Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (4V): 73–85

ỨNG XỬ KHÁNG CHẤN CỦA CỘT TRÒN BÊ TÔNG CỐT THÉP BỊ ĂN MÒN SỬ DỤNG MÔ HÌNH PHẦN TỬ SỢI PHI TUYẾN TRONG OPENSEES

Vũ Ngọc Sơn[a,*], Trần Văn Tuấn[b], Nguyễn Trường Thắng[a], Vũ Tiến Chương[a]

[a]*Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*
[b]*Tổng Công ty Tư vấn Xây dựng Việt Nam – CTCP (VNCC), 184 Huỳnh Thúc Kháng, phường Láng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 14/8/2026, Sửa xong 07/10/2026, Chấp nhận đăng 8/10/2026

Tóm tắt

Ăn mòn cốt thép làm suy giảm đáng kể khả năng chịu lực của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT), đặc biệt dưới tác động của tải trọng động đất. Nghiên cứu này đề xuất mô hình phần tử sợi phi tuyến trong OpenSees nhằm đánh giá ứng xử kháng chấn của cột tròn BTCT bị ăn mòn. Ảnh hưởng của ăn mòn được xét đến thông qua sự suy giảm đặc trưng cơ học của cốt thép, bê tông và liên kết bám dính giữa bê tông và cốt thép. Để mô phỏng chính xác ứng xử phức tạp của cấu kiện cột BTCT, mô hình tích hợp đồng thời ba cơ chế biến dạng gồm uốn, cắt và trượt liên kết được đề xuất. Mô hình được kiểm chứng bằng các kết quả thực nghiệm đã công bố và cho thấy sự phù hợp tốt về đường cong trễ, đường cong bao và khả năng tiêu tán năng lượng. Nghiên cứu tham số được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của mức độ ăn mòn, hàm lượng cốt thép, tỷ số nén dọc trục và tỷ số hình dạng. Kết quả cho thấy ăn mòn làm suy giảm đáng kể khả năng chịu lực, độ dẻo và khả năng tiêu tán năng lượng của cột dưới tác động động đất.

Từ khoá: ăn mòn cốt thép; cột tròn bê tông cốt thép; ứng xử kháng chấn; mô hình phần tử sợi; trượt liên kết; OpenSees; phân tích phi tuyến.

SEISMIC BEHAVIOR OF CORRODED CIRCULAR REINFORCED CONCRETE COLUMNS USING NONLINEAR FIBER-BASED ELEMENT MODEL IN OPENSEES

Abstract

Corrosion of reinforcing steel significantly degrades the load-carrying capacity of reinforced concrete (RC) structures, particularly under seismic loading. This study proposes a nonlinear fiber-based element model implemented in OpenSees to evaluate the seismic behavior of corroded circular RC columns. The effects of corrosion are incorporated through the degradation of the mechanical properties of reinforcing steel, concrete, and the bond–slip behavior between concrete and reinforcement. To accurately capture the complex behavior of RC column members, a model integrating three deformation mechanisms (flexure, shear, and bond-slip) is proposed. The model is validated against previously published experimental results and shows good agreement in terms of hysteretic curves, envelope curves, and energy dissipation capacity. A parametric study is conducted to evaluate the influence of corrosion level, longitudinal reinforcement ratio, axial load ratio, and aspect ratio. The results indicate that corrosion significantly reduces the load-carrying capacity, ductility, and energy dissipation capacity of columns under seismic action.

Keywords: reinforcement corrosion; circular RC column; seismic behavior; fiber element model; bond-slip; OpenSees; nonlinear analysis.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(4V)-06 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Ăn mòn cốt thép từ lâu được xem là nguyên nhân chủ yếu gây suy giảm khả năng làm việc và tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT), đặc biệt tại các công trình trong môi trường xâm thực như vùng ven biển hoặc môi trường chứa ion clorua [1]. Ngoài việc làm giảm tiết diện hữu hiệu, ăn

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* sonvn@huce.edu.vn (Sơn, V. N.)

mòn còn làm suy giảm cường độ chảy dẻo, cường độ phá hoại, mô đun đàn hồi và biến dạng cực hạn của cốt thép, đồng thời làm suy giảm liên kết bám dính bê tông–cốt thép, dẫn đến suy giảm đáng kể cường độ, độ cứng và độ dẻo của kết cấu BTCT theo thời gian [2].

Dưới tác động động đất, cấu kiện BTCT chịu tải trọng lặp chu kỳ với biên độ biến dạng lớn. Các nghiên cứu thực nghiệm gần đây cho thấy ăn mòn làm gia tăng tốc độ suy giảm độ cứng, giảm khả năng chịu lực cực hạn và giảm đáng kể diện tích vòng lặp trễ [3]. Hiện tượng thắt "pinching effect" cũng xuất hiện rõ rệt hơn trong đường cong trễ của cấu kiện bị ăn mòn, phản ánh sự suy giảm liên kết bám dính, đồng thời ăn mòn có thể làm chuyển đổi cơ chế phá hoại từ uốn – dẻo sang cắt – giòn [4]. Nhiều nghiên cứu gần đây đã đánh giá ảnh hưởng của ăn mòn đến ứng xử cơ học và động đất của cấu kiện BTCT [5, 6], cũng như các mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) mô phỏng ứng xử phi tuyến dưới tải trọng động đất [7]. Tuy nhiên, phần lớn nghiên cứu chỉ xét riêng lẻ ảnh hưởng của ăn mòn hoặc ứng xử kháng chấn, thiếu mô hình tích hợp đồng thời hai yếu tố và chưa xét đầy đủ tương tác giữa các cơ chế uốn, cắt và trượt (bond-slip).

Một số nghiên cứu trong nước đã khảo sát cấu kiện BTCT bị ăn mòn, bao gồm dự báo tốc độ ăn mòn cốt thép [8], ứng xử của cột bị ăn mòn gia cường bằng tấm sợi các-bon [9] và mô phỏng phần tử hữu hạn ảnh hưởng của ăn mòn [10, 11]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào ứng xử tĩnh của cấu kiện, chưa xét đến ứng xử kháng chấn dưới tải trọng lặp chu kỳ.

Do vậy, nghiên cứu này phát triển mô hình số phi tuyến dựa trên phần tử sợi trong môi trường OpenSees nhằm mô phỏng ứng xử kháng chấn của cột tròn BTCT bị ăn mòn [6, 12], tích hợp đồng thời các cơ chế uốn, cắt và trượt để phản ánh đầy đủ ứng xử phi tuyến dưới tải trọng động đất. Trên cơ sở kiểm chứng với kết quả thực nghiệm đã công bố, nghiên cứu phân tích tham số nhằm đánh giá ảnh hưởng của mức độ ăn mòn, hàm lượng cốt thép, tỷ số nén và tỷ lệ nhịp/chiều cao tiết diện đến ứng xử kháng chấn của cột BTCT.

2. Mô phỏng số cột bê tông cốt thép bị ăn mòn

2.1. Mô hình vật liệu có xét đến ăn mòn

a. Cốt thép bị ăn mòn

Để đơn giản hóa mô phỏng, nghiên cứu giả thiết ăn mòn phân bố đều dọc theo chiều dài thanh thép, tức đường kính cốt thép suy giảm đồng đều. Khi đó, diện tích còn lại của thanh thép sau ăn mòn được xác định theo công thức [13]:

$$A_s(\Delta G) = \frac{\pi D_0^2}{4}(1 - 0{,}01X_{corr}) \tag{1}$$

trong đó, $A_s(\Delta G)$ là diện tích còn lại của thanh thép sau ăn mòn; X_{corr} (%) là mức độ ăn mòn cốt thép; và D_0 là đường kính ban đầu của thanh thép. Sự suy giảm đặc trưng cơ học của cốt thép do ăn mòn được xác định theo phương pháp thực nghiệm của Cairns và cs. [14], trong đó cường độ chảy f_{yc}, cường độ chịu kéo cực hạn f_{uc} và mô đun đàn hồi E_{sc} được xác định theo mức độ ăn mòn qua các biểu thức thực nghiệm dưới đây:

$$f_{yc} = (1 - \alpha_1 X_{corr}) f_{ys} \tag{2}$$

$$f_{uc} = (1 - \alpha_1 X_{corr}) f_{us} \tag{3}$$

$$E_{sc} = (1 - \alpha_2 X_{corr}) E_s \tag{4}$$

trong đó, f_{ys}, f_{us} và E_s lần lượt là cường độ chảy, cường độ chịu kéo cực hạn và mô đun đàn hồi ban đầu. Hệ số α_1 lấy bằng 0,005 [15]; hệ số α_2 lấy bằng 0,01 [15]. Biondini và cs. [16], dựa trên thực

nghiệm của Apostolopoulos và cs. [17], đề xuất xác định biến dạng cực hạn của cốt thép bị ăn mòn, ký hiệu ε_{uc}, thông qua biểu thức sau:

$$\varepsilon_{uc} = \begin{cases} \varepsilon_u, & 0 \le X_{corr} \le 0{,}016 \\ 0{,}1521\, X_{corr}^{-0{,}4583}\, \varepsilon_u, & 0{,}016 < X_{corr} \le 1 \end{cases} \tag{5}$$

trong đó ε_u là biến dạng cực hạn của cốt thép chưa bị ăn mòn.

b. Bê tông lớp bảo vệ

Sản phẩm ăn mòn giãn nở gây nứt, bong tróc lớp bê tông bảo vệ, làm suy giảm cường độ của lớp này. Để xét ảnh hưởng của ăn mòn, cường độ chịu nén của lớp bê tông bảo vệ, ký hiệu f_{cov}, được xác định theo biểu thức sau [18]:

$$f_{cov} = \frac{f_{c0}}{1 + \kappa\left(\frac{\varepsilon_{ave}}{\varepsilon_{c0}}\right)} \tag{6}$$

$$\varepsilon_{ave} = \frac{n_{bars}\, w}{b_0} \tag{7}$$

$$w = \kappa_w(\Delta A_s - \Delta A_{s0}) \tag{8}$$

$$\Delta A_s = A_s - A_{sc} \tag{9}$$

$$\Delta A_{s0} = A_s \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\beta}{d_s}\left(7{,}53 + 9{,}32\frac{d_c}{d_s}\right) \times 10^{-3} \right]^2 \right\} \tag{10}$$

trong đó, f_{c0} là cường độ chịu nén của bê tông chưa bị ăn mòn; κ là hệ số thực nghiệm (khuyến nghị 0,1 với cốt thép gai) [18]; ε_{c0} là biến dạng tương ứng với cường độ f_{c0}, trong khi ε_{ave} là biến dạng kéo trung bình của bê tông nứt theo công thức (7); b_0 là chu vi của tiết diện bê tông chưa bị ăn mòn; n_{bars} là số thanh cốt thép trong vùng chịu nén. Độ rộng vết nứt trung bình tại mỗi thanh, ký hiệu w, được xác định theo công thức (8) [19]; κ_w là hệ số thực nghiệm xác định độ rộng vết nứt, khuyến nghị bằng 0,0575 mm^{-1}. Đại lượng ΔA_s là phần diện tích cốt thép bị suy giảm do ăn mòn, theo công thức (9); A_s và A_{sc} lần lượt là diện tích cốt thép trước và sau ăn mòn. Ngưỡng suy giảm diện tích trước khi nứt, ký hiệu ΔA_{s0}, được xác định theo công thức (10); d_c là chiều dày lớp bê tông bảo vệ, d_s là đường kính cốt thép và β là hệ số phân bố ăn mòn (lấy $\beta = 2$ theo Vidal và cs. [19]). Khi ăn mòn tăng, độ rộng vết nứt tiến tới giá trị tới hạn lý thuyết, ký hiệu w_{cr}. Giá trị này được giả định bằng $w_{cr} = 1{,}0$ mm theo tài liệu [18].

c. Bê tông lõi được bó bởi cốt đai (Confined concrete)

Đối với bê tông lõi, hiệu ứng bó suy giảm do ăn mòn cốt đai, làm giảm cường độ nén và biến dạng cực hạn. Dựa trên mô hình Mander [20, 21], các tham số hiệu chỉnh theo mức độ ăn mòn X_{corr} [22]. Cường độ chịu nén cực đại f'_{cc} và biến dạng tương ứng ε'_{cc} của bê tông được bó xác định theo:

$$f'_{cc} = (1 - \beta_1 X_{corr}) f_{c0} \left(-1{,}254 + 2{,}254\sqrt{1 + 7{,}94\frac{f'_l}{f_{c0}}} - 2\frac{f'_l}{f_{c0}} \right) \tag{11}$$

$$\varepsilon'_{cc} = (1 - \beta_2 X_{corr})\varepsilon_{c0}\left[1 + 5\left(\frac{f'_{cc}}{f_{c0}} - 1 \right) \right] \tag{12}$$

$$f'_l = 0{,}5 k_e \rho_{tc} f_{yh} \tag{13}$$

$$k_e = \frac{(2d_s' - s')^2}{4(1-\rho_{cc})(d_s')^2} \tag{14}$$

trong đó, β_1 và β_2 lần lượt là hệ số hiệu chỉnh ăn mòn cho cường độ và biến dạng bê tông bị bó, phụ thuộc cấu tạo cốt đai theo [22]; f_l' là áp lực bó ngang hiệu quả, được xác định theo công thức (13) [22]; k_e là hệ số hiệu quả bó, xác định theo công thức (14); d_s' là khoảng cách tim giữa các cốt đai; s' là khoảng hở giữa các cốt đai. Các đại lượng f_{yh} và ρ_{tc} lần lượt là cường độ chảy và tỷ lệ thể tích cốt đai bị ăn mòn; ρ_{cc} là tỷ lệ cốt dọc trong vùng lõi được bó.

d. Suy giảm liên kết bám dính

Khi cốt thép bị ăn mòn, sản phẩm ăn mòn gây áp lực nở và hình thành vết nứt dọc thanh thép, làm suy giảm lực bám dính [12]. Theo fib Model Code 2010 [23], quan hệ ứng suất bám dính–độ trượt là hàm từng đoạn theo độ trượt tương đối. Ứng suất bám dính tham chiếu τ_b được xác định theo công thức (15), trong đó các tham số đặc trưng $\tau_{b\max}$, τ_{bf}, s_1, s_2, s_3 và α được trình bày trong Bảng 1.

$$\begin{aligned}
\tau_b &= \tau_{b\max}\left(\frac{s}{s_1}\right)^{\alpha}; \quad 0 \le s \le s_1 \\
\tau_b &= \tau_{b\max}; \quad s_1 \le s \le s_2 \\
\tau_b &= \tau_{b\max} - (\tau_{b\max} - \tau_{res})\frac{s-s_2}{s_3-s_2}; \quad s_2 \le s \le s_3 \\
\tau_b &= \tau_{res}; \quad s \ge s_3
\end{aligned} \tag{15}$$

Bảng 1. Các tham số xác định đường cong ứng suất bám dính – trượt cục bộ đối với phá hoại do tách nứt (splitting failure) theo Model Code 2010

Tham số	Điều kiện bám dính tốt - Không có cốt đai	Điều kiện bám dính tốt - Có cốt đai	Các trường hợp khác - Không có cốt đai	Các trường hợp khác - Có cốt đai
$\tau_{b\max}$	$2{,}5\sqrt{f_{cm}}$	$2{,}5\sqrt{f_{cm}}$	$1{,}25\sqrt{f_{cm}}$	$1{,}25\sqrt{f_{cm}}$
$\tau_{bu,\text{split}}$	Theo [23]	Theo [23]	Theo [23]	Theo [23]
s_1	$s(\tau_{bu,\text{split}})$	$s(\tau_{bu,\text{split}})$	$s(\tau_{bu,\text{split}})$	$s(\tau_{bu,\text{split}})$
s_2	s_1	s_1	s_1	s_1
s_3	$1{,}2s_1$	$0{,}5c_{clear}$	$1{,}2s_1$	$0{,}5c_{clear}$
a	0,4	0,4	0,4	0,4
τ_{res}	0	$0{,}4\tau_{bu,\text{split}}$	0	$0{,}4\tau_{bu,\text{split}}$

Ghi chú: c_{clear} là khoảng cách thông thủy giữa các thanh cốt thép dọc.

Theo fib Model Code 2010 [23], cường độ bám dính giới hạn do phá hoại tách nứt trong Bảng 1 được xác định theo cường độ chịu nén của bê tông, đường kính thanh thép, chiều dày lớp bê tông bảo vệ và hàm lượng cốt đai.

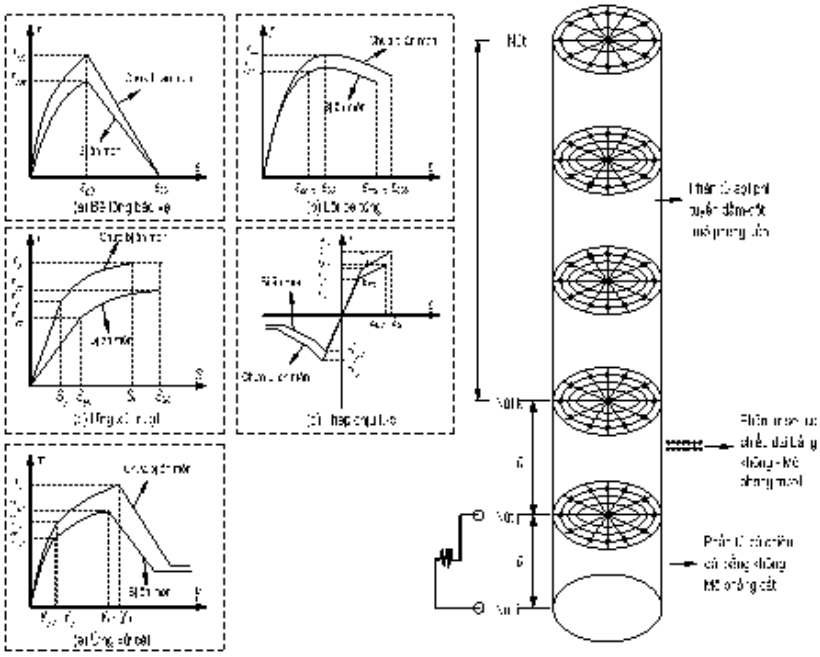
2.2. Đề xuất mô phỏng số trong OpenSees kể đến tương tác uốn – cắt – trượt

a. Tổng quan mô hình số trong môi trường OpenSees

Để mô phỏng ứng xử phi tuyến của cột BTCT bị ăn mòn dưới tải trọng động đất, nghiên cứu sử dụng mô hình phần tử sợi phi tuyến (*nonlinear fiber-based element model*) trong OpenSees [24]. Tiết diện cột được chia thành ba thành phần vật liệu: bê tông bảo vệ không được bó, bê tông lõi được bó

bởi cốt đai và cốt thép dọc; mỗi thành phần mô hình hóa bằng quan hệ ứng suất – biến dạng phi tuyến riêng biệt.

Nhằm mô phỏng đầy đủ ứng xử tổng thể của cột, mô hình tích hợp đồng thời ba cơ chế biến dạng: uốn, cắt và trượt liên kết bê tông–cốt thép (Hình 1), tương tự mô hình FSS (Flexure–Shear–Slip) đã áp dụng trong nghiên cứu gần đây về kết cấu BTCT chịu động đất [25]. Việc xét đồng thời ba cơ chế cho phép mô hình tái hiện chính xác hơn hiện tượng thắt của đường cong trễ và sự suy giảm khả năng tiêu tán năng lượng thường quan sát ở cột BTCT bị ăn mòn dưới động đất mạnh [25].



Hình 1. Mô hình phần tử sợi cột bị ăn mòn xét đến đồng thời ứng xử uốn-cắt-trượt - Xây dựng dựa trên các mô hình vật liệu [13–23]

Một số nghiên cứu gần đây đã mô phỏng cột BTCT bị ăn mòn trong OpenSees. Kashani và cs. [26] xét mất ổn định và mỏi chu kỳ thấp của cốt thép dọc bị ăn mòn, tập trung vào ứng xử uốn. Xu và cs. [27] xét tương tác uốn–cắt và cho thấy ăn mòn cốt đai làm tăng nguy cơ phá hoại cắt ở cột ngắn. Kumar và Banerjee [28], Park và cs. [29] phát triển mô hình phần tử sợi dự báo ứng xử trễ của cột bị ăn mòn. Ngoài ra, Nguyen [30] đề xuất mô hình giải tích kết hợp ứng xử uốn và cắt để dự báo quan hệ lực ngang–chuyển vị của dầm BTCT bị ăn mòn chịu tải trọng lặp. Khác với các nghiên cứu trên, vốn chỉ xét một hoặc hai cơ chế, nghiên cứu này tích hợp đồng thời ba cơ chế uốn, cắt và trượt liên kết trong cùng một mô hình.

Trong mô hình đề xuất, ảnh hưởng của ăn mòn được phân tách theo từng loại cốt thép. Ăn mòn cốt thép dọc làm suy giảm diện tích và các đặc trưng cơ học của cốt thép (công thức (1)–(5), vật liệu Steel02), đồng thời làm suy giảm cường độ lớp bê tông bảo vệ (công thức (6)–(10)), từ đó ảnh hưởng đến ứng xử uốn. Ăn mòn cốt thép đai làm giảm khả năng chịu cắt (lò xo cắt Pinching4) và giảm áp lực bó ngang hiệu quả, dẫn đến suy giảm cường độ và biến dạng cực hạn của bê tông lõi (công thức (11)–(14)). Ứng xử trượt liên kết được mô phỏng riêng thông qua quan hệ ứng suất bám dính–độ trượt suy giảm theo mức độ ăn mòn (công thức (15), Bảng 1).

b. Mô phỏng ứng xử uốn

Ứng xử uốn của cột BTCT bị ăn mòn được mô phỏng bằng phần tử dầm–cột dạng sợi phi tuyến (*nonlinear fiber beam-column element*), phương pháp đã được sử dụng rộng rãi cho kết cấu BTCT dưới tải trọng động đất [7]. Mô hình vật liệu *Concrete02* trong OpenSees được dùng để mô phỏng ứng xử trễ của bê tông lớp bảo vệ và bê tông lõi. Đối với cốt thép, mô hình *Steel02* [7] được sử dụng.

c. Mô phỏng ứng xử cắt

Li và cs. [5] cho thấy biến dạng cắt có thể chiếm 10–25% tổng chuyển vị ngang của cột khi xảy ra phá hoại cắt, dù thường được bỏ qua ở cột phá hoại chủ yếu do uốn [7]. Với cột BTCT bị ăn mòn, đặc biệt khi phá hoại cắt chi phối, bỏ qua biến dạng cắt có thể dẫn đến đánh giá quá cao khả năng chịu lực, độ dẻo và khả năng kháng chấn. Do đó, mô hình vật liệu *Pinching4* trong OpenSees được dùng để mô phỏng ứng xử cắt của cột BTCT bị ăn mòn. Ứng xử cắt được mô phỏng qua phần tử tiết diện sợi có chiều dài bằng không (*zero-length fiber section element*), như trong Hình 1.

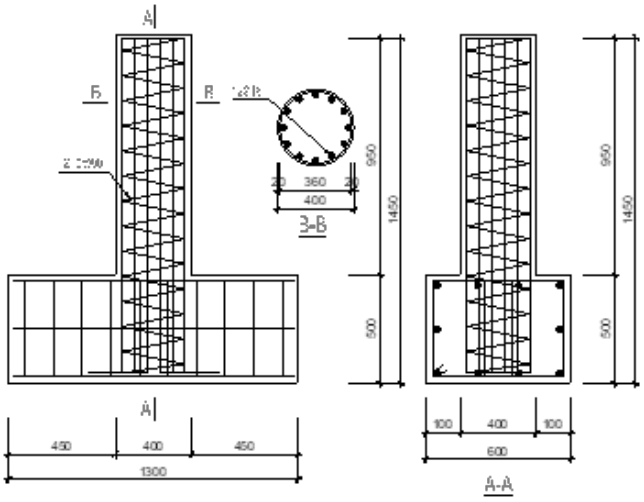
d. Mô phỏng ứng xử trượt

Quan hệ trượt cốt thép–bê tông được mô phỏng qua phần tử tiết diện sợi có chiều dài bằng không, như trong Hình 1, kết hợp luật ứng xử trễ phi tuyến trong OpenSees, cho phép mô phỏng sự phát triển độ trượt liên kết cùng suy giảm độ cứng và cường độ bám dính khi gia tải – dỡ tải lặp. Cơ chế này đặc biệt quan trọng với cấu kiện bị ăn mòn vì là nguyên nhân chính gây hiện tượng thắt của đường cong trễ.

2.3. Kiểm chứng mô hình số

a. Lựa chọn kết quả thí nghiệm

Tổng cộng 05 mẫu cột tròn BTCT từ nghiên cứu [5] được dùng để kiểm chứng mô hình, với các tham số khảo sát chính là mức độ ăn mòn cốt thép và tỷ số nén dọc trục. Kích thước hình học và bố trí cốt thép được trình bày trong Hình 2, các thông số thiết kế trong Bảng 2. Các mẫu cột có chiều dày lớp bê tông bảo vệ 20 mm, chiều cao tổng thể 1450 mm, thân cột cao 950 mm, đường kính tiết diện 400 mm (tỷ số nhịp/chiều cao tiết diện bằng 2).



Hình 2. Kích thước hình học và bố trí cốt thép chi tiết của mẫu thí nghiệm [5]

Do nghiên cứu thực nghiệm dùng để kiểm chứng mô hình [5] không công bố biến dạng cực hạn của cốt thép, giá trị $\varepsilon_u = 0{,}12$ được lấy theo kết quả thí nghiệm kéo cốt thép của nhóm tác giả [22]. Theo công thức (5), khi mức độ ăn mòn đạt 20% và 30%, biến dạng cực hạn của cốt thép chỉ còn lần lượt 31,8% và 26,4% so với cốt thép chưa bị ăn mòn.

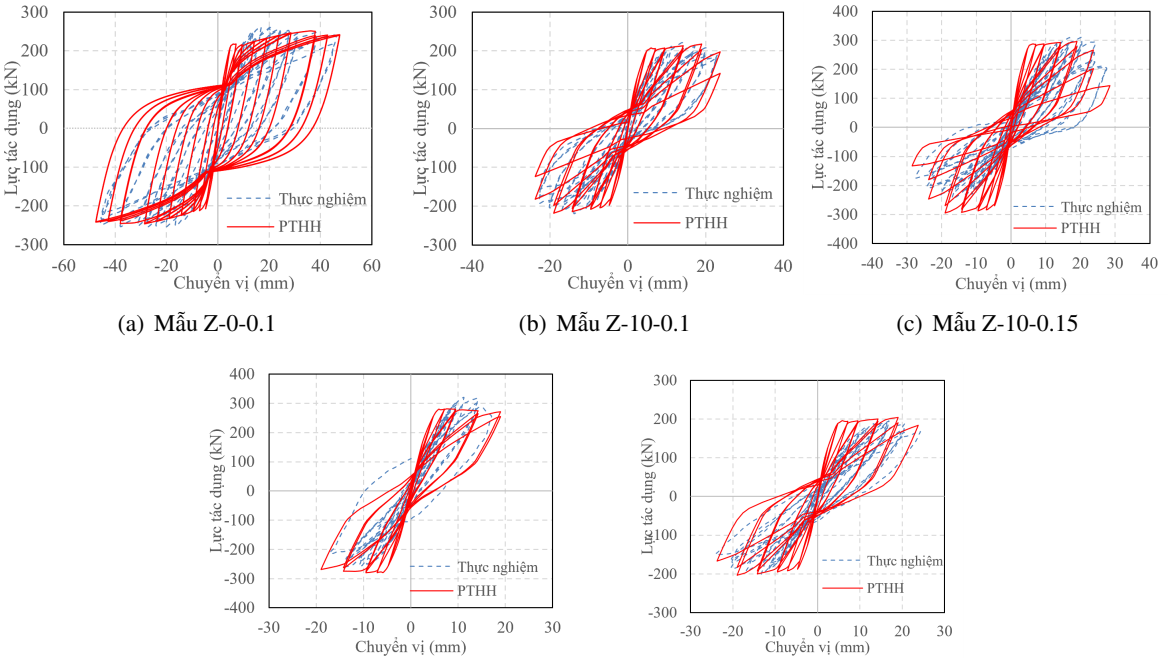
Bảng 2. Các thông số thiết kế chi tiết của các mẫu thí nghiệm [5]

Mẫu TN	n	f_{c0} (MPa)	Cốt đai					Cốt dọc			
			d_t (mm)	s (mm)	f_{ty} (MPa)	ρ_t (%)	X_t (%)	d_l (mm)	f_{ly} (MPa)	ρ_l (%)	X_l (%)
Z-0-0.1	0,10	38,9	10	90	338,0	1,02	0,00	16	460,0	1,92	0
Z-10-0.1	0,10	38,9	10	90	338,0	1,02	11,82	16	460,0	1,92	6,11
Z-20-0.1	0,10	38,9	10	90	338,0	1,02	19,10	16	460,0	1,92	13,73
Z-10-0.15	0,15	38,9	10	90	338,0	1,02	11,68	16	460,0	1,92	6,06
Z-10-0.20	0,20	38,9	10	90	338,0	1,02	12,04	16	460,0	1,92	6,17

Chú ý: n = tỷ số nén dọc trục; f_{c0} = cường độ chịu nén của bê tông; d_t = đường kính cốt đai; s = khoảng cách giữa các cốt đai; f_{ty} = cường độ chảy của cốt đai; ρ_t = tỷ lệ thể tích cốt thép đai; X_t = mức độ ăn mòn cốt đai; d_l = đường kính cốt thép dọc; f_{ly} = cường độ chảy của cốt thép dọc; ρ_l = tỷ lệ cốt dọc trong vùng lõi bê tông bị bó; X_l = mức độ ăn mòn cốt thép dọc.

b. Kết quả kiểm chứng mô phỏng số

So sánh đường cong trễ thực nghiệm và mô phỏng số của cả năm mẫu (Hình 3) cho thấy mô hình PTHH tái hiện tốt ứng xử phi tuyến của cột BTCT chịu tải trọng lặp tựa tĩnh. Giá trị tải trọng cực đại và khả năng chịu biến dạng của mô phỏng nhìn chung phù hợp tốt với thực nghiệm. Khi mức ăn mòn và tải trọng dọc trục tăng, các vòng trễ thu hẹp, độ cứng suy giảm nhanh hơn và khả năng biến dạng giảm đáng kể; xu hướng này được mô hình số phản ánh tương đối chính xác, dù vẫn tồn tại sai khác cục bộ ở một số chu kỳ tải lớn, đặc biệt sau chảy dẻo và gần phá hoại. Nhìn chung, mô hình PTHH có độ tin cậy cao và có thể dùng để phân tích ứng xử kháng chấn của cột BTCT bị ăn mòn dưới tải trọng động đất.



(a) Mẫu Z-0-0.1 (b) Mẫu Z-10-0.1 (c) Mẫu Z-10-0.15

(d) Mẫu Z-10-0.2 (e) Mẫu Z-20-0.1

Hình 3. Đồ thị so sánh thực nghiệm với mô phỏng số các mẫu thí nghiệm

Bảng 3 so sánh khả năng phân tán năng lượng (diện tích vòng trễ trên quan hệ lực–chuyển vị) giữa mô phỏng số và thực nghiệm của 05 mẫu. Năng lượng tiêu tán từ mô phỏng đều cao hơn thực nghiệm, với sai số từ 12,76% đến 20,76%, trung bình 18,24%. Sự chênh lệch chủ yếu do mô hình số chưa mô phỏng đầy đủ hiệu ứng thắt (pinching), suy giảm độ cứng và cường độ, trượt cốt thép–bê tông và các cơ chế hư hỏng cục bộ. Dù vậy, mô hình phản ánh đúng xu hướng suy giảm khả năng tiêu tán năng lượng theo mức độ ăn mòn, với sai số trung bình dưới 20%. Nghiên cứu tiếp theo cần cải thiện mô hình hiệu ứng thắt, suy giảm bám dính và các cơ chế hư hỏng do ăn mòn. Do mô hình đánh giá cao hơn năng lượng tiêu tán so với thực nghiệm, việc sử dụng trực tiếp kết quả mô phỏng cho các tiêu chí hư hỏng dựa trên năng lượng tích lũy có thể thiên về không an toàn. Tuy nhiên, tải trọng cực đại và khả năng biến dạng, hai đại lượng chính trong đánh giá kháng chấn theo lực và theo chuyển vị, được mô hình dự báo phù hợp tốt với thực nghiệm, nên ảnh hưởng của sai lệch này đến đánh giá an toàn tổng thể là hạn chế. Khi áp dụng cho các phương pháp đánh giá dựa trên năng lượng, cần bổ sung hệ số an toàn hoặc hiệu chỉnh mô hình.

Bảng 3. So sánh khả năng phân tán năng lượng (diện tích đường cong trễ)

Mẫu thí nghiệm	Năng lượng phân tán (Mô phỏng số) (kN.mm)	Năng lượng phân tán (Thực nghiệm) (kN.mm)	Sai số
Z-0-0.1	175236	145111	20,76%
Z-10-0.1	50218	42232	18,91%
Z-10-0.15	43853	36587	19,86%
Z-10-0.2	26463	22253	18,92%
Z-20-0.1	18181	16124	12,76%
	Trung bình		18,24%

3. Nghiên cứu tham số và thảo luận

Các tham số nghiên cứu sự làm việc của cột bị ăn mòn chịu tải trọng động đất được mô tả trong Bảng 4. Khả năng chịu lực tới hạn được xác định bằng tải trọng lớn nhất, còn chuyển vị tới hạn là chuyển vị khi tải trọng suy giảm 20% so với giá trị lớn nhất.

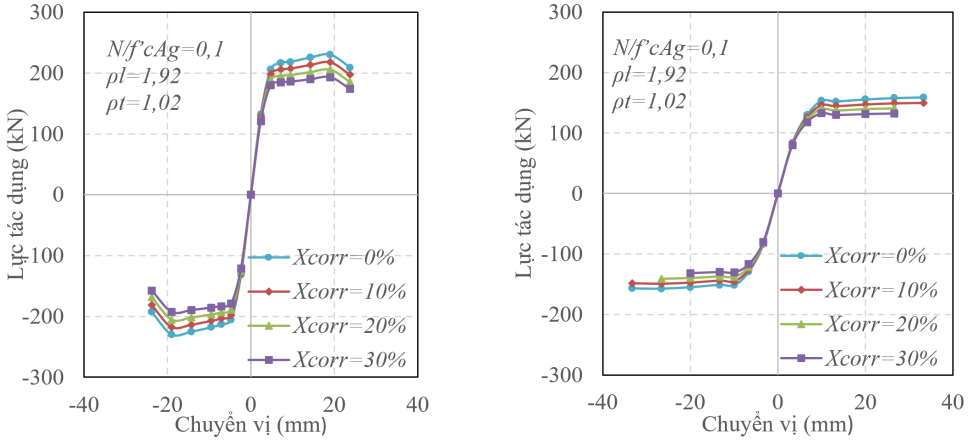
Bảng 4. Các tham số nghiên cứu

STT	Ký hiệu	Mô tả	Khoảng tham số
1	X_{corr} (%)	Mức độ ăn mòn cốt thép	0; 10; 20; 30
2	a/d	Tỷ số hình dạng (Chiều cao/Đường kính)	2,0; 2,5; 3,0; 4,0
3	N/f'_cA_g	Tỷ số nén	0,1; 0,25; 0,35
4	ρ_t (%)	Hàm lượng cốt thép đai lần lượt bố trí Φ10@50 và Φ10@100	1,02; 2,04
5	ρ_l (%)	Hàm lượng cốt thép dọc lần lượt với bố trí 12Φ16 và 12Φ20	1,92; 2,43

Nghiên cứu tham số dưới đây được thực hiện trên cùng một mô hình tích hợp ba cơ chế uốn, cắt và trượt liên kết, cho phép đánh giá đồng thời khả năng chịu lực, độ dẻo, và khả năng tiêu tán năng lượng. Kết quả giúp phân định xu hướng ứng xử kém dẻo (ở tỷ số hình dạng nhỏ và tỷ số nén cao) và ứng xử dẻo hơn (ở tỷ số hình dạng lớn) của cột bị ăn mòn, làm cơ sở cho việc đánh giá và ưu tiên gia cường kháng chấn các cột BTCT hiện hữu.

3.1. Ảnh hưởng của mức độ ăn mòn

Hình 4 cho thấy khi mức độ ăn mòn tăng, khả năng chịu lực tới hạn giảm dần ở cả hai tỷ số hình dạng: với $a/d = 2$, lực tới hạn giảm lần lượt 5,4%, 10,7% và 16,1% khi ăn mòn tăng lên 10%, 20% và 30%; với $a/d = 3$, mức giảm tương ứng là 5,4%, 10,9% và 16,5%. Trong phạm vi mô phỏng, lực chưa suy giảm đủ 20% ở cả hai trường hợp, song tỷ lệ lực còn lại tại cùng chuyển vị giảm dần theo mức ăn mòn, phản ánh xu hướng suy giảm khả năng biến dạng và độ dẻo khi ăn mòn tăng. Xu hướng suy giảm khả năng chịu lực và độ dẻo theo mức độ ăn mòn quan sát được ở đây phù hợp với các kết quả thực nghiệm và mô phỏng số đã công bố về cột BTCT bị ăn mòn chịu tải trọng động đất [5, 6, 25].



(a) $a/d = 2$ (b) $a/d = 3$

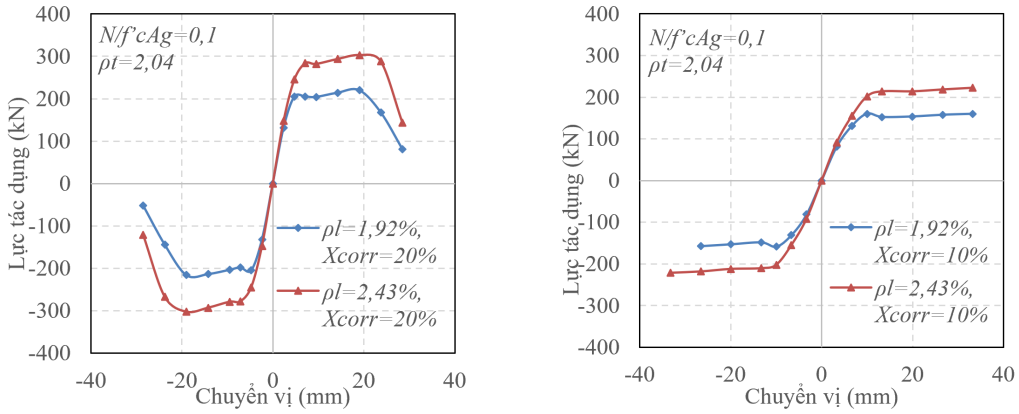
Hình 4. Ảnh hưởng của mức độ ăn mòn

3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép dọc

Hình 5 cho thấy khi hàm lượng cốt thép dọc tăng từ 1,92% lên 2,43%, khả năng chịu lực tới hạn tăng đáng kể và đồng nhất ở cả hai tỷ số hình dạng: 39,0% với $a/d = 2$ và 39,4% với $a/d = 3$. Với $a/d = 2$, chuyển vị tới hạn tăng từ 22,4 lên 24,9 mm (11,1%), nhưng sau cực đại lực suy giảm khá nhanh, cho thấy phá hoại kém dẻo hơn do độ cứng lớn; với $a/d = 3$, lực chưa suy giảm đủ 20% trong phạm vi mô phỏng, cho thấy khả năng duy trì tải trọng ổn định hơn ở biến dạng lớn. Xu hướng tăng khả năng chịu lực khi tăng hàm lượng cốt thép dọc phù hợp với nguyên lý cơ bản về ứng xử uốn của cấu kiện BTCT, đồng thời tương đồng với quan sát trong các nghiên cứu mô phỏng số cột BTCT bị ăn mòn có xét đến hàm lượng cốt thép dọc [6].

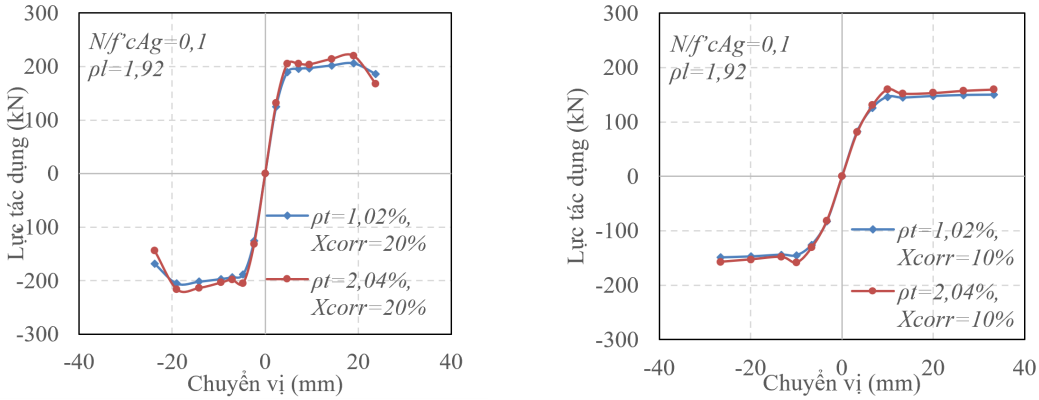
3.3. Ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép đai

Hình 6 cho thấy khi hàm lượng cốt thép đai tăng từ 1,02% lên 2,04%, khả năng chịu lực tới hạn tăng 6,0% với $a/d = 2$ và 6,6% với $a/d = 3$, phản ánh vai trò của cốt đai trong kháng cắt và kiềm chế bê tông lõi. Với $a/d = 2$, chuyển vị tới hạn đạt 22,4 mm ở hàm lượng cốt đai 2,04%, trong khi hàm lượng 1,02% vẫn còn $\approx$ 86% lực tới hạn tại chuyển vị lớn nhất, cho thấy tăng cốt đai cải thiện khả năng biến dạng; với $a/d = 3$, cả hai trường hợp đều chưa suy giảm đủ 20%. Vai trò của cốt đai trong cải thiện khả năng kháng cắt và độ dẻo của cột bị ăn mòn quan sát được ở đây tương đồng với kết luận của các nghiên cứu trước về ảnh hưởng của ăn mòn cốt đai đến khả năng chịu cắt của cột BTCT [22, 25].



(a) $a/d = 2$ (b) $a/d = 3$

Hình 5. Ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép dọc

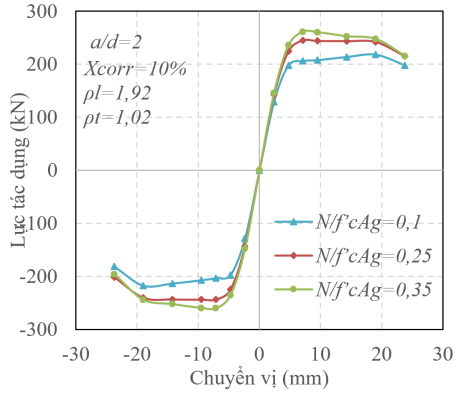


(a) $a/d = 2$ (b) $a/d = 3$

Hình 6. Ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép đai

3.4. Ảnh hưởng của tỷ số nén dọc trục

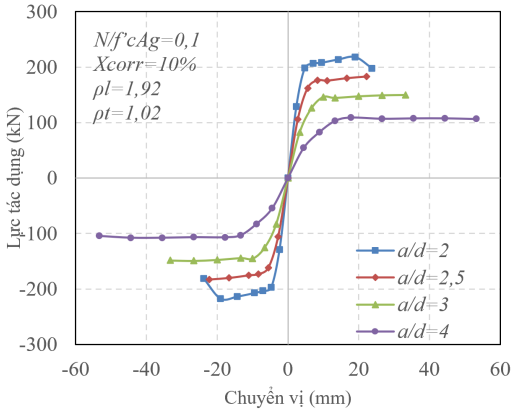
Hình 7 cho thấy khi tỷ số nén N/f'_cA_g tăng từ 0,1 lên 0,25 và 0,35, khả năng chịu lực tới hạn tăng lần lượt 12,3% và 19,7% so với $N/f'_cA_g = 0,1$, do lực nén dọc trục hợp lý làm tăng khả năng kháng uốn. Ngược lại, chuyển vị tới hạn giảm khi tỷ số nén tăng: với $N/f'_cA_g = 0,35$, lực suy giảm đủ 20% tại chuyển vị ≈ 22,6 mm, trong khi $N/f'_cA_g = 0,1$ và 0,25 vẫn còn ≈ 87% và ≈ 85% lực tới hạn tại chuyển vị lớn nhất (23,75 mm), phản ánh phá hoại giòn hơn khi tỷ số nén cao, bất lợi với cấu kiện bị ăn mòn. Xu hướng tăng khả năng chịu tải nhưng giảm độ dẻo khi tỷ số nén tăng phù hợp với kết quả nghiên cứu trước đây của nhóm tác giả về ảnh hưởng của tải trọng dọc trục đến ứng xử kháng chấn của cột BTCT ngắn [6], cũng như các nghiên cứu về ứng xử của cột bị ăn mòn chịu cắt dưới tải trọng lặp [4].



Hình 7. Ảnh hưởng của tỷ số nén

3.5. Ảnh hưởng của tỷ số hình dạng

Hình 8 cho thấy khi a/d tăng từ 2 lên 2,5, 3 và 4, khả năng chịu lực tới hạn giảm đơn điệu, lần lượt 16,1%, 31,3% và 50,2% so với $a/d = 2$, do ảnh hưởng bất lợi của độ mảnh khi cánh tay đòn mô men tăng. Ngược lại, khả năng biến dạng cải thiện khi a/d tăng: chuyển vị mô phỏng tăng từ $\approx$ 22–24 mm ($a/d = 2,2,5$) lên $\approx$ 33 mm ($a/d = 3$) và $\approx$ 53 mm ($a/d = 4$), với lực vẫn duy trì cao ($\approx$ 87% lực tới hạn ở $a/d = 2$, $\approx$ 98–100% ở các trường hợp còn lại); cả bốn trường hợp chưa suy giảm đủ 20%. Điều này cho thấy ứng xử dẻo hơn ở cột dài. Xu hướng khả năng biến dạng tăng khi tỷ số hình dạng tăng phù hợp với các nghiên cứu về tương tác uốn – cắt của cột BTCT bị ăn mòn [26, 27].



Hình 8. Ảnh hưởng của tỷ số hình dạng

4. Kết luận

Mô hình số phần tử sợi phi tuyến trong OpenSees, được kiểm chứng với các kết quả thực nghiệm đã công bố, cho thấy sự phù hợp tốt về đường cong lực – chuyển vị, khả năng chịu tải và xu hướng suy giảm khả năng làm việc của cột tròn BTCT bị ăn mòn. Mô hình phần tử hữu hạn xét đồng thời ba cơ chế uốn, cắt và trượt cho phép mô phỏng đầy đủ hơn ứng xử kháng chấn của cột BTCT trong môi trường ăn mòn.

Kết quả phân tích tham số cho thấy mức độ ăn mòn, tỷ số hình dạng, hàm lượng cốt thép và tỷ số nén dọc trục đều ảnh hưởng đáng kể đến khả năng kháng chấn của cột: ăn mòn tăng làm suy giảm rõ rệt khả năng chịu tải, độ dẻo và tiêu tán năng lượng; độ mảnh tăng làm giảm khả năng chịu tải nhưng tăng biến dạng dẻo; tỷ số nén dọc trục tăng cải thiện khả năng chịu tải ngang song làm giảm độ dẻo, tăng nguy cơ phá hoại giòn. Tăng hàm lượng cốt thép dọc và cốt đai góp phần nâng cao khả năng chịu lực và tiêu tán năng lượng của cột dưới động đất. Khác với các nghiên cứu trước thường xét ăn mòn một cách độc lập, kết quả trên cho thấy ảnh hưởng của ăn mòn phụ thuộc vào đặc trưng hình học và tải trọng của cột. Với cùng mức ăn mòn, cột có tỷ số hình dạng nhỏ và tỷ số nén cao có ứng xử kém dẻo hơn rõ rệt so với cột mảnh hoặc chịu nén thấp. Kết quả này là cơ sở để phân loại mức độ ưu tiên gia cường các cột BTCT hiện hữu bị ăn mòn.

Mô hình OpenSees đã kiểm chứng là cơ sở phù hợp cho các nghiên cứu tiếp theo về đánh giá khả năng kháng chấn, độ tin cậy và xác suất phá hoại của kết cấu BTCT dưới tác động kết hợp của ăn mòn, động đất và biến đổi khí hậu.

Nghiên cứu giả thiết ăn mòn phân bố đều dọc thanh thép, trong khi thực tế ở môi trường ven biển thường xảy ra ăn mòn cục bộ (pitting corrosion), gây suy giảm tiết diện không đồng đều và tập trung ứng suất, do đó có thể đánh giá thấp nguy cơ phá hoại cục bộ. Nghiên cứu tiếp theo cần xét đến sự phân bố ăn mòn không đồng đều này.

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

Các tác giả xác nhận không sử dụng bất kỳ công cụ trí tuệ nhân tạo tạo sinh hoặc công nghệ hỗ trợ bởi AI nào trong quá trình chuẩn bị và hoàn thiện bản thảo.

Tài liệu tham khảo

[1] Zhang, R., Castel, A., François, R. (2010). Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process. *Cement and Concrete Research*, 40(3):415–425.

[2] Zhou, H., Zhong, Z., Liu, J., Xu, Y., Lu, J., Zhang, X., Xing, F. (2022). Experimental and theoretical study on the mechanical behavior of concrete confined by corroded stirrups. *Materials and Structures*, 55 (3):108.

[3] Zheng, H., Zheng, S., Zhang, Y., Cai, Y., Ming, M., Zhou, J. (2020). Experimental investigation on seismic behaviours of reinforced concrete columns under simulated acid rain environment. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1):3826062.

[4] Zhang, Q., Chen, M.-H., Li, W.-J., Gu, X.-L., Gong, J.-X. (2023). Seismic performance and damage properties of flexure-shear critical RC columns with various loading cycles. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(10):5083–5113.

[5] Li, Y., Zheng, S., Shang, Z., Chen, J., Wang, D. (2022). Experimental study on the seismic behavior of ECE corroded reinforced concrete short pier columns. *Construction and Building Materials*, 348:128681.

[6] Vu, N. S., Li, B., Tran, C. T. N. (2022). Seismic behavior of reinforced concrete short columns subjected to varying axial load. *ACI Structural Journal*, 119(6):99–112.

[7] Kashani, M. M., Lowes, L. N., Crewe, A. J., Alexander, N. A. (2016). Nonlinear fibre element modelling of RC bridge piers considering inelastic buckling of reinforcement. *Engineering Structures*, 116:163–177.

[8] Nguyen, N. T., Dang, V. H. (2020). Empirical models of corrosion rate prediction of steel in reinforced concrete structures. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE*, 14(2): 98–107.

[9] Tín, H. X., Thắng, Đ. Đ., Long, N. M. (2023). Ứng xử nén lệch tâm của cột bê tông cốt thép bị ăn mòn được gia cường bằng tấm sợi các-bon. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXDHN*, 17(1V):24–41.

[10] Nguyễn, T. H., Đào, D. K., Đoàn, Đ. T. V., Lê, Q. T. (2025). Effect of accelerated time-dependent corrosion on reinforcement concrete and ultra-high performance concrete: Finite element method analysis. *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*, 67(3):38–46.

[11] Nguyễn, V. C., Bùi, Q. H., Lê, X. D., Nguyễn, V. V., Lý, V. T. (2023). Nghiên cứu ảnh hưởng của cấp cường độ chịu nén của bê tông và ăn mòn cốt thép đến khả năng chịu lực uốn của dầm bê tông cốt thép sử dụng phần mềm Abaqus. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, 21(1):20–25.

[12] Lin, H., Zhao, Y., Ožbolt, J., Hans-Wolf, R. (2017). The bond behavior between concrete and corroded steel bar under repeated loading. *Engineering Structures*, 140:390–405.

[13] Vu, N. S., Yu, B., Li, B. (2016). Prediction of strength and drift capacity of corroded reinforced concrete columns. *Construction and Building Materials*, 115:304–318.

[14] Cairns, J., Plizzari, G. A., Du, Y., Law, D. W., Franzoni, C. (2005). Mechanical properties of corrosion-damaged reinforcement. *ACI Materials Journal*, 102(4):256–264.

[15] Du, Y. G., Clark, L. A., Chan, A. H. C. (2005). Residual capacity of corroded reinforcing bars. *Magazine of Concrete Research*, 57(3):135–147.

[16] Biondini, F., Vergani, M. (2015). Deteriorating beam finite element for nonlinear analysis of concrete structures under corrosion. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(4):519–532.

[17] Apostolopoulos, C. A., Papadakis, V. G. (2008). Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials*, 22(12):2316–2324.

[18] Coronelli, D., Gambarova, P. (2004). Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: Modeling guidelines. *Journal of Structural Engineering*, 130(8):1214–1224.

[19] Vidal, T., Castel, A., François, R. (2004). Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1):165–174.

[20] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8):1804–1826.

[21] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R. (1988). Observed stress-strain behavior of confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8):1827–1849.

[22] Vu, N. S., Yu, B., Li, B. (2017). Stress-strain model for confined concrete with corroded transverse reinforcement. *Engineering Structures*, 151:472–487.

[23] fib (2013). *fib Model Code for concrete structures 2010*. International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland.

[24] McKenna, F. (2011). OpenSees: A framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*, 13(4):58–66.

[25] Li, Y., Sun, Z., Li, Y., Zhu, W., Zheng, H., Zheng, S. (2024). Exploring the shear performance and predictive shear capacity of corroded RC columns utilizing the modified compression-field theory: An investigative study. *Engineering Structures*, 302:117390.

[26] Kashani, M. M., Lowes, L. N., Crewe, A. J., Alexander, N. A. (2016). Computational modelling strategies for nonlinear response prediction of corroded circular RC bridge piers. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016:2738265.

[27] Xu, J. G., Feng, D. C., Wu, G., Cotsovos, D. M., Lu, Y. (2020). Analytical modeling of corroded RC columns considering flexure-shear interaction for seismic performance assessment. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(5):2165–2190.

[28] Kumar, S., Banerjee, S. (2025). Predicting cyclic response of corroded RC columns through fiber-based modeling approaches in OpenSees. *Structural Concrete*, 26(6):8042–8064.

[29] Park, Y., Lee, C. S., Jeon, J.-S. (2025). Modeling nonlinear cyclic load–deformation response of corrosion-damaged reinforced concrete columns. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 54 (10):2453–2482.

[30] Nguyen, D.-N. (2025). An analytical model for evaluating lateral load-displacement curve of corroded reinforced concrete beams under cyclic loading. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, 19(2):32–47.