cốt thép bị ăn mòn còn lớn, làm tăng điện trở của môi trường bê tông và hạn chế dòng điện bảo vệ. Đến nay, các nghiên cứu về cấu hình bố trí tối ưu của anode kẽm trong sửa chữa trám vá còn hạn chế, đặc biệt là các nghiên cứu định lượng so sánh hiệu quả chống ăn mòn giữa các phương án bố trí khác nhau. Hơn nữa, hầu như rất ít nghiên cứu đề xuất nguyên lý động học ăn mòn để giải thích cho tính hiệu quả giữa các cấu hình kẽm anode hy sinh khác nhau.

Xuất phát từ khoảng trống nghiên cứu trên, bài báo sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn kết hợp mô hình điện hóa để đánh giá ảnh hưởng của các cấu hình bố trí anode kẽm đến hiệu quả bảo vệ cốt thép trong sửa chữa trám vá cục bộ. Trên cơ sở kết quả mô phỏng, nghiên cứu đề xuất cấu hình bố trí anode phù hợp nhằm nâng cao hiệu quả chống ăn mòn và kéo dài tuổi thọ của các kết cấu BTCT bị ăn mòn cục bộ. Ngoài ra, bài báo cũng đề xuất nguyên lý điện hóa để giải thích nguyên nhân dẫn đến hiệu quả vượt trội của cấu hình kẽm anode hy sinh tối ưu đã đề xuất.

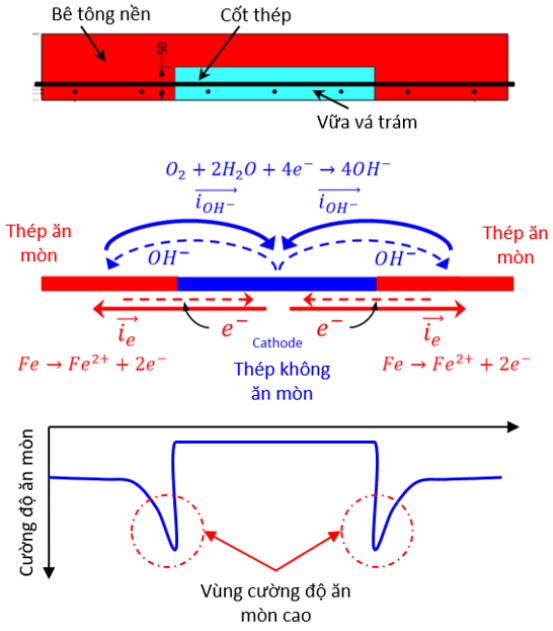
2. Nguyên lý chống ăn mòn cốt thép trong sửa chữa trám vá bê tông cục bộ dựa trên lý thuyết điện hóa

2.1. Nguyên lý chống ăn mòn cốt thép trong sửa chữa trám vá cục bộ không tích hợp anode kẽm hy sinh

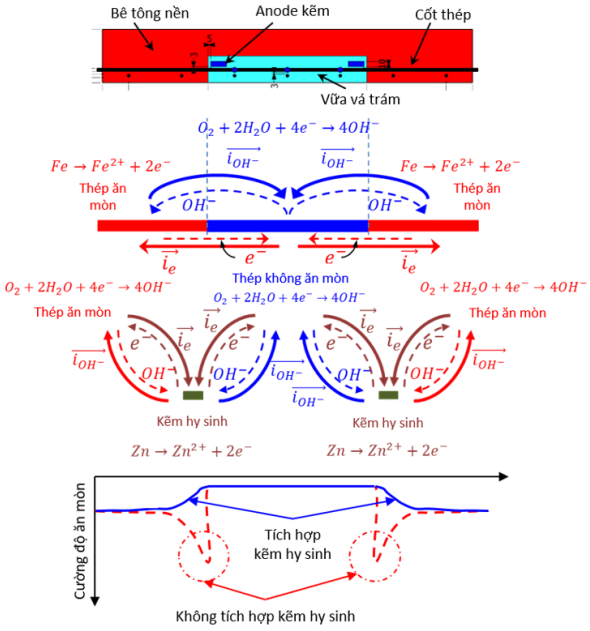
Trong sửa chữa trám vá cục bộ, cốt thép tại vùng bê tông hư hỏng được làm sạch trước khi đổ lớp vữa sửa chữa. Sau khi sửa chữa, cốt thép trong vùng trám vá được tái thụ động hóa và hầu như không bị ăn mòn, trong khi cốt thép trong bê tông nền xung quanh vẫn chịu ảnh hưởng của các tác nhân ăn mòn như chloride hoặc carbon dioxide. Sự khác biệt về môi trường điện hóa giữa hai vùng tạo nên chênh lệch điện thế ăn mòn, hình thành quá trình ăn mòn macrocell giữa vùng trám vá và bê tông nền.

Như minh họa trong Hình 1, cốt thép trong vùng trám vá đóng vai trò cathode, còn cốt thép trong bê tông nền đóng vai trò anode. Electron sinh ra từ phản ứng oxy hóa tại anode di chuyển qua cốt thép đến vùng cathode, trong khi dòng ion khép kín mạch điện thông qua dung dịch lỗ rỗng của bê tông.

Quá trình này làm tăng mật độ dòng ăn mòn tại vùng cốt thép sát mép sửa chữa, thúc đẩy sự hình thành gỉ, gây nứt và bong tróc bê tông sau một thời gian khai thác. Hiện tượng này được gọi là *hiệu ứng vòng anode*.



Hình 1. Nguyên lý ăn mòn điện hóa trong sửa chữa bê tông trám vá không tích hợp anode kẽm hy sinh



Hình 2. Nguyên lý ăn mòn điện hóa trong sửa chữa bê tông trám vá tích hợp kẽm hy sinh

2.2. *Nguyên lý chống ăn mòn cốt thép trong sửa chữa trám vá cục bộ tích hợp anode kẽm hy sinh*

Để hạn chế hiện tượng hiệu ứng vòng anode, kẽm hy sinh được lắp đặt cùng với lớp vật liệu trám vá nhằm cung cấp dòng điện bảo vệ cho cốt thép. Do có điện thế điện hóa âm hơn cốt thép, kẽm ưu tiên bị oxy hóa và đóng vai trò anode hy sinh, trong khi cốt thép được phân cực cathode và tốc độ ăn mòn giảm đáng kể.

Như thể hiện trong Hình 2, khi tích hợp anode kẽm hy sinh, hệ điện hóa bao gồm ba cặp tương tác: (i) giữa cốt thép vùng trám vá và cốt thép trong bê tông nền; (ii) giữa anode kẽm và cốt thép trong bê tông nền; và (iii) giữa anode kẽm và cốt thép trong vùng trám vá. Trong đó, quá trình điện hóa giữa anode kẽm và cốt thép tạo ra dòng điện bảo vệ, làm giảm hoặc triệt tiêu dòng ăn mòn macrocell giữa vùng trám vá và bê tông nền. Electron sinh ra từ quá trình oxy hóa của kẽm được truyền tới cốt thép, duy trì trạng thái phân cực cathode và hạn chế phản ứng hòa tan của sắt. Cơ chế này được duy trì cho đến khi anode kẽm tiêu hao hoàn toàn. Đồng thời, anode kẽm cũng tạo ra dòng điện bảo vệ đối với cốt thép trong vùng trám vá, góp phần nâng cao hiệu quả chống ăn mòn cho toàn bộ khu vực sửa chữa.

3. Mô phỏng ăn mòn điện hóa trong sửa chữa trám vá bê tông tích hợp anode kẽm hy sinh

Quá trình ăn mòn điện hóa và sự phân bố dòng điện trong sửa chữa trám vá bê tông cục bộ tích hợp anode kẽm hy sinh được mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics 6.0 [14, 15]. Các phản ứng điện hóa trên bề mặt anode kẽm và cốt thép được mô tả theo phương trình phân cực Tafel, trong đó mật độ dòng điện anode và cathode của kẽm và cốt thép được xác định theo các công thức (1)–(4) [2, 16–18]. Các tham số của mô hình bao gồm mật độ dòng điện

trao đổi, điện thế cân bằng, hệ số Tafel và nồng độ oxy hòa tan.

$$i_{a,Zn} = i^0_{a,Zn} \times e^{2{,}3026\frac{\phi_{a,Zn}-\phi^0_{a,Zn}}{\beta_{a,Zn}}} \tag{1}$$

$$i_{c,Zn} = \frac{C^{Zn}_{O_2}}{C^s_{O_2}} i^0_{c,Zn} \times e^{2{,}3026\frac{\phi_{c,Zn}-\phi^0_{c,Zn}}{\beta_{c,Zn}}} \tag{2}$$

$$i_{a,Fe} = i^0_{a,Fe} \times e^{2{,}3026\frac{\phi_{a,Fe}-\phi^0_{a,Fe}}{\beta_{a,Fe}}} \tag{3}$$

$$i_{c,Fe} = \frac{C^{Fe}_{O_2}}{C^s_{O_2}} i^0_{c,Fe} \times e^{2{,}3026\frac{\phi_{c,Fe}-\phi^0_{c,Fe}}{\beta_{c,Fe}}} \tag{4}$$

trong đó, $i_{a,Zn}$, $i_{c,Zn}$, $i_{a,Fe}$ và $i_{c,Fe}$ (μA/cm^2) lần lượt là cường độ dòng điện của quá trình phân cực anode và cathode trên bề mặt kẽm hy sinh và cốt thép; $i^0_{a,Zn}$, $i^0_{c,Zn}$, $i^0_{a,Fe}$ và $i^0_{c,Fe}$ (μA/cm^2) lần lượt là cường độ dòng điện trao đổi anode và cathode trên bề mặt kẽm hy sinh và cốt thép; $\phi_{a,Zn}$, $\phi_{c,Zn}$, $\phi_{a,Fe}$ và $\phi_{c,Fe}$ (mV/CSE) lần lượt là hiệu điện thế của quá trình phân cực anode và cathode trên bề mặt kẽm hy sinh và cốt thép; $\phi^0_{a,Zn}$, $\phi^0_{c,Zn}$, $\phi^0_{a,Fe}$ và $\phi^0_{c,Fe}$ (mV/CSE) lần lượt là hiệu điện thế cân bằng anode và cathode trên bề mặt kẽm hy sinh và cốt thép; $\beta_{a,Zn}, \beta_{c,Zn}, \beta_{a,Fe}$ và $\beta_{c,Fe}$ (mV/d) lần lượt là độ dốc Tafel anode và cathode của quá trình phân cực trên kẽm hy sinh và cốt thép; $C^{Zn}_{O_2}$, $C^{Fe}_{O_2}$ và $C^s_{O_2}$ (mol/m^3) lần lượt là nồng độ oxy tại vị trí kẽm, cốt thép và ở bề mặt bê tông.

Điều kiện biên của mô hình được thiết lập trên cơ sở cân bằng giữa dòng điện microcell và điện thế ăn mòn tại bề mặt anode kẽm và cốt thép, như trình bày trong các công thức (5)–(8) [17, 19, 20]. Đối với vùng cốt thép còn ở trạng thái thụ động, mật độ dòng điện microcell được giả thiết bằng không và điện thế được xác định bởi phản ứng cathode.

$$i_{mic,Zn} = i_{a,Zn} = i_{c,Zn} \tag{5}$$

$$i_{mic,Fe} = i_{a,Fe} = i_{c,Fe} \tag{6}$$

$$\phi_{mic,Zn} = \phi_{a,Zn} = \phi_{c,Zn} \tag{7}$$

$$\phi_{mic,Fe} = \phi_{a,Fe} = \phi_{c,Fe} \tag{8}$$

trong đó, $i_{mic,Zn}$, $i_{mic,Fe}$ và $\phi_{mic,Zn}$, $\phi_{mic,Fe}$ lần lượt là cường độ dòng điện microcell và hiệu điện thế ăn mòn tại kẽm hy sinh và cốt thép vùng ăn mòn.

Sự phân bố điện thế trong bê tông được xác định bằng phương trình Laplace cùng các điều kiện biên tương ứng trên bề mặt anode kẽm, cốt thép và bề mặt bê tông (9)–(12) [2, 19]. Trên cơ sở phân bố điện thế, mật độ dòng điện macrocell được tính theo định luật Ohm (13), trong khi tổng mật độ dòng điện ăn mòn được xác định bằng tổng của dòng điện microcell và macrocell theo công thức (14) [19, 21].

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} = 0 \tag{9}$$

$$\phi = \phi_{mic,Zn} \text{ trên } \Gamma_{Zn} \tag{10}$$

$$\phi = \phi_{mic,Fe} \text{ trên } \Gamma_{Fe} \tag{11}$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial n_1} = 0 \text{ trên } \Gamma_{sf} \tag{12}$$

$$i_{mac} = -\frac{1}{R_c}\frac{\partial \phi}{\partial n_2} \tag{13}$$

$$i_{tot} = i_{mic} + i_{mac} \tag{14}$$

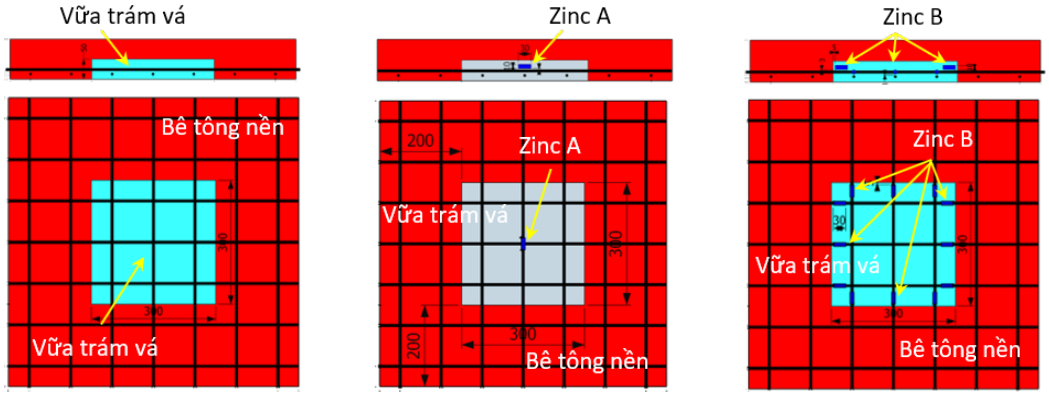
trong đó, Γ_{Zn} và Γ_{Fe} là điều kiện biên trên bề mặt kẽm hy sinh và cốt thép; Γ_{sf} là điều kiện biên trên bề mặt bê tông; n_1 là vec tơ hướng vuông góc với bề mặt bê tông; n_2 là vec tơ hướng vuông góc với đường đẳng thế; R_c là điện trở suất của bê tông giữa cực anode và cực cathode.

Các thông số đầu vào của mô hình được trình bày trong Bảng 1. Cường độ dòng điện trao đổi và hiệu điện thế cân bằng anode/cathode trên bề mặt cốt thép và kẽm là các giá trị được xác định ở điều kiện tiêu chuẩn trong phòng thí nghiệm và thường không thay đổi. Độ dốc Tafel phụ thuộc vào trạng thái điện hóa trên bề mặt cốt thép và kẽm. Giá trị của các thông số này đã được thống nhất trong các công bố trước. Nồng độ oxy trên bề mặt bê tông được lấy theo giá trị trung bình, trong khi giá trị điện trở suất phụ thuộc vào loại bê tông và cấp phối. Trong mô hình này, điện trở suất của bê tông và vữa trám vá được lấy trung bình theo giá trị cho bê tông và vữa có cường độ vừa trong điều kiện khô ráo. Trong các nghiên cứu thực nghiệm, điện trở suất của bê tông có thể được đo trực tiếp. Tuy nhiên, sự thay đổi của các giá trị này không làm thay đổi so sánh tương quan hiệu quả bảo vệ của kẽm hy sinh anode ở các cấu hình bố trí khác nhau.

Bảng 1. Thông số đầu vào của mô hình phần tử hữu hạn [2, 10, 16, 20, 22–24]

	i_a^0 (10^{-4}) (μA/cm^2)	i_c^0 (10^{-4}) (μA/cm^2)	ϕ_a^0 (mV/CSE)	ϕ_c^0 (mV/CSE)	β_a (mV/d)	β_c (mV/d)	$C_{O_2}^s$ (mol/m^3)	R_c (Ω.m)
Kẽm	16	2	−1050	160	40	−150	NA	NA
Cốt thép ăn mòn	180	6	−780	160	60	−160	NA	NA
Cốt thép không ăn mòn	180	6	−780	160	NA	−160	NA	NA
Bê tông cũ	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	500
Vữa trám vá	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	800
Nồng độ O_2 tại bề mặt bê tông	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,266	NA

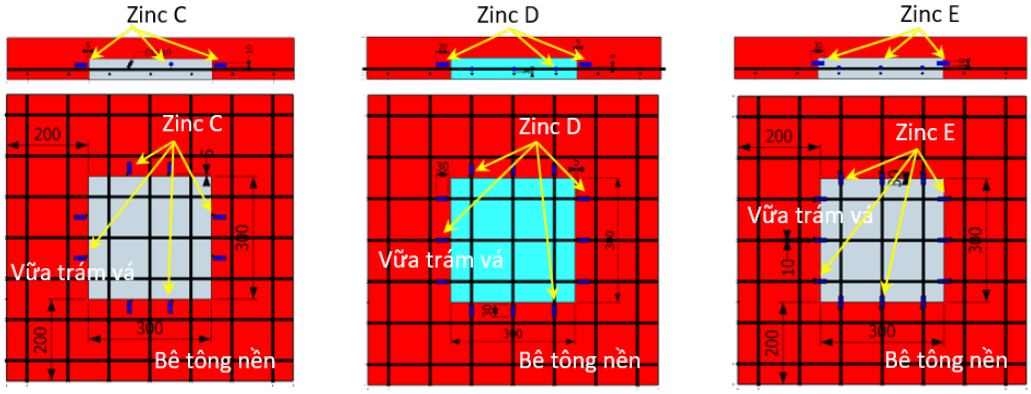
Để đánh giá ảnh hưởng của cấu hình bố trí anode đến hiệu quả chống ăn mòn, nghiên cứu xem xét sáu phương án sửa chữa trám vá, gồm một trường hợp không sử dụng anode kẽm và năm cấu hình bố trí anode kẽm khác nhau (Hình 3). Các cấu hình này được mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn nhằm so sánh sự phân bố mật độ dòng điện ăn mòn và xác định phương án bố trí anode có hiệu quả bảo vệ cốt thép cao nhất.



(a) Vữa trám vá không tích hợp anode kẽm

(b) Vữa trám vá tích hợp anode kẽm zinc A

(c) Vữa trám vá & anode kẽm zinc B



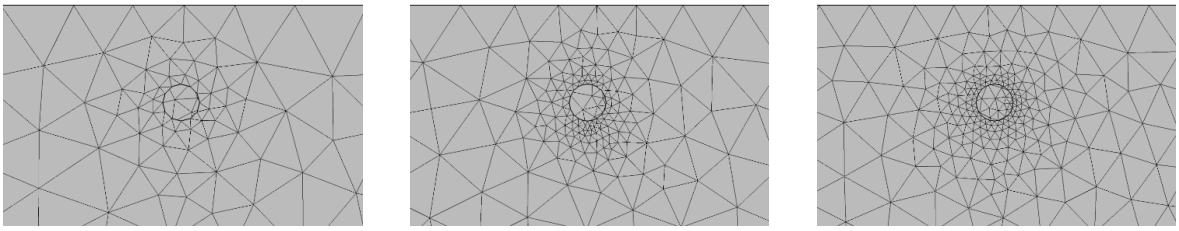
(d) Vữa trám vá & anode kẽm zinc C

(e) Vữa trám vá & anode kẽm zinc D

(f) Vữa trám vá & anode kẽm zinc E

Hình 3. Cấu hình sửa chữa trám vá và anode kẽm hy sinh

Trong mô hình phần tử hữu hạn, ba kích thước lưới được áp dụng nhằm đánh giá sự ảnh hưởng của việc chia lưới đến kết quả cường độ ăn mòn. Hình ảnh phân chia lưới tại vùng tiếp giáp giữa cốt thép và bê tông được thể hiện ở Hình 4. Phần tử được sử dụng là tứ diện tự do (free tetrahedral) với kích thước thay đổi dần từ lớn đến nhỏ tương ứng với vị trí xa vùng tiếp giáp tới vị trí gần vùng tiếp giáp. Mô hình lưới thô hơn có kích thước lưới lớn nhất và nhỏ nhất tương ứng là 44 mm và 5,5 mm với tỉ lệ tăng là 1,45 (Hình 4(a)), trong khi các thông số này cho mô hình lưới vừa là 30,3 mm, 2,2 mm và 1,4 (Hình 4(b)). Mô hình lưới mịn hơn có kích thước lưới lớn nhất, nhỏ nhất và tỉ lệ tăng lần lượt là 19,3 mm, 0,83 mm và 1,35 (Hình 4(c)). Theo kết quả phân tích, thì ba mô hình lưới này không làm thay đổi phân bố cường độ dòng điện ở cốt thép và kẽm hy sinh đáng kể, do vậy mô hình lưới vừa (Hình 4(b)) sẽ được sử dụng cho các phân tích tiếp theo nhằm tối ưu lưu lượng bộ nhớ.



(a) Lưới thô hơn

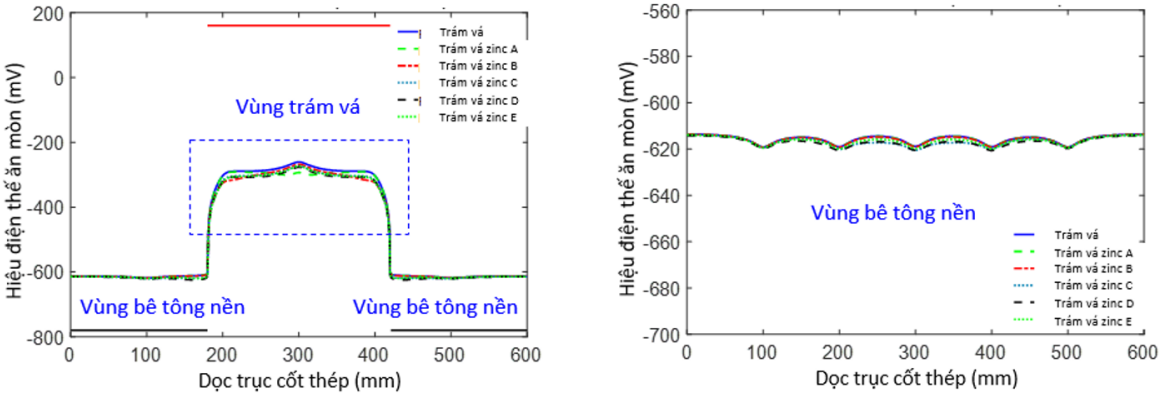
(b) Lưới vừa

(c) Lưới mịn hơn

Hình 4. Ba kích thước chia lưới trong mô hình PTHH

4. Ảnh hưởng của cấu hình kẽm hy sinh tới khả năng chống ăn mòn cốt thép

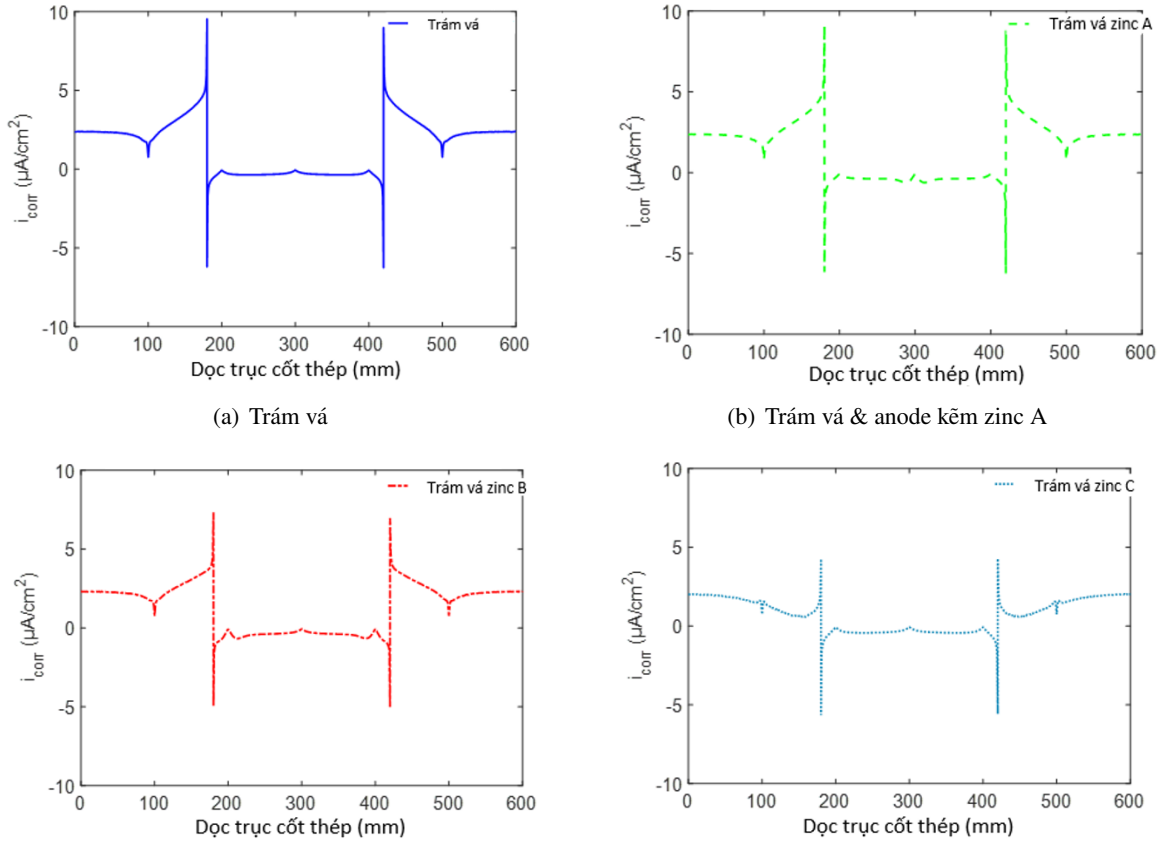
Hình 5 thể hiện sự phân bố hiệu điện thế ăn mòn dọc theo cốt thép đi qua vùng trám vá và cốt thép chỉ nằm trong bê tông nền. Đối với cốt thép đi qua vùng trám vá (Hình 5(a)), hiệu điện thế tại vùng bê tông nền xấp xỉ −600 mV/CSE, cho thấy cốt thép có nguy cơ ăn mòn cao, trong khi vùng trám vá có hiệu điện thế lớn hơn −350 mV/CSE nhờ lớp vữa mới và cốt thép đã được làm sạch. Đối với cốt thép chỉ nằm trong bê tông nền (Hình 5(b)), hiệu điện thế duy trì khoảng −615 mV/CSE trên toàn bộ chiều dài, phản ánh trạng thái ăn mòn của cốt thép trong môi trường bê tông đã bị xâm thực. Sự chênh lệch điện thế giữa các vùng cốt thép tạo điều kiện hình thành ăn mòn macrocell, làm gia tăng tốc độ ăn mòn tại vùng tiếp giáp giữa bê tông nền và vùng trám vá.



(a) Cốt thép qua vùng trám vá (b) Cốt thép trong bê tông nền

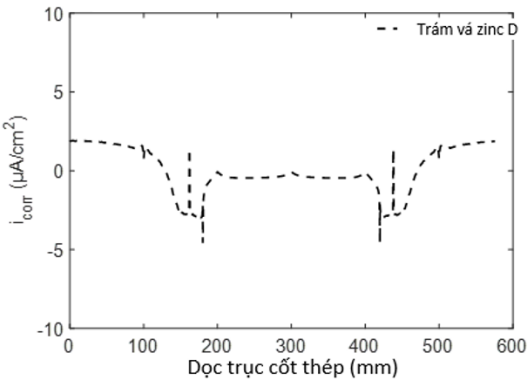
Hình 5. Hiệu điện thế ăn mòn

Ảnh hưởng của các cấu hình bố trí anode kẽm đến mật độ dòng điện ăn mòn macrocell được trình bày trong Hình 6. Đối với trường hợp chỉ sử dụng vữa trám vá, mật độ dòng điện macrocell đạt giá trị lớn nhất, đặc biệt tại vùng tiếp giáp giữa bê tông nền và vùng sửa chữa, với giá trị cực đại xấp xỉ 10 μA/cm^2 (Hình 6(a)). Khi tích hợp anode kẽm, mật độ dòng điện macrocell giảm rõ rệt; tuy nhiên, mức độ giảm phụ thuộc đáng kể vào vị trí bố trí anode.

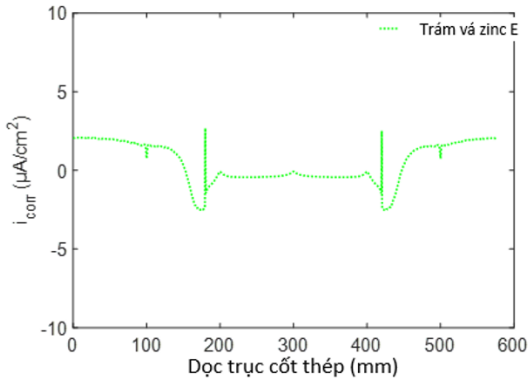


(a) Trám vá (b) Trám vá & anode kẽm zinc A

(c) Trám vá & zinc B (d) Trám vá & zinc C



(e) Trám vá & zinc D



(f) Trám vá & zinc E

Hình 6. Cường độ ăn mòn cốt thép macrocell dưới các cấu hình sửa chữa khác nhau

Đối với các cấu hình Zinc A và Zinc B, anode được bố trí bên trong vùng trám vá nên khoảng cách đến cốt thép trong bê tông nền còn lớn. Điện trở của môi trường bê tông làm hạn chế dòng điện bảo vệ truyền từ anode đến cốt thép, dẫn đến hiệu quả chống ăn mòn còn hạn chế (Hình 6(b) và Hình 6(c)). So với sửa chữa trám vá đơn thuần, khi lắp đặt thêm cấu hình kẽm anode hy sinh Zinc A và Zinc B, cường độ dòng điện macrocell ở cốt thép tại vùng tiếp giáp giảm lần lượt khoảng 5,3% và 21,1%. Khi anode được dịch chuyển về phía bê tông nền (Zinc C), hiệu quả bảo vệ cốt thép tăng lên với dòng điện ăn mòn giảm 52,6% so với cấu hình trám vá. Hiệu quả bảo vệ cốt thép được cải thiện rõ rệt và đạt tối ưu ở cấu hình Zinc D, trong đó anode được bố trí dọc theo biên sửa chữa, nằm hoàn toàn trong bê tông nền và gần với vị trí cốt thép, làm giảm mật độ dòng điện ăn mòn xuống khoảng 1,7 μA/cm^2 (giảm 82,1% so với cấu hình trám vá). Cấu hình Zinc E, với anode bố trí dọc theo biên sửa chữa và chỉ nằm một phần trong bê tông nền, cũng cho hiệu quả bảo vệ cao với cường độ dòng điện của cốt thép tại vùng chuyển tiếp giảm 68,4%. Tuy nhiên, cấu hình này không đạt hiệu quả cao bằng cấu hình Zinc D (giảm 82,1%).

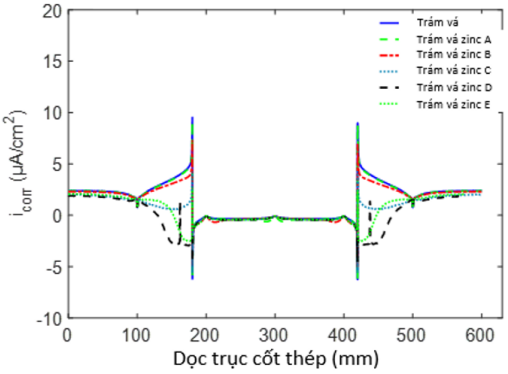
Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả chống ăn mòn phụ thuộc chủ yếu vào khoảng cách giữa anode kẽm và cốt thép bị ăn mòn. Anode càng được bố trí gần cốt thép và nằm hoàn toàn trong bê tông nền, điện trở truyền dòng càng nhỏ, khả năng cung cấp dòng điện bảo vệ càng lớn và mật độ dòng điện ăn mòn càng giảm. Ngược lại, khi anode được đặt sâu trong vùng trám vá, hiệu quả bảo vệ giảm đáng kể do điện trở của lớp vật liệu sửa chữa.

Hình 7 trình bày sự phân bố dòng điện microcell, macrocell và tổng dòng điện ăn mòn của sáu cấu hình sửa chữa. Kết quả cho thấy dòng điện microcell gần như không thay đổi giữa các cấu hình, trong khi sự khác biệt của tổng dòng điện ăn mòn chủ yếu bắt nguồn từ dòng điện macrocell. Điều này cho thấy việc bố trí anode kẽm chủ yếu ảnh hưởng đến quá trình ăn mòn macrocell. Trong sáu cấu hình khảo sát, phương án bố trí anode thành nhiều đoạn nhỏ dọc theo biên vùng sửa chữa và sát cốt thép trong bê tông nền (Zinc D) cho tổng mật độ dòng điện ăn mòn thấp nhất, thể hiện hiệu quả bảo vệ cao nhất.

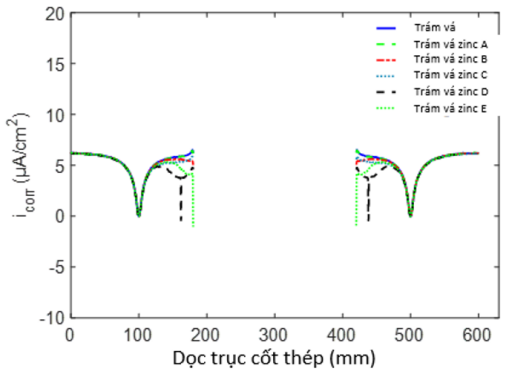
Để đánh giá mức độ phù hợp của kết quả mô phỏng, kết quả thu được từ mô hình số trong nghiên cứu này được đối chiếu với các bằng chứng thực nghiệm độc lập đã được công bố trong các nghiên cứu trước. Trước hết, kết quả thực nghiệm tại một tòa nhà để xe [25] cho thấy việc bố trí kẽm hy sinh dọc theo biên vùng sửa chữa, nằm trong phần bê tông cũ và gần vị trí cốt thép, tạo ra hiệu quả bảo vệ cốt thép tốt hơn. Trong nghiên cứu thực tế này, sau khi loại bỏ phần bê tông bị bong tróc và làm sạch bề mặt cốt thép, các lỗ khoan được tạo trong phần bê tông cũ để lắp đặt các anode kẽm hy sinh, như

thể hiện trong Hình 8. Cấu hình lắp đặt thực tế này tương đồng với cấu hình cho hiệu quả bảo vệ tốt nhất được xác định từ mô hình số trong nghiên cứu hiện tại. Bên cạnh đó, kết quả thí nghiệm trong phòng của Tang và cs. [26] cũng cung cấp một bằng chứng thực nghiệm độc lập về ảnh hưởng của vị trí anode đến quá trình bảo vệ cốt thép. Kết quả cho thấy khi kẽm hy sinh được bố trí dọc theo biên vùng sửa chữa và nằm trong phần bê tông cũ, cường độ dòng điện macrocell tại cốt thép bị ăn mòn giảm đáng kể so với trường hợp kẽm được bố trí ở trung tâm vùng vữa sửa chữa. Xu hướng này phù hợp với kết quả mô phỏng của nghiên cứu hiện tại, theo đó việc bố trí anode kẽm hy sinh trong bê tông cũ và gần biên vùng sửa chữa tạo điều kiện thuận lợi hơn cho sự phân bố dòng điện bảo vệ đến vùng cốt thép bị ăn mòn.

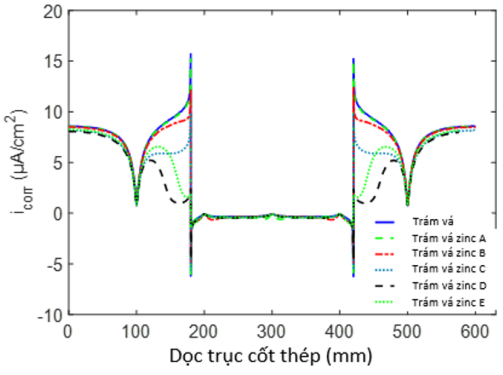
Sự phù hợp về xu hướng giữa kết quả mô phỏng và các quan sát thực nghiệm độc lập [25, 26] cho thấy mô hình số có khả năng mô tả hợp lý ảnh hưởng của vị trí anode đến sự phân bố dòng điện và hiệu quả bảo vệ cốt thép. Tuy nhiên, các kết quả này chủ yếu cung cấp sự đối chiếu về cơ chế và xu hướng, chưa thay thế cho một phép kiểm chứng định lượng trực tiếp của toàn bộ mô hình số dưới cùng điều kiện hình học, vật liệu và môi trường.



(a) Cường độ ăn mòn macrocell



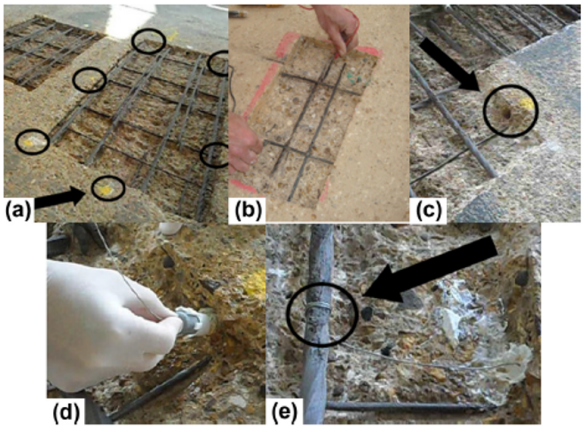
(b) Cường độ ăn mòn microcell



(c) Tổng cường độ ăn mòn

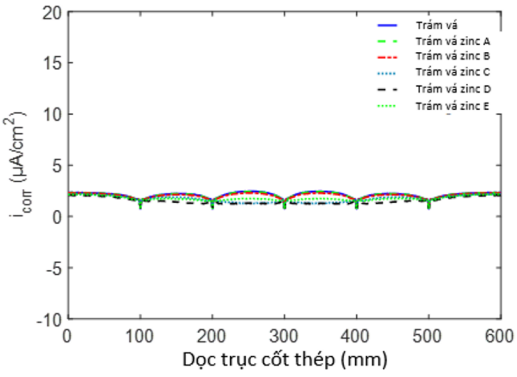
Hình 7. Tổng hợp cường độ ăn mòn cốt thép qua vùng trám vá

Đối với các thanh cốt thép không đi qua vùng trám vá (Hình 9), dòng điện microcell có giá trị lớn hơn dòng điện macrocell, tuy nhiên thành phần macrocell vẫn đóng góp đáng kể vào tổng dòng điện ăn mòn. Kết quả này cho thấy cần xem xét đồng thời cả hai thành phần ăn mòn trong đánh giá mức độ suy giảm của kết cấu. Ngoài ra, tại vị trí giao nhau giữa hai lớp cốt thép, dòng điện microcell gần bằng không do nồng độ oxy rất thấp, làm hạn chế phản ứng cathode trên bề mặt cốt thép.

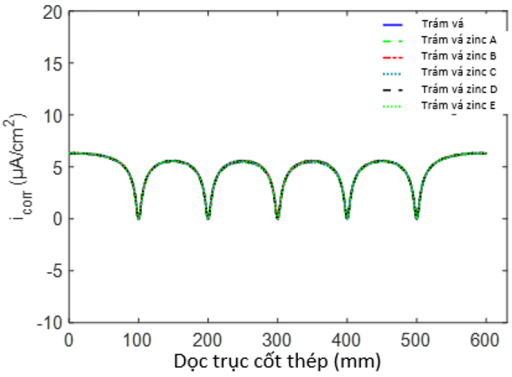


Hình 8. Bố trí kẽm hy sinh dọc theo biên vùng sửa chữa và nằm trong bê tông cũ tại một công trình để xe thực tế [25]

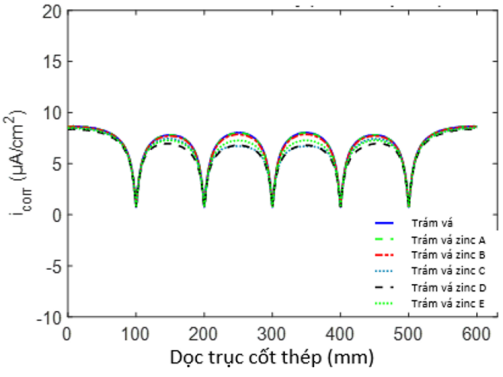
Các kết quả trong mô hình phần tử hữu hạn này chưa xét đến sự lấp đầy của sản phẩm ăn mòn của kẽm anode và cốt thép vào các lỗ rỗng và vi nứt trong bê tông. Các sản phẩm ăn mòn này theo thời gian có thể hình thành một lớp màng với điện trở đáng kể, làm suy giảm cường độ dòng điện bảo vệ từ anode kẽm hy sinh tới cốt thép.



(a) Cường độ ăn mòn macrocell



(b) Cường độ ăn mòn microcell



(c) Tổng cường độ ăn mòn

Hình 9. Tổng hợp cường độ ăn mòn cốt thép trong bê tông nền

5. Kết luận

Bài báo đã phân tích cơ chế ăn mòn điện hóa của cốt thép trong sửa chữa trám vá bê tông cục bộ và đánh giá ảnh hưởng của cấu hình bố trí anode kẽm hy sinh thông qua mô phỏng phần tử hữu hạn. Từ kết quả nghiên cứu, có thể rút ra một số kết luận sau:

- Trong sửa chữa trám vá không tích hợp anode kẽm hy sinh, sự chênh lệch điện thế giữa vùng trám vá và bê tông nền làm hình thành ăn mòn macrocell, dẫn đến gia tăng mật độ dòng điện ăn mòn, đặc biệt tại vùng tiếp giáp giữa bê tông nền và lớp vật liệu sửa chữa.

- Khi tích hợp anode kẽm hy sinh, kẽm đóng vai trò anode trong hệ điện hóa, cung cấp dòng điện bảo vệ cho cốt thép và làm giảm đáng kể mật độ dòng điện ăn mòn macrocell, qua đó nâng cao hiệu quả chống ăn mòn và kéo dài tuổi thọ của kết cấu.

- Hiệu quả bảo vệ của anode kẽm phụ thuộc rõ rệt vào cấu hình bố trí. Trong các phương án khảo sát, cấu hình bố trí anode dọc theo biên vùng sửa chữa, nằm hoàn toàn trong bê tông nền và gần với vị trí cốt thép cho hiệu quả bảo vệ cao nhất, trong khi các cấu hình bố trí anode bên trong vùng trám vá cho hiệu quả thấp hơn do khoảng cách truyền dòng lớn hơn.

- Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn vị trí bố trí anode kẽm trong sửa chữa trám vá cục bộ, góp phần nâng cao hiệu quả chống ăn mòn và độ bền khai thác của các kết cấu bê tông cốt thép.

Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Trong quá trình chuẩn bị bản thảo, tác giả đã sử dụng Google Gemini để cải thiện ngôn ngữ hoặc khả năng diễn đạt của bản thảo. Tác giả đã kiểm tra và chỉnh sửa nội dung và chịu hoàn toàn trách nhiệm về tính chính xác, tính nguyên bản và tính toàn vẹn của bài báo.

Tài liệu tham khảo

[1] François, R., Laurens, S., Deby, F. (2018). *Corrosion and its consequences for reinforced concrete structures*. Elsevier.

[2] Poursaee, A. (2016). Corrosion of steel in concrete structures. *Corrosion of Steel in Concrete Structures*, Elsevier, 19–33.

[3] Thắng, N. C., Tuấn, N. V., Hanh, P. H. (2018). Ảnh hưởng của phụ gia khoáng đến khả năng ăn mòn cốt thép trong bê tông chất lượng siêu cao. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 12(2):86–91.

[4] Pruckner, F., Gjørv, O. E. (2002). Patch repair and macrocell activity in concrete structures. *ACI Materials Journal*, 99(2):143–148.

[5] Raupach, M. (2006). Patch repairs on reinforced concrete structures–model investigations on the required size and practical consequences. *Cement and Concrete Composites*, 28(8):679–684.

[6] Emberson, N. K., Mays, G. C. (1990). Significance of property mismatch in the patch repair of structural concrete part 1: Properties of repair systems. *Magazine of Concrete Research*, 42(152):147–160.

[7] Ghoddousi, P., Haghtalab, M., Shirzadi Javid, A. A. (2021). Experimental and numerical investigation of repair dimensions effect on macro-cell corrosion induced by concrete slabs patch repair. *International Journal of Civil Engineering*, 19(9):1091–1110.

[8] Wilson, K., Jawed, M., Ngala, V. (2013). The selection and use of cathodic protection systems for the repair of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 39:19–25.

[9] Byrne, A., Holmes, N., Norton, B. (2016). State-of-the-art review of cathodic protection for reinforced concrete structures. *Magazine of Concrete Research*, 68(13):664–677.

[10] Cheung, M. M. S., Cao, C. (2013). Application of cathodic protection for controlling macrocell corrosion in chloride contaminated RC structures. *Construction and Building Materials*, 45:199–207.

[11] Lozinguez, E., Barthélémy, J.-F., Bouteiller, V., Desbois, T. (2018). Contribution of sacrificial anode in reinforced concrete patch repair: Results of numerical simulations. *Construction and Building Materials*, 178:405–417.

[12] Wang, F., Xu, J., Xu, Y., Jiang, L., Ma, G. (2020). A comparative investigation on cathodic protections of three sacrificial anodes on chloride-contaminated reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 246:118476.

[13] Oleiwi, H. M., Wang, Y., Curioni, M., Chen, X., Yao, G., Augusthus-Nelson, L., Ragazzon-Smith, A. H., Shabalin, I. (2018). An experimental study of cathodic protection for chloride contaminated reinforced concrete. *Materials and Structures*, 51(6):148.

[14] COMSOL AB (2024). *COMSOL Multiphysics®*. Stockholm, Sweden.

[15] Zimmerman, W. B. J. (2006). Introduction to COMSOL multiphysics. *Multiphysics modeling with finite element methods*, World Scientific, 1–26.

[16] Chen, J., Zhang, W., Gu, X. (2019). Modeling time-dependent circumferential non-uniform corrosion of steel bars in concrete considering corrosion-induced cracking effects. *Engineering Structures*, 201: 109766.

[17] Cao, C., Cheung, M. M. S., Chan, B. Y. B. (2013). Modelling of interaction between corrosion-induced concrete cover crack and steel corrosion rate. *Corrosion Science*, 69:97–109.

[18] Perez, N. (2004). *Electrochemistry and corrosion science*. Springer.

[19] Revie, R. W., Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering*. John Wiley & Sons.

[20] Xia, J., Li, T., Fang, J.-X., Jin, W.-l. (2019). Numerical simulation of steel corrosion in chloride contaminated concrete. *Construction and Building Materials*, 228:116745.

[21] Bui, H. T., Tan, K. H. (2023). Time-dependent nonuniform numerical model of corrosion process and consequent corrosion-induced concrete cracking under chloride attack. *Structures*, 52:332–347.

[22] Zhu, X., Zi, G. (2017). A 2D mechano-chemical model for the simulation of reinforcement corrosion and concrete damage. *Construction and Building Materials*, 137:330–344.

[23] Yu, B., Liu, J., Li, B. (2017). Improved numerical model for steel reinforcement corrosion in concrete considering influences of temperature and relative humidity. *Construction and Building Materials*, 142: 175–186.

[24] Cao, C. (2014). 3D simulation of localized steel corrosion in chloride contaminated reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 72:434–443.

[25] Christodoulou, C., Goodier, C. I., Austin, S. A., Glass, G. K., Webb, J. (2014). A new arrangement of galvanic anodes for the repair of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 50: 300–307.

[26] Bui, H. T., Tan, K. H. (2025). Optimising zinc sacrificial anode configurations for corrosion protection in patch-repaired reinforced concrete slabs: Experimental insights and underlying electrochemical mechanisms. *Journal of Building Engineering*, 108:112915.