



Đánh giá sự suy giảm sức kháng uốn của dầm cầu BTCT – mặt cắt chữ T, bị hư hỏng do cốt thép bị ăn mòn

Evaluation of the reduction in flexural strength of reinforced concrete bridge girders – T section, damaged by corroded steel reinforcement

Võ Văn Nam^{1,*}, Nguyễn Trọng Tâm¹, Nguyễn Đức Trình¹

¹ Nhóm nghiên cứu phát triển bền vững trong xây dựng và giao thông vận tải (SDCT), Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Từ khóa:

Dầm T - BTCT
Ăn mòn cốt thép
Mức độ ăn mòn
Sức kháng uốn
Phương pháp giải tích

TÓM TẮT

Nội dung bài báo trình bày kết quả nghiên cứu và đánh giá bằng phương pháp giải tích kết hợp kiểm tra bằng phương pháp phần tử hữu hạn, trường hợp cụ thể đối với một kết cấu dầm cầu bê tông cốt thép nhịp giản đơn – mặt cắt chữ T, thiết kế theo tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN 11823 – 2017) trong điều kiện dầm bị hư hỏng do cốt thép bị ăn mòn dưới tác dụng của môi trường chứa nhiều Ion Clorua. Các điều kiện khai thác của kết cấu và mức độ ăn mòn được xét đến khi quá trình cốt thép bị ăn mòn âm thầm diễn ra trong một thời gian dài suốt 35 năm. Tiết diện cốt thép và sức kháng uốn còn lại theo thời gian được tính toán và thống kê, kết quả tính toán giải tích sau đó được nhóm tác giả mô phỏng số nhằm kiểm chứng, đối sánh. Qua đó đánh giá và nhận xét về ảnh hưởng của ăn mòn cốt thép đến khả năng kháng uốn của kết cấu dầm T.

Keywords:

T girder – RC
Corrosion of RC
Corrosion level
Bending resistance
Analytical method

ABSTRACT

The content of the article presents the results of research and evaluation by analytical method combined with finite element method testing, a specific case for a simple span reinforced concrete bridge girder structure T-section, designed according to Vietnamese standards (TCVN 11823 - 2017) in the condition of the girder being damaged due to steel corrosion under the influence of an environment containing many chloride ions. The operating conditions of the structure and the level of corrosion are considered when the steel corrosion process takes place silently for a long time of 35 years. The cross-section of the steel and the remaining bending resistance over time are calculated and statistically calculated, the analytical calculation results are then simulated by the authors to verify and compare. Thereby, the impact of steel corrosion on the bending resistance of the T- girder structure is evaluated and commented on.

* Võ Văn Nam. Nhóm nghiên cứu phát triển bền vững trong xây dựng và giao thông vận tải (SDCT), Trường Đại học giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Email: nam.vo@ut.edu.vn

<https://www.doi.org/10.55228/JTST140509>

Ngày nhận bài: 13/06/2025; Ngày nhận bài sửa: 25/08/2025; Ngày chấp nhận đăng: 15/09/2025

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/09/2025

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Dầm bê tông cốt thép (BTCT) mặt cắt chữ T là một trong những dạng cấu kiện chịu lực được ứng dụng phổ biến nhất trong hệ thống cầu đường tại Việt Nam hiện nay. Với những ưu điểm vượt trội về mặt kỹ thuật, kinh tế và công nghệ thi công, loại dầm này ngày càng khẳng định được vị trí quan trọng trong lĩnh vực xây dựng hạ tầng giao thông, đặc biệt là trong các công trình cầu vừa và nhỏ đến cầu vượt, cầu cao tốc hay cầu trong đô thị. Sự phổ biến của dầm BTCT mặt cắt chữ T bắt nguồn từ khả năng chịu uốn lớn nhờ vào cấu tạo hình học đặc biệt – phần cánh rộng phía trên kết hợp với phần bụng hẹp phía dưới tạo nên khả năng phân bố mô men và lực cắt hiệu quả, đồng thời tối ưu hóa việc sử dụng vật liệu bê tông và cốt thép.

Tại Việt Nam, địa hình trải dài theo hướng Bắc – Nam với hơn 3200 Km đường bờ biển, đặc trưng điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa, độ ẩm không khí cao quanh năm. Xu hướng dầm BTCT chữ T đã và đang được áp dụng rộng rãi trong công nghệ thi công cầu. Quá trình khai thác dưới tác dụng của tải trọng và môi trường khí hậu ven biển chứa nhiều tác nhân gây ăn mòn, cốt thép trong cấu kiện dầm BTCT bị ăn mòn, là một quá trình lâu dài, liên tục và gây nguy hiểm cho cấu kiện dầm BTCT [1, 2, 3, 4].

Ảnh hưởng của môi trường khí hậu tại các vùng ven biển Việt Nam với đặc thù điều kiện nóng ẩm, không khí chứa hàm lượng ion Clorua cao làm cho kết cấu bê tông cốt thép thường bị ăn mòn và phá huỷ nhanh, đặc biệt nghiêm trọng là vùng nước lên xuống do chế độ thủy triều theo các tác giả Trương Hoài Chính cùng cộng sự [5], và Cao Duy Tiến cùng cộng sự [6].

Các nguyên nhân gây hư hại cầu bê tông được GS Mutsuyoshi, đưa ra thống kê trên các cầu bê tông cốt thép ở Nhật Bản. Qua số liệu thống kê có thể thấy rằng nguyên nhân chủ yếu nhất dẫn đến các hư hại của các kết cấu bê tông cốt thép là do xâm nhập Clorua chiếm tới 66% các hư hại, trong khi do các bon nát hóa chỉ chiếm 5% [7].

Một số kết quả nghiên cứu đã chỉ rõ rằng khi tải trọng tác dụng lên kết cấu lúc này kết cấu bê tông cốt thép xuất hiện các dạng khe nứt, các khe nứt nhỏ này cũng sẽ góp phần vào việc gia tăng quá

trình xâm nhập ion Cl⁻. Tốc độ xâm nhập phụ thuộc vào kích thước khe nứt (độ mở rộng và chiều dài), mật độ khe nứt, tính liên thông giữa các khe nứt và hệ thống lỗ rỗng. Tốc độ xâm nhập của ion Cl⁻ càng tăng, tốc độ ăn mòn càng lớn, dẫn đến sự phát triển, liên thông các khe nứt đã xuất hiện và hình thành các khe nứt mới dẫn đến suy giảm khả năng chịu lực của cấu kiện bê tông cốt thép [8, 13].

Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn đánh giá ảnh hưởng của mức độ ăn mòn BTCT đến sự làm việc của cấu kiện bê tông cốt thép cũng được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu [14,18,19], qua đó, bổ sung thêm góc nhìn khác và gia tăng độ tin cậy cho các đánh giá về ảnh hưởng của ăn mòn cốt thép đến mức độ suy giảm sức kháng của kết cấu BTCT.

2. Tổng quan cơ sở lý thuyết

Ăn mòn kim loại được Fontana, M. G. [20] và Uhlig, H. H. [21], định nghĩa là sự xuống cấp của một kim loại do phản ứng điện hóa của nó với môi trường. Theo các định luật nhiệt động lực học, có một xu hướng trạng thái năng lượng cao biến đổi thành trạng thái năng lượng thấp. Đó là xu hướng của kim loại tái kết hợp với các nguyên tố hiện diện trong môi trường dẫn đến hiện tượng được gọi là ăn mòn.

Theo kết quả nghiên cứu của Liu. Y (1996) [22], thiệt hại do ăn mòn cốt thép gây ra đã được thừa nhận là một trong những nguyên nhân chính gây ra sự hư hỏng của kết cấu bê tông cốt thép trên toàn thế giới. Thông thường, bê tông cung cấp một mức độ bảo vệ cho cốt thép không bị ăn mòn, được gọi là thụ động của thép, nhờ độ kiềm cao trong các dung dịch lỗ rỗng. Trong môi trường chứa tác nhân gây ăn mòn, chứa tác nhân gây ăn mòn, tính năng độ bền mong muốn cao này trong bê tông thường bị phá hủy dẫn đến ăn mòn cốt thép trở thành một vấn đề thường gặp. Hai nguyên nhân chính thường gặp gây ăn mòn thép trong bê tông cốt thép là: cacbonat gây ra sự ăn mòn và clorua gây ra sự ăn mòn. Với sự phát triển của sự ăn mòn, thể tích các sản phẩm gỉ tăng khoảng 2-6 lần thể tích của thép bị gỉ, tạo áp lực lên bê tông xung quanh và cuối cùng dẫn đến sự hư hỏng các kết cấu theo hình thức nứt, vỡ và tách lớp của bê tông bảo vệ. Đồng thời với việc gây ra nứt vỡ bê tông bảo vệ, ăn mòn cốt thép còn làm giảm dính bám

giữa cốt thép với bê tông và gây ra mất mát diện tích mặt cắt ngang của cốt thép làm giảm sức kháng của cấu kiện bê tông cốt thép.

Theo các tài liệu khảo sát, sau 10 đến 30 năm sử dụng, các công trình xây dựng bằng bê tông cốt thép trong môi trường biển bị ăn mòn và phá hủy trầm trọng, đòi hỏi chi phí lớn cho việc sửa chữa và bảo vệ, chiếm khoảng 40% - 70% giá thành xây dựng. Đồng thời, công tác đánh giá, dự báo độ bền và tuổi thọ của công trình gặp rất nhiều khó khăn do tính chất không đồng nhất của bê tông, chịu tác dụng của nhiều loại tải trọng phức tạp và có mặt của nhiều yếu tố xâm thực trong môi trường biển, theo tổng hợp của tác giả Đồng Kim Hạnh cùng cộng sự [23].

Theo Bazant (1979) [24] đề xuất một mô hình toán học đơn giản để tính toán thời gian tới nứt do ăn mòn của lớp bê tông bảo vệ. Các giả định cơ bản của mô hình Bazant là như sau:

Thâm nhập oxy và ion clo thông qua lớp bê tông bảo vệ là một chiều. Một trạng thái ổn định của tốc độ tạo gỉ bắt đầu vào thời điểm lớp thụ động trên bề mặt cốt thép bị phá vỡ.

Mô hình này dựa trên gỉ thép gây nguy hiểm hơn cho nứt bê tông và giả định $\rho_r = \rho_s/4$, trong đó ρ_r và ρ_s là tỷ trọng của sản phẩm gỉ và thép chưa gỉ.

Thời gian từ khi bắt đầu ăn mòn tới khi ăn mòn gây nứt bê tông, t_{cr} :

$$t_{cr} = \rho_{cor} \frac{d\Delta d}{Sj_r} \quad (1)$$

$$\rho_{cor} = \frac{\pi}{2 \left[\frac{1}{\rho_r} - \frac{0.523}{\rho_{st}} \right]} \quad (2)$$

Trong đó:

- S là khoảng cách giữa các thanh;
- d là đường kính của thanh;
- Δd là sự thay đổi đường kính của thanh;
- j_r là tốc độ tạo gỉ, $j_r = 2,89 \cdot 10^{-12} i_{cor}$
- ρ_{cor} là một hàm của mật độ khối lượng của thép và gỉ.

Một mô hình tính toán ăn mòn khác của Tuutti (1982) [25], xác định cơ chế ăn mòn và phá hoại kết cấu bê tông trong môi trường biển trải qua theo hai giai đoạn riêng biệt: giai đoạn mồi và giai đoạn phát tán. Điểm bắt đầu giai đoạn mồi tương ứng với thời điểm cốt thép bị mất tính thụ động hoá chống gỉ, giới hạn của độ pH đủ để mất trạng thái thụ động dao động trong khoảng từ 9 đến 11,5. Nguyên nhân dẫn đến việc độ pH của bê tông bị giảm có một số lý do như:

- Quá trình cacbonat hóa bê tông dưới tác dụng của CO₂, quá trình này diễn ra từ ngoài vào trong bê tông, theo thời gian. Tuy nhiên, để quá trình cacbonat hóa diễn ra hoàn toàn (khi đó pH của bê tông chỉ còn khoảng 9) ngay cả khi có lớp chiều dày lớp bê tông bảo vệ mỏng cũng cần một khoảng thời gian dài (20 - 30 năm trở lên).

- Nồng độ ion Cl⁻ trên bề mặt cốt thép vượt quá giới hạn, gây mất ổn định trạng thái thụ động.

Năm 1989 Morinaga [26] giả định rằng các vết nứt trên bê tông đầu tiên sẽ xảy ra khi có một số lượng nhất định các sản phẩm ăn mòn hình thành trên cốt thép. Ông đã dựa trên các dữ liệu các thí nghiệm hiện trường và trong phòng đưa ra dự đoán thời gian tới nứt như sau:

$$t_{cr} = \frac{Q_{cr}}{j_r} \quad (3)$$

Trong đó:

- t_{cr} là thời gian ăn mòn tới nứt tính bằng ngày;
- Q_{cr} là khối lượng sản phẩm gỉ tới hạn ($10^{-4} g/cm^2$);
- j_r tốc độ ăn mòn ($g/ngày$).

Duracrete (2000) [27] đã đưa ra phương pháp thiết kế tuổi thọ của các kết cấu bê tông. Mô hình được dựa trên một khung thiết kế, mô hình hóa các cơ chế suy giảm độ bền có sử dụng xác suất thống kê và các trạng thái giới hạn. Các mô hình cho phép mô phỏng quá trình suy giảm độ bền dựa trên các kết quả thí nghiệm. Hai nguyên nhân chính dẫn tới suy giảm độ bền của kết cấu BTCT là xâm nhập ion Cl⁻ và cacbonat hóa. Trong các mô hình này, thời gian bắt đầu ăn mòn khi nồng độ ion Cl⁻ xung

quanh cốt thép vượt quá nồng độ ion Cl⁻ giới hạn (C_{cr}) và C_{cr} thường được biểu thị theo tỷ lệ phần trăm của trọng lượng bê tông hoặc trọng lượng chất kết dính.

Năm 1996, Liu. Y (1996) [22], đã đề xuất phương pháp xác định khoảng thời gian từ khi khởi đầu ăn mòn tới nứt bê tông bảo vệ do ăn mòn. Các sản phẩm ăn mòn gây ra áp lực đồng đều cho bê tông xung quanh cốt thép. Không phải tất cả các sản phẩm ăn mòn đều gây ra áp lực, một số trong chúng có thể lấp vào các khoảng trống xung quanh giao diện thép - bê tông hoặc di chuyển ra khỏi giao diện thép - bê tông. Do tính phức tạp của vấn đề, nứt do ăn mòn gây ra chỉ giới hạn do các ứng suất do việc sản phẩm ăn mòn nở thể tích. Các hiệu ứng khác là bỏ qua, mặc dù chúng có thể ảnh hưởng đến quá trình thiệt hại ăn mòn.

Có ba giai đoạn xem xét trong mô hình đề xuất và được giải thích ngắn gọn như sau:

- Giai đoạn giãn nở tự do: trong mô hình đã được giả định rằng có tồn tại một vùng xốp xung quanh giao diện thép - bê tông. Khi ăn mòn xảy ra trên bề mặt của thép, vùng xốp sẽ dần dần được lấp đầy bởi các sản phẩm ăn mòn. Khi tổng số lượng của các sản phẩm ăn mòn WT ít hơn so với số lượng sản phẩm ăn mòn yêu cầu lấp đầy vào vùng xốp xung quanh giao diện thép - bê tông, sự hình thành của các sản phẩm ăn mòn ở giai đoạn này sẽ chưa tạo ra bất kỳ ứng suất nào trên bê tông xung quanh.

- Giai đoạn tạo ứng suất: khi số lượng các sản phẩm ăn mòn WT vượt quá số lượng các sản phẩm ăn mòn cần thiết để lấp đầy vào vùng xốp xung quanh giao diện thép- bê tông, sự hình thành của các sản phẩm ăn mòn bắt đầu tạo ra áp lực lên bê tông xung quanh cốt thép, và áp lực này tăng lên cùng với sự gia tăng trong các sản phẩm ăn mòn.

- Giai đoạn nứt: khi tổng lượng của các sản phẩm ăn mòn WT, đạt đến số lượng tới hạn các sản phẩm ăn mòn tới hạn, W_{crit} (số lượng giới hạn của các sản phẩm ăn mòn cần thiết để tạo ra nứt bê tông bảo vệ), ứng suất do sự gia tăng thể tích sản phẩm gi sẽ vượt quá cường độ chịu kéo của bê tông sẽ gây nứt bê tông bảo vệ.

$$W_{crit} = \rho_{rust} \left\{ \pi \left[\frac{c f_{ct}}{E_{ef}} \left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \nu_c \right) + d_0 \right] d + \frac{W_{st}}{\rho_{st}} \right\} \quad (4)$$

Trong đó:

- ρ_{rust} là tỷ trọng của sản phẩm ăn mòn;
- ρ_{st} là tỷ trọng của thép;
- d_0 là chiều dày của vùng xốp;
- d_s là chiều dày của sản phẩm ăn mòn gây ra ứng suất kéo;
- d là đường kính cốt thép;
- c là chiều dày lớp bê tông bảo vệ;
- W_{st} là khối lượng của thép ăn mòn ($W_{st} = \alpha W_{crit}$);
- $\alpha = 0.523$ (Gi là Fe(OH)₃) và $\alpha = 0.622$ cho Fe(OH)₂;
- f_{ct} cường độ chịu kéo của bê tông;
- ν_c là hệ số Poisson của bê tông;
- E_{cef} là một mô đun đàn hồi có hiệu của bê tông.

Các mô hình nêu trên đã đưa ra cơ sở khoa học rất rõ ràng và tường minh về đánh giá ảnh hưởng của ăn mòn đến việc phát triển vết nứt và làm suy giảm sức kháng của kết cấu BTCT. Mỗi mô hình có những ưu điểm và nhược điểm riêng; Tại phạm vi nghiên cứu này, tác giả ứng dụng mô hình Liu.Y (1996) [22], trong tính toán mức độ ăn mòn vì mô hình này có xét đến sự thay đổi tốc độ ăn mòn theo thời gian ăn mòn - đây là đối tượng đánh giá chính tại nội dung nghiên cứu.

Tác giả sử dụng phương pháp giải tích tiến hành tính toán và phân tích đối với một kết cấu dầm cầu BTCT – mặt cắt chữ T, hư hỏng do cốt thép bị ăn mòn dưới tác dụng của môi trường ăn mòn chứa Ion Clorua; tiếp đó bằng phương pháp phần tử hữu hạn tác giả tiến hành mô phỏng nguyên trạng kết cấu dầm T (nêu trên) và các điều kiện khai thác tương ứng của kết cấu nhằm so sánh kết quả từ phương pháp giải tích để đưa ra các đánh giá nhận xét về ảnh hưởng của ăn mòn cốt thép đến khả năng kháng uốn của kết cấu dầm.

3.3. Tính toán sức kháng còn lại sau ăn mòn

3.3.1. Mật độ dòng điện

Dùng mô hình của Liu.Y (1996) [22] và công thức Weyers [30] để tính mật độ dòng điện ăn mòn:

$$i_{corr} = 0,926 \exp \left\{ 7,98 + 0,7771 \ln(1,69C_{cl}) - \frac{3006}{T} - 0,000116R_c + 2,24t^{-0,215} \right\} \quad (7)$$

Trong đó:

- i_{corr} là mật độ dòng điện ăn mòn ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$);
- C_{cl} là hàm lượng clorua (kg/m^3), lấy $C_{cl}=1.8(\text{Kg}/\text{m}^3)$;
- T là nhiệt độ môi trường (độ K), lấy $T=298$, nhiệt độ môi trường 25°C , $D = 6 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$; $C_s = 0.6\%$; độ ẩm môi trường $H = 85\%$;
- t là thời gian từ khởi đầu ăn mòn (năm);
- R_c là điện trở của bê tông (Ω).

Thay số ta có: $i_{corr} = 0,258 (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$

Theo Liu.Y and Weyers (1998) [31] đã thiết lập mối quan hệ hồi quy giữa điện trở của bê tông R_c và tổng hàm lượng Clorua đối với các mẫu tiếp xúc tại hiện trường như sau:

$$R_c = \exp[8,03 - 0,549 \ln(1 + 1,69C_{cl})] \quad (8)$$

- C_{cl} tổng hàm lượng clorua sẽ thay đổi theo thời gian, C_{cl} dựa trên định luật khuếch tán thứ hai của Fick (coi nồng độ clorua ban đầu của bê tông là 0) như sau:

$$C(c,t) = \left\{ C_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{c}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} \times \frac{1}{100} \times \gamma_c \quad (9)$$

Trong đó:

- D là hệ số khuếch tán clorua trong bê tông;
- C_s là nồng độ clorua trên bề mặt bê tông;
- c là độ sâu của lớp bê tông bảo vệ;
- t là thời gian ($t = t_1 + \Delta t$);
- γ_c là khối lượng riêng của bê tông.

Theo Lopez [32] và cộng sự đã nghiên cứu các mối quan hệ giữa điện trở của bê tông và độ ẩm tương đối của môi trường (H) được lấy bằng 85% dựa trên các kết quả thực nghiệm. Họ đưa ra mối quan hệ như sau:

$$R_c = 90,537 \cdot H^{-7,2548} \{ 1 + \exp[5 - 50(1 - H)] \} \quad (10)$$

Tại điều kiện các vùng biển Việt Nam, độ ẩm được đánh giá là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình ăn mòn cấu kiện BTCT, trong điều kiện độ ẩm cao từ 75% đến 85% tốc độ thẩm Ion Clorua diễn ra nhanh chóng, tác động đến mức độ ăn mòn cốt thép bên trong cấu kiện BTCT [5,6,23].

Trên cơ sở các phân tích trên độ ẩm môi trường được lấy như sau: $H = 85\%$.

Thay số vào (10) ta có:

$$R_c = 317,888(\Omega)$$

3.3.2. Sức kháng còn lại theo mức độ ăn mòn

Khối lượng thép tiêu thụ có liên quan đến độ lớn dòng điện trong các pin ăn mòn điện hóa. Sử dụng định luật Faraday mô tả mất mát khối lượng thép do ăn mòn:

$$M_{loss} = \frac{MI_{corr}}{zF} t \quad (11)$$

Trong đó:

- M_{loss} là sự mất trọng lượng cốt thép (g);
- M là khối lượng nguyên tử của ion Fe, $M = 56 \text{g}/\text{mol}$;
- z là hóa trị ion, lấy trung bình $z=2.5$;
- F là hằng số Faraday, $F = 96.500 \text{C}/\text{mol}$;
- t là thời gian ăn mòn tính bằng giây (s).

Mật độ dòng ăn mòn i_{corr} được định nghĩa là dòng điện ăn mòn trên mỗi đơn vị bề mặt cốt thép. Nếu chiều dài đơn vị $L_0 = 1\text{cm}$ và đường kính thép d có đơn vị là mm, một mối quan hệ giữa I_{corr} (A) và i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) thu được như sau:

$$I_{corr} = 1 \times \pi \frac{d}{10} i_{corr} \times 10^{-6} = 10^{-7} \pi d i_{corr} \quad (12)$$

Với $\rho_s=7.85\text{g}/\text{cm}^3$ và $L_0=1\text{cm}$:

$$M_{loss} = \frac{\pi}{100} \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 - r_n^2 \right] \rho_s \quad (13)$$

Kết hợp (12) và (13) ta có:

$$M_{loss} = \frac{\pi}{100} \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 - r_n^2 \right] \rho_s$$

$$= \frac{M \cdot 10^{-7} \pi d i_{corr} t}{\frac{zF}{2,5.96500}} 31536000t$$

$$r_n = \sqrt{\left(\frac{d^2}{4} - 9,352 \cdot 10^{-3} d i_{corr} t \right)}$$

với: $i_{corr} = 0,258$ ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

$$\rho = \frac{A_{s1} - A_{si}}{A_{s1}} (\%)$$

(Trong đó: thời gian t tính bằng đơn vị năm).

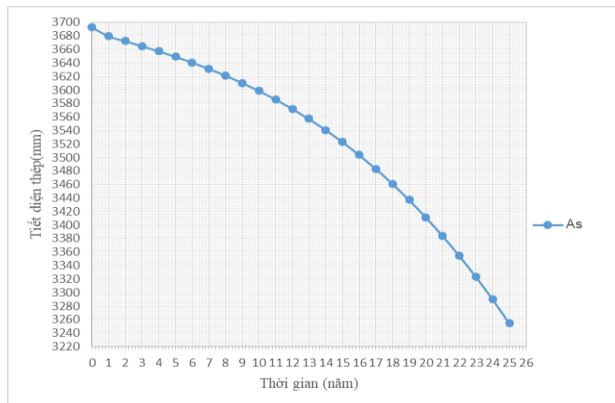
Kết quả tính toán dầm T theo Tiêu chuẩn thiết kế cầu hiện hành tại Việt Nam – TCVN 11823-2017 được thống kê thành bảng (xem bảng 3).

Bảng 3. Kết quả tính toán sức kháng uốn còn lại của dầm T.

t (Năm)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}$)	C_{cl} (Kg/m^3)	ρ (%)	r_n (mm)	A_s (mm^2)	a (mm)	M_r (KN.m)
0	0,258	1,800	0.000	14,000	3692,64	30,41	983,77
1	2,665	1,944	0,356	13,975	3679,49	30,30	980,34
2	2,075	2,100	0,554	13,961	3672,16	30,24	978,43
3	1,875	2,267	0,751	13,947	3664,90	30,18	976,53
4	1,790	2,449	0,957	13,933	3657,31	30,12	974,56
5	1,758	2,645	1,174	13,918	3649,27	30,05	972,46
6	1,756	2,856	1,408	13,901	3640,66	29,98	970,21
9	1,850	3,598	2,225	13,843	3610,49	29,73	962,34
10	1,904	3,886	2,543	13,821	3598,72	29,64	959,27
11	1,966	4,197	2,889	13,796	3585,96	29,53	955,94
12	2,036	4,533	3,264	13,770	3572,11	29,42	952,32
13	2,113	4,895	3,671	13,741	3557,10	29,29	948,41
14	2,199	5,287	4,112	13,709	3540,79	29,16	944,15
15	2,291	5,710	4,591	13,675	3523,12	29,01	939,53
16	2,390	6,165	5,109	13,638	3504,00	28,86	934,54
17	2,495	6,653	5,668	13,597	3483,36	28,69	929,14
18	2,607	7,175	6,270	13,554	3461,12	28,50	923,33
19	2,725	7,732	6,917	13,507	3437,22	28,31	917,08
20	2,849	8,325	7,612	13,457	3411,57	28,10	910,38
21	2,978	8,955	8,355	13,402	3384,12	27,87	903,20
24	3,399	11,077	10,899	13,215	3290,16	27,10	878,60
25	3,550	11,865	11,859	13,144	3254,74	26,80	869,32
26	3,707	12,695	12,877	13,068	3217,16	13,07	859,47
27	3,869	13,568	13,955	12,986	3177,33	12,99	849,03
28	4,036	14,485	15,096	12,900	3135,19	12,90	837,97
29	4,208	15,447	16,302	12,808	3090,67	12,81	826,29

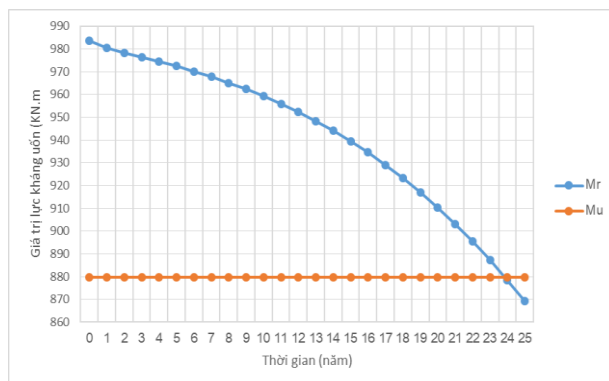
t (Năm)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}$)	C_{cl} (Kg/m^3)	ρ (%)	r_n (mm)	A_s (mm^2)	a (mm)	M_r (KN.m)
30	4,385	16,455	17,574	12,710	3043,70	12,71	813,95
31	4,567	17,510	18,914	12,607	2994,20	12,61	800,95
34	5,144	20,967	23,366	12,256	2829,83	12,26	757,70
35	5,707	22,220	24,999	12,124	2769,52	12,12	741,81

Trên cơ sở các kết quả tính toán được thống kê tại bảng 3, tác giả xây dựng biểu đồ nhằm đánh giá trực quan và thể hiện quan hệ giữa các tham số trong quá trình tính toán và ảnh hưởng của các tham số đến quá trình cốt thép bị ăn mòn bởi môi trường ăn mòn Clorua (xem hình 4).



Hình 4. Biểu đồ quan hệ diện tích cốt thép theo thời gian ăn mòn.

Một biểu đồ quan hệ giữa mô men kháng uốn tính toán, mô men kháng uốn danh định theo mức độ ăn mòn cũng được nghiên cứu sinh xây dựng nhằm thể hiện rõ hơn ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến sức kháng uốn còn lại của dầm bị ăn mòn dưới tác dụng của tải trọng khai thác (xem hình 5).



Hình 5. Biểu đồ quan hệ mô men uốn theo thời gian ăn mòn.

Kết quả:

- Qua kết quả tính toán dầm cầu BTCT mặt cắt chữ T bị ăn mòn trong 35 năm, có thể thấy: sau 05 năm đầu tiết diện các thanh cốt thép bị ăn mòn so với cốt thép thiết kế là 1%; cùng điều kiện môi trường và khai thác ở năm thứ 10 mức độ ăn mòn cốt thép là 2,5% sau đó nhanh chóng chạm mốc 5,1% năm thứ 16, 8% ở năm thứ 20, 11,8% ở năm thứ 25 và 25% ở năm thứ 35;

- Tiết diện cốt thép bị ăn mòn gia tăng theo thời gian, theo kết quả tính toán khoảng 8mm² thép bị hao mòn trong 5 năm đầu, 5 năm tiếp theo lượng thép bị hao mòn khoảng 12mm², sau đó lượng cốt thép hao mòn tăng nhanh chạm mức 25mm² ở năm thứ 20, 35mm² ở năm thứ 25 và 60mm² ở năm thứ 35.

- Cốt thép trong cấu kiện dầm cầu bê tông cốt thép bị ăn mòn theo thời gian làm mất mát tiết diện thép chịu lực, điều này dẫn đến việc suy giảm sức kháng uốn của dầm, sức kháng uốn suy giảm tỉ lệ thuận với quá trình dầm bị ăn mòn cụ thể: giai đoạn 5 năm đầu sức kháng giảm khoảng 1,1% so với sức kháng tính toán thiết kế, sự suy giảm này ở mức 2,5% ở năm thứ 10, 7,8% ở năm thứ 20, 12% ở năm thứ 25 và 23,5% ở năm thứ 35.

Nhận xét, đánh giá:

- Kết cấu dầm BTCT bị ăn mòn khi làm việc trong môi trường chứa nhiều Ion Clorua, mức độ ăn mòn gia tăng theo thời gian khai thác, thời gian cấu kiện làm việc trong môi trường ăn mòn càng lâu mức độ ăn mòn càng nghiêm trọng. Điều này có thể do sản phẩm ăn mòn gây ra hiện tượng trương nở thể tích cốt thép và gây nứt lớp bê tông bảo vệ làm gia tăng mức độ xâm nhập Ion Clorua, qua đó thúc đẩy quá trình ăn mòn diễn ra mạnh mẽ hơn;

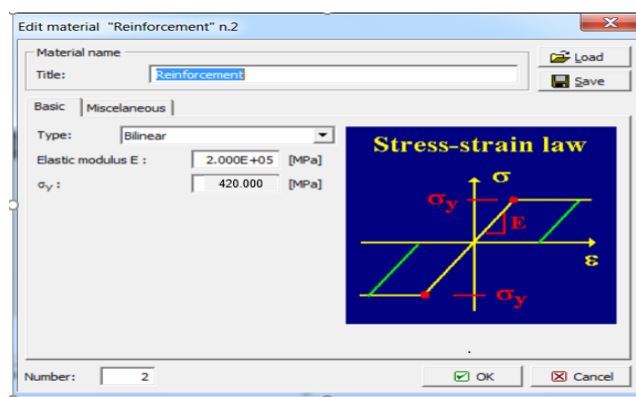
- Cốt thép bị ăn mòn theo thời gian làm giảm tiết chịu lực, điều này dẫn đến sự suy giảm sức kháng uốn chung của kết cấu dầm BTCT.

4.2. Mô hình vật liệu cốt thép

Cốt thép chịu lực có thể mô tả với mô hình vật liệu tuyến tính, phi tuyến tùy theo định nghĩa từ người dùng. Thông số đầu vào là mô đun đàn hồi, giới hạn chảy hoặc đường cong ứng suất – biến dạng của cốt thép.

Sự giảm khối lượng của thanh cốt thép bị ăn mòn được mô phỏng bằng cách giảm diện tích mặt cắt.

Các đặc trưng cơ học của thép: Cốt thép theo ASTM A615M [28], với $f_y = 420$ (MPa). Khối lượng riêng của thanh thép là $7,8 \times 10^{-2}$ (MN/m³) và hệ số nở vì nhiệt là $1,2 \times 10^{-5}$ (1/K).



Hình 7. Khai báo đặc trưng cơ học của thép.

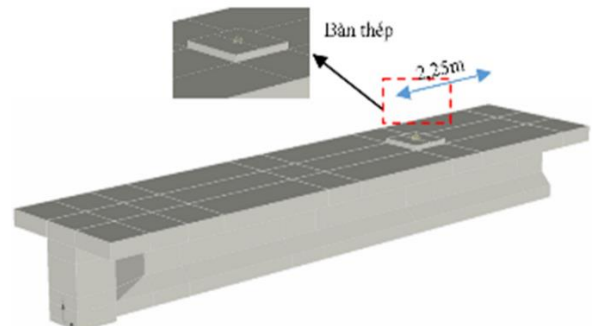
4.3. Mô hình dính bám giữa bê tông và cốt thép

Có nhiều cách để mô hình hóa sự dính bám giữa bê tông và cốt thép trong phần mềm ATENA. Thông thường, có thể sử dụng các định nghĩa sẵn có từ tiêu chuẩn Model Code 2010 [33], cũng như theo luật dính bám của Bigaj (1999)[34]. Ngoài ra, người dùng có thể tự định nghĩa một luật dính bám riêng, hoặc đường cong dính bám (quan hệ giữa độ trượt và ứng suất tiếp) thu được từ thực nghiệm [35, 36].

4.4. Mô hình hóa hình học kết cấu

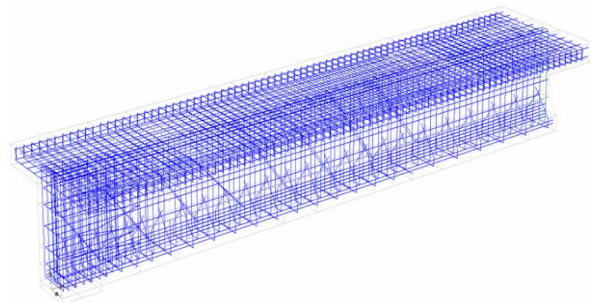
Phần mềm ATENA cho phép mô phỏng bê tông và cốt thép với các phần tử riêng rẽ. Đối với bê tông, có thể sử dụng các phần tử phẳng hoặc phần tử khối, tùy theo dạng chịu lực của kết cấu. Nếu kết cấu chịu lực trong mặt phẳng và có độ dày tương đối đồng đều thì có thể sử dụng mô hình phẳng 2D để tăng hiệu quả việc tính toán. Theo đó, tốc độ tính toán sẽ nhanh hơn. Ưu điểm của cách mô hình này là nhờ vào lợi thế về tốc độ tính toán cho phép mô tả chi tiết các vùng chịu lực của cấu kiện.

Mô hình phần tử hữu hạn (FE) đã được nhóm nghiên cứu xây dựng bằng cách sử dụng phần mềm ATENA. Phân tích thực hiện dưới dạng ba chiều, bằng cách phân chia các lưới phần tử với kích thước ô lưới là 25 mm.



Hình 8. Chia phần tử lưới của dầm chữ T.

Mô hình trên nền tảng phần mềm ATENA được đề xuất để mô hình hóa kết cấu dầm BTCT – T giản đơn, khi xét đến sự ăn mòn cốt thép bên trong và mối quan hệ của chúng đối với khả năng chịu tải của dầm BTCT khi chịu ứng suất. Với mô hình như vậy, cần quan tâm đến các đặc tính vật liệu của bê tông và thép phù hợp với mẫu dầm trong thực nghiệm, có xét đến ảnh hưởng của đặc tính dính bám giữa bê tông và cốt thép. Mô hình đánh giá kết cấu hư hỏng khi cốt thép trong dầm BTCT ở trạng thái chảy dẻo, các cốt liệu có tính đàn hồi.



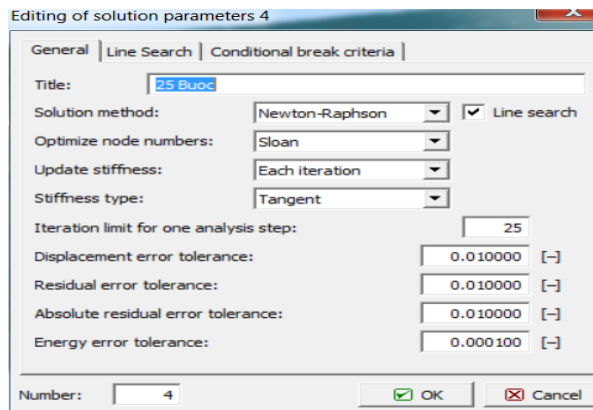
Hình 9. Mô hình hóa cốt thép của dầm chữ T.

4.5. Các bước thiết lập tính toán

Thiết lập các bước gia tải:

Từ bước tải 1 đến bước tải 8: tải tác dụng là chuyển vị thẳng đứng hướng xuống dưới của điểm đặt lực, với độ lớn cho mỗi bước tải là 100KN.

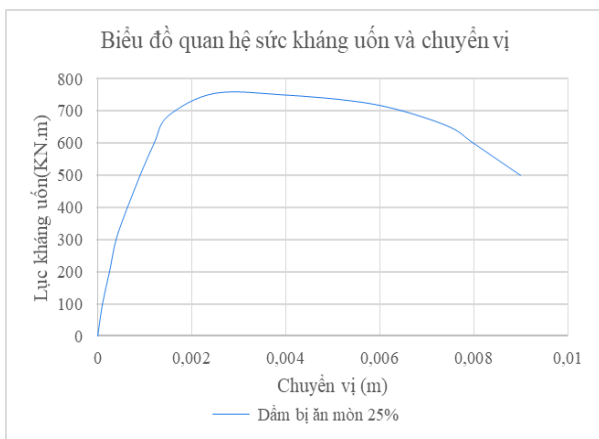
Gia tải dần dần từ 100KN đến 800KN cho đến khi dầm bị phá hoại.



Hình 10. Các bước thiết lập tính toán trên phần mềm.

Trong mô phỏng giả định rằng đường kính của cốt thép giảm 25% trên tiết diện 01 thanh có đường kính là 21 mm (D21) so với trường hợp dầm có cốt thép không bị ăn mòn có đường kính là 28 mm(D28).

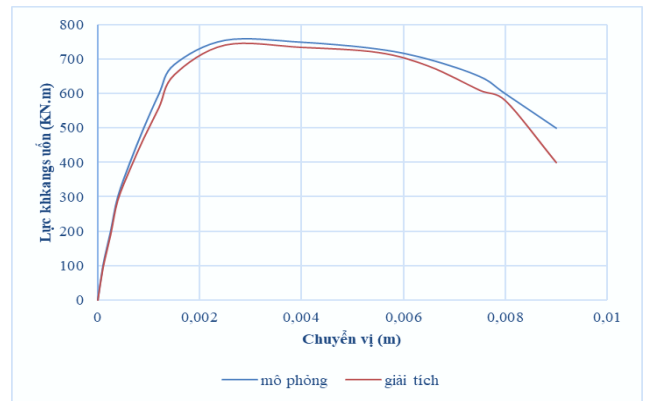
4.6. Kết quả phân tích bằng mô phỏng số



Hình 11. Biểu đồ quan hệ sức kháng uốn và chuyển vị theo mô phỏng số.

Theo kết quả mô phỏng số thực hiện trên phần mềm ATENA thì lực kháng uốn cực hạn đạt 755,7 KN.m tại thời điểm phá hoại.

Nhằm so sánh, kiểm tra sự tương đồng về ứng xử của dầm cầu bị ăn mòn được thực hiện trên mô phỏng số với phương pháp giải tích đã đánh giá trên dầm BTCT có cốt thép chủ bị ăn mòn tại mức 25%, một biểu đồ quan hệ sức kháng uốn và chuyển vị của cả hai trường hợp được xây dựng như sau:



Hình 12. Biểu đồ quan hệ lực kháng uốn và chuyển vị theo mô phỏng số và giải tích tại mức ăn mòn 25%.

Nhận xét, đánh giá:

- Về mặt trực quan có thể thấy đường cong lực – chuyển vị của 02 phương pháp: giải tích và PTHH là rất tương đồng, điều này có thể phản ánh tính đối sánh về kết quả là đáng tin cậy;

- Kết quả tính toán theo phương pháp giải tích ta thấy lực kháng uốn cực đại đạt giá trị 741,81 (KN.m), giá trị này theo phương pháp PTHH là: 755,7 (KN.m), chênh lệch 13,89 KN.m tương đương 1,87%; lượng sai khác này là chấp nhận được; nguyên nhân có sự sai khác có thể là do trong quá trình thiết lập mô hình tính toán giữa 02 phương pháp có sự sai khác nhất định.

5. Kết luận, kiến nghị

Qua phân tích đánh giá tác giả có một số kết luận như sau:

- Ăn mòn cốt thép trong kết cấu BTCT là một trong nhiều nguyên nhân làm suy giảm cường độ kháng uốn của kết cấu BTCT, quá trình suy giảm sức kháng uốn này phát triển và có quan hệ mật thiết với quá trình ăn mòn cốt thép trong dầm BTCT;

- Cốt thép bị ăn mòn sẽ sinh ra các sản phẩm ăn mòn (gỉ thép), sản phẩm gỉ có tính trương nở thể tích gây ra ứng suất kéo trong bê tông bảo vệ và gây nứt, tách, vỡ bê tông bảo vệ;

- Sự suy giảm sức dính bám giữa bê tông và cốt thép do hình thành gỉ cốt thép có thể là nguyên nhân làm giảm sức kháng uốn của dầm bê tông cốt thép.

Hạn chế của nghiên cứu:

- Nghiên cứu còn nhiều hạn chế trong việc đa dạng khẩu độ dầm tính toán, đa dạng giá trị các tham số ảnh hưởng đến quá trình ăn mòn cốt thép, thiếu đánh giá ảnh hưởng của ăn mòn đến lực dính bám của bê tông và cốt thép trong kết cấu BTCT.

Kiến nghị:

- Cần thiết xem xét cụ thể hơn về vai trò của các tham số: cường độ bê tông, độ ẩm, nhiệt độ, hàm lượng Clorua bề mặt, chiều dày lớp bê tông bảo vệ ... đến mức độ ăn mòn cốt thép trong cấu kiện dầm bê tông cốt thép ở những nghiên cứu tiếp theo;

- Đánh giá ảnh hưởng của ăn mòn cốt thép đến sức dính bám giữa bê tông và cốt thép.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Võ Văn Nam*: Phương pháp, tính toán, phân tích, tiếp nhận tài trợ, viết – bản thảo gốc, chỉnh sửa – bản thảo, phản hồi ý kiến phản biện; **Nguyễn Trọng Tâm**: Biên soạn dữ liệu, phân tích dữ liệu, tiếp nhận tài trợ; **Nguyễn Đức Trinh**: Biên soạn dữ liệu, phân tích dữ liệu, tiếp nhận tài trợ;

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Các tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

Lời cảm ơn

Công trình là sản phẩm thuộc đề tài khoa học cấp cơ sở có mã số: KH2407 được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh (UTH). Nhóm tác giả xin gửi lời cảm ơn chân thành đến đơn vị tài trợ tài chính cho công trình nghiên cứu.

1st Vo Van Nam*. *SDCT Research Group, University of Transport Ho Chi Minh City*

2nd Nguyen Trong Tam. *SDCT Research Group, University of Transport Ho Chi Minh City*

3rd Nguyen Duc Trinh. *SDCT Research Group, University of Transport Ho Chi Minh City*

*Corresponding author: nam.vo@ut.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] Ngoc, A. V, A. Castel, and R. Francois, "Effect of Stress Corrosion Cracking on Stress-Strain Response of Steel Wires Used in Prestressed Concrete Beams," *Corrosion Science*, 2009, Vol 51, Issue 6, pp. 1453-1459.
- [2] T. T. Tran, T. M. Tran, X. T. Nguyen, D. H. Nguyen, B. T. Vu, and V. V. Vo, "Influences of pre-bending load and corrosion degree of reinforcement on the loading capacity of concrete beams," *Journal of the Mechanical Behavior of Materials. DE GRUYTER*, 2022.
- [3] N. V. Vo, T. T. Nguyen, "Evaluate the influence of concrete strength on the level of corrosion of steel reinforcement in reinforced concrete beam structures, taking into account the applied load," *International Journal for Computational Civil and Structural*, 2024.
- [4] B.T. Vu, T.T. Tran, and H.C. Nguyen, "Phase-field method of fracture for experimental validation to simulate damage caused by reinforcement corrosion in clam-shell concrete beams," *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 454, 139065. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139065.
- [5] C. H. Trương, Q. Huỳnh, Q.V. Trần, P.P. Nguyễn, "Tổng hợp, phân tích, đánh giá và dự báo hiện trạng ăn mòn xâm thực các công trình xây dựng DD & CN vùng ven biển Đà Nẵng," *Báo cáo đề tài nghiên cứu khoa học cấp thành phố Đà Nẵng*, 2007.
- [6] T. D. Cao, K. V. Pham, H. Q. Le, "Báo cáo tổng kết dự án KT-KT Chống ăn mòn và bảo vệ các công trình bê tông và bê tông cốt thép vùng biển," *Tạp chí XD*, 2003.
- [7] Mutsuyoshi, "Present Situation of durability of post-tensioned pc bridges in Japan, Durability of post-tensioning tendons (Taerwe, L. ed.)," *Fédération Internationale du Béton*, 2001.
- [8] Nguyễn X. T, Thái K. C, Trần T.T, "Thực nghiệm xác định độ thấm clorua của bê tông chịu tải nén trước có sử dụng phụ gia chống thấm," *Tạp chí khoa học và công nghệ GTVT*, 2017, số tháng 1+2.
- [9] Zhen Cui, Alice Alipour, "Concrete cover cracking and service life prediction of reinforced concrete structures in corrosive environments," *Construction and Building Material*. 2018, 159, pp. 652-671.
- [10] Võ M. T, "Ảnh hưởng của chiều rộng khe nứt giới hạn trong thiết kế kết cấu bê tông cốt thép vùng ven biển," *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng*, 2021, (3), tr. 3-9.
- [11] Phạm T. T., Dao, P., Tung, D., & Quang. N, "Nghiên cứu sự hình thành và mở rộng khe nứt thẳng góc trong dầm bê tông cốt thép khi chịu tác dụng của tải trọng ngắn hạn," *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng*, 2018, 12(2), tr. 3-10.
- [12] Đào V. D, "A model for prediction of time from corrosion initiation to cracked concrete cover

- considering the effect of load,” International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET), March. 2021, Volume 12, Issue 3, pp. 805-814.
- [13] T.T. Tran, D.T. Pham, M.N. Vu, V.Q. Truong, X.B. Ho, N.L. Tran, T.S. Nguyen, Q.D. To, “Relation between water permeability and chloride diffusivity of concrete under compressive stress: Experimental investigation and mesoscale lattice modelling,” Construction and Building Materials, 2021.
- [14] Phạm Đ. T, Phạm V. H, Bùi A.T, Hoàng Đ. P, Đỗ N. A, Võ V. N, “Mô hình lưới phân tích ảnh hưởng của ứng suất đến hệ số thấm nước của bê tông,” *Tuyển tập công trình khoa học của Hội nghị Khoa học toàn quốc VIETGEO 2019*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2019.
- [15] T.H. Nguyen, A.T. Le, D.D. Nguyen, “Bending strength diagnosis for corroded reinforced concrete beams with attendance of deterministic, random and fuzzy parameters,” Journal of Structural Integrity and Maintenance, 2020, 5(3), pp. 183-189.
- [16] Hussain. H., Miteva.D. Structural behavior of corroded reinforced concrete structures - A study based on detailed 3D FE analyses, *Master dissertation, Chalmers University of Technology*, 2018.
- [17] Nguyễn C. L. “Nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng ăn mòn cốt thép đến kết cấu bê tông cốt thép bằng mô hình 3D-RBSM,” Tạp chí Khoa học kỹ thuật và môi trường, 2018, số 62.
- [18] Vũ.B. T, “Nghiên cứu cơ chế hư hỏng và sự suy giảm sức chịu tải do ăn mòn cốt thép trong kết cấu bê tông bằng thực nghiệm và mô phỏng,” Tạp chí khoa học và công nghệ GTVT, 2025, tập 14, số 1.
- [19] B.T. Vu, T.T Bui, N.L.Nguyen, T.T. Tran, X.L. Nguyen, and V.H. Hoang, “Phase-field modelings of fracture investigate the influence of interfacial effects on damage and optimal material distribution in brittle inclusion-matrix structures,” Forces in Mechanics, vol. 16,100282, August 2024, DOI: 10.1016/j.finmec.2024.100282.
- [20] Fontana, M. G, Corrosion, 1971, 27, pp. 127.
- [21] Uhlig. H. H, Corrosion and Corrosion Control, Wiley, New York, 1971.
- [22] Liu. Y, “Modeling the Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures,” Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
- [23] K.H. Đồng, H. T. T. Dương, “Tình trạng ăn mòn bê tông cốt thép và giải pháp chống ăn mòn cho công trình bê tông cốt thép trong môi trường biển Việt Nam,” KHCN - Hội đập lớn và phát triển nguồn nước Việt Nam, 2014.
- [24] Bazant, “Physical Model for Steel Corrosion in Sea Structures” – Theory, Journal of the Structural Division, 1979.
- [25] Tuutti, “Corrosion of steel in concrete,” Swedish Cement and Concrete Institute, Stockholm, 1982.
- [26] Morinaga, “Prediction of Service Lives of Reinforced Concrete Buildings Based on Rate of Corrosion of Reinforcing Steel,” 1989.
- [27] DuraCrete, “Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures,” Brite – EuRam Programme (project BE95-1347), 2000.
- [28] *Tiêu chuẩn thiết kế cầu đường bộ*, TCVN 11823:2017, Bộ Khoa học và công nghệ, 2017.
- [29] Tiêu chuẩn ASTM A615M.
- [30] Weyers, R.E, “Service life model for concrete structures in chloride laden environments,” ACI Materials Journal, 1998.
- [31] Weyers, and Liu.Y, “Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures,” Cement and Concrete Research, 1998.
- [32] Lopez, W. and J.A. González, “Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement,” Cement and Concrete Research, 1993.
- [33] CEB-FIP Model Code 2010, 2010.
- [34] A.J. Bigaj, “Structural dependence of rotations capacity of plastic hinges in RC beams and slabs,” Ph.D. Thesis, Delft University Press, the Netherlands, 1999.
- [35] Cervenka, J., Tutorial for Program ATENA 3D, Prague, June. 2015.
- [36] Cervenka.V, Jendele.L, Cervenka.J, ATENA Program Documentation – Theory. Prague, 2010.