

KHẢO SÁT CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG TỚI KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CỦA CỘT TRÒN BÊ TÔNG CỐT THÉP BỊ ẼN MÒN BẰNG MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN

Nguyễn Đăng Nguyễn^{a,*}, Nguyễn Ngọc Tân^a, Nguyễn Minh Thu^a

^aKhoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 29/7/2024, Sửa xong 17/9/2024, Chấp nhận đăng 25/9/2024

Tóm tắt

Nghiên cứu này xây dựng mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) phi tuyến ba chiều (3D) để mô phỏng và kiểm chứng ứng xử cột tròn bê tông cốt thép bị và không bị ăn mòn chịu tác động đồng thời của tải trọng đứng không đổi và tải trọng ngang. Mô hình kể đến ảnh hưởng của ăn mòn bằng cách giảm diện tích mặt cắt ngang, cường độ và biến dạng cốt thép dọc và cốt thép đai, giảm cường độ chịu nén của bê tông bảo vệ, và giảm bám dính giữa bê tông và cốt thép. Kết quả thí nghiệm của bốn cột được chọn để kiểm tra mức độ chính xác của mô hình PTHH đề xuất. Tiếp đến, một nghiên cứu tham số được tiến hành dựa trên mô hình đã được kiểm chứng để khảo sát ảnh hưởng của các tham số chính ảnh hưởng đến đường cong tải trọng-chuyển vị của cột tròn bê tông cốt thép bị ăn mòn. Các tham số được khảo sát gồm mức độ ăn mòn, tỷ số nén, tỷ lệ nhíp/chiều cao tiết diện, hàm lượng cốt thép dọc, và cường độ chịu nén của bê tông.

Từ khóa: bê tông cốt thép; cột tròn; ăn mòn cốt thép; lực dọc; phân tích phần tử hữu hạn phi tuyến.

INVESTIGATION OF FACTORS AFFECTING THE LOAD-CARRYING CAPACITY OF CORRODED CIRCULAR REINFORCED CONCRETE COLUMNS USING FINITE ELEMENT MODELING

Abstract

This study develops a three-dimensional (3D) nonlinear finite element model to simulate and verify the behavior of reinforced concrete circular columns with and without corrosion subjected to constant vertical and horizontal loads simultaneously. The model accounted for the effect of corrosion by reducing the cross-sectional area, strength, and deformation of longitudinal and stirrup reinforcement, reducing the compressive strength of the cover concrete, and reducing bond strength between concrete and steel reinforcement. Experimental results of four uncorroded and corroded columns were used to examine the accuracy of the proposed nonlinear finite element model. Furthermore, a parametric study was conducted based on the validated finite element model to investigate the influence of some main parameters affecting the applied horizontal load-displacement curve of corroded reinforced concrete circular columns. The parameters investigated include corrosion level, axial load ratio, span-to-depth ratio, longitudinal reinforcement ratio, and compressive strength of concrete.

Keywords: reinforced concrete; circular column; reinforcement corrosion; axial load; nonlinear finite element analysis.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(4V\)-09](https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(4V)-09) © 2024 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Quá trình ăn mòn cốt thép sinh ra các sản phẩm rỉ sét có thể tích lớn hơn từ hai đến sáu lần so với cốt thép không bị ăn mòn. Ứng suất kéo xuất hiện bên trong bê tông do sự giãn nở thể tích của các sản phẩm ăn mòn, và khi ứng suất kéo lớn hơn khả năng chịu kéo của bê tông thì sẽ gây nứt cho lớp bê tông bảo vệ [1]. Sự ăn mòn làm giảm đường kính cốt thép, giảm độ dẻo và khả năng chịu lực của

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: nguyennnd@huce.edu.vn (Nguyễn, N. Đ.)

thanh thép [2–5]. Do hai lý do trên nên ứng suất bám dính giữa bê tông và cốt thép cũng bị suy giảm khi sự ăn mòn xảy ra [6]. Kết quả là khi xảy ra sự ăn mòn cốt thép thì các cấu kiện BTCT sẽ bị giảm khả năng chịu lực và độ cứng. Hình 1 minh họa kết cấu cột BTCT bị ăn mòn trên công trình thực tế ở ven biển.

Trước đây, phần lớn các nghiên cứu tập trung vào nguyên nhân và cơ chế của sự ăn mòn cốt thép và tác động của ăn mòn tới sự xuống cấp của bê tông và cốt thép. Một số nghiên cứu gần đây kể đến ảnh hưởng đồng thời của ăn mòn cốt thép và hư hại do động đất đến sự suy giảm ứng xử của kết cấu BTCT [7–15]. Sự suy giảm như vậy sẽ cần phải quan tâm khi nó thường xảy ra ở các vùng tập trung ứng suất ở hai đầu cột, nơi mà yêu cầu đòi hỏi cả khả năng chịu lực và độ dẻo lớn. Các nghiên cứu này chỉ ra rằng sự ăn mòn cốt thép ảnh hưởng đáng kể tới ứng xử kháng chấn của cột BTCT, đặc biệt là khả năng chịu lực và chuyển vị cực hạn của cột. Meda và cs. [13] tiến hành thực nghiệm nghiên cứu ứng xử kháng chấn cột BTCT tiết diện hình chữ nhật bị và không bị ăn mòn. Nghiên cứu chỉ ra rằng, với mức độ ăn mòn 20% sẽ làm giảm khoảng 30% khả năng chịu tải trọng ngang và giảm 50% chuyển vị lớn nhất so với cột BTCT không bị ăn mòn. Tương tự, Ma và cs. [14] tiến hành thực nghiệm 13 cột BTCT tiết diện hình tròn đã thấy rằng mức độ ăn mòn và tỷ số nén là các tham số chính ảnh hưởng tới ứng xử kháng chấn của cột BTCT bị ăn mòn. Khi mức độ ăn mòn và tỷ số nén càng cao dẫn đến suy giảm đáng kể ứng xử kháng chấn của cột. Khi cốt thép bị ăn mòn nghiêm trọng thì dạng phá hoại của cột BTCT bị ăn mòn chuyển từ phá hoại dẻo sang phá hoại giòn, đặc biệt là với các cột có tỷ số nén lớn. Với mức độ ăn mòn 15% làm giảm 50% chuyển vị ngang cực hạn và giảm 20% lực chảy dẻo và lực ngang giới hạn lớn nhất của cột so với cột không bị ăn mòn. Vu & Li [15] tiến hành thí nghiệm trên 8 mẫu cột BTCT tiết diện chữ nhật bị và không bị ăn mòn kích thước lớn chịu tác động của tải trọng lặp để xem xét ảnh hưởng của sự ăn mòn với ứng xử kháng chấn của cột được thiết kế ban đầu là phá hoại uốn. Nghiên cứu cho thấy cột bị ăn mòn sẽ suy giảm đáng kể khả năng chịu lực và chuyển vị ngang so với cột không bị ăn mòn. Thêm nữa, dạng phá hoại của cột bị ăn mòn chuyển từ phá hoại uốn sang dạng phá hoại uốn-cắt và phá hoại dọc trực đột ngột khi cột có mức độ ăn mòn lớn và chịu tải trọng dọc trục lớn. Vu & Li [16] cũng đã tiến hành mô phỏng PTHH 3D sự làm việc của cột BTCT tiết diện chữ nhật có cốt thép bị ăn mòn chịu tác động của tải trọng lặp. Nghiên cứu chỉ ra rằng khả năng chịu tải trọng ngang của cột BTCT bị ăn mòn giả khi tăng tỷ lệ nhịp/chiều cao tiết diện, giảm tỷ số nén, và giảm cường độ chịu nén của bê tông cũng như giảm hàm lượng cốt thép đai. Thêm nữa, ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép đai trở nên quan trọng hơn đối với khả năng chịu tải trọng ngang trong trường hợp cột BTCT có mức độ ăn mòn lớn. Ngược lại, khả năng chuyển vị cực hạn của cột giảm khi giảm tỷ lệ nhịp/chiều cao tiết diện, tăng tỷ số nén, và giảm hàm lượng cốt thép dọc. Tuy nhiên, chuyển vị cực hạn của cột không có mối quan hệ rõ ràng với sự thay đổi cường độ chịu nén của bê tông.

Do đó, để làm rõ hơn ứng xử của cột BTCT bị ăn mòn khi chịu tải trọng lặp theo phương ngang là cần định lượng được ảnh hưởng của mức độ ăn mòn và mối tương quan của mức độ ăn mòn với các

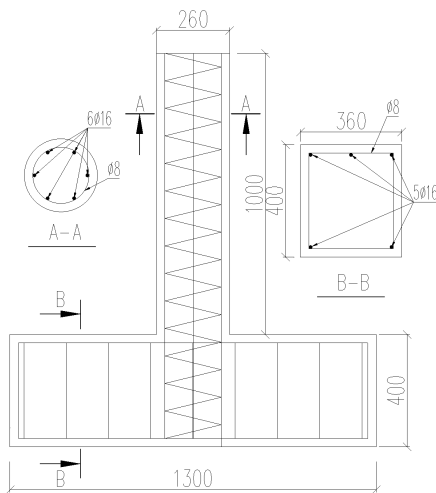


Hình 1. Ví dụ minh họa trụ cầu BTCT bị ăn mòn ở Việt Nam (nguồn: internet)

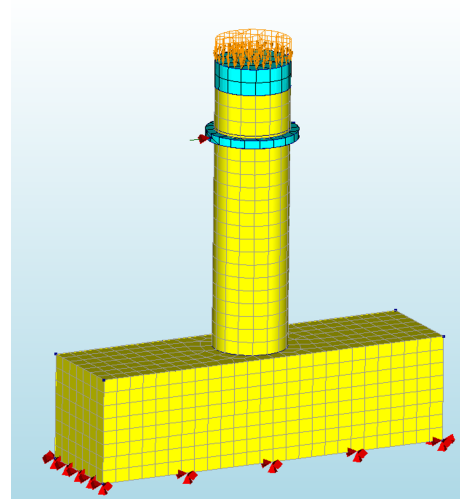
yếu tố quan trọng khác đến sự suy giảm khả năng chịu tải trọng ngang và chuyển vị cực hạn của cột bị ăn mòn, như tỷ lệ nhíp/chiều cao tiết diện, tỷ số nén, cường độ chịu nén của bê tông, và hàm lượng cốt thép dọc. Nghiên cứu này đề xuất phương pháp mô hình PTHH 3D bằng phần mềm DIANA FEA [17] để mô phỏng ứng xử kháng chấn cột BTCT bị ăn mòn tiết diện hình tròn có cốt thép đai xoắn. Phương pháp PTHH đề xuất sẽ được kiểm chứng bằng cột tròn BTCT bị ăn mòn từ nghiên cứu thực nghiệm thực hiện bởi Ma và cs. [14]. Độ tin cậy của mô hình PTHH để mô hình hóa ứng xử của các kết cấu BTCT bị ăn mòn đã được kiểm chứng và đánh giá trong một số nghiên cứu trước đây [18–20]. Tiếp đến, một số tham số chính như mức độ ăn mòn, tỷ lệ nhíp/chiều cao tiết diện, tỷ số nén, hàm lượng cốt thép dọc, và cường độ chịu nén bê tông sẽ được khảo sát để đánh giá mức độ ảnh hưởng tới sự làm việc của cột tròn BTCT bị ăn mòn.

2. Tóm tắt kết quả thực nghiệm

Mô hình PTHH được phát triển trong đề tài này sẽ được kiểm chứng bằng cách so sánh với kết quả thí nghiệm của bốn cột được thực hiện bởi Ma và cs. [14]. Các cột được thí nghiệm dưới tải trọng dọc trục không đổi với tải trọng lặp mô phỏng tác dụng của tải trọng động đất. Cột có đường kính 260 mm và chiều cao 1000 mm được đúc liền với khối đế có kích thước $1300 \times 360 \times 400$ mm. Lớp bê tông bảo vệ cốt thép đai của cột là 30 mm. Các cột này có chiều dài làm việc là 820 mm và tỷ lệ nhíp trên chiều cao tiết diện (L/D) là 3,15. Cường độ chịu nén trung bình quy đổi sang cường độ mẫu hình trụ 150×300 mm là 27 MPa. Tiết diện cột có thép dọc là 6D16, thép đai xoắn đường kính D8 có khoảng cách 100 mm. Giá trị mô đun đàn hồi với cốt thép lấy là $E_s = 200$ GPa. Các tham số được kiểm soát là mức độ ăn mòn và tỷ số nén dọc trục ($n = N/f'_c A$) được định nghĩa là tỷ số giữa tải trọng dọc trục (N) (tức là tải trọng dọc trục nén theo hướng song song với trục cột) với tích của cường độ chịu nén bê tông (f'_c) và diện tích mặt cắt (A). Trong nghiên cứu này, giá trị biến dạng cực hạn của thép dọc và thép đai được lấy là 0,12. Thông tin chung về các cột dùng trong phân tích này được trình bày ở Bảng 1 và Hình 2. Các mẫu thí nghiệm được ký hiệu là $Cx-y$ trong đó C thể hiện là mặt cắt ngang tròn của các cột thí nghiệm, x thể hiện phần số nguyên của mức độ cốt thép bị ăn mòn (%), và y thể hiện phần thập phân của tỷ số nén. Phương pháp ăn mòn điện hoá được sử dụng để thúc đẩy quá trình ăn mòn cốt thép trong các mẫu thí nghiệm. Mức độ ăn mòn thực tế (ρ) được xác định bởi lượng



(a) Cột BTCT thí nghiệm [14]



(b) Mô hình PTHH 3D

Hình 2. Chi tiết cột thí nghiệm và mô hình PTHH 3D

mất mát về khối lượng của thanh thép so với khối lượng trước khi bị ăn mòn. Mức độ ăn mòn trong Bảng 1 là mức độ ăn mòn trung bình của cả cốt thép dọc và cốt đai.

Bảng 1. Thông số các cột trong mô hình PTHH phi tuyến

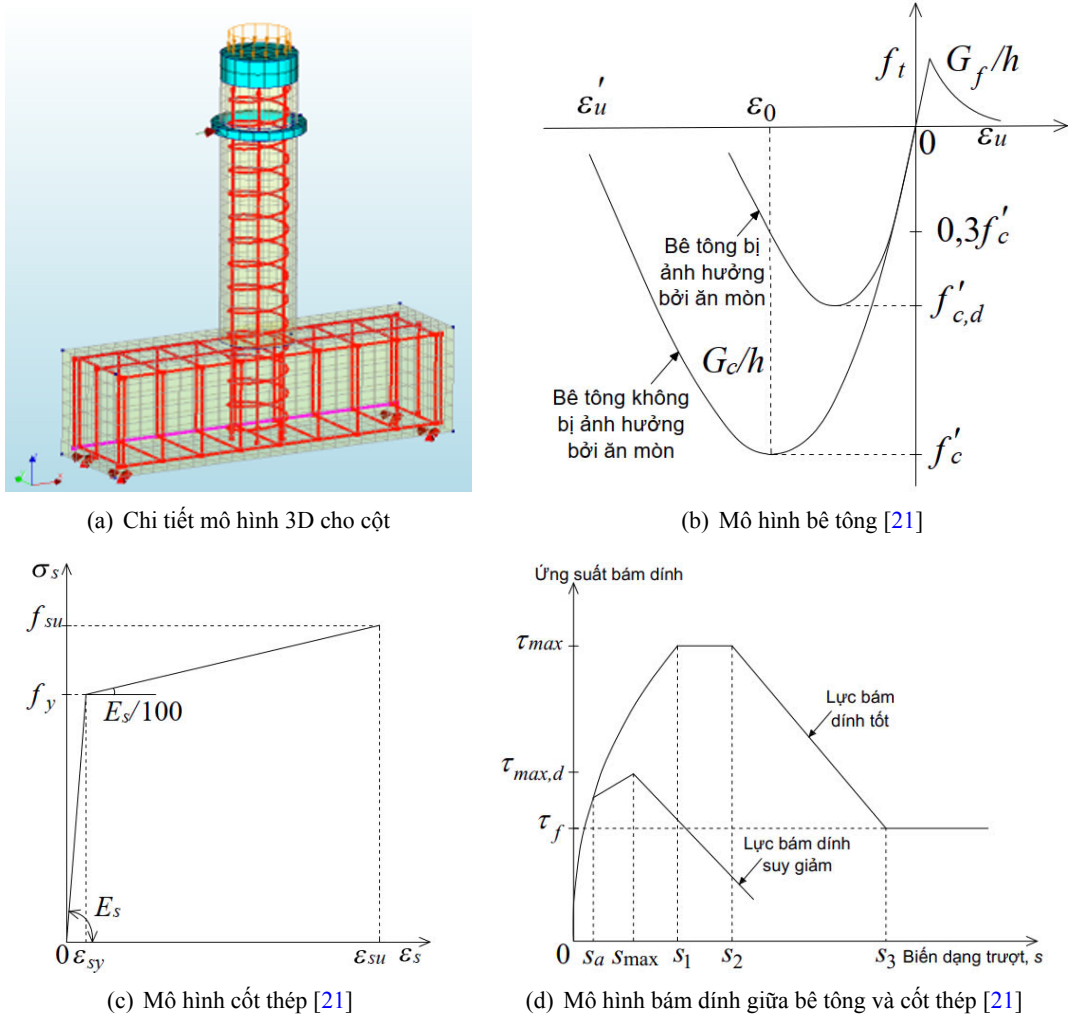
Thông số	Ký hiệu	Mẫu thí nghiệm				
		C0-40	C9-40	C14-32	C9-15	
Mức độ ăn mòn (%)	ρ	0	9,3	14,7	9,5	
Tỷ số nén	n	0,4	0,4	0,32	0,15	
Tỷ lệ nhíp/chiều cao tiết diện	L/D	3,15				
Cường độ chịu nén của bê tông lõi và bê tông lớp bảo vệ (MPa)	$f'_c / f'_{c,d}$	27/27	27/20,58	27/18,09	27/20,48	
Cường độ chịu kéo của bê tông lõi và bê tông lớp bảo vệ (MPa)	$f'_t / f'_{t,d}$	2,71/2,71	2,71/2,27	2,71/2,08	2,71/2,26	
Mô đun đàn hồi của bê tông (GPa)	E_b	24,1	18,4	16,2	18,3	
Năng lượng phá hoại nén của bê tông lõi và bê tông lớp bảo vệ (Nmm/mm ²)	$G_c / G_{c,d}$	12,39/12,39	12,39/7,63	12,39/7,54	12,39/7,63	
Năng lượng phá hoại kéo của bê tông lõi và bê tông lớp bảo vệ (Nmm/mm ²)	$G_f / G_{f,d}$	0,049/0,049	0,049/0,031	0,049/0,03	0,049/0,031	
Giới hạn chảy (MPa)	D8 (mm)	$f_y / f_{y,d}$	327/327	327/311,8	327/303,0	327/311,5
Giới hạn bền (MPa)		$f_u / f_{u,d}$	510,7/510,7	510,7/487,0	510,7/473,2	510,7/486,4
Biến dạng cực hạn		$\varepsilon_{su} / \varepsilon_{su,d}$	0,12/0,12	0,12/0,089	0,12/0,070	0,12/0,088
Giới hạn chảy (MPa)	D16 (mm)	$f_y / f_{y,d}$	373,2/373,2	373,2/355,8	373,2/345,8	373,2/355,5
Giới hạn bền (MPa)		$f_u / f_{u,d}$	572,3/572,3	572,3/545,7	572,3/530,2	572,3/545,1
Biến dạng cực hạn		$\varepsilon_{su} / \varepsilon_{su,d}$	0,12/0,12	0,12/0,089	0,12/0,070	0,12/0,088
Ứng suất bám dính giữa cốt thép và bê tông (MPa)	D16 (mm)	$\tau_{max,d}$	12,99	11,34	10,63	11,31

3. Mô hình phần tử hữu hạn phi tuyến

3.1. Giới thiệu chung

Nghiên cứu này xây dựng mô hình PTHH phi tuyến 3D để mô phỏng ứng xử của các cột tròn BTCT không bị và bị ăn mòn dưới tác dụng đồng thời của tải trọng nén dọc trục và tải trọng lặp theo phương ngang. Bốn cột thí nghiệm trong nghiên cứu của Ma và cs. [14] dùng kiểm chứng mức độ chính xác của mô hình PTHH 3D, trong đó cột C0-40 không bị ăn mòn và ba cột C9-40, C14-32, và C9-15 với mức độ ăn mòn và tỷ số nén dọc khác nhau. Trong mô Hình 3D của cột bao gồm một cột tiết diện tròn, một khối móng liên kết với cột, một tấm thép trên đỉnh cột, và một vòng đai bằng thép quanh cột, như được thể hiện ở Hình 3(a). Trong khi đó, thông số các cột BTCT được sử dụng trong mô hình phi tuyến 3D được thể hiện ở Bảng 1. Hình 3 giới thiệu các mô hình vật liệu sử dụng để mô phỏng kết cấu cột tròn BTCT bị ăn mòn. Bê tông của cột và khối đế móng được rời rạc hoá bằng cách sử dụng phần tử khối đặc có 20 nút CHX60. Cốt thép trong khối đế, và cốt thép đai trong cột tròn được mô phỏng bằng phần tử thanh ba nút CL9TR được mô phỏng gắn chặt hoàn hảo với bê tông. Cốt thép dọc trong cột tròn được mô hình bằng phần tử thanh ba nút CL9TR và được kết nối với bê tông thông qua phần tử bám dính CQ48I với độ dày bằng không. Tấm thép trên đỉnh cột có tác dụng để truyền lực dọc trục, được mô hình bằng phần tử CHX60 và gắn chặt với đỉnh cột. Vòng đai bằng thép quanh cột tại vị trí đặt tải trọng ngang được mô hình bằng phần tử CHX60 được gắn chặt với cột.

Đầu tiên, mô hình được gia tải bằng lực dọc trục không đổi, được mô hình hóa bằng tải trọng phân bố đều trên tấm thép ở đỉnh cột. Tải trọng ngang sau đó được tạo ra ở vị trí vòng đai thép bằng cách tăng dần chuyển vị ngang với bước nhảy 1 mm cho đến khi phá hoại xảy ra. Kích thước lưới chia phần tử được sử dụng là 50 mm dựa vào kích thước lớn nhất của hạt cốt liệu thô. Các tính chất vật liệu của tấm thép trên đỉnh cột và vòng đai thép được mô hình hóa với mô đun đàn hồi 200 GPa và hệ số Poisson được lấy là 0,3.



Hình 3. Mô hình PTHH 3D của cột thí nghiệm và các mô hình vật liệu xét đến ảnh hưởng của ăn mòn cốt thép

3.2. Mô hình bê tông

Sự ăn mòn cốt thép chỉ ảnh hưởng tới lớp bê tông bảo vệ mà không ảnh hưởng tới phần bê tông lõi phía trong. Do đó, tính chất cơ lý của bê tông lõi không bị suy giảm bởi ứng suất kéo phát sinh do sự giãn nở thể tích của các sản phẩm ăn mòn cốt thép và được mô phỏng như đối với bê tông không bị ảnh hưởng bởi ăn mòn. Ứng xử nén của lớp bê tông bảo vệ bị suy giảm do sự hình thành của các sản phẩm ăn mòn. Trong nghiên cứu này, cường độ chịu nén còn lại của lớp bê tông bảo vệ do ăn mòn được tính toán theo công thức (1) dựa theo mô hình đưa ra bởi Vecchio & Collins [22].

$$f'_{c,d} = \frac{f'_c}{1 + k \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{c0}} \right)} \quad (1)$$

trong đó f'_c là cường độ chịu nén ban đầu của bê tông; $f'_{c,d}$ là cường độ chịu nén còn lại của bê tông kể đến sự ăn mòn; k là hệ số kể đến ảnh hưởng của đường kính và độ gồ ghề của cốt thép, giá trị $k = 0,1$ được đề nghị bởi Capé [23] được sử dụng trong nghiên cứu này; ε_{c0} là biến dạng bê tông tại vị trí ứng suất nén lớn nhất; ε_1 là biến dạng kéo trung bình do bề rộng vết nứt của bê tông lớp bảo vệ do sự ăn mòn. Khi không có số liệu đo bề rộng vết nứt gây ra do sự ăn mòn của cốt thì ε_1 có thể được tính toán như sau:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sum_{i=1}^n w_{cr,i}}{b_0} = \frac{\sum_{i=1}^n 2\pi(v_{cr} - 1)x_i}{b_0} \quad (2)$$

$$x_i = \frac{D_0 - D_{c,i}}{2} = \frac{D_0 - D_0 \sqrt{1 - 0,01\rho_i}}{2} \quad (3)$$

trong đó b_0 là chu vi của cột BTCT; n là số thanh thép bị ăn mòn; $w_{cr,i}$ là bề rộng vết nứt gây ra bởi sự ăn mòn của thanh cốt thép thứ i ; v_{cr} là hệ số kể đến sự giãn nở thể tích của sản phẩm ăn mòn; x_i là bề dày ăn mòn trung bình của thanh cốt thép thứ i ; D_0 là đường kính ban đầu của thanh thép; $D_{c,i}$ là đường kính còn lại của thanh thép thứ i sau khi bị ăn mòn, và ρ_i là mức độ ăn mòn trung bình của thanh thép thứ i . Do kết quả đo mức độ ăn mòn của từng thanh thép trong nghiên cứu của Ma và cs. [14] không được đề cập nên trong nghiên cứu này sử dụng số liệu ăn mòn trung bình được công bố, xem như các thanh thép bị ăn mòn như nhau. Giá trị của v_{cr} biến đổi tùy thuộc vào môi trường tạo ra sản phẩm ăn mòn khác nhau [1]. Giá trị $v_{cr} = 2$ đã được sử dụng trong phân tích PTHH [16, 20] để phân tích sự làm việc của cấu kiện BTCT bị ăn mòn.

Trong nghiên cứu này, ứng xử của bê tông khi chịu nén và chịu kéo được mô phỏng bằng các đường cong ứng suất – biến dạng, như minh họa trên Hình 3(b), theo đề xuất của Lim và cs. [21]. Quan hệ ứng suất – biến dạng của bê tông khi chịu nén được biểu diễn bởi các thông số như: cường độ chịu nén (f'_c); mô đun đàn hồi (E_c) tương ứng với giai đoạn ứng suất nén nhỏ hơn $0,3f'_c$; biến dạng nén cực hạn (ε'_u); năng lượng phá hoại nén (G_c); dài bề rộng vết nứt (h). Năng lượng phá hoại nén của bê tông không bị ảnh hưởng bởi ăn mòn (G_c) được xác định theo đề xuất của Nakamura & Higai [24]. Dài bề rộng vết nứt h , được tính bằng $\sqrt[3]{V}$, với V là thể tích của phần tử khối. Khi không có sẵn kết quả thực nghiệm thì cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của bê tông có thể được xác định theo các công thức trong fib Model Code 2010 [25]. Giá trị năng lượng phá hoại kéo (G_f) được xác định theo fib Model Code 2010 [25]. Độ cứng kéo của vật liệu bê tông khi chịu kéo được biểu diễn thông qua mô hình phi tuyến của Hordijk và cs. [26].

Khi bê tông bị giảm tính chất cơ lý do ăn mòn cốt thép, thì cường độ chịu kéo của bê tông ($f'_{t,d}$), năng lượng phá hoại kéo ($G_{f,d}$) và năng lượng phá hoại nén ($G_{c,d}$) được xác định theo các phương trình đề xuất tương ứng như sau:

$$f'_{t,d} = 0,3(f'_{c,d})^{2/3} \quad (4)$$

$$G_{f,d} = G_{f0} \left(\frac{f'_{c,d}}{f_{cmo}} \right)^{0,7} \quad (5)$$

$$G_{c,d} = 250G_{f,d} \quad (6)$$

trong đó G_{f0} là giá trị cơ sở của năng lượng phá hoại kéo, được lấy bằng 0,035 với cốt liệu thô với đường kính lớn nhất hạt cốt liệu là 19 mm, trong khi đó f_{cmo} được lấy bằng 10 MPa.

3.3. Mô hình cốt thép

Trong nghiên cứu này, cốt thép chịu kéo và chịu nén được xem là ứng xử như nhau và được mô hình hoá bởi công thức (7):

$$f_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & \text{khi } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \\ f_{sy} + 0,01 E_s (\varepsilon_s - \varepsilon_{sy}) & \text{khi } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su} \end{cases} \quad (7)$$

trong đó f_s và ε_s lần lượt là ứng suất và biến dạng của cốt thép; f_{sy} và ε_{sy} lần lượt là giới hạn chảy và biến dạng chảy của cốt thép; ε_{su} là biến dạng cực hạn của cốt thép; E_s là mô đun đàn hồi của cốt thép.

Diện tích mặt cắt ngang của thanh thép bị suy giảm do sự ăn mòn. Việc mô hình sự biến thiên của diện tích thanh thép dọc theo chiều dài thanh thép là phức tạp. Để đơn giản hoá sự mô phỏng, ở đây giả thiết đường kính cốt thép bị ăn mòn đều dọc theo chiều dài thanh thép. Vì vậy, diện tích còn lại của thanh thép sau khi bị ăn mòn có thể được xác định theo công thức (8):

$$A_s(\Delta G) = \frac{\pi D_0^2}{4} (1 - 0,01 \rho) \quad (8)$$

trong đó $A_s(\Delta G)$ là diện tích còn lại của thanh thép; ρ (%) là mức độ ăn mòn cốt thép; D_0 là đường kính của thanh thép ban đầu.

Do ảnh hưởng của ăn mòn cục bộ, giới hạn chảy và giới hạn bền của cốt thép sau khi bị ăn mòn phụ thuộc nhiều vào đường kính còn lại nhỏ nhất, trong khi đường kính còn lại trung bình được sử dụng trong công thức (8). Vì vậy, giới hạn chảy và giới hạn bền còn lại của cốt thép bị ăn mòn được ước lượng theo công thức (9):

$$f_{y,d} = (1 - \beta \times \rho) f_y \quad (9)$$

trong đó $f_{y,d}$ là giới hạn chảy còn lại của thanh thép bị ăn mòn; β là hệ số suy giảm cường độ do ăn mòn; f_y là giới hạn chảy của thanh thép ban đầu. Trong nghiên cứu này, $\beta = 0,005$ theo như đề nghị của Du và cs. [3].

Biến dạng cực hạn của cốt thép bị ăn mòn bị suy giảm do có sự tập trung ứng suất và biến dạng tại các vị trí ăn mòn rõ nơi có diện tích còn lại nhỏ nhất [2, 4, 5, 9]. Biến dạng cực hạn còn lại của thanh thép bị ăn mòn được tính toán sử dụng công thức (10) theo [2, 5]:

$$\varepsilon_{su,d} = (1 - \alpha \times \rho) \varepsilon_{su} \quad (10)$$

trong đó $\varepsilon_{su,d}$ là biến dạng cực hạn còn lại của thanh thép; α là hệ số suy giảm biến dạng cực hạn của thanh thép; và ε_{su} là biến dạng cực hạn của thanh thép ban đầu, $\varepsilon_{su} = 0,12$. Hệ số α biến đổi từ 0 tới 0,06 tùy thuộc vào môi trường và sản phẩm ăn mòn [2]. Ou và cs. [5] đề xuất $\alpha = 0,0125$ và $\alpha = 0,0281$ lần lượt là hệ số suy giảm đối với cốt thép nằm trong bê tông bị ăn mòn tự nhiên và cốt thép bị ăn mòn bằng phương pháp thúc đẩy ăn mòn điện hóa. Giá trị của α được lấy bằng 0,0281 trong nghiên cứu này. Hình 3(c) biểu diễn đường cong ứng suất - biến dạng của cốt thép khi chịu kéo và chịu nén.

Các cốt thép dọc và cốt thép đai xoắn được mô hình hoá riêng biệt để tạo thành khung cốt thép. Khung cốt thép bằng cách mô hình như vậy sẽ tự mang lại hiệu ứng bó ngang cho bê tông lõi. Do đó, bê tông lõi sẽ có hiệu ứng bó ngang trong quá trình mô phỏng. Kết quả thí nghiệm của Ma và cs. [14] cho thấy cốt đai của cột C14-32 bị ăn mòn điểm nghiêm trọng. Tuy nhiên, sẽ là quá mức nếu bỏ qua hoàn toàn khả năng chịu lực của cốt đai. Thêm nữa, việc mô phỏng cốt đai bị ăn mòn điểm là phức tạp do sự biến động của các điểm ăn mòn. Do đó, để đơn giản hoá việc mô phỏng cốt thép bị ăn mòn, nghiên cứu này thực hiện thông qua giảm diện tích tiết diện ngang, giảm cường độ và độ dẻo của cốt thép như đã thể hiện ở các công thức (8), (9), và (10).

3.4. Mô hình bám dính giữa bê tông và cốt thép

Ứng suất bám dính của bê tông và cốt thép bị suy giảm khi có sự ăn mòn của cốt thép dọc và/hoặc cốt thép đai. Kết quả là khả năng của bê tông khi phân phối ứng suất kéo trong cấu kiện sẽ bị ảnh hưởng bởi sự suy giảm bám dính. Theo Maaddawy và cs. [27], ứng suất bám dính của bê tông và cốt thép bị ăn mòn bao gồm sự đóng góp của bê tông bảo vệ (τ_{con}) và cốt thép đai (τ_{st}) và được tính toán như sau:

$$\tau_{max,d} = \underbrace{R(0,55 + 0,24 \frac{c_c}{d_b}) \sqrt{f'_c}}_{\tau_{con}} + \underbrace{0,191 \frac{A_{st} f_{yt}}{S_s d_b}}_{\tau_{st}} \quad (11)$$

$$R = (A_1 + A_2 \times \rho) \quad (12)$$

trong đó $\tau_{max,d}$ là ứng suất bám dính còn lại của bê tông và cốt thép, c là chiều dày lớp bê tông bảo vệ, d_b là đường kính ban đầu của cốt thép, A_{st} là diện tích cốt thép đai, f_{yt} là giới hạn chảy của thép đai, S_s là khoảng cách các thanh cốt thép đai, và R là hệ số suy giảm xét đến sự đóng góp của bê tông đối với cường độ bám dính. Giá trị A_1 và A_2 là các hệ số được xác định dựa vào cường độ dòng điện ăn mòn như được đề nghị bởi Maaddawy và cs. [27], và ρ là mức độ ăn mòn cốt thép theo tỷ lệ phần trăm.

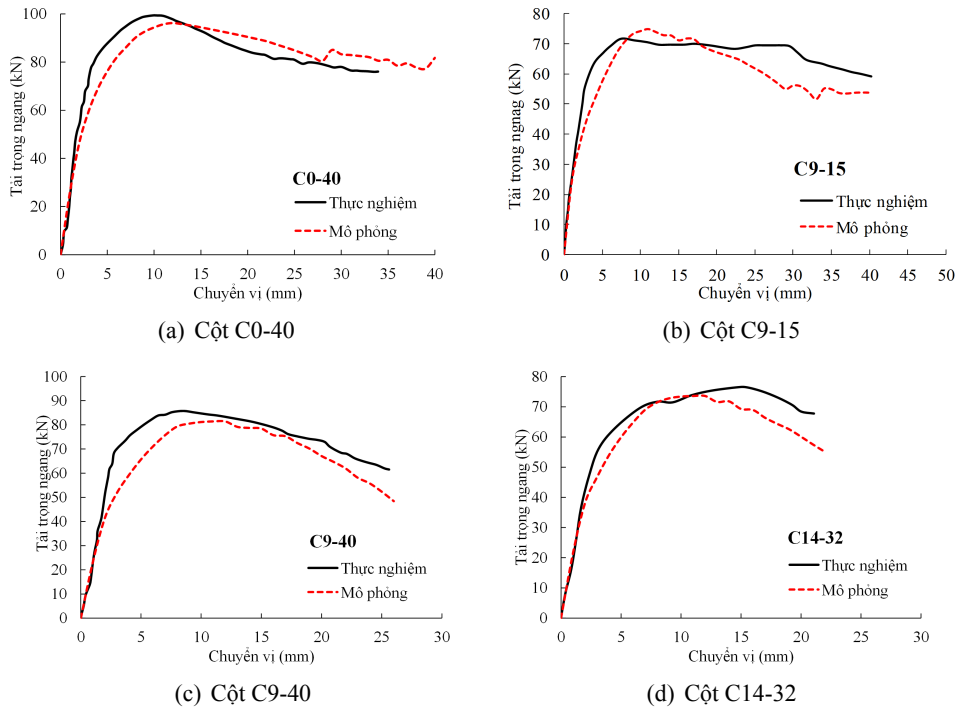
Sự suy giảm bám dính từ đóng góp của cốt thép đai (τ_{st}) do sự ăn mòn được kể đến bằng cách giảm diện tích mặt cắt ngang của cốt thép đai và sự suy giảm giới hạn chảy. Với cột BTCT có hàm lượng cốt thép đai và chiều dày lớp bảo vệ được thiết kế thông thường, cơ chế phá hoại bong tách thường chiếm ưu thế sự phá hoại lực bám dính. Trong nghiên cứu này, để xem xét ảnh hưởng của sự ăn mòn tới ứng xử lực dính, mô hình lực dính-trượt trong fib Mode Code 1990 [28] được áp dụng và chỉnh sửa theo phương trình (13) như sau:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_{max} C \left(\frac{s}{s_1} \right)^\alpha & \text{với } 0 \leq s \leq s_1 \\ \tau &= \tau_{max} C & \text{với } s_1 \leq s \leq s_2 \\ \tau &= \tau_{max} C - (\tau_{max} C - \tau_f) \left(\frac{s - s_2}{s_3 - s_2} \right) & \text{với } s_2 \leq s \leq s_3 \\ \tau &= \tau_f & \text{với } s_3 < s \end{aligned} \quad (13)$$

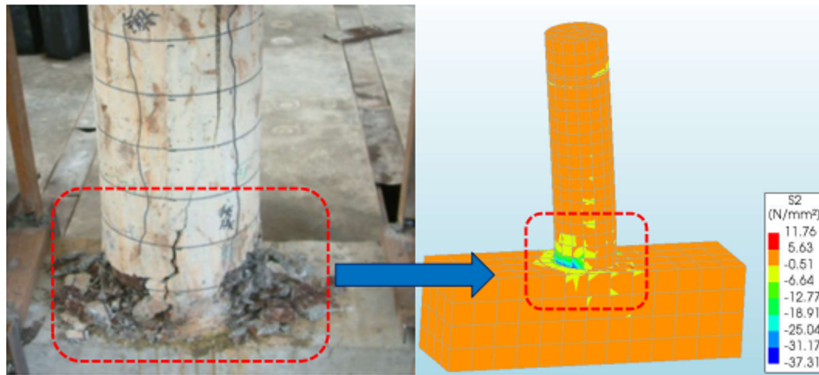
Các giá trị của các tham số với mô hình bám dính có thể chọn lựa như sau, theo như đề xuất bởi Ou & Nguyen [20] và Vu & Li [16]: $\alpha = 0,4$; $s_1 = 0,6$ mm; $s_2 = 0,6$ mm; $s_3 = 2,5$ mm và $\tau_f = 0,15\tau_{max} C$. Hình 3(d) thể hiện mô hình bám dính giữa bê tông và cốt thép trong mô phỏng cột BTCT không bị và bị ăn mòn.

3.5. Kiểm chứng mô hình phân tử hữu hạn phi tuyến

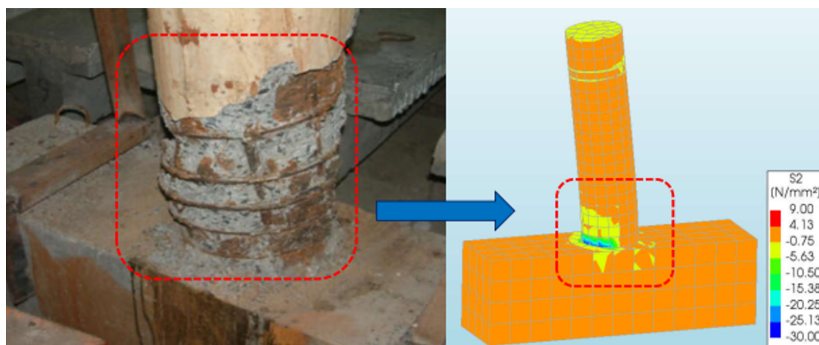
Hình 4 thể hiện so sánh đường cong tải trọng-chuyển vị giữa kết quả của phân tích số và kết quả từ thực nghiệm của các cột BTCT không bị ăn mòn (C0-40) và bị ăn mòn (C9-40, C14-32, và C9-15). Có thể quan sát thấy rằng, đường cong tải trọng-chuyển vị từ mô hình PTHH phi tuyến 3D đề xuất có tương quan rất tốt với kết quả từ thực nghiệm về độ cứng ban đầu, khả năng chịu tải trọng ngang, và khả năng chuyển vị cực hạn. Hình 5 và Hình 6 lần lượt so sánh dạng phá hoại của cột C9-15, và C14-32 từ thực nghiệm và mô phỏng ở giai đoạn cuối của quá trình gia tải. Có thể thấy rằng, vùng chân cột tiếp giáp với khối đế nơi tập trung ứng suất kéo nén của quá trình gia tải thí nghiệm được dự đoán khá chính xác trong mô hình PTHH 3D đề xuất.



Hình 4. So sánh đường cong tải trọng-chuyển vị giữa thí nghiệm và phân tích PTHH



Hình 5. So sánh dạng phá hoại cột C9-15 từ thực nghiệm và mô phỏng



Hình 6. So sánh dạng phá hoại cột C14-32 từ thực nghiệm và mô phỏng

4. Nghiên cứu tham số và thảo luận

Sử dụng mô hình PTHH phi tuyến 3D đã được đề xuất, kiểm chứng và thảo luận ở trên, các mô phỏng số đã được thực hiện để nghiên cứu tác động của các tham số khác nhau đến ứng xử của các cột BTCT ăn mòn để xem xét sự suy giảm về khả năng chịu tải trọng ngang và khả năng biến dạng cực hạn của cột. Một nghiên cứu tham số được tiến hành, bao gồm các tham số như mức độ ăn mòn cốt thép, tỷ lệ nhịp/chiều cao tiết diện (L/D), tỷ số nén, hàm lượng cốt thép dọc, và cường độ chịu nén của bê tông. Bảng 2 giới thiệu phạm vi khảo sát của các tham số ảnh hưởng.

Bảng 2. Nghiên cứu tham số

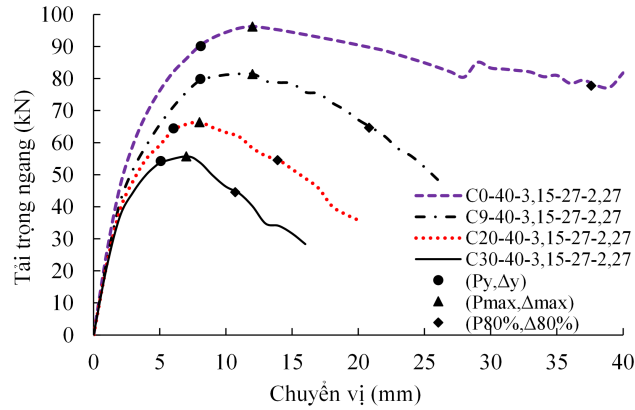
TT	Ký hiệu	Mô tả	Phạm vi nghiên cứu
1	ρ (%)	Mức độ ăn mòn	0; 9,3; 20; 30; 40
2	L/D	Tỷ lệ nhịp/chiều cao tiết diện	1,5; 2,5; 3,15; 3,5
3	$n = N/f'_c A$	Tỷ số nén	0,1; 0,2; 0,3; 0,4
4	ρ_l (%)	Hàm lượng thép dọc lần lượt với bố trí 6D12; 6D14; 6D16 và 6D18	1,28; 1,74; 2,27; 2,86
5	f'_c	Cường độ chịu nén của bê tông	20; 27; 40; 50

Khảo sát tham số được thực hiện trên tổng cộng 20 mô hình. Đối với ăn mòn tự nhiên, cốt thép đai thường bị ăn mòn sớm hơn và nghiêm trọng hơn so với cốt thép dọc, do chúng nằm gần với lớp bê tông bảo vệ hơn và có đường kính nhỏ hơn [9]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, cốt thép bị ăn mòn bằng phương pháp điện hóa, nên mức độ ăn mòn được giả thiết như nhau đối với cốt thép dọc và cốt thép đai (lấy theo mức độ ăn mòn trung bình của cốt thép dọc).

Trong mục này, nghiên cứu tham số được thực hiện dựa trên mô hình PTHH phi tuyến ban đầu của cột C9-40 và được ký hiệu là $Cx-y-z-t-k$ trong đó C thể hiện là mặt cắt ngang tròn của các cột thí nghiệm, x thể hiện mức độ cốt thép bị ăn mòn (%), y thể hiện phần thập phân của tỷ số nén, z là tỷ lệ nhịp/chiều cao tiết diện, t là cường độ chịu nén của bê tông, và k là hàm lượng cốt thép dọc. Các cột trong mô hình số có cốt thép đai D8 và bước cốt thép đai là 100 mm. Ví dụ, C9-40-27-3,15-2,27 thể hiện cột tròn BTCT bị ăn mòn mức độ cốt thép bị ăn mòn là 9,3% (từ mô hình gốc C9-40 của mục kiểm chứng với kết quả thí nghiệm), tỷ số nén dọc trục là 0,4, cường độ chịu nén bê tông là 27 MPa, tỷ lệ nhịp/chiều cao tiết diện là 3,15 và hàm lượng cốt thép dọc là 2,27% ứng với bố trí thép dọc 6D16. Có ba vị trí quan trọng sẽ được xác định trên đường cong dự đoán lực-chuyển vị: vị trí cốt thép dọc chảy dẻo (P_y, Δ_y), vị trí ứng với tải trọng ngang đạt giá trị lớn nhất (P_{max}, Δ_{max}), và vị trí ứng với thời điểm tải trọng ngang bị giảm xuống dưới 80% so với vị trí tải trọng ngang lớn nhất ($P_{80\%}, \Delta_{80\%}$).

4.1. Ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép dọc

Bốn cột BTCT bị ăn mòn được ký hiệu là C0-40-3,15-27-2,27; C9-40-3,15-27-2,27; C20-40-3,15-27-2,27; và C30-40-3,15-27-2,27 tương ứng với các mức độ ăn mòn lần lượt là 0%, 9,3%, 20%, và 30% được phân tích để xem xét ảnh hưởng của mức độ ăn mòn tới ứng xử của cột. Hình 7 thể hiện ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép tới đường cong tải trọng-chuyển vị của các dầm BTCT bị ăn mòn từ mô hình PTHH phi tuyến 3D. Từ Hình 7 và Bảng 3, có thể thấy rằng khi các tham số L/D , f'_c , n , ρ_l không đổi, khả năng chịu lực bị suy giảm khi mức độ ăn mòn tăng lên. Khi tăng mức độ ăn mòn từ 0% tới 9,3%, 20% và 30% thì tải trọng ngang (P_{max}) của cột giảm lần lượt các mức là 15,4%, 31,0%, và 42,1%. Sự suy giảm về khả năng chịu lực là do các yếu tố sau: (i) diện tích và cường độ cốt thép dọc bị suy giảm do ăn mòn. (ii) Thêm nữa, khi mức độ ăn mòn tăng lên thì diện tích và cường độ cốt thép đai bị ăn mòn bị suy giảm càng nhiều sẽ giảm ảnh hưởng của hiệu ứng bó ngang của cốt thép đai đối với bê tông lõi. (iii) Và cuối cùng, khi sự ăn mòn tăng lên sẽ sinh ra ứng suất kéo làm cho lớp



Hình 7. Ảnh hưởng của mức độ ăn mòn tới đường cong tải trọng-chuyển vị của cột tròn BTCT bị ăn mòn

Bảng 3. Kết quả thu được từ đường cong tải trọng-chuyển vị

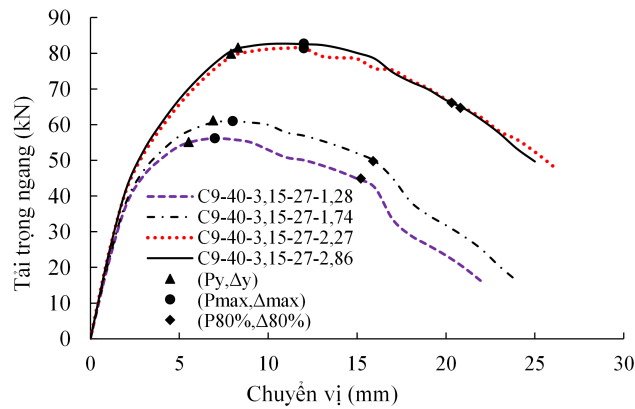
TT	Mẫu cột	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_{max} (kN)	Δ_{max} (mm)	$P_{80\%}$ (kN)	$\Delta_{80\%}$ (mm)
1	C0-40-27-3,15-2,27	90,2	8,1	96,2	12,0	77,8	37,6
2	C9-40-27-3,15-2,27	79,9	8,1	81,4	12,0	64,7	20,8
3	C20-40-27-3,15-2,27	64,5	6,1	66,4	8,0	54,5	13,9
4	C30-40-27-3,15-2,27	54,3	5,1	55,7	7,0	44,6	10,7
5	C9-40-27-3,15-1,28	55,1	5,5	56,2	7,0	44,9	15,2
6	C9-40-27-3,15-1,74	61,2	6,9	61,0	8,0	49,8	16,2
7	C9-40-27-3,15-2,27	79,9	8,1	81,4	12,0	64,7	20,8
8	C9-40-27-3,15-2,86	81,6	8,3	82,7	12,0	66,1	20,3
9	C9-40-27-1,5-2,27	192,8	3,5	195,5	5,0	156,3	8,1
10	C9-40-27-2,5-2,27	104,6	5,7	106,4	8,0	85,6	14,1
11	C9-40-27-3,15-2,27	79,9	8,1	81,4	12,0	64,7	20,8
12	C9-40-27-3,5-2,27	69,0	8,7	72,6	15,0	59,7	23,9
13	C9-40-20-3,15-2,27	67,6	8,4	69,8	13,0	54,9	18,8
14	C9-40-27-3,15-2,27	79,9	8,1	81,4	12,0	64,7	20,8
15	C9-40-40-3,15-2,27	88,9	7,3	94,5	11,0	76,4	21,8
16	C9-40-50-3,15-2,27	97,6	7,2	102,9	10,0	82,4	22,3
17	C9-10-27-3,15-2,27	66,2	6,9	76,2	11,0	61,4	26,3
18	C9-20-27-3,15-2,27	71,2	7,1	79,5	11,0	64,2	24,1
19	C9-30-27-3,15-2,27	74,9	7,3	81,2	11,0	65,8	20,3
20	C9-40-27-3,15-2,27	79,9	8,1	81,4	12,0	64,7	20,8

bê tông bảo vệ bị suy giảm khả năng chịu lực. Mức độ ăn mòn càng lớn thì sự ảnh hưởng tới khả năng chịu tải trọng ngang càng rõ rệt. Có thể thấy rằng, khi mức độ ăn mòn tăng lên thì chuyển vị của cột gồm có Δ_y , Δ_{max} , và $\Delta_{80\%}$ có xu hướng giảm đáng kể. Từ Hình 7 thấy rằng, khi mức độ ăn mòn tăng thì độ dẻo của cột càng giảm, cụ thể mức độ ăn mòn tăng từ 0% tới 9,3%, 20% và 30% thì chuyển vị $\Delta_{80\%}$ của cột giảm lần lượt các mức là 44,7%, 63,0%, và 71,5%.

4.2. Ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép dọc

Bốn cột BTCT bị ăn mòn được ký hiệu là C9-40-3,15-27-1,28; C9-40-3,15-27-1,74; C9-40-3,15-27-2,27; và C9-40-3,15-27-2,86 tương ứng với các hàm lượng cốt thép dọc lần lượt là 1,28%, 1,74%,

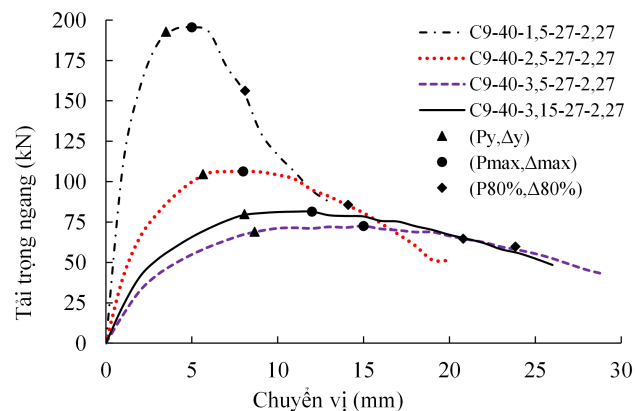
2,27%, và 2,86% được phân tích để xem xét ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép dọc tới ứng xử của cột. Hình 8 thể hiện ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép dọc tới đường cong tải trọng-chuyển vị của các dầm BTCT bị ăn mòn từ mô hình PTHH phi tuyến 3D. Từ Hình 8 và Bảng 3, có thể thấy rằng khi các tham số ρ , L/D , f'_c , n không đổi, khả năng chịu lực (P_y , P_{max} , và $P_{80\%}$) giảm lên khi hàm lượng cốt thép dọc giảm đi, xu hướng tương tự như khi mức độ ăn mòn tăng lên. Khi hàm lượng thép dọc tăng từ 1,27% tới 1,74%, 2,27%, và 2,86% thì tải trọng ngang của cột tăng lần lượt các mức là 8,5%, 44,8%, và 47,2%. Với các hàm lượng cốt thép khảo sát trong mục này, khi hàm lượng cốt thép tăng lên thì chuyển vị của cột gồm có Δ_y , Δ_{max} , và $\Delta_{80\%}$ có xu hướng tăng lên đáng kể. Cụ thể, chuyển vị cột ($\Delta_{80\%}$) tăng lên lần lượt là 6,6%, 36,8%, và 33,6% khi tăng hàm lượng thép dọc từ 1,27% tới 1,74%, 2,27%, và 2,86%.



Hình 8. Ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép dọc tới đường cong tải trọng-chuyển vị của cột tròn BTCT bị ăn mòn

4.3. Ảnh hưởng của tỷ lệ nhịp/chiều cao tiết diện

Trong nghiên cứu này, đường kính cột được giữ không đổi với các mô hình PTHH. Do đó, tỷ lệ nhịp/chiều cao tiết diện (L/D) tăng lên bằng cách tăng chiều nhịp gia tải của cột. Bốn cột BTCT bị ăn mòn được ký hiệu là C9-40-1,5-27-2,27; C9-40-2,5-27-2,27; C9-40-3,15-27-2,27; và C9-40-3,5-27-2,27 tương ứng với các tỷ số nhịp/chiều cao tiết diện lần lượt là 1,5, 2,5, 3,15, và 3,5 được phân tích để xem xét ảnh hưởng của tỷ lệ nhịp/chiều cao tiết diện tới ứng xử của cột. Hình 9 thể hiện ảnh hưởng

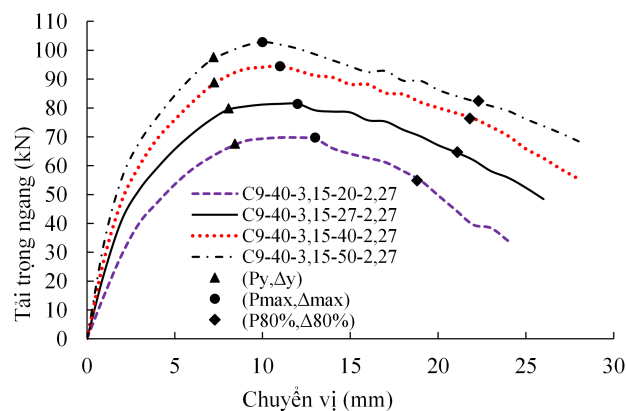


Hình 9. Ảnh hưởng của tỷ lệ nhịp/chiều cao tiết diện tới đường cong tải trọng-chuyển vị của cột tròn BTCT bị ăn mòn

của tỷ lệ nhíp/chiều cao tiết diện tới đường cong tải trọng-chuyển vị của các dầm BTCT bị ăn mòn từ mô hình PTHH phi tuyến 3D. Từ Hình 9 và Bảng 3, có thể thấy rằng khi các tham số ρ , f'_c , n , ρ_l không đổi thì khả năng chịu lực (P_y , P_{max} , và $P_{80\%}$) và độ cứng ban đầu của cột giảm đi rõ rệt khi tỷ lệ nhíp/chiều cao tiết diện tăng lên. Cụ thể, khi tăng tỷ lệ L/D từ 1,5 lên 2,5; 3,15; và 3,5 thì khả năng chịu tải trọng ngang lớn nhất P_{max} giảm lần lượt là 45,6%, 58,4% và 62,9%. Mặt khác, khi tỷ lệ L/D tăng lên tăng lên thì chuyển vị của cột gồm có Δ_y , Δ_{max} , và $\Delta_{80\%}$ có xu hướng tăng lên đáng kể. Độ dẻo của cột thể hiện qua chuyển vị $\Delta_{80\%}$ tăng lên lần lượt là 74,1%, 156,8%, và 195,1% khi tăng tỷ lệ L/D từ 1,5 lên 2,5; 3,15; và 3,5. Các kết quả này tương tự xu hướng như đã được quan sát thấy trong nghiên cứu của Vu & Li [16].

4.4. Ảnh hưởng của cường độ chịu nén của bê tông

Bốn cột BTCT bị ăn mòn được ký hiệu là C9-40-3,15-20-2,27; C9-40-3,15-27-2,27; C9-40-3,15-40-2,27; và C9-40-3,15-50-2,27 tương ứng với cường độ chịu nén của bê tông lần lượt là 20 MPa, 27 MPa, 40 MPa, và 50 MPa được phân tích để xem xét ảnh hưởng của cường độ chịu nén của bê tông tới ứng xử của cột. Hình 10 thể hiện ảnh hưởng của cường độ chịu nén của bê tông tới đường cong tải trọng-chuyển vị của các dầm BTCT bị ăn mòn từ mô hình PTHH phi tuyến 3D. Từ Hình 10 và Bảng 3, có thể thấy rằng khi các tham số ρ , L/D , n , ρ_l không đổi, khả năng chịu lực (P_y , P_{max} , và $P_{80\%}$) tăng lên đáng kể khi cường độ chịu nén của bê tông tăng lên. Cụ thể, khi tăng cường độ chịu nén của bê tông từ 20 MPa lên 27 MPa, 40 MPa, và 50 MPa thì khả năng chịu lực tăng lên lần lượt là 16,6%, 35,4% và 47,4%. Có thể quan sát thấy rằng, khi tăng cường độ chịu nén của bê tông từ B20 lên B50 thì Δ_y và Δ_{max} có xu hướng giảm. Tuy nhiên, khi cường độ chịu nén của bê tông tăng từ B20 lên B50 thì chuyển vị thể hiện độ dẻo của cột $\Delta_{80\%}$ có tăng lên lần lượt là 12,2%, 16,0% và 18,6%. Điều này có sự khác biệt với Vu & Li [16], khi khả năng biến dạng cực hạn của cột không thay đổi đáng kể khi tăng cường độ chịu nén.

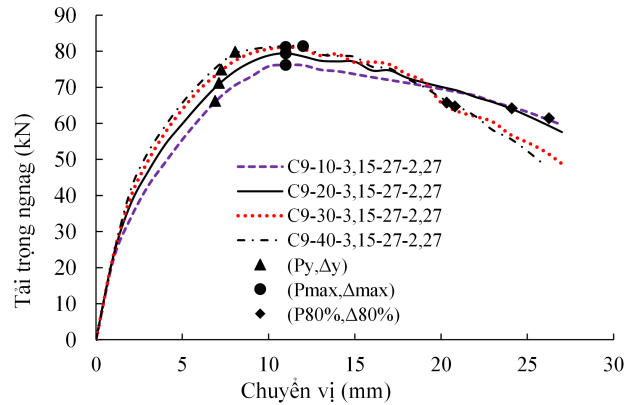


Hình 10. Ảnh hưởng của cường độ bê tông chịu nén tới đường cong tải trọng-chuyển vị của cột tròn BTCT bị ăn mòn

4.5. Ảnh hưởng của tỷ số nén

Trong thiết kế kháng chấn cho cột BTCT, tỷ số nén là một trong các tham số quan trọng ảnh hưởng tới ứng xử của cột. Trong nghiên cứu này, bốn cột BTCT bị ăn mòn được ký hiệu là C9-10-3,15-27-2,27; C9-20-3,15-27-2,27; C9-30-3,15-27-2,27; và C9-40-3,15-27-2,27 tương ứng với các L/D lần lượt là 0,1; 0,2; 0,3; và 0,4 được phân tích để xem xét ảnh hưởng của tỷ số nén tới sự làm việc của cột BTCT. Hình 11 thể hiện ảnh hưởng của tỷ số nén tới đường cong tải trọng-chuyển vị của các dầm BTCT bị ăn mòn từ mô hình PTHH phi tuyến 3D. Từ Hình 11 và Bảng 3, có thể thấy rằng khả năng

chịu lực (P_y , $P_{\max}$, và $P_{80\%}$) tăng lên khi tỷ số nén tăng lên. Ví dụ, khi tăng tỷ số nén từ 0,1 lên 0,2, 0,3 và 0,4 thì $P_{\max}$ tăng lên lần lượt 4,7%, 7,2%, và 7,4%. Giá trị chuyển vị của cột $\Delta_{\max}$ không bị ảnh hưởng đáng kể khi tăng tỷ số nén. Thêm nữa, khi tỷ số nén tăng lên thì chuyển vị của cột gồm có Δ_y và $\Delta_{80\%}$ có xu hướng tăng lên đáng kể. Cụ thể, chuyển vị $\Delta_{80\%}$ của cột giảm lần lượt 8,4%, 22,8% và 20,9% khi tăng tỷ số nén từ 0,1 lên 0,2, 0,3 và 0,4.



Hình 11. Ảnh hưởng của tỷ số nén tới đường cong tải trọng-chuyển vị của cột tròn BTCT bị ăn mòn

5. Kết luận

Tác động của sự ăn mòn cốt thép đến ứng xử kháng chấn của cột tròn BTCT đã được khảo sát đánh giá bằng cách sử dụng phương pháp PTHH phi tuyến 3D. Các tham số chính gồm mức độ ăn mòn cốt thép, tỷ lệ nhịp/chiều cao tiết diện, tỷ số nén, cường độ chịu nén của bê tông, và hàm lượng cốt thép dọc đã được xem xét đánh giá tới khả năng chịu tải trọng ngang và chuyển vị của cột BTCT bị ăn mòn. Các kết luận chính của nghiên cứu như sau:

- Mô hình PTHH phi tuyến 3D đã được đề xuất cho cột tròn BTCT có cốt thép đai xoắn mô phỏng ứng xử kháng chấn có kể đến sự suy giảm tính chất cơ lý của vật liệu bao gồm sự giảm chịu lực của bê tông lớp bảo vệ, sự suy giảm cường độ của bê tông lõi do sự suy giảm tính chất cơ lý của cốt thép đai và cốt thép dọc, sự suy giảm diện tích mặt cắt ngang, cường độ và biến dạng cực hạn của cốt thép bị ăn mòn và sự suy giảm bám dính giữa bê tông và cốt thép bị ăn mòn. Mô hình PTHH đề xuất có thể dự đoán khá chính xác khả năng chịu lực của cột tròn BTCT bị và không bị ăn mòn. Có thể thấy rõ, kết quả của mô hình số thể hiện rất tốt kết quả thí nghiệm thông qua đường cong tải trọng-chuyển vị thu được.

- Kết quả của mô hình PTHH cho thấy khả năng chịu tải trọng ngang và độ dẻo của cột tròn BTCT bị ăn mòn sẽ suy giảm khi mức độ ăn mòn tăng lên.

- Kết quả của mô hình PTHH thể hiện rằng khả năng chịu tải trọng ngang của cột tròn BTCT bị ăn mòn sẽ giảm khi tăng tỷ lệ nhịp/chiều cao tiết diện, giảm tỷ số nén, và giảm cường độ chịu nén của bê tông cũng như khi giảm hàm lượng cốt thép dọc. Ngược lại, độ dẻo của cột sẽ giảm với sự suy giảm tỷ lệ nhịp/chiều cao tiết diện, tăng tỷ số nén, giảm cường độ chịu nén của bê tông, và giảm hàm lượng cốt thép dọc.

Cần lưu ý rằng, việc sử dụng mức độ ăn mòn trung bình cho cốt thép dọc và cốt thép đai để mô phỏng như trên (do thiếu số liệu thực nghiệm được công bố) có thể ảnh hưởng tới độ chính xác của đường cong lực-chuyển vị của cột BTCT bị ăn mòn và cần được tiếp tục đánh giá ở các nghiên cứu tiếp theo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (HUCE) trong đề tài mã số 30-2024/KHXD. Tác giả cũng chân thành cảm ơn sự hỗ trợ của Ths. Dư Đức Hiếu và Ths. Hak Hai trong quá trình thực hiện đề tài.

Tài liệu tham khảo

- [1] Hime, W. G., Backus, L. A., Li, C. Q. (1999). Modeling time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures. Discussions and closure. *ACI Materials Journal*, 96(5).
- [2] Du, Y. G., Clark, L. A., Chan, A. H. C. (2005). [Effect of corrosion on ductility of reinforcing bars](#). *Magazine of Concrete Research*, 57(7):407–419.
- [3] 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.
- [4] Palsson, R., Mirza, M. S. (2002). [Mechanical response of corroded steel reinforcement of abandoned concrete bridge](#). *ACI Structural Journal*, 99(2):157–162.
- [5] Ou, Y.-C., Susanto, Y. T. T., Roh, H. (2016). [Tensile behavior of naturally and artificially corroded steel bars](#). *Construction and Building Materials*, 103:93–104.
- [6] Molina, F. J., Alonso, C., Andrade, C. (1993). [Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part 2—Numerical model](#). *Materials and Structures*, 26(9):532–548.
- [7] Akiyama, M., Frangopol, D. M., Matsuzaki, H. (2011). [Life-cycle reliability of RC bridge piers under seismic and airborne chloride hazards](#). *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40(15): 1671–1687.
- [8] Ou, Y., Fan, H., Nguyen, N. D. (2013). [Long-term seismic performance of reinforced concrete bridges under steel reinforcement corrosion due to chloride attack](#). *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(14):2113–2127.
- [9] Ou, Y.-C., Nguyen, N. D. (2016). [Influences of location of reinforcement corrosion on seismic performance of corroded reinforced concrete beams](#). *Engineering Structures*, 126:210–223.
- [10] Ou, Y.-C., Nguyen, N. D. (2016). [Modified axial-shear-flexure interaction approaches for uncorroded and corroded reinforced concrete beams](#). *Engineering Structures*, 128:44–54.
- [11] Nguyễn, N. Đ., Tân, N. N. (2019). [Dự báo khả năng chịu lực còn lại của cột BTCT chịu nén lệch tâm phẳng có cốt thép dọc bị ăn mòn](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD*, 13(2V): 53–62.
- [12] Tan, N. N., Nguyen, N. D. (2019). [An experimental study on flexural behavior of corroded reinforced concrete beams using electrochemical accelerated corrosion method](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE*, 13(1):1–11.
- [13] Meda, A., Mostosi, S., Rinaldi, Z., Riva, P. (2014). [Experimental evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns](#). *Engineering Structures*, 76:112–123.
- [14] Ma, Y., Che, Y., Gong, J. (2012). [Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading](#). *Construction and Building Materials*, 29:548–556.
- [15] Vu, N. S., Li, B. (2018). [Seismic Performance of Flexural Reinforced Concrete Columns with Corroded Reinforcement](#). *ACI Structural Journal*, 115(5).
- [16] 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.
- [17] D. Ferreira, J. M. (2020). *DIANA Documentation release 10.3*. DIANA FEA bv, The Netherlands.
- [18] Nam, B. H., Đạt, N. Q., Công, Đ. V., Hòa, N. T., Nhân, N. Đ., Minh, P. C., Kiên, N. T., Tân, N. N. (2021). [Mô phỏng ứng xử nén lệch tâm của cột bê tông cốt thép bị ăn mòn do ion clorua](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD*, 15(2V):65–78.
- [19] Nguyen, T. K., Nguyen, N. T. (2021). [Finite element investigation of the shear performance of corroded RC deep beams without shear reinforcement](#). *Case Studies in Construction Materials*, 15:e00757.
- [20] Ou, Y.-C., Nguyen, N. D. (2014). Plastic hinge length of corroded reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 111(5):1049.

- [21] Lim, S., Akiyama, M., Frangopol, D. M. (2016). [Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling](#). *Engineering Structures*, 127:189–205.
- [22] Vecchio, F. J., Collins, M. P. (1986). [The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear](#). *ACI Journal Proceedings*, 83(2):219–231.
- [23] Capé, M. (1999). *Residual service-life assessment of existing R/C structures*. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, and Milan University of Technology, Milan, Italy.
- [24] Nakamura, H., Higai, T. (2001). Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete. *Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads*, ASCE, ASCE Publications, 471–487.
- [25] Model Code 2010 (2013). *fib model code for concrete structures 2010*. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn.
- [26] Cornelissen, H., Hordijk, D., Reinhardt, H. (1986). Experimental determination of crack softening characteristics of normalweight and lightweight. *Heron*, 31(2):45–46.
- [27] Maaddawy, T. E., Soudki, K., Topper, T. (2005). [Analytical model to predict nonlinear flexural behavior of corroded reinforced concrete beams](#). *ACI Structural Journal*, 102(4).
- [28] CEB-FIB (1993). *CEB-FIP Model Code-Design Code 1990*. Bulletin d'Information 213/214, Comité Euro-International du Béton, Lausanne, Switzerland.