

DỰ ĐOÁN ĐƯỜNG CONG LỰC-CHUYỂN VỊ CỦA DẦM ĐƠN GIẢN BÊ TÔNG CỐT THÉP MỘT NHỊP CHỊU UỐN BỐN ĐIỂM CÓ CỐT THÉP BỊ ĂN MÒN

Nguyễn Đăng Nguyên^{a,*}, Dương Văn Hai^a

^a*Khoa Xây dựng dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng,
số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 16/08/2019, Sửa xong 12/09/2019, Chấp nhận đăng 12/09/2019

Tóm tắt

Ăn mòn cốt thép là một trong những vấn đề thường gặp đối các công trình bê tông cốt thép sau một thời gian công trình đưa vào sử dụng. Nghiên cứu này đề xuất mô hình dự báo đường cong lực-chuyển vị của dầm đơn giản bê tông cốt thép chịu uốn bốn điểm có cốt thép bị ăn mòn. Mô hình xem xét ảnh hưởng của sự ăn mòn cốt thép bằng cách sử dụng mô hình vật liệu suy giảm do ăn mòn cho bê tông, cốt thép, và lực dính. Diện tích còn lại của cốt thép dọc được tính toán dựa vào mức độ ăn mòn trung bình. Ảnh hưởng của cốt đai bị ăn mòn đến ứng xử nén của bê tông lõi và lực dính được tính toán sử dụng diện tích mặt cắt ngang còn lại nhỏ nhất. Kết quả thí nghiệm uốn bốn điểm của 11 dầm không bị và bị ăn mòn trong các tài liệu tham khảo được sử dụng để đánh giá mức độ chính xác của mô hình dự báo.

Từ khoá: dầm bê tông cốt thép bị ăn mòn; khả năng chịu lực; chuyển vị; sự ăn mòn; phân tích mômen-độ cong.

PREDICTION OF LATERAL FORCE-DISPLACEMENT RESPONSE OF SIMPLE SPAN CORRODED REINFORCED CONCRETE BEAMS SUBJECTED TO FOUR-POINT BENDING

Abstract

Corrosion of steel reinforcement is a common issue faced by reinforced concrete structures after an in-service period of certain years. This paper proposes a prediction model to predict force-displacement response of simple span corroded reinforced concrete beams subjected to four-point bending. The proposed model considers the effect of reinforcement corrosion by using the corroded constitutive models for concrete, steel, and bonding. Residual cross-sectional area of steel longitudinal reinforcement was computed based on average corrosion weight loss. Minimum residual diameter of stirrups was used to compute confinement effect and bond strength. Experimental results of eleven uncorroded and corroded RC beams under four-point bending taken from literature were used to examine the accuracy of the model.

Keywords: corroded RC beam; load-carrying capacity; displacement; corrosion; sectional analysis.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(4V\)-08](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(4V)-08) © 2019 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Ăn mòn cốt thép là một trong những vấn đề thường gặp đối các công trình bê tông cốt thép (BTCT) sau một thời gian công trình đưa vào sử dụng. Nó làm giảm cường độ và độ dẻo của cốt thép [1–6]. Hơn nữa, sự ăn mòn tạo nên rỉ sét có sự giãn nở về thể tích tạo nên ứng suất kéo trong bê tông và làm cho bê tông suy giảm khả năng chịu lực [7, 8]. Sự ăn mòn cốt thép cũng làm cho lực dính giữa

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

bê tông và cốt thép bị giảm đi [9, 10]. Do đó, sự ăn mòn sẽ làm cho độ cứng, khả năng chịu lực và biến dạng của cấu kiện bê tông cốt thép bị suy giảm [3, 11–13]. Kết quả là sự an toàn và chức năng phục vụ của công trình bị ảnh hưởng. Việt Nam có một bờ biển rất dài và các thành phố lớn nằm sát gần bờ biển. Do đó, các công trình bê tông cốt thép ở các thành phố này rất dễ bị ăn mòn do gió thổi từ biển vào mang theo độ ẩm và hàm lượng muối cao. Vì vậy, sự ăn mòn cốt thép chắc chắn là một vấn đề quan trọng thu hút nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu trong thời gian gần đây. Tại Việt Nam, những nghiên cứu về vấn đề này vẫn chưa nhiều, một số nghiên cứu thường chỉ xét đến các biện pháp chống và giảm ăn mòn mà chưa xét đến khả năng làm việc của cấu kiện khi đã bị ăn mòn. Một số thông tin về ăn mòn cốt thép rất mạnh xảy ra tại một số công trình BTCT tại Việt Nam có thể được tham khảo ở tài liệu [14].

Dầm BTCT dễ bị suy giảm khả năng chịu lực do sự tấn công của các ion Cl^- làm cho cốt thép bị ăn mòn. Phần lớn các nghiên cứu thường tập trung vào dự đoán khả năng chịu lực còn lại của dầm BTCT có cốt thép bị ăn mòn. Dự đoán khả năng biến dạng của dầm BTCT là cần thiết và ý nghĩa trong việc nghiên cứu dạng phá hoại của dầm BTCT có cốt thép bị ăn mòn. Phần lớn các nghiên cứu tập trung đến ảnh hưởng của sự ăn mòn đến tính chất vật liệu và ứng xử kết cấu/cấu kiện. Trong khi, nghiên cứu về dự đoán chuyển vị của dầm BTCT có cốt thép bị ăn mòn chưa được quan tâm đúng mức. Các dầm luôn được thiết kế để đảm bảo phá hoại dẻo do uốn và các dạng phá hoại khác như cắt và uốn cắt cần phải tránh bằng các biện pháp gia cường, biến dạng do cắt được bỏ qua trong tổng biến dạng khi tỉ số chiều dài nhịp/chiều cao tiết diện lớn hơn ba lần [15, 16]. Bài báo này tập trung vào dự đoán khả năng chịu lực và chuyển vị của dầm BTCT có cốt thép bị ăn mòn dựa trên mô hình dự báo cho dầm BTCT sử dụng các mô hình vật liệu suy giảm do ảnh hưởng của sự ăn mòn cho bê tông, cốt thép, và lực dính. Kết quả thí nghiệm của 11 dầm BTCT bị và không bị ăn mòn chịu uốn bốn điểm (với tỉ số chiều dài nhịp chịu cắt/chiều cao tiết diện lớn hơn ba lần) trong các nghiên cứu thực nghiệm của Du và cs. [3] và Maaddawy và cs. [17] được sử dụng để đánh giá mức độ chính xác của mô hình dự báo

2. Mô hình vật liệu do tác động của ăn mòn cốt thép

2.1. Mô hình cốt thép chịu kéo

Đường cong ứng suất-biến dạng của cốt thép khi chịu kéo (công thức (1)) được xác định theo mô hình Mander [18] nhưng với đường chảy dẻo được chỉnh sửa bằng việc áp dụng một lượng nhỏ biến dạng củng cố ($E'_s = 0,02E_s$) theo như khuyến cáo của Sezen và Setzler [19].

$$f_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & \text{khi } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sY} \\ f_{sY} + 0,02E_s(\varepsilon_s - \varepsilon_{sY}) & \text{khi } \varepsilon_{sY} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh} \\ f_{su} + (f_{sh} - f_{su}) \left(\frac{\varepsilon_{su} - \varepsilon_s}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}} \right)^2 & \text{khi } \varepsilon_{sh} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su} \end{cases} \quad (1)$$

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 ứng suất chảy và biến dạng chảy của cốt thép; f_{sh} và ε_{sh} lần lượt là ứng suất ($f_{sh} = f_{sY} + 0,02E_s(\varepsilon_{sh} - \varepsilon_{sY})$) và biến dạng ứng với điểm tăng cứng của cốt thép; f_{su} và ε_{su} lần lượt là ứng suất và biến dạng cực hạn của cốt thép; và E_s mô đun đàn hồi của cốt thép.

Sự ăn mòn làm suy giảm diện tích mặt cắt ngang của cốt thép. Trong nghiên cứu này, diện tích mặt cắt ngang còn lại của cốt thép dọc bị ăn mòn được mô hình bằng công thức (2) với giả thiết ăn mòn là đồng đều suốt theo chiều dài thanh thép:

$$A_s(\Delta w) = \frac{\pi D_o^2}{4} (1 - 0.01 \times \Delta w) \quad (2)$$

trong đó $A_s(\Delta w)$ là diện tích mặt cắt ngang của thanh cốt thép bị ăn mòn; Δw là khối lượng cốt thép bị ăn mòn trung bình (%); and D_o là đường kính của thanh cốt thép không bị ăn mòn.

Ứng suất chảy và ứng suất cực hạn có mối liên quan đến diện tích mặt cắt ngang nhỏ nhất hơn là diện tích mặt cắt ngang trung bình như giả thiết ở công thức (2). Để kể đến hiện tượng này, ứng suất chảy và ứng suất cực hạn của cốt thép được tính toán dựa vào công thức (3) [2]. Tỷ số giữa ứng suất cực hạn và ứng suất chảy, biến dạng cứng cổ, và mô đun đàn hồi không bị ảnh hưởng bởi sự ăn mòn [1], và do đó, các giá trị ứng với cốt thép không bị ăn mòn được sử dụng với những tính chất cơ lý này.

$$f_s^C = (1 - \beta \times \Delta w) f_0 \quad (3)$$

trong đó f_s^C là ứng suất chảy (f_{sY}^C) hoặc ứng suất cực hạn (f_{su}^C) của thanh cốt thép bị ăn mòn; β là hệ số suy giảm cường độ; và f_0 là ứng suất chảy (f_{sY0}) hoặc ứng suất cực hạn (f_{su0}) của thanh thép không bị ăn mòn. Trong nghiên cứu này, $\beta = 0,005$ như đề xuất của Du và cs. [2].

Chú ý rằng ứng suất chảy và ứng suất cực hạn của cốt thép không bị ảnh hưởng bởi sự ăn mòn khi mà diện tích mặt cắt ngang nhỏ nhất còn lại của thanh cốt thép được sử dụng để xác định ứng suất chảy và ứng suất cực hạn [6]. Do đó, khi sử dụng diện tích mặt cắt ngang nhỏ nhất còn lại để mô phỏng cốt thép bị ăn mòn thì giá trị của ứng suất chảy và ứng suất cực hạn ứng với khi cốt thép không bị ăn mòn được gán cho thanh cốt thép bị ăn mòn. Khi cốt đai được sử dụng để tính toán hiệu ứng bó ngang thì diện tích mặt cắt ngang nhỏ nhất còn lại được sử dụng. Đó là bởi vì sự nở ngang của bê tông dưới tác dụng của ứng suất nén có xu hướng gây ra ứng suất phân bố đều trong cốt đai, do đó diện tích mặt cắt ngang nhỏ nhất còn lại sẽ đóng vai trò quyết định ở trạng thái giới hạn.

Do sự tập trung ứng suất và biến dạng tại các vị trí ăn mòn điểm, biến dạng cực hạn của cốt thép bị ăn mòn sẽ bị suy giảm [1, 4, 5]. Biến dạng cực hạn còn lại của thanh cốt thép bị ăn mòn có thể được dự báo bằng công thức (4), trong đó mối quan hệ tuyến tính được giả thiết giữa khối lượng ăn mòn trung bình và biến dạng cực hạn còn lại được đề xuất bởi các nhà nghiên cứu [1, 5].

$$\varepsilon_{su}^C = (1 - \alpha_i \times \Delta w) \varepsilon_{su0} \quad (4)$$

trong đó ε_{su}^C là biến dạng cực hạn của thanh cốt thép bị ăn mòn; α_i là hệ số biến dạng cực hạn ($i=t$ đối với cốt đai và $i=l$ đối với cốt thép dọc); và ε_{su0} là biến dạng cực hạn của cốt thép không bị ăn mòn. Hệ số α_i biến đổi từ 0 tới 0,06 tùy thuộc vào môi trường ăn mòn [1, 5]. Do phân tán lớn của kết quả thí nghiệm [1] nên rất khó để sử dụng một giá trị duy nhất của α_i để bắt được chuyển vị của dầm mà ở đó thanh thép bị đứt gãy trong phần mô hình của nghiên cứu này. Thay vào đó, giá trị của α_i được lấy bằng 0,03 với bước phân tích ban đầu. Hình 1 (a) biểu diễn một thí dụ về mối quan hệ đường cong ứng suất-biến dạng khi chịu kéo của thanh cốt thép bị và không bị ăn mòn.

2.2. Mô hình cốt thép khi chịu nén

Đường cong ứng suất-biến dạng khi nén được mô hình dựa vào đường cong khi kéo như được thể hiện ở công thức (1) nhưng được hiệu chỉnh bởi Dhakal và Maekawa [20] để kể đến ảnh hưởng của sự uốn dọc. Ảnh hưởng của sự ăn mòn được xem xét bởi sự hiệu chỉnh thông số uốn dọc (λ_p^C) (công thức (5)) được sử dụng để xây dựng nên mô hình Dhakal và Maekawa [20]. Trong công thức (6) cường độ chảy khi nén (f_{sYc}^C), đường kính cốt thép (D_c) và chiều dài uốn dọc (L_{bl}) bị thay đổi do sự ăn mòn. Sự suy giảm về cường độ chảy được xác định theo công thức (6), trong đó hệ số suy giảm (β_c) phụ thuộc vào hệ số độ mảnh của thanh cốt thép bị ăn mòn [20]. Chiều dài L_{bl} liên quan đến độ cứng uốn trung bình của cốt thép dọc và độ cứng dọc trục của cốt đai trong việc cản trở sự uốn dọc [21]. Độ cứng uốn dọc trung bình của cốt dọc bị ăn mòn được tính toán sử dụng cường độ chảy suy giảm (f_{sYc}^C) và đường

kính cốt thép (D_c) tương tự như được dùng ở công thức (5), và độ cứng dọc trung của cốt đai do bị ăn mòn được xác định căn cứ vào diện tích mặt cắt ngang còn lại do sự ăn mòn, trong đó một nhánh cốt đai được mô hình sử dụng diện tích mặt cắt ngang trung bình còn lại và nhánh cốt đai còn lại được mô hình sử dụng diện tích mặt cắt ngang bé nhất, tương tự như sự mô hình do ảnh hưởng của lực cắt. Thí dụ về ứng xử nén của cốt thép bị và không bị ăn mòn được thể hiện ở Hình 1(b).

$$\lambda_p^C = \sqrt{\frac{f_{sYc}^C L_{bl}}{100 D_c}} \text{ (Đơn vị: MPa)} \quad (5)$$

$$f_{sYc}^C = f_{sY} (1 - \beta_c \times \Delta w) \quad (6)$$

trong đó λ_p^C là thông số uốn dọc của cốt thép bị ăn mòn; f_{sYc}^C là ứng suất chảy của cốt thép bị ăn mòn khi nén; D_c là đường kính cốt thép còn lại sau khi bị ăn mòn được xác định dựa vào khối lượng ăn mòn trung bình $= D_o \sqrt{1 - 0,01 \times \Delta w}$; β_c là hệ số suy giảm phụ thuộc vào hệ số uốn dọc ($\beta_c = 0,005$ với $L_{bl}/D_c \leq 5$; $\beta_c = 0,0065$ với $5 < L_{bl}/D_c \leq 10$; và $\beta_c = 0,0125$ với $L_{bl}/D_c > 10$ và L_{bl} = chiều dài uốn dọc).

2.3. Mô hình bê tông

Bê tông lớp bảo vệ khi chịu nén được mô hình sử dụng mô hình bê tông không được kiểm chế nở ngang của Mander [22]. Khi sự ăn mòn xảy ra trong cốt thép thì sự giãn nở về thể tích do các sản phẩm của sự ăn mòn gây ra ứng suất kéo cho lớp bảo vệ và làm suy giảm ứng xử khi nén của nó. Trong nghiên cứu này, sự suy giảm ứng suất khi nén của bê tông lớp bảo vệ do ăn mòn được mô phỏng sử dụng mô hình mềm hóa bê tông theo đề xuất của Vecchio và Collins [23] thông qua hệ số mềm (ξ) tính bởi công thức (7). Biểu dạng kéo được tính toán dựa vào tổng bề rộng các vết nứt bởi công thức (8). Ứng suất nén của bê tông lớp bảo vệ do ảnh hưởng của sự ăn mòn được xác định bằng công thức (10).

$$\xi = \frac{1}{0,8 + 0,34 \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_c}} \leq 1 \quad (7)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\sum 2\pi (v_{cr} - 1) x}{p_{cp}} \quad (8)$$

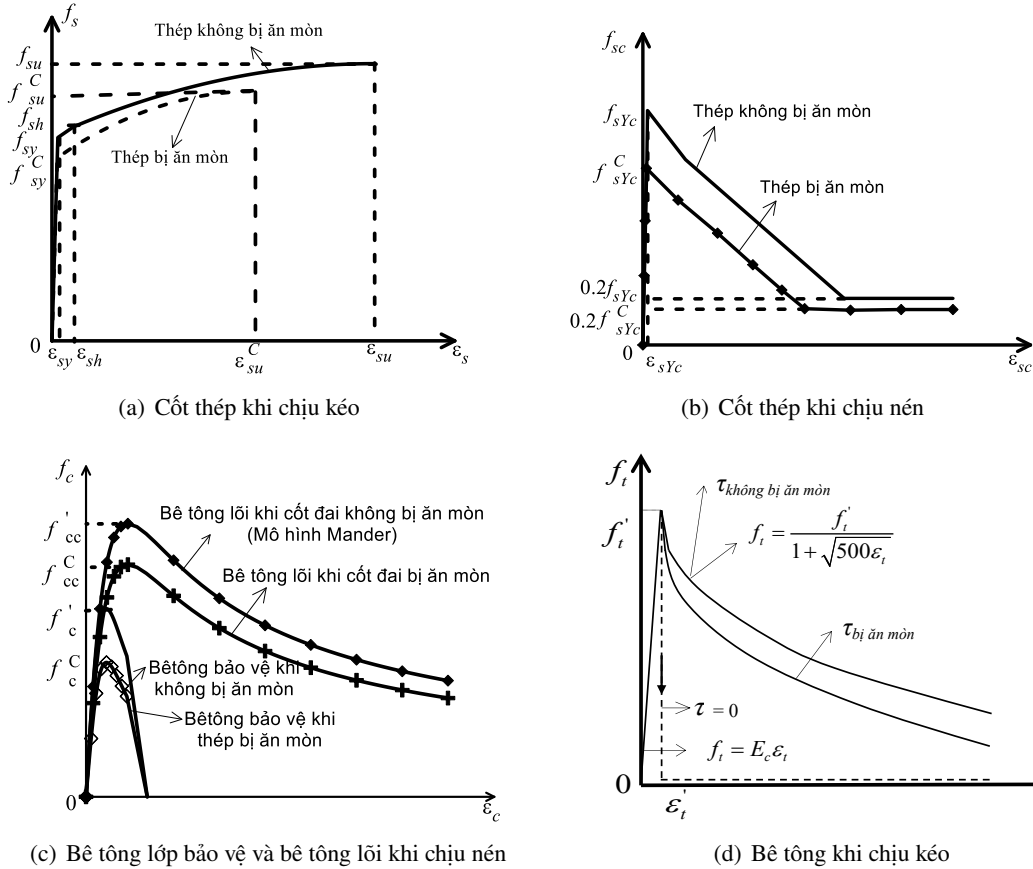
$$x = \frac{D_o - D_c}{2} \quad (9)$$

$$f_c^C = \xi \times f_c' \quad (10)$$

trong đó f_c' là cường độ chịu nén của bê tông không bị ảnh hưởng bởi sự ăn mòn; f_c^C là cường độ chịu nén của bê tông bị ảnh hưởng bởi sự ăn mòn; ε_r là ứng suất kéo gây ra bởi các vết nứt do sự ăn mòn; v_{cr} là tỉ số của đường kính tăng lên do giãn nở thể tích của sản phẩm ăn mòn với đường kính bị giảm do ăn mòn của cốt thép; x là bề dày ăn mòn trung bình của thanh cốt thép bị ăn mòn; D_o là đường kính ban đầu của cốt thép khi chưa bị ăn mòn; và D_c là đường kính cốt thép sau khi bị ăn mòn. Giá trị của v_{cr} phụ thuộc vào sản phẩm ăn mòn, và được thảo luận trong nghiên cứu của Liu và Weyers [8]. Giá trị $v_{cr} = 2$ được đề xuất bởi Molina và cs. [7] từ các nghiên cứu thực nghiệm, và đã được sử dụng trong phân tích phần tử hữu hạn [11, 12, 24, 25].

Lớp bê tông lõi được mô hình dựa trên mô hình bê tông kiểm chế nở ngang theo Mander [22]. Sự ăn mòn của cốt đai là nguyên nhân chính ảnh hưởng đến ứng xử của bê tông lõi. Như đã được đề cập từ trước, thép đai bị ăn mòn được mô hình sử dụng diện tích mặt cắt ngang còn lại nhỏ nhất với

ứng suất chảy và ứng suất cực hạn của cốt thép không bị ăn mòn và biến dạng cực hạn bị suy giảm như công thức (4). Hình 1(c) thể hiện ảnh hưởng của sự ăn mòn tới lớp bê tông bảo vệ và bê tông lõi. Bê tông khi chịu kéo được mô hình bởi mô hình của Collins và cs. [26] có điều chỉnh để kể đến ảnh hưởng của lực dính. Ảnh hưởng của sự ăn mòn đến lực dính và ứng xử chịu kéo của bê tông được trình bày ở phần tiếp theo.



Hình 1. Mô hình vật liệu với sự ăn mòn và không ăn mòn

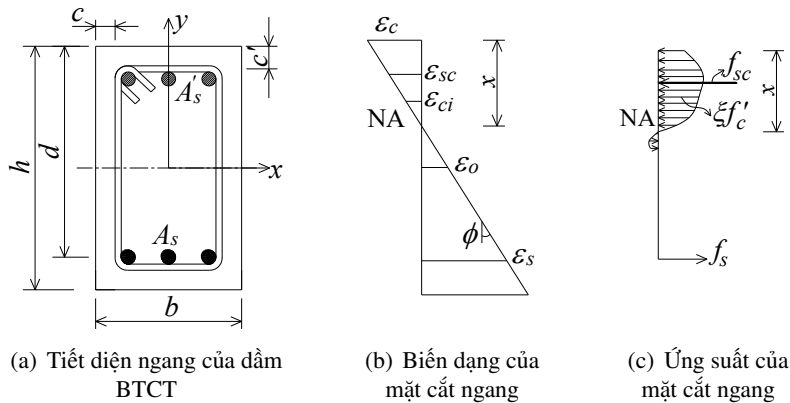
2.4. Lực dính

Ăn mòn của cốt thép dọc và/hoặc cốt thép đai làm giảm lực dính giữa cốt thép và bê tông. Sự suy giảm về lực dính ảnh hưởng tới khả năng của bê tông trong việc nhận ứng suất kéo từ cốt thép (tension stiffening). Khi lực dính bị mất hoàn toàn do sự ăn mòn, ứng suất kéo trong bê tông giảm về không sau khi đạt ứng suất kéo lớn nhất. Nói một cách khác, bê tông không thể nhận lực kéo từ cốt thép (Hình 1(d)). Với cốt thép không bị ăn mòn, ứng xử kéo của bê tông tuân theo mô hình của Collins và cs. [26] như được đề cập ở trước (Hình 1(d)). Khi sự ăn mòn xảy ra nhưng chưa làm cho lực dính giảm về không, ứng xử kéo của bê tông được xác định bằng cách nội suy giữa ứng xử chịu kéo khi không có ăn mòn xảy ra và ứng xử kéo khi lực dính bằng 0 (Hình 1(d)). Lực dính của cốt thép với bê tông khi bị và không bị ăn mòn được xác định theo đề xuất bởi Maaddawy và cs. [27]. Trong nghiên cứu này, sự suy giảm của lực dính do đóng góp của cốt đai do sự ăn mòn được mô phỏng bằng cách sử dụng diện tích còn lại nhỏ nhất của cốt đai.

3. Kiểm chứng mô hình

3.1. Phân tích mômen-độ cong

Mặt cắt ngang tiết diện (Hình 2(a)) được chia nhỏ thành các thớ vật liệu với tính chất mỗi lớp vật liệu tương ứng với mô hình vật liệu đã được trình bày ở mục 2 “Mô hình vật liệu do tác động của ăn mòn cốt thép”. Nghiên cứu này sử dụng phần mềm XTRACT 3.0.8 [28] để phân tích mômen-độ cong. Với một độ cong (ϕ) cho trước và trọng tâm của các thớ vật liệu đã biết, biến dạng của mỗi thớ vật liệu (cốt thép và bê tông) trên mặt cắt ngang được xác định với giả thiết tiết diện trước và sau biến dạng là phẳng (Hình 2(b)). Các lực trong mỗi thớ bê tông và các lớp cốt thép được tính toán bằng cách nhân các ứng suất của thớ vật liệu (Hình 2(c)) với diện tích tương ứng mà các ứng suất tác dụng. Xem xét sự cân bằng lực trên mặt cắt ngang, khi lực dọc tác dụng trên mặt cắt ngang và tổng lực dọc từ các thớ vật liệu có sự chênh lệch phù hợp, giá trị mô men M ứng với độ cong (ϕ) cho trước được tính toán bằng cách cộng các mô men do các lực trong cốt thép và bê tông lấy đối với đường trung hòa NA của mặt cắt. Độ cong (ϕ) được tăng lên và quá trình thực hiện được lặp lại cho đến khi vật liệu trên mặt cắt ngang đạt đến giá trị cực hạn xác định trước, hoặc bê tông lõi bị nén vỡ hoặc cốt thép dọc chịu kéo bị đứt. Biến dạng cực hạn khi kéo của cốt thép ϵ_{su}^C được xác định từ công thức (4). Bê tông lõi bị nén vỡ khi thớ ngoài của lớp bê tông lõi đạt giá trị cực hạn xác định theo Mander và cs. [22] có kể đến sự ăn mòn của cốt đai (được trình bày ở mục 2.3). Tập hợp các giá trị (M, ϕ) được lập thành biểu đồ mô men và độ cong.



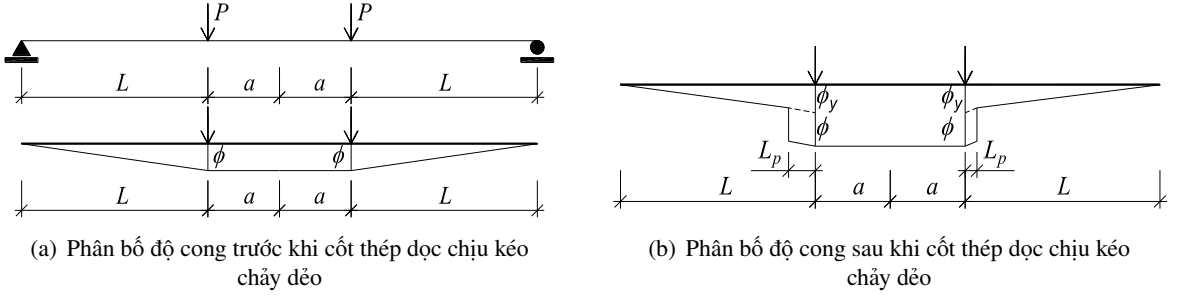
Hình 2. Phân bố biến dạng và ứng suất của mặt cắt ngang dầm BTCT

3.2. Tính toán chuyển vị và lực tác dụng

Xét dầm BTCT được gia tải uốn bốn điểm như Hình 3. L là khoảng cách từ điểm gia tải đến gối tựa. a là khoảng cách từ điểm giữa dầm đến điểm đặt lực P . Chuyển vị tại giữa dầm (Δ_g) với thí nghiệm uốn bốn điểm được xác định từ hai thành phần (công thức (11)):

$$\Delta_g = \Delta_f + \Delta_{cắt} \quad (11)$$

trong đó Δ_g là tổng chuyển vị giữa dầm; $\Delta_{cắt}$ là chuyển vị do lực cắt và Δ_f là chuyển vị do uốn. Như đã đề cập ở mục giới thiệu, các dầm BTCT được dùng trong nghiên cứu này có tỉ số chiều dài nhịp/chiều cao tiết diện lớn hơn ba nên có thể bỏ qua biến dạng cắt, $\Delta_{cắt} = 0$ [15].



Hình 3. Mô hình dầm BTCT chịu uốn bốn điểm

Chuyển vị do uốn của dầm đóng góp đáng kể vào chuyển vị tổng của dầm, có thể được tính toán bằng cách tích phân độ cong của mặt cắt dọc theo suốt chiều dài dầm:

$$\Delta_f = \frac{1}{l} \int_0^l \phi(z) z d(z) \quad (12)$$

trong đó \$l\$ là chiều dài của dầm tính từ điểm tính chuyển vị đến gối tựa và \$\phi(z)\$ là độ cong của mặt cắt ở khoảng cách \$z\$ tính từ điểm gia tải đến gối tựa được xác định bằng phân tích moment-độ cong.

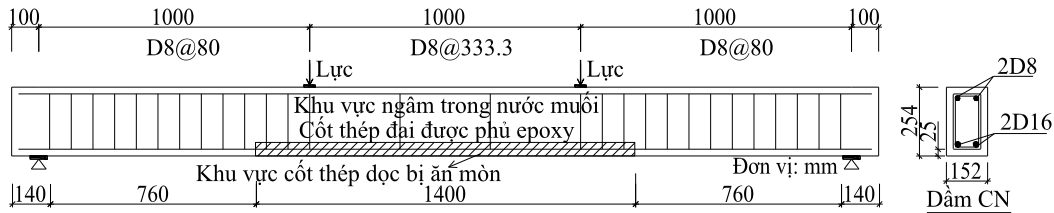
Chuyển vị do uốn \$\Delta_f\$ sau khi chảy dẻo của dầm có thể được tính toán nhờ chiều dài biến dạng dẻo (\$L_p\$). Độ cong của dầm được giả thiết phân bố đều suốt chiều dài biến dạng dẻo \$L_p\$ [29]. Với thí nghiệm uốn bốn điểm như Hình 3, để thể hiện sự chuyển trạng thái từ đàn hồi sang dẻo, công thức (12) có thể được viết lại bằng cách sử dụng mô hình chiều dài biến dạng dẻo [29] như sau:

$$\Delta_f = \begin{cases} \frac{1}{3} \phi L^2 + 0,5 \phi L(2L + a) & \phi < \phi_y \\ \frac{1}{3} \phi_y L^2 + (\phi - \phi_y) L_p (L - 0,5 L_p) + 0,5 \phi L(2L + a) & \phi \geq \phi_y \end{cases} \quad (13)$$

trong đó \$\phi\$ là độ cong của mặt cắt dầm tại một điểm bất kỳ được xác định bằng phân tích mômen-độ cong (\$\phi = \varepsilon_s / (d - x) = \varepsilon_c / x\$); \$\phi_y\$ là độ cong của mặt cắt dầm ứng với điểm bắt đầu chảy dẻo của cốt thép dọc chịu kéo được xác định bằng phân tích moment-độ cong (\$\phi_y = \varepsilon_{sy}^C / (d - x)\$); \$d\$ là chiều cao làm việc của dầm; \$x\$ là chiều cao vùng nén của bê tông; \$\varepsilon_s, \varepsilon_c\$ lần lượt biến dạng của cốt thép và bê tông ứng với góc xoay \$\phi\$; và \$\varepsilon_{sy}^C\$ là biến dạng chảy của cốt thép dọc ứng với cường độ chảy \$f_{sy}^C\$ xác định theo công thức (3).

Giá trị \$L_p\$ cho cấu kiện không bị ăn mòn được lấy bằng \$0,5h\$ [30–33]. Với dầm BTCT bị ăn mòn, giá trị \$L_p\$ được xác định dựa vào giá trị \$L_p\$ như đề xuất bởi Ou và Nguyen [25]. Giá trị \$L_p\$ được giảm 98%, 96%, 88%, and 80% với các mức độ ăn mòn lần lượt là 10%, 15%, 20%, và 25%. Nội suy tuyến tính được áp dụng với mức độ ăn mòn thấp hơn 25%. Với mức độ ăn mòn lớn hơn 25%, giá trị \$L_p\$ được giả thiết không đổi như đối với mức độ ăn mòn là 25%.

Ba điểm quan trọng sẽ được chỉ rõ trên đường cong lực-chuyển vị gồm: điểm đứt gãy của cốt thép dọc chịu kéo, điểm mất ổn định cốt thép dọc chịu nén, và điểm lớp bê tông bảo vệ chịu nén bị vỡ. Biến dạng gây vỡ lớp bê tông bảo vệ được giả thiết là 0,0038 [29]. Cốt thép chịu kéo sẽ bị đứt gãy khi biến dạng của nó đạt đến biến dạng như được định nghĩa ở công thức (4). Sự mất ổn định cốt thép dọc chịu nén xảy ra khi cốt thép dọc chịu nén đạt biến dạng chảy [21]. Lực tác dụng \$P\$ của dầm BTCT được xác định bằng cách chia giá trị \$M\$ cho nhịp chịu cắt \$L\$ (Hình 4).



Hình 4. Chi tiết dầm thí nghiệm của Maaddawy và cs. [17]

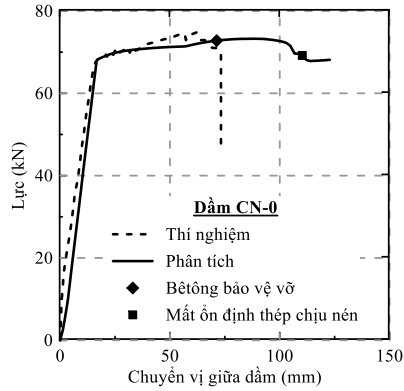
3.3. Kiểm chứng mô hình dự báo với kết quả thí nghiệm

Hai nhóm thí nghiệm được chọn để kiểm chứng kết quả phân tích của mô hình đề xuất với kết quả thực nghiệm. Nhóm 1 được thực hiện bởi Maaddawy và cs. [17] và nhóm 2 được thực hiện bởi Du và cs. [3].

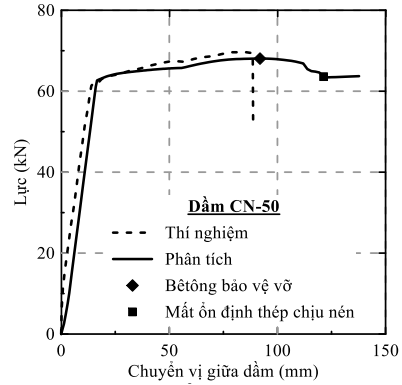
Dầm thí nghiệm bởi Maaddawy và cs. [17] có kích thước mặt cắt ngang dầm là 152×254 mm, với chiều cao làm việc $h_o = 214$ mm, và chiều dài của dầm là 3200 mm. Các dầm có cốt thép $2\phi 16$ (hàm lượng 1,24%) đặt ở phần chịu kéo và $2\phi 8$ đặt ở phần chịu nén. Dầm được kê lên hai gối tựa đơn giản có khoảng cách là 3000 mm và được gia tải bằng hai lực tập trung cách hai gối tựa là 1000 mm, xem Hình 4. Tính chất cơ lý của cốt thép, bê tông dùng chế tạo dầm và chi tiết về quá trình thí nghiệm có thể tham khảo ở tài liệu Maaddawy và cs. [17]. Hàm lượng thép bị ăn mòn về khối lượng lần lượt là 8,9%, 14,2%, 22,2%, và 31,6%. Hình 5 thể hiện so sánh kết quả thí nghiệm và kết quả từ mô hình phân tích. Từ Hình 5 thấy rằng, mô hình đề xuất dự đoán khá tốt đường cong lực-chuyển vị của dầm về độ cứng ban đầu, khả năng chịu lực của dầm, và chuyển vị của dầm trước khi cốt thép chảy dẻo.

Chuyển vị cực hạn từ mô hình dự báo và kết quả thí nghiệm có mức độ sai lệch là do các yếu tố như sự biến thiên về tính chất cơ lý của cốt thép hoặc/và sự biến thiên về biến dạng cực hạn của bê tông. Kết quả thí nghiệm của ba dầm CN-0, CN-50, CN-110 cho chuyển vị cực hạn của dầm là nhỏ hơn so với mô hình dự báo. Với các dầm này, sự phá hoại được mô hình dự báo bắt đầu bằng việc lớp bê tông bảo vệ bị vỡ, theo sau đó là lớp cốt thép dọc chịu nén bị mất ổn định. Nguyên nhân có thể do thí nghiệm của dầm BTCT đã được dừng ngay sau khi lớp bê tông bảo vệ bị nứt trong khi lớp bê tông lõi chưa bị phá hoại. Mô hình dự báo sử dụng biến dạng cực hạn trung bình (với $\alpha_i = 0,03$ trong công thức (4)) cho kết quả dự báo là dầm bị phá hoại do thép dọc bị kéo đứt và chuyển vị của dầm khá tốt với dầm CN-210 nhưng có sự sai số lớn hơn với dầm CN-310. Nguyên nhân có thể là do độ cứng và khả năng chịu lực của dầm liên quan đến toàn bộ mức độ ăn mòn của các thanh cốt thép dọc nhưng sự đứt gãy cốt thép liên quan nhiều hơn tới thanh cốt thép mà có mức độ ăn mòn lớn nhất trong số các thanh bị ăn mòn. Thêm nữa, với một mức độ ăn mòn thì biến dạng cực hạn của cốt thép bị ăn mòn biến động nhiều hơn so với ứng suất chảy và ứng suất cực hạn của cốt thép [1, 2].

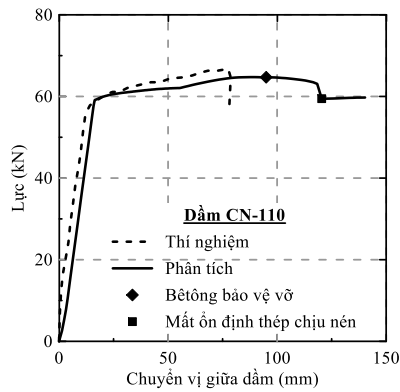
Dầm thí nghiệm thực hiện bởi Du và cs. [3] thể hiện ở Hình 6 có kích thước $150 \times 200 \times 2100$ mm; khoảng cách giữa hai gối tựa đơn giản là 1800 mm; được gia cường với thép chịu nén lớp trên lần lượt là 0,56 và 0,87%, cốt đai sử dụng $\phi 8a150$, và cốt thép chịu kéo lớp dưới được gia cường với hàm lượng lần lượt là 0,87% ($2\phi 12$), 1,6% ($2\phi 16$) và 3,2% ($4\phi 16$). Tính chất cơ lý của cốt thép, bê tông dùng chế tạo dầm và chi tiết về quá trình thí nghiệm có thể tham khảo ở tài liệu Du và cs. [3]. Chiều dày lớp bê tông bảo vệ với cốt thép dọc là 20 mm. Mức độ ăn mòn cốt thép dọc lớp dưới của dầm T164, T682, và T280 lần lượt là 10,3%, 8,8%, và 11,1%. Kết quả so sánh giữa thí nghiệm và phương pháp phân tích đề xuất được thể hiện ở Hình 7. Từ Hình 7 thấy rằng, độ cứng và khả năng chịu lực của dầm được dự báo khá tốt. Đối với các dầm có mức độ ăn mòn nhỏ (T280, T680, T682, T160, T164), sự phá hoại của dầm bắt đầu từ bê tông bảo vệ bị vỡ và kế tiếp là sự mất ổn định cốt thép dọc chịu



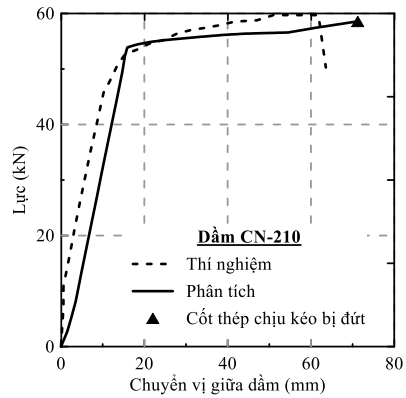
(a) Dầm CN-0



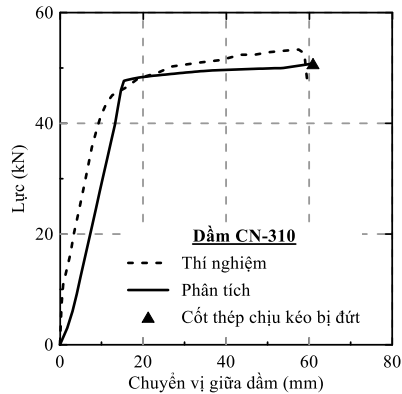
(b) Dầm CN-50



(c) Dầm CN-110



(d) Dầm CN-210

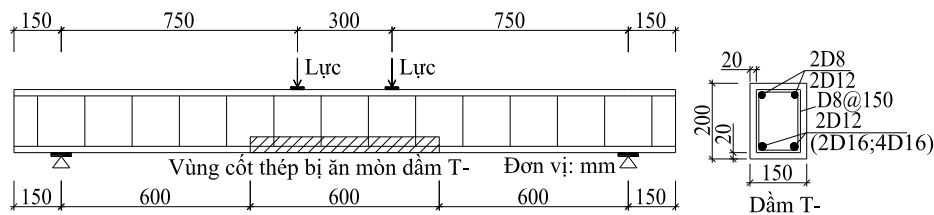


(e) Dầm CN-310

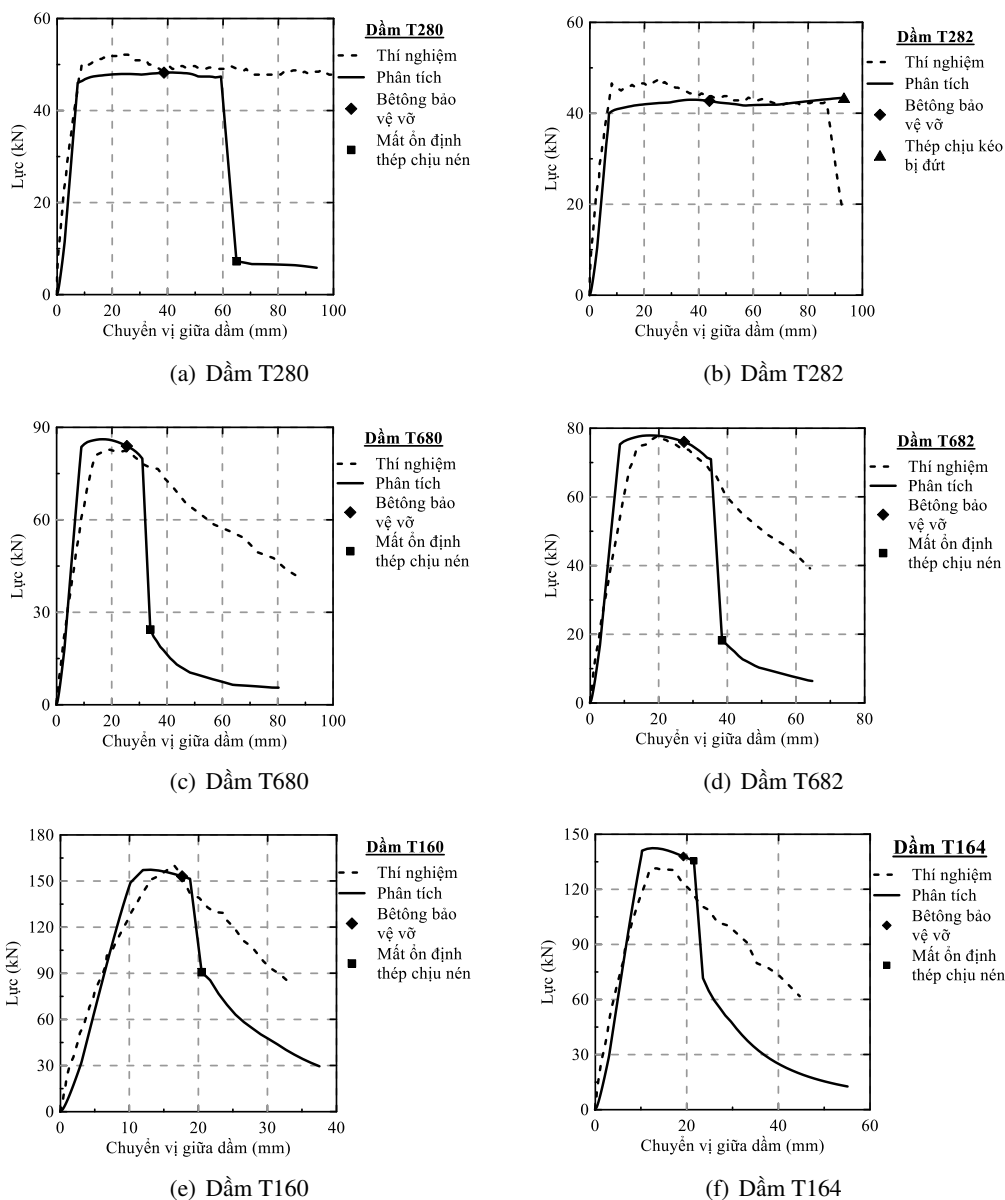
Hình 5. So sánh kết quả dự đoán với thí nghiệm dầm của Maaddawy và cs. [17]

nén. Dầm T282 có mức độ ăn mòn 11,1%, sự phá hoại được dự báo là do cốt thép chịu kéo bị đứt. Sự phá hoại trong mô hình dự báo của các dầm này phù hợp với kết quả thí nghiệm. Chuyển vị cực hạn từ mô hình dự báo và kết quả thí nghiệm cũng có sự sai khác với kết quả thí nghiệm. Một số lý do được đưa ra tương tự như đối với mẫu dầm từ thí nghiệm của Du và cs. [3]. Tuy nhiên, sự sai khác rõ rệt hơn giữa kết quả của mô hình dự báo với kết quả thí nghiệm xảy ra với các dầm có hàm lượng cốt thép dọc chịu kéo lớn hơn hàm lượng cốt thép cân bằng (xem Hình 7(c)–7(f)). Kết quả của mô hình

dự báo chưa phản ánh được sự suy giảm khả năng chịu lực của các dầm này. Nguyên nhân một phần là do với các dầm này hàm lượng cốt thép chịu kéo lớn hơn sẽ làm tăng biến dạng do cắt, mà biến dạng này chưa được kể đến trong mô hình dự báo.



Hình 6. Chi tiết dầm thí nghiệm của Du và cs. [3]



Hình 7. So sánh kết quả dự đoán với thí nghiệm dầm của Du và cs. [3]

Hai nhóm dầm được sử dụng để so sánh kết quả của mô hình đề xuất với kết quả thí nghiệm có cốt thép bị ăn mòn chủ yếu xảy ra ở cốt thép dọc chịu kéo. Sự ăn mòn của cốt thép dọc chịu nén và cốt đai là bé. Với các dầm này, sự suy giảm về diện tích mặt cắt ngang, khả năng chịu lực và biến dạng phần lớn là do sự suy giảm về cường độ và biến dạng của cốt thép chịu kéo do ảnh hưởng của sự ăn mòn như đã đề cập ở mục 2 của bài báo. Ảnh hưởng của các yếu tố như sự suy giảm ứng xử nén của bê tông lớp bảo vệ vùng nén, sự suy giảm ứng xử nén của lớp bê tông lõi do sự ăn mòn cốt đai, sự suy giảm ứng xử nén của cốt thép dọc chịu nén do cốt thép dọc chịu nén bị ăn mòn và do cốt đai bị ăn mòn, sự suy giảm về lực dính giữa bê tông và cốt thép sẽ được làm rõ hơn trong các nghiên cứu tiếp theo.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đề xuất mô hình dự báo đường cong lực- biến dạng của dầm đơn giản bê tông cốt thép không bị và bị ăn mòn chịu uốn bốn điểm. Ảnh hưởng của sự ăn mòn đến sự suy giảm mô hình vật liệu của cốt thép, bê tông, và lực dính được kể đến. Mô hình tính toán đề xuất được kiểm chứng với kết quả thực nghiệm của 11 dầm BTCT có thể dự đoán được đường cong lực biến dạng của cột bê tông có cốt thép không bị và bị ăn mòn ở mức độ nhất định.

Một vài khía cạnh cần được phát triển thêm để tăng mức độ chính xác của phương pháp tính toán. Tính chất cơ lý của cốt thép bị ăn mòn trong mô hình tính toán suy giảm được tính toán dựa vào kết quả ăn mòn trung bình, điều đó chưa phản ánh đúng sự ăn mòn thực tế khi mà các thanh sẽ có mức độ ăn mòn khác nhau do sự ăn mòn điểm trong các mẫu thí nghiệm. Do đó, mô hình ăn mòn cốt thép thực tế hơn cần được xem xét. Thêm nữa, mô hình này cũng chưa kể đến biến dạng cắt có thể chiếm tỉ trọng lớn trong tổng biến dạng của dầm với các dầm có tỉ số chiều dài nhịp/chiều cao tiết diện nhỏ hơn ba lần. Ngoài ra, phương pháp tính toán nên chuyển từ phân tích xác định sang phân tích xác suất bởi vì tính phân tán và không thống nhất trong các mô hình vật liệu là không thể tránh khỏi. Một bộ dữ liệu thí nghiệm cho các dầm BTCT có cốt thép bị ăn mòn cũng cần được xây dựng và mở rộng, đặc biệt cho các nghiên cứu thực nghiệm về đo lường các thành phần chuyển vị.

Tài liệu tham khảo

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Du, Y., Clark, L. A., Chan, A. H. C. (2007). [Impact of reinforcement corrosion on ductile behavior of reinforced concrete beams](#). *ACI Structural Journal*, 104(3):285–293.
- [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] Kashani, M. M., Crewe, A. J., Alexander, N. A. (2013). [Nonlinear stress-strain behaviour of corrosion-damaged reinforcing bars including inelastic buckling](#). *Engineering Structures*, 48:417–429.
- [7] 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.
- [8] Liu, Y., Weyers, R. E. (1998). Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures. *ACI Materials Journal*, 96(6):675–681.
- [9] Auyeung, Y., Balaguru, P., Chung, L. (2000). [Bond behavior of corroded reinforcement bars](#). *ACI Materials Journal*, 97(2):214–220.

- [10] Bhargava, K., Ghosh, A. K., Mori, Y., Ramanujam, S. (2007). [Corrosion-induced bond strength degradation in reinforced concrete—Analytical and empirical models](#). *Nuclear Engineering and Design*, 237 (11):1140–1157.
- [11] Coronelli, D., Gambarova, P. (2004). [Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modeling guidelines](#). *Journal of Structural Engineering*, 130(8):1214–1224.
- [12] 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 (KHCN XD)-ĐH XD*, 13(2V): 53–62.
- [13] 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.
- [14] Bộ Xây dựng (2016). *Tài liệu đào tạo, bồi dưỡng thí nghiệm ăn mòn bê tông và bê tông cốt thép*. Chương trình đào tạo thuộc đề án 1511.
- [15] Lehman, D. E., Moehle, J. P. (1998). Seismic performance of well-confined concrete bridge columns. *Pacific Earthquake Engineering Research Center, Report No. PEER-1998/01, College of Engineering, University of California, Berkely, CA, USA*.
- [16] Calderone, A. J. (2001). Behavior of reinforced concrete bridge columns having varying aspect ratios and varying lengths of confinement. *Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkely, CA, USA*.
- [17] El Maaddawy, T., Soudki, K., Topper, T. (2005). [Long-term performance of corrosion-damaged reinforced concrete beams](#). *ACI Structural Journal*, 102(5):649–656.
- [18] Mander, J. B. (1983). *Seismic design of bridge piers*. PhD dissertation, Department of Civil Engineering, University of Canterbury.
- [19] Sezen, H., Setzler, E. J. (2008). [Reinforcement slip in reinforced concrete columns](#). *ACI Structural Journal*, 105(3):280–289.
- [20] Dhakal, R. P., Maekawa, K. (2002). [Path-dependent cyclic stress-strain relationship of reinforcing bar including buckling](#). *Engineering Structures*, 24(11):1383–1396.
- [21] Dhakal, R. P., Maekawa, K. (2002). [Reinforcement stability and fracture of cover concrete in reinforced concrete members](#). *Journal of Structural Engineering*, 128(10):1253–1262.
- [22] 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.
- [23] Vecchio, F. J., Collins, M. P. (1986). [The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear](#). *ACI Structural Journal*, 83(2):219–231.
- [24] Zandi Hanjari, K., Kettli, P., Lundgren, K. (2011). [Analysis of mechanical behavior of corroded reinforced concrete structures](#). *ACI Structural Journal*, 108(5):532–541.
- [25] Ou, Y.-C., Nguyen, N. D. (2014). [Plastic hinge length of corroded reinforced concrete beams](#). *ACI Structural Journal*, 111(5):1049–1058.
- [26] Collins, M. P., Mitchell, D., Adebar, P., Vecchio, F. J. (1996). [A general shear design method](#). *ACI Structural Journal*, 93(1):36–45.
- [27] El Maaddawy, T., Soudki, K., Topper, T. (2005). Analytical model to predict nonlinear flexural behavior of corroded reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 102(4):550–559.
- [28] XTRACT 3.0.8 (2007). *Cross-sectional structural analysis of components*.
- [29] Park, R., Paulay, T. (1975). *Reinforced concrete structures*. John Wiley & Sons: New York, USA.
- [30] Moehle, J. P. (1992). [Displacement-based design of RC structures subjected to earthquakes](#). *Earthquake Spectra*, 8(3):403–428.
- [31] Paulay, T., Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry building*. John Wiley & Sons, Inc: New York, USA.
- [32] Lodhi, M. S., Sezen, H. (2012). [Estimation of monotonic behavior of reinforced concrete columns considering shear-flexure-axial load interaction](#). *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(15): 2159–2175.
- [33] Setzler, E. J., Sezen, H. (2008). [Model for the lateral behavior of reinforced concrete columns including shear deformations](#). *Earthquake Spectra*, 24(2):493–511.