



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.5.89-101>

***Corresponding author:**

Email address:

tuyettrinh@utc.edu.vn

Received: 24/06/2026

Received in Revised Form:
08/07/2026

Accepted: 07/08/2026

Assessment of Structural Resistance Degradation of Steel Pipe Pile Shafts Due to Corrosion in the Vietnamese Marine Environment

Le Trung Hieu¹, Nguyen Thi Tuyen Trinh^{2*}, Ngo Quoc Trinh¹

¹University of Transport Technology, No. 54 Trieu Khuc Street, Thanh Liet Ward, Hanoi, Vietnam

²University of Transport and Communications, No. 3 Cau Giay Street, Lang Ward, Hanoi, Vietnam

Abstract: Steel pipe piles are widely used in wharves, piers, coastal bridges, sea-crossing bridges, and high-pile foundation systems. In marine environments, especially in free or semi-free pile shaft segments exposed to seawater, tidal zones, and splash zones, corrosion may reduce wall thickness, steel cross-sectional area, and the mechanical properties of the section. This study evaluates the degradation of structural resistance of steel pipe pile shafts due to corrosion in the Vietnamese marine environment. The TCVN 11820 series is adopted as the reference standard framework, in which TCVN 11820-5:2021 covers wharf structures, TCVN 11820-2:2017 covers loads and actions, TCVN 11820-3:2019 covers material requirements, and TCVN 11820-4-1:2020 covers foundations for marine port facilities. Corrosion-induced mass loss data are described using a two-parameter Weibull model, in which $k = 1.226$ and $\eta = 70.761$ years are obtained from nonlinear regression of an accelerated corrosion test dataset consisting of 90 specimens at three equivalent exposure times of 4.5, 7.5, and 15 years. Based on this model, the remaining steel cross-sectional area, equivalent wall thickness, moment of inertia, elastic section modulus, radius of gyration, and D/t_r ratio are determined over time. The calculation results show that, for a pile with an outer diameter of $D=1500$ mm and an initial wall thickness of $t_0=16$ mm, after 50 years, the mass loss ratio reaches 47.97%, the remaining steel cross-sectional area is about 52.0%, the equivalent wall thickness is 8.28 mm, and the moment of inertia and elastic section modulus are about 52.6% of their initial values. The D/t_r ratio increases from 93.75 initially to 181.11 after 50 years and 435.79 after 100 years, indicating a significant increase in wall slenderness; therefore, local buckling should be further checked in long-term assessments, especially when non-uniform corrosion or localized pitting is present.

Keywords: steel pipe pile; marine corrosion; structural resistance; TCVN 11820; equivalent wall thickness; section modulus.



Đánh giá suy giảm sức kháng kết cấu của cọc ống thép do ăn mòn trong môi trường biển Việt Nam

Thông tin bài viết

Dạng bài viết:

Bài báo nghiên cứu

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.5.89-101>

*Tác giả liên hệ:

Địa chỉ Email:

tuyettrinh@utc.edu.vn

Ngày nộp bài: 24/06/2026

Ngày nộp bài sửa: 08/07/2026

Ngày chấp nhận: 07/08/2026

Lê Trung Hiếu¹, Nguyễn Thị Tuyết Trinh^{2*}, Ngô Quốc Trinh¹

¹Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, số 54 Triều Khúc, phường Thanh Liệt, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Đại học Giao thông vận tải, số 3 Cầu Giấy, phường Láng, Hà Nội, Việt Nam

Tóm tắt: Cọc ống thép được sử dụng rộng rãi trong công trình bến cảng, cầu cảng, cầu ven biển, cầu vượt biển và các kết cấu móng cọc bê tông cao. Trong môi trường biển, đặc biệt tại các đoạn cọc nằm tự do hoặc bán tự do trong nước biển, vùng thủy triều và vùng bắn tóe, ăn mòn có thể làm suy giảm chiều dày thành cọc, diện tích tiết diện thép và các đặc trưng cơ học của tiết diện. Nghiên cứu này đánh giá sự suy giảm sức kháng kết cấu của cọc ống thép do ăn mòn trong môi trường biển Việt Nam. Bộ TCVN 11820 được sử dụng làm khung tiêu chuẩn tham chiếu, trong đó TCVN 11820-5:2021 liên quan đến công trình bến, TCVN 11820-2:2017 liên quan đến tải trọng và tác động, TCVN 11820-3:2019 liên quan đến vật liệu, và TCVN 11820-4-1:2020 liên quan đến nền móng công trình cảng biển. Dữ liệu hao hụt khối lượng do ăn mòn được mô tả bằng mô hình Weibull hai tham số, trong đó các tham số $k = 1,226$ và $\eta = 70,761$ năm được xác định từ hồi quy phi tuyến trên bộ dữ liệu thí nghiệm ăn mòn gồm 90 mẫu, tương ứng với ba mốc thời gian quy đổi 4,5 năm, 7,5 năm và 15 năm. Trên cơ sở đó, nghiên cứu xác định diện tích tiết diện thép còn lại, chiều dày tương đương, mô men quán tính, mô đun chống uốn, bán kính quán tính và tỷ số D/t_r theo thời gian. Kết quả tính toán cho thấy, với cọc có đường kính ngoài $D=1500$ mm và chiều dày ban đầu $t_0=16$ mm, tại 50 năm, tỷ lệ hao hụt khối lượng đạt 47,97%, diện tích tiết diện thép còn khoảng 52,0%, chiều dày tương đương còn 8,28 mm, mô men quán tính và mô đun chống uốn còn khoảng 52,6% so với ban đầu. Tỷ số D/t_r tăng từ 93,75 ban đầu lên 181,11 tại 50 năm và 435,79 tại 100 năm, cho thấy thành cọc có xu hướng mảnh hóa đáng kể theo thời gian; đây là chỉ báo cần được xem xét khi kiểm tra ổn định cục bộ trong đánh giá dài hạn, đặc biệt đối với trường hợp có ăn mòn không đều hoặc ăn mòn cục bộ.

Từ khóa: cọc ống thép; ăn mòn biển; sức kháng kết cấu; TCVN 11820; chiều dày tương đương; mô đun chống uốn.

1. Giới thiệu

Cọc ống thép được sử dụng rộng rãi trong công trình bến cảng, cầu cảng, cầu ven biển, cầu vượt biển và các kết cấu chịu tải trọng lớn trong

điều kiện địa chất phức tạp.

Đối với công trình bến cảng hoặc móng cọc bê tông cao, một phần cọc có thể nằm tự do hoặc bán tự do trong nước biển, vùng thủy triều hoặc vùng

bắn tóe. Đoạn cọc này vừa đóng vai trò truyền tải trọng từ kết cấu bên trên xuống phần cọc chôn trong đất, vừa chịu tác động trực tiếp của môi trường biển, tải trọng sóng, dòng chảy, va chạm và các tác động khai thác khác. Trong môi trường biển Việt Nam, thép có thể bị ăn mòn do tác động đồng thời của độ ẩm cao, nhiệt độ lớn, ion clorua, chu kỳ khô – ướt, vùng bắn tóe và vùng thủy triều. Ăn mòn làm suy giảm lượng vật liệu thép, kéo theo sự thay đổi chiều dày thành cọc, diện tích tiết diện, mô men quán tính, mô đun chống uốn và tỷ số đường kính trên chiều dày thành ống [1–3]. Các thay đổi này ảnh hưởng trực tiếp đến sức kháng kết cấu của cọc, đặc biệt tại các đoạn cọc lộ thiên trong nước biển hoặc trong vùng thủy triều.

Trong thực tế thiết kế và khai thác, cọc thép trong môi trường biển thường không được để trần hoàn toàn mà được áp dụng các biện pháp bảo vệ chống ăn mòn như sơn phủ, bọc vật liệu, bù chiều dày ăn mòn hoặc bảo vệ điện hóa. TCVN 11197:2015 đưa ra các yêu cầu và nguyên tắc lựa chọn phương pháp chống ăn mòn cho cọc thép [4]. Tuy nhiên, hiệu quả của các biện pháp bảo vệ có thể suy giảm theo thời gian do lão hóa lớp phủ, hư hỏng cơ học, va chạm, chất lượng thi công không đồng đều, môi trường xâm thực mạnh hoặc mất hiệu quả của hệ thống bảo vệ catốt. Vì vậy, nghiên cứu trường hợp cọc thép không được bảo vệ không nhằm mô tả đầy đủ điều kiện thiết kế thông thường, mà được sử dụng như một trường hợp cơ sở bất lợi để đánh giá ảnh hưởng trực tiếp của ăn mòn đến cọc và làm cơ sở so sánh với các giải pháp bảo vệ trong các nghiên cứu tiếp theo.

Bộ TCVN 11820 được sử dụng trong bài báo như khung tham chiếu để xác định bối cảnh làm việc của cọc trong công trình cảng biển và móng cọc bê tông cao [5–8]. Trong khuôn khổ này, cần phân biệt giữa bài toán sức chịu tải nền móng của phần cọc chôn trong đất và bài toán sức kháng kết cấu của đoạn cọc lộ trong môi trường biển. Đối với đoạn cọc bị ăn mòn, vấn đề trọng tâm không phải là xác định lại toàn bộ sức chịu tải địa kỹ thuật của cọc, mà là lượng hóa sự suy giảm diện tích tiết diện hữu hiệu và các đặc trưng cơ học của tiết diện theo

thời gian [7]. Đây là cơ sở quan trọng để liên hệ bài toán ăn mòn với đánh giá sức kháng kết cấu của đoạn cọc lộ trong môi trường biển, vì ăn mòn làm suy giảm trực tiếp diện tích mặt cắt ngang hữu hiệu của đoạn cọc này. TCVN 11820-5:2021 áp dụng cho công trình bến cảng biển, còn TCVN 11820-4-1:2020 áp dụng cho nền móng công trình cảng biển.

Cần phân biệt rõ hai khái niệm trong nghiên cứu này. Sức chịu tải nền móng của cọc được huy động chủ yếu bởi phần cọc chôn trong đất, thông qua sức kháng mũi, ma sát bên và tương tác đất – cọc. Ngược lại, đoạn cọc lộ trong nước biển, vùng thủy triều hoặc vùng bắn tóe không phải là đoạn tạo ra sức chịu tải nền móng chủ yếu, nhưng là đoạn truyền lực từ bệ/kết cấu bên trên xuống phần cọc chôn trong đất. Do đó, ăn mòn tại đoạn này không được diễn giải là làm giảm trực tiếp sức chịu tải địa kỹ thuật của cọc, mà làm suy giảm sức kháng kết cấu của cọc thông qua suy giảm diện tích mặt cắt ngang hữu hiệu, mô men quán tính, mô đun chống uốn và chiều dày thành cọc.

Các nghiên cứu trước đây đã tập trung vào đặc trưng ăn mòn, mô hình hao hụt vật liệu và ảnh hưởng của ăn mòn đến khả năng chịu lực của cấu kiện thép hoặc cọc ống thép trong môi trường biển [1–3], [9–16]. Đặc biệt, nghiên cứu của Le và cộng sự đã hiệu chỉnh mô hình Weibull hai tham số cho hao hụt khối lượng ăn mòn của mẫu ống thép trong môi trường biển mô phỏng Việt Nam [15].

Trong nghiên cứu này, kết quả hiệu chỉnh nêu trên được sử dụng như dữ liệu đầu vào để đánh giá suy giảm tiết diện cọc. Cụ thể, mô hình Weibull được xây dựng từ dữ liệu thí nghiệm ăn mòn gia tốc gồm 90 mẫu thép, với ba mốc thời gian quy đổi tương đương 4,5 năm, 7,5 năm và 15 năm. Các tham số k và η được xác định bằng hồi quy phi tuyến nhằm tối thiểu hóa sai số giữa tỷ lệ hao hụt khối lượng thực nghiệm và giá trị dự báo của mô hình. Vì vậy, mô hình Weibull trong bài báo không phải là giả thiết tùy ý, mà là mô hình dự báo kế thừa từ dữ liệu thí nghiệm của nhóm tác giả. Tuy nhiên, vẫn cần làm rõ hơn cách liên kết dữ liệu hao hụt vật liệu do ăn mòn với đánh giá suy giảm tiết

diện và sức kháng kết cấu của đoạn cọc lộ trong môi trường biển. Do đó, nghiên cứu này sử dụng bộ TCVN 11820 làm khung tiêu chuẩn tham chiếu cho điều kiện làm việc của công trình cảng biển/móng cọc bê cao, đồng thời tập trung định lượng sự suy giảm tiết diện cọc do ăn mòn.

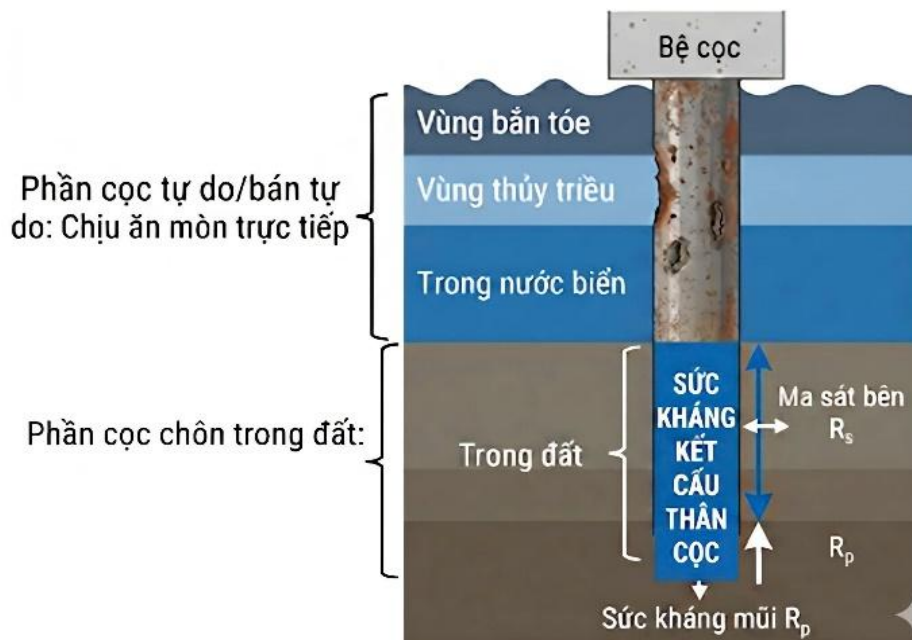
Mục tiêu của nghiên cứu gồm: (1) xác định phạm vi đánh giá đối với đoạn cọc lộ trong môi trường biển của móng cọc bê cao/công trình bến; (2) trình bày cách liên hệ giữa điều kiện khống chế theo vật liệu trong TCVN 11820-4-1 và diện tích tiết diện hữu hiệu sau ăn mòn; (3) quy đổi hao hụt khối lượng do ăn mòn thành diện tích tiết diện và chiều dày tương đương còn lại; (4) đánh giá sự suy giảm các đặc trưng tiết diện cọc theo thời gian; và (5)

làm rõ hàm ý của sự suy giảm tiết diện đối với kiểm tra kết cấu cọc trong khung thiết kế theo TCVN 11820.

2. Phạm vi nghiên cứu và giả thiết

Phạm vi đoạn cọc được xem xét trong nghiên cứu, bao gồm phần cọc lộ trong nước biển, vùng thủy triều và vùng bắn tóe của móng cọc bê cao, được minh họa trong Hình 1.

Nghiên cứu tập trung vào đoạn cọc ống thép lộ trong môi trường biển, đặc biệt trong công trình bến cọc cao, cầu cảng hoặc các kết cấu móng cọc bê cao tương tự. Đây là đoạn cọc nằm trong nước biển, vùng thủy triều hoặc vùng bắn tóe, chịu tác động ăn mòn trực tiếp trong quá trình khai thác.



Hình 1. Phạm vi đánh giá ăn mòn đối với cọc ống thép trong móng cọc bê cao

Nghiên cứu không nhằm tính toán đầy đủ sức chịu tải nền móng của cọc theo đất nền, cũng không tính đầy đủ tải trọng sóng, dòng chảy, va chạm tàu, động đất hoặc tổ hợp tải trọng theo TCVN 11820-2:2017. Các nội dung này cần được thực hiện trong thiết kế công trình cụ thể [5]. Trong bài báo này, TCVN 11820 được sử dụng như khung tham chiếu để xác định đúng bối cảnh làm việc của cọc ống thép trong công trình cảng biển và móng cọc bê cao.

Các giả thiết chính của nghiên cứu gồm: ăn mòn được giả thiết phân bố đều trên thành cọc; tỷ

lệ hao hụt khối lượng được dùng để suy ra diện tích tiết diện thép trung bình còn lại; chiều dày sau ăn mòn được biểu diễn dưới dạng chiều dày tương đương theo điều kiện bảo toàn diện tích tiết diện; cường độ vật liệu thép và ứng suất cho phép được giả thiết không thay đổi theo thời gian. Nghiên cứu chưa xét trực tiếp ăn mòn cục bộ, ăn mòn lỗ rỗng, ăn mòn không đều theo cao độ, tải trọng động, mỏi, va chạm, sóng, dòng chảy và tương tác đất – cọc trong tính toán định lượng. Các yếu tố này được xem là những nội dung cần bổ sung khi áp dụng cho đánh giá công trình cụ thể.

Với giả thiết ăn mòn đều, kết quả tính toán phản ánh xu thế suy giảm trung bình của tiết diện cọc. Trong thực tế, ăn mòn tại vùng bắn tóe, vùng thủy triều hoặc các vị trí có khuyết tật lớp bảo vệ có thể phát triển không đều và tạo ra chiều dày cục bộ nhỏ hơn chiều dày tương đương tính toán. Vì vậy, chiều dày tương đương trong bài báo nên được hiểu là đại lượng quy đổi phục vụ đánh giá tương đối, không thay thế cho số liệu đo chiều dày thực tế tại hiện trường.

3. Cơ sở kiểm tra theo TCVN 11820-4-1:2020 và cách xét suy giảm tiết diện do ăn mòn

3.1. Sức chịu tải nền móng và giới hạn của phạm vi nghiên cứu

Trong thiết kế nền móng cảng biển theo TCVN 11820-4-1:2020, khả năng làm việc của cọc được xem xét trong mối liên hệ với điều kiện nền đất, chiều dài cọc, phương pháp thi công và các hệ số điều chỉnh thiết kế. Trong bài báo này, nguyên tắc đó chỉ được sử dụng để xác định ranh giới giữa bài toán nền móng và bài toán suy giảm kết cấu của đoạn cọc lộ do ăn mòn [7]. Trong nghiên cứu này, nguyên tắc này được biểu diễn dưới dạng:

$$R_a = \frac{R_u}{m} \quad (1)$$

trong đó R_a là sức chịu tải dọc trục thiết kế của cọc trong điều kiện bình thường (kN), R_u là sức chịu tải dọc trục cực hạn của cọc đơn (kN), và m là hệ số điều chỉnh.

Công thức (1) phản ánh sức chịu tải nền móng của cọc, trong đó R_u phụ thuộc vào điều kiện địa chất, chiều dài cọc, phương pháp thi công, điều kiện mũi cọc, ma sát bên và các yếu tố nền đất. Các yếu tố này chủ yếu gắn với phần cọc chôn trong đất. Trong phạm vi nghiên cứu này, do chưa xét một hồ sơ địa chất và sơ đồ công trình cụ thể, R_u và R_a không được tính tuyệt đối. Công thức (1) chỉ được sử dụng để xác định ranh giới giữa bài toán nền móng và bài toán suy giảm kết cấu của đoạn cọc lộ trong môi trường biển.

3.2. Điều kiện khống chế theo vật liệu của cọc

Ngoài điều kiện nền đất, quá trình kiểm tra cọc còn bị khống chế bởi khả năng chịu nén của vật liệu trên tiết diện hữu hiệu. Khi cọc bị ăn mòn,

diện tích tiết diện hữu hiệu giảm theo thời gian, do đó giới hạn chịu nén theo vật liệu của đoạn cọc lộ cũng giảm tương ứng. TCVN 11820-4-1:2020 quy định rằng sức chịu tải thiết kế dọc trục của cọc không được vượt quá giá trị xác định bằng diện tích mặt cắt ngang hữu hiệu của cọc nhân với ứng suất nén cho phép của vật liệu cọc [7]. Điều kiện khống chế được biểu diễn trong nghiên cứu theo công thức (2):

$$R_a \leq A_e f_{ca} \quad (2)$$

trong đó A_e là diện tích mặt cắt ngang hữu hiệu của cọc (m^2 hoặc mm^2), và f_{ca} là ứng suất nén cho phép của vật liệu cọc. Khi A_e tính bằng mm^2 và f_{ca} tính bằng N/mm^2 , tích $A_e f_{ca}$ có đơn vị N.

Trong phạm vi mô hình ăn mòn đều của nghiên cứu, diện tích mặt cắt ngang hữu hiệu tại thời điểm t được lấy bằng diện tích tiết diện thép trung bình còn lại, theo công thức (3):

$$A_e(t) = A(t) \quad (3)$$

trong đó $A(t)$ là diện tích tiết diện thép trung bình còn lại tại thời điểm t .

Khi đó, giới hạn chịu nén theo điều kiện vật liệu của đoạn cọc sau ăn mòn có thể biểu diễn dưới dạng:

$$R_{mat}(t) = A(t) f_{ca} \quad (4)$$

trong đó $R_{mat}(t)$ là giới hạn chịu nén theo điều kiện vật liệu của tiết diện cọc lộ trong môi trường biển sau ăn mòn. Công thức (4) chỉ biểu diễn giới hạn chịu nén theo vật liệu của đoạn cọc bị ăn mòn. Công thức này không dùng để thay thế tính toán sức chịu tải nền móng của toàn bộ cọc, mà nhằm lượng hóa ảnh hưởng của suy giảm diện tích tiết diện đến sức kháng kết cấu tương đối.

Nếu giả thiết f_{ca} không thay đổi theo thời gian, tỷ lệ suy giảm giới hạn chịu nén theo điều kiện vật liệu được xác định bởi:

$$\frac{R_{mat}(t)}{R_{mat,0}} = \frac{A(t)}{A_0} \quad (5)$$

trong đó $R_{mat,0} = A_0 f_{ca}$ là giá trị ban đầu trước ăn mòn. Công thức (5) là quan hệ chính để liên kết yêu cầu về diện tích mặt cắt ngang hữu hiệu trong TCVN 11820-4-1:2020 với bài toán ăn mòn: ăn mòn làm giảm diện tích mặt cắt ngang hữu hiệu, từ

đó làm giảm giới hạn chịu nén theo điều kiện vật liệu của đoạn cọc.

3.3. Điều kiện uốn của đoạn cọc lộ trong môi trường biển

Đối với công trình bến bệ cọc cao, đoạn cọc lộ trong nước biển không chỉ chịu lực dọc mà còn có thể chịu mô men uốn và tải trọng ngang do tải trọng sử dụng, sóng, dòng chảy, va chạm và chuyển vị của kết cấu bên trên. TCVN 11820-2:2017 quy định về tải trọng và tác động đối với công trình cảng biển, còn TCVN 11820-5:2021 áp dụng cho công trình bến, bao gồm bến bệ cọc cao [5], [8].

Trong phạm vi nghiên cứu này, do chưa có sơ đồ tải trọng cụ thể, sức kháng uốn tuyệt đối không được tính theo tổ hợp tải trọng thiết kế. Tuy nhiên, ảnh hưởng của ăn mòn đến khả năng chống uốn của tiết diện có thể được đánh giá thông qua mô đun chống uốn đàn hồi và được biểu diễn theo công thức (6):

$$M_{mat}(t) = W(t)f_{ba} \quad (6)$$

trong đó $M_{mat}(t)$ là sức kháng uốn đàn hồi tương ứng với điều kiện vật liệu của tiết diện sau ăn mòn, $W(t)$ là mô đun chống uốn đàn hồi còn lại của tiết diện (mm^3), và f_{ba} là ứng suất uốn cho phép của vật liệu thép. Công thức (6) là quan hệ cơ học tiết diện dùng để đánh giá mức suy giảm tương đối, không phải công thức tính toán đầy đủ theo TCVN 11820.

Nếu giả thiết f_{ba} không thay đổi theo thời gian, tỷ lệ suy giảm sức kháng uốn đàn hồi được xác định theo:

$$\frac{M_{mat}(t)}{M_{mat,0}} = \frac{W(t)}{W_0} \quad (7)$$

Công thức (7) không thể thay thế quá trình kiểm tra uốn đầy đủ của công trình theo tổ hợp tải trọng, nhưng cho phép định lượng trực tiếp mức suy giảm khả năng chống uốn của tiết diện cọc do ăn mòn.

3.4. Chỉ tiêu độ mảnh và nguy cơ oằn cục bộ thành cọc

TCVN 11820-4-1:2020 nêu rằng khi xác định sức chịu tải dọc trục của cọc cần xét đến giảm ứng suất cho phép do hệ số độ mảnh của cọc. Đối với

cọc có tỷ lệ lớn giữa chiều dài và đường kính, sức chịu tải thiết kế dọc trục có thể phải giảm do ảnh hưởng của độ chính xác thi công và độ mảnh của cọc [7]. Tiêu chuẩn cũng lưu ý đối với cọc ống thép có chiều dày thành nhỏ so với đường kính, cần quan tâm đến nguy cơ mất ổn định cục bộ.

Đối với đoạn cọc tự do hoặc bán tự do trong móng cọc bệ cao, nếu chiều dài tính toán chưa được xác định, nghiên cứu này không tính sức kháng ổn định tổng thể tuyệt đối. Tuy nhiên, có thể đánh giá xu thế thay đổi độ mảnh tương đối theo công thức (8):

$$\frac{\lambda(t)}{\lambda_0} = \frac{i_0}{i(t)} \quad (8)$$

trong đó $\lambda(t)$ là độ mảnh tại thời điểm t , λ_0 là độ mảnh ban đầu, $i(t)$ là bán kính quán tính còn lại, và i_0 là bán kính quán tính ban đầu với giả thiết chiều dài tính toán của đoạn cọc tự do được giả thiết không đổi.

Ngoài ra, đối với cọc ống thép, tỷ số giữa đường kính ngoài và chiều dày tương đương còn lại được xác định theo công thức (9):

$$\frac{D}{t_r(t)} \quad (9)$$

trong đó D là đường kính ngoài của cọc và $t_r(t)$ là chiều dày tương đương còn lại. Tỷ số này phản ánh mức độ mảnh hóa thành ống. Khi D/t_r tăng mạnh, nguy cơ oằn cục bộ thành cọc có thể tăng, đặc biệt tại các vùng ăn mòn cục bộ hoặc ăn mòn không đều theo cao độ.

4. Mô hình ăn mòn và quy đổi tiết diện còn lại

4.1. Tỷ lệ hao hụt khối lượng theo thời gian

Tỷ lệ hao hụt khối lượng theo thời gian được mô tả bằng mô hình Weibull hai tham số. Việc lựa chọn mô hình Weibull xuất phát từ đặc điểm của quá trình ăn mòn thép trong môi trường biển: mức độ suy giảm vật liệu có tính tích lũy, không hồi phục và thường biến thiên phi tuyến theo thời gian. Mô hình Weibull có khả năng điều chỉnh hình dạng đường cong suy giảm thông qua tham số hình dạng k , đồng thời tham số tỷ lệ η thể hiện mốc thời gian đặc trưng của quá trình suy giảm [9], [15], tỷ lệ hao hụt khối lượng theo thời gian của mô hình

Weibull được biểu diễn theo công thức (10):

$$c(t)=100\left[1-\exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^k\right)\right] \quad (10)$$

trong đó, $c(t)$ là tỷ lệ hao hụt khối lượng tại thời điểm t (%), t là thời gian khai thác tương đương (năm), k là tham số hình dạng và η là tham số tỷ lệ của mô hình Weibull. Trong nghiên cứu này, các tham số Weibull được kế thừa từ kết quả thí nghiệm ăn mòn gia tốc của nhóm tác giả. Dữ liệu thí nghiệm dùng để hiệu chỉnh mô hình được lấy từ thí nghiệm ăn mòn gia tốc điện hóa trên mẫu thép SKK490 trong dung dịch mô phỏng môi trường biển. Mẫu thép có kích thước $20 \times 200 \times 16$ mm, trong đó chiều dài phần ngâm trong dung dịch thí nghiệm là 100 mm. Tại các mốc thời gian quy đổi 4,5 năm, 7,5 năm và 15 năm, mỗi mốc gồm 30 mẫu thí nghiệm; tỷ lệ hao hụt khối lượng trung bình

tại các mốc này được sử dụng để hiệu chỉnh mô hình Weibull hai tham số. Các tham số k và η được xác định bằng hồi quy phi tuyến theo tiêu chí tối thiểu hóa tổng bình phương sai số giữa tỷ lệ hao hụt khối lượng thực nghiệm và giá trị dự báo của mô hình. Kết quả thu được theo [15] là:

$$k=1,226, \quad \eta=70,761 \text{ năm}$$

Giá trị $k > 1$ cho thấy tốc độ hao hụt khối lượng có xu hướng tăng theo thời gian. Tuy nhiên, do các tham số này được xác định từ thí nghiệm gia tốc trong môi trường biển mô phỏng, kết quả dự báo cần được hiểu là xu thế suy giảm trung bình và cần được hiệu chỉnh thêm khi có số liệu hiện trường của công trình cụ thể. Trên cơ sở các tham số Weibull đã xác định, tỷ lệ hao hụt khối lượng dự báo tại các mốc thời gian tương đương 20, 30, 50, 75 và 100 năm được tổng hợp trong Bảng 1.

Bảng 1. Tỷ lệ hao hụt khối lượng của mẫu cọc thép theo mô hình dự báo Weibull [15]

Mốc thời gian tương đương t (năm)	Tỷ lệ hao hụt khối lượng $c(t)$ (%)
20	19,14
30	29,48
50	47,97
75	65,83
100	78,30

4.2. Diện tích tiết diện thép còn lại

Diện tích tiết diện ban đầu của cọc ống thép được xác định theo công thức (11):

$$A_0=\frac{\pi}{4}\left[D^2-(D-2t_0)^2\right] \quad (11)$$

trong đó A_0 là diện tích tiết diện thép ban đầu của cọc (mm^2), D là đường kính ngoài ban đầu của cọc (mm), và t_0 là chiều dày ban đầu của thành cọc (mm).

Từ tỷ lệ hao hụt khối lượng $c(t)$, diện tích tiết diện thép trung bình còn lại tại thời điểm t được xác định theo:

$$A(t)=A_0\left[1-\frac{c(t)}{100}\right] \quad (12)$$

trong đó $A(t)$ là diện tích tiết diện thép trung bình còn lại tại thời điểm t (mm^2). Cách tiếp cận này dựa trên giả thiết rằng đoạn cọc xét có chiều dài không đổi, khối lượng riêng thép không đổi và ăn

mòn phân bố tương đối đều trên tiết diện. Khi đó, tỷ lệ hao hụt khối lượng có thể được dùng để suy ra tỷ lệ suy giảm diện tích tiết diện trung bình. Trường hợp ăn mòn cục bộ hoặc ăn mòn không đều theo cao độ sẽ làm cho chiều dày nhỏ nhất tại một số vị trí thấp hơn giá trị chiều dày tương đương, do đó cần được kiểm tra riêng trong đánh giá công trình thực tế [17–19].

4.3. Chiều dày tương đương sau ăn mòn

Chiều dày tương đương $t_r(t)$ được xác định từ điều kiện diện tích tiết diện ống tròn sau ăn mòn bằng diện tích tiết diện thép còn lại $A(t)$. Đại lượng này là chiều dày quy đổi theo diện tích, được sử dụng cho mô hình ăn mòn đều quanh chu vi cọc. Do đó, $t_r(t)$ không đại diện cho chiều dày nhỏ nhất tại các vị trí ăn mòn rỗ hoặc ăn mòn cục bộ, điều kiện bảo toàn diện tích giữa tiết diện tương đương sau ăn mòn và diện tích thép còn lại $A(t)$ được biểu

diễn theo công thức (13):

$$A(t) = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2t_r(t))^2] \quad (13)$$

Từ công thức (13), $t_r(t)$ được xác định theo công thức (14):

$$t_r(t) = \frac{D - \sqrt{D^2 - \frac{4A(t)}{\pi}}}{2} \quad (14)$$

trong đó $t_r(t)$ là chiều dày tương đương còn lại tại thời điểm t (mm).

Công thức (14) chỉ áp dụng khi tiết diện sau ăn mòn được giả thiết vẫn là tiết diện ống tròn đồng tâm, có chiều dày phân bố đều theo chu vi. Trong trường hợp ăn mòn lỗ rỗng, ăn mòn không đều hoặc ăn mòn lệch một phía, tiết diện còn lại có thể bị lệch tâm hình học, làm thay đổi vị trí trọng tâm, trục quán tính chính và phân bố ứng suất uốn. Khi đó, cần sử dụng chiều dày cục bộ $t(z, \theta)$, chiều dày nhỏ nhất t_{min} hoặc mô hình tiết diện không đều để tính lại A , I , W và ứng suất cục bộ. Vì vậy, kết quả tính theo $t_r(t)$ trong bài báo chỉ phản ánh xu thế suy giảm trung bình, không thay thế kiểm tra chịu uốn chi tiết đối với tiết diện bị ăn mòn cục bộ.

4.4. Đặc trưng tiết diện còn lại

Đường kính trong tương đương tại thời điểm t được xác định theo công thức (15):

$$D_i(t) = D - 2t_r(t) \quad (15)$$

trong đó $D_i(t)$ là đường kính trong tương đương (mm).

Từ đường kính trong tương đương, mô men quán tính của tiết diện, mô đun chống uốn đàn hồi và bán kính quán tính của tiết diện được xác định lần lượt theo các công thức (16), (17) và (18):

$$I(t) = \frac{\pi}{64} [D^4 - D_i^4(t)] \quad (16)$$

$$W(t) = \frac{I(t)}{D/2} \quad (17)$$

$$i(t) = \sqrt{\frac{I(t)}{A(t)}} \quad (18)$$

trong đó $I(t)$ là mô men quán tính của tiết diện (mm^4), $W(t)$ là mô đun chống uốn đàn hồi (mm^3), và $i(t)$ là bán kính quán tính của tiết diện (mm).

Tỷ số đường kính trên chiều dày tương đương được xác định theo công thức (9).

Đây là đại lượng không thứ nguyên, phản ánh mức độ mảnh của thành ống khi chiều dày bị suy giảm do ăn mòn.

5. Kết quả tính toán và đánh giá

5.1. Suy giảm khối lượng, diện tích tiết diện và chiều dày tương đương

Cọc ống thép được xét trong nghiên cứu có đường kính ngoài $D=1.500$ mm và chiều dày ban đầu $t_0=16$ mm. Các đặc trưng hình học ban đầu được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Thông số hình học ban đầu của cọc ống thép

Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Đường kính ngoài ban đầu	D	1.500 (mm)
Chiều dày ban đầu	t_0	16 (mm)
Đường kính trong ban đầu	D_{i0}	1.468 (mm)
Diện tích tiết diện thép ban đầu	A_0	74.594 (mm^2)
Mô men quán tính ban đầu	I_0	$20,537 \times 10^9$ (mm^4)
Mô đun chống uốn ban đầu	W_0	$27,382 \times 10^6$ (mm^3)
Bán kính quán tính ban đầu	i_0	524,70 (mm)

Bảng 3. Hao hụt khối lượng và tiết diện còn lại theo thời gian

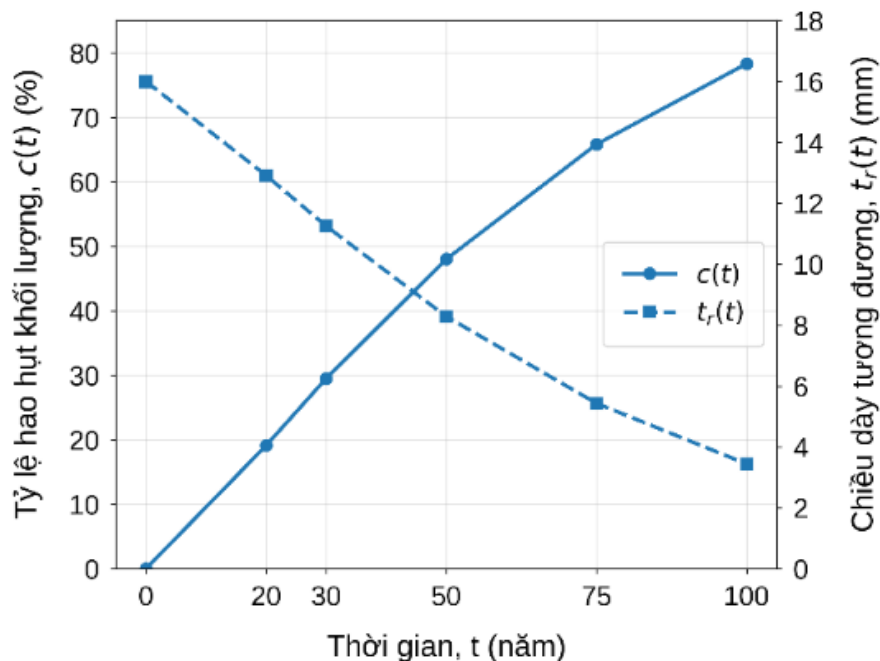
Thời gian t (năm)	0	20	30	50	75	100
$c(t)$ (%)	0,000	19,140	29,480	47,970	65,830	78,300
$A(t)/A_0$	1,000	0,809	0,705	0,520	0,342	0,217
$A(t)$ (mm^2)	74.594	60.318	52.606	38.815	25.486	16.183
$t_r(t)$ (mm)	16,000	12,910	11,250	8,280	5,430	3,440
$D/t_r(t)$	93,750	116,180	133,36	181,110	276,350	435,790

Kết quả trong Bảng 3 cho thấy quá trình ăn mòn làm suy giảm đáng kể tiết diện thép của cọc theo thời gian. Tại 20 năm, tỷ lệ hao hụt khối lượng đạt 19,14%, tương ứng diện tích tiết diện thép còn khoảng hơn 80% so với ban đầu. Tại 50 năm, tỷ lệ hao hụt khối lượng tăng lên 47,97%, diện tích tiết diện thép còn gần 52,0%, và chiều dày tương đương giảm từ 16,00 mm xuống 8,28 mm. Đến 100 năm, diện tích tiết diện thép chỉ còn 21,7% và chiều dày tương đương chỉ còn 3,44 mm.

Các kết quả này cho thấy đối với đoạn cọc tiếp xúc trực tiếp với môi trường biển, suy giảm tiết diện thép có thể trở thành một trong các yếu tố chi phối trong đánh giá dài hạn, đặc biệt khi lớp bảo vệ

chống ăn mòn bị suy giảm hiệu quả hoặc khi cọc làm việc trong vùng thủy triều và vùng nước bắn. Tuy nhiên, các giá trị trong Bảng 3 phản ánh tiết diện trung bình còn lại theo giả thiết ăn mòn đều. Trong điều kiện thực tế, chiều dày còn lại cần được kiểm chứng bằng đo đạc hiện trường hoặc dữ liệu quan trắc để xét đến ảnh hưởng của ăn mòn không đều.

Đây là cơ sở để yêu cầu kiểm tra sức kháng kết cấu của đoạn cọc lộ trong biển, bên cạnh các kiểm tra nền móng, tải trọng và tác động theo bộ TCVN 11820. Diễn biến của tỷ lệ hao hụt khối lượng $c(t)$ và chiều dày tương đương còn lại $t_r(t)$ theo thời gian được thể hiện trong Hình 2.



Hình 2. Quan hệ giữa thời gian với tỷ lệ hao hụt khối lượng $c(t)$ và chiều dày tương đương $t_r(t)$

5.2. Suy giảm đặc trưng tiết diện và sức kháng kết cấu tương đối

Bảng 4 cho thấy mô men quán tính và mô đun chống uốn đàn hồi đều suy giảm mạnh theo thời gian, với xu thế gần tương ứng với mức suy giảm diện tích tiết diện thép trong trường hợp ăn mòn đều. Tại 50 năm, $A(t)/A_0=0,520$, trong khi $I(t)/I_0$ và $W(t)/W_0$ đạt khoảng 0,526. Điều đó có nghĩa là diện tích chịu lực dọc và khả năng chống uốn đàn hồi của tiết diện đều đã giảm gần một nửa so với trạng thái ban đầu. Đến 100 năm, các giá trị $A(t)/A_0$, $I(t)/I_0$ và $W(t)/W_0$ chỉ còn khoảng

0,217÷0,221.

Trên cơ sở điều kiện khống chế theo vật liệu của TCVN 11820-4-1, nếu ứng suất nén cho phép của vật liệu thép được giả thiết không thay đổi, tỷ lệ suy giảm giới hạn chịu nén theo điều kiện vật liệu của đoạn cọc bị ăn mòn có thể lấy bằng $A(t)/A_0$. Như vậy, tại 50 năm, giới hạn chịu nén theo điều kiện vật liệu của tiết diện chỉ còn khoảng 52,0% so với ban đầu. Tương tự, nếu sử dụng mô đun chống uốn đàn hồi để đánh giá tương đối khả năng chống uốn, tại 50 năm sức kháng uốn đàn hồi chỉ còn khoảng 52,6% so với ban đầu.

Bảng 4. Suy giảm đặc trưng tiết diện cọc theo thời gian

Thời gian t (năm)	0	20	30	50	75	100
$A(t)/A_0$	1,000	0,809	0,705	0,520	0,342	0,217
$I(t)/I_0$	1,000	0,812	0,710	0,526	0,347	0,221
$W(t)/W_0$	1,000	0,812	0,710	0,526	0,347	0,221
$i(t)/i_0$	1,000	1,002	1,003	1,005	1,007	1,008
$\lambda(t)/\lambda_0$	1,000	0,998	0,997	0,995	0,993	0,992

Kết quả này cho thấy sự suy giảm sức kháng kết cấu tương đối của đoạn cọc lộ trong môi trường biển có thể rất lớn, ngay cả với mô hình ăn mòn đều. Khi xuất hiện ăn mòn cục bộ, lỗ rỗng tại bề mặt hoặc suy giảm chiều dày không đều theo cao độ, mức suy giảm tại tiết diện nguy hiểm có thể lớn hơn so với giá trị trung bình tính toán trong bài báo. Đối với móng cọc bê tông, đoạn cọc lộ trong nước biển là bộ phận truyền lực từ kết cấu bên trên xuống phần cọc chôn trong đất, đồng thời có thể chịu lực dọc, mô men uốn và tải trọng ngang. Vì vậy, kiểm tra chiều dày còn lại và tiết diện hữu hiệu là nội dung cần thiết trong đánh giá dài hạn.

5.3. Chỉ tiêu mảnh hóa thành ống và vấn đề ổn định cục bộ

TCVN 11820-4-1:2020 lưu ý rằng khi xác định sức chịu tải dọc trục của cọc cần xét đến ảnh hưởng của độ mảnh, và đối với cọc ống thép có chiều dày thành nhỏ so với đường kính cần quan tâm đến nguy cơ mất ổn định cục bộ [7]. Vì vậy, tỷ số D/t_r là một chỉ tiêu quan trọng khi đánh giá hậu quả của ăn mòn.

Kết quả trong Bảng 2 cho thấy D/t_r tăng từ 93,75 ở trạng thái ban đầu lên 181,11 tại 50 năm và 435,79 tại 100 năm, do chiều dày tương đương giảm nhanh theo thời gian trong khi đường kính ngoài D được giữ không đổi trong mô hình quy đổi. Sự gia tăng này cho thấy thành ống trở nên mảnh hơn rất nhiều khi ăn mòn phát triển. Trong khi đó, bán kính quán tính $i(t)$ gần như không thay đổi; tại 100 năm, $i(t)/i_0 = 1,008$. Nếu chiều dài tính toán của đoạn cọc tự do được giả thiết không đổi, tỷ số độ mảnh tổng thể $\lambda(t)/\lambda_0 = i_0/i(t)$ giảm nhẹ từ 1,000 xuống 0,992. Kết quả tính toán cho thấy trong giả

thiết ăn mòn đều, bán kính quán tính thay đổi không đáng kể nên độ mảnh tổng thể của đoạn cọc tự do hầu như không tăng. Tuy nhiên, nhận xét này chỉ đúng cho mô hình tiết diện quy đổi trung bình và không đồng nghĩa với việc có thể bỏ qua kiểm tra ổn định. Nguy cơ nổi bật hơn là mảnh hóa và oằn cục bộ thành ống do D/t_r tăng mạnh. Vì vậy, đối với cọc ống thép trong môi trường biển, D/t_r nên được xem là chỉ tiêu cảnh báo về mảnh hóa thành ống. Chỉ tiêu này không thay thế kiểm tra ổn định cục bộ theo tiêu chuẩn thiết kế, nhưng cho thấy cần bổ sung kiểm tra oằn cục bộ thành ống, ăn mòn cục bộ và phân bố ăn mòn theo cao độ trong các nghiên cứu tiếp theo [12–14].

Xu thế gia tăng mạnh của tỷ số D/t_r theo thời gian được thể hiện trực quan trong Hình 3, qua đó cho thấy mức độ mảnh hóa của thành ống ngày càng rõ khi ăn mòn phát triển.

5.4. Ảnh hưởng của ăn mòn không đều và giới hạn của mô hình quy đổi

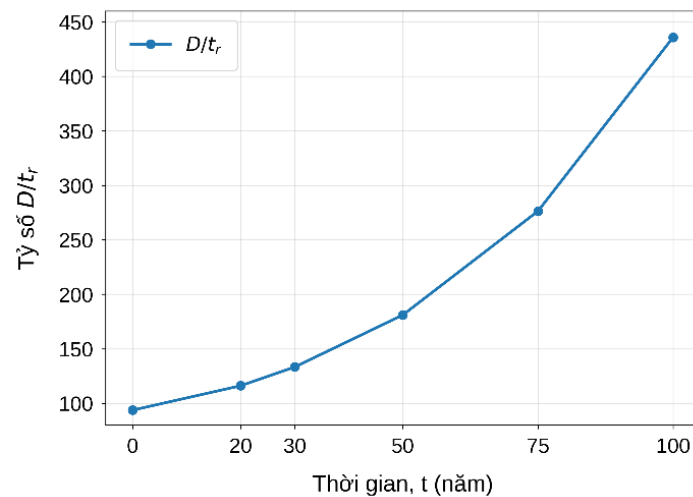
Các kết quả tính toán trong bài báo được xây dựng trên giả thiết ăn mòn đều, trong đó tỷ lệ hao hụt khối lượng được quy đổi thành diện tích tiết diện trung bình và chiều dày tương đương. Cách tiếp cận này phù hợp để đánh giá xu thế suy giảm tổng quát của tiết diện cọc theo thời gian, nhưng chưa phản ánh đầy đủ sự phân bố ăn mòn không đều trong môi trường biển thực tế.

Trong điều kiện khai thác, mức độ ăn mòn có thể thay đổi theo cao độ cọc. Vùng bắn tóe và vùng thủy triều thường chịu tác động bất lợi của chu kỳ khô – ướt, oxy hòa tan và ion clorua, do đó có thể xuất hiện chiều dày cục bộ nhỏ hơn chiều dày tương đương tính toán. Ngoài ra, ăn mòn lỗ rỗng

hoặc ăn mòn cục bộ có thể gây tập trung ứng suất và làm tăng nguy cơ mất ổn định cục bộ của thành ống.

Vì vậy, khi áp dụng kết quả nghiên cứu cho công trình thực tế, cần kết hợp mô hình suy giảm

trung bình với số liệu đo chiều dày, khảo sát hiện trường và kiểm tra ổn định cục bộ tại các tiết diện bất lợi. Đây cũng là hướng phát triển cần thiết để mở rộng mô hình từ đánh giá suy giảm tương đối sang đánh giá an toàn kết cấu đầy đủ.



Hình 3. Sự gia tăng tỷ số D/t_r theo thời gian

5.5. Lưu ý đối với thiết kế, kiểm định và bảo vệ chống ăn mòn

Kết quả tính toán cho thấy, trong khung thiết kế công trình cảng biển theo TCVN 11820, ngoài các kiểm tra về tải trọng, tác động, nền móng và sức chịu tải của cọc, cần quan tâm đến sự suy giảm tiết diện của đoạn cọc lộ trong môi trường biển. Đoạn cọc này là bộ phận truyền lực từ bộ/kết cấu bên trên xuống phần cọc chôn trong đất, đồng thời có thể chịu lực dọc, mô men uốn, tải trọng ngang, sóng, dòng chảy và va chạm trong điều kiện khai thác.

Trong thực tế, cọc thép thường được bảo vệ bằng sơn phủ, bọc vật liệu hoặc bảo vệ catốt theo các nguyên tắc của TCVN 11197:2015 [4]. Vì vậy, trường hợp cọc không được bảo vệ trong nghiên cứu này không đại diện cho mọi cấu hình thiết kế thông thường, mà được sử dụng như một kịch bản cơ sở bất lợi để đánh giá trực tiếp ảnh hưởng của ăn mòn đến tiết diện cọc. Kịch bản này có ý nghĩa trong các trường hợp lớp phủ bị hư hỏng, hệ bảo vệ điện hóa mất hiệu quả, xuất hiện vùng thép trần cục bộ, hoặc khi cần đánh giá giới hạn trên của tác động ăn mòn đến cọc.

Nghiên cứu này chưa tính giá trị tuyệt đối của

sức chịu tải nền móng hoặc nội lực trong cọc cho một công trình cụ thể do chưa có dữ liệu địa chất, tải trọng, chiều dài cọc, điều kiện liên kết, vị trí ngầm tương đương trong đất và điều kiện khai thác. Vì vậy, kết quả nghiên cứu cần được xem là đánh giá cơ sở về suy giảm tiết diện và sức kháng kết cấu tương đối của cọc do ăn mòn.

6. Kết luận và kiến nghị

Nghiên cứu đã đề xuất một mô hình đánh giá suy giảm sức kháng kết cấu tương đối của cọc ống thép do ăn mòn trong môi trường biển Việt Nam. Kết quả tính toán cho thấy ăn mòn làm suy giảm đáng kể diện tích tiết diện, chiều dày tương đương và các đặc trưng cơ học của tiết diện, đồng thời làm tăng mạnh tỷ số D/t_r theo thời gian. Các kết luận và kiến nghị chính của nghiên cứu được trình bày như sau:

6.1. Kết luận

(1) Nghiên cứu đã xây dựng khung đánh giá suy giảm sức kháng kết cấu của cọc ống thép do ăn mòn trong môi trường biển Việt Nam, trong đó bộ TCVN 11820 được sử dụng làm khung tiêu chuẩn tham chiếu cho công trình cảng biển, công trình bến bệ cọc cao và các kết cấu móng cọc làm việc trong môi trường biển.

(2) Nghiên cứu đã làm rõ ranh giới giữa bài toán sức chịu tải nền móng và bài toán sức kháng kết cấu của đoạn cọc bị ăn mòn. Trong phạm vi bài báo, các công thức liên quan đến sức chịu tải nền móng chỉ được dùng để xác định bối cảnh thiết kế, không nhằm tính toán sức chịu tải địa kỹ thuật tuyệt đối của cọc.

(3) Theo TCVN 11820-4-1:2020, sức chịu tải dọc trục thiết kế của cọc không được vượt quá giá trị xác định bằng diện tích mặt cắt ngang hữu hiệu của cọc nhân với ứng suất nén cho phép của vật liệu cọc. Đây là cơ sở để xét ảnh hưởng của ăn mòn đến giới hạn chịu nén theo điều kiện vật liệu của đoạn cọc lộ trong môi trường biển.

(4) Với cọc có $D=1.500$ mm và $t_0=16$ mm, tại 50 năm, diện tích tiết diện thép còn khoảng 52,0%, chiều dày tương đương còn 8,28 mm và mô đun chống uốn còn khoảng 52,6% so với ban đầu. Đến 100 năm, diện tích tiết diện thép chỉ còn khoảng 21,7% và mô đun chống uốn còn khoảng 22,1%.

(5) Trong giả thiết ứng suất cho phép của vật liệu thép không thay đổi theo thời gian, tỷ lệ $A(t)/A_0$ có thể dùng để đánh giá suy giảm tương đối giới hạn chịu nén theo vật liệu, còn $W(t)/W_0$ có thể dùng để đánh giá suy giảm tương đối khả năng chống uốn đàn hồi của tiết diện. Do đó, ăn mòn làm suy giảm rất rõ sức kháng kết cấu tương đối của cọc.

(6) Trong giả thiết ăn mòn đều, độ mảnh tổng thể tương đối $\lambda(t)/\lambda_0$ thay đổi không đáng kể do bán kính quán tính gần như không giảm. Tuy nhiên, tỷ số D/t_r tăng mạnh từ 93,75 ban đầu lên 181,11 tại 50 năm và 435,79 tại 100 năm, cho thấy thành ống có xu hướng mảnh hóa rõ rệt và cần được kiểm tra thêm về ổn định cục bộ trong đánh giá dài hạn.

6.2. Kiến nghị

(1) Khi đánh giá cọc ống thép trong công trình cảng biển, cầu cảng hoặc móng cọc bệ cao, cần phân biệt rõ giữa kiểm tra nền móng/phần cọc chôn trong đất và kiểm tra kết cấu đoạn cọc lộ trong môi trường biển.

(2) Đối với đoạn cọc lộ trong nước biển, vùng thủy triều hoặc vùng bắn tóe, nên bổ sung kiểm tra chiều dày còn lại, diện tích tiết diện thép, mô đun chống uốn và tỷ số D/t_r trong đánh giá dài hạn.

(3) Đối với cọc đã được sơn phủ, bọc bảo vệ hoặc bảo vệ catốt, cần đánh giá tình trạng thực tế của hệ bảo vệ. Trường hợp lớp phủ bị hư hỏng, bảo vệ điện hóa mất hiệu quả hoặc xuất hiện vùng thép trần cục bộ, mô hình suy giảm tiết diện như trong nghiên cứu này có thể được sử dụng như một trường hợp tham chiếu bất lợi.

(4) Cần nghiên cứu bổ sung về ăn mòn không đều theo cao độ, ăn mòn cục bộ, oằn cục bộ thành ống, tải trọng ngang, tải trọng mỗi, sóng, dòng chảy, va chạm và tương tác đất – cọc để đánh giá toàn diện hơn tuổi thọ và độ tin cậy của cọc ống thép trong môi trường biển Việt Nam.

Tuyên bố về việc sử dụng AI tạo sinh

Trong quá trình chuẩn bị bài báo này, các tác giả đã sử dụng ChatGPT nhằm hỗ trợ rà soát và cải thiện cách diễn đạt ngôn ngữ của bản thảo. Sau khi sử dụng công cụ này, các tác giả đã rà soát và chỉnh sửa nội dung khi cần thiết, đồng thời chịu hoàn toàn trách nhiệm về nội dung của bài báo được công bố.

Tài liệu tham khảo

- [1] R.E. Melchers. (2018). A review of trends for corrosion loss and pit depth in longer-term exposures. *Corrosion and Materials Degradation*, 1(1), 42–58. <https://doi.org/10.3390/cmd1010004>
- [2] P. Liu, C. Liu, S. Zhang, Y. Wang, Q. Wang. (2022). Depth-varying corrosion characteristics and stability bearing capacity of steel pipe piles under aggressive marine environment. *Ocean Engineering*, 266(1), 112649. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112649>
- [3] K. Wang, M. Zhao. (2016). Mathematical model of homogeneous corrosion of steel pipe pile foundation for offshore wind turbines and corrosive action. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016(1), 9014317. <https://doi.org/10.1155/2016/9014317>
- [4] TCVN. (2015). 11197:2015, Cọc thép – Phương pháp chống ăn mòn – Yêu cầu và nguyên tắc lựa chọn
- [5] TCVN. (2017). 11820-2:2017, Công trình cảng

- biển – Yêu cầu thiết kế – Phần 2: Tải trọng và tác động
- [6] TCVN. (2019). 11820-3:2019, Công trình cảng biển – Yêu cầu thiết kế – Phần 3: Yêu cầu về vật liệu
- [7] TCVN. (2020). 11820-4-1:2020, Công trình cảng biển – Yêu cầu thiết kế – Phần 4-1: Nền móng
- [8] TCVN. (2021). 11820-5:2021 Công trình cảng biển – Yêu cầu thiết kế - Phần 5: Công trình bến
- [9] D. P. Murthy, M. Xie, R. Jiang. (2004). Weibull models. John Wiley & Sons.
- [10] R. Xia, Y. Garbatov, C. Liu, M. Sun. (2024). Model for Wastage Allowance and Strength Properties of Pipe Piles Exposed to Marine Corrosion. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 113. <https://doi.org/10.3390/jmse12010113>
- [11] K. K. Toledo, H.-S. Kim, Y.-S. Jeong, I.-T. Kim. (2020). Residual compressive strength of short tubular steel columns with artificially fabricated local corrosion damage. *Materials*, 13(4), 813. <https://doi.org/10.3390/ma13040813>
- [12] X. Han, C. Wei, Q. Hu, C. Liu, X. Leng. (2024). Stability analysis and design methods of steel pipe piles under non-uniform corrosion. *Structures*, 65, 106714. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106714>
- [13] R. Wang, H. Guo, R.A. Shenoi. (2020). Compressive strength of tubular members with localized pitting damage considering variation of corrosion features. *Marine Structures*, 73, 102805. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102805>
- [14] W. Shao, X. Du, H. Chen, D. Shi, W. Zhang. (2026). Nonlinear Corrosion Evolution and Lateral Bearing Capacity Degradation of Steel Tubular Piles Under Marine Environment. *Materials and Corrosion*, 77(2), 325–339. <https://doi.org/10.1002/maco.70057>
- [15] T.H. Le, T.T.T. Nguyen, Q.T. Ngo. (2026). Experimental Calibration of a Weibull Model for Corrosion Mass Loss in Steel Pipe Specimens Under Simulated Vietnamese Marine Conditions. *Coatings*, 16(5), 529. <https://doi.org/10.3390/coatings16050529>
- [16] N.T.T. Trinh, L.T. Hieu. (2025). Accelerated corrosion effects on steel pipe pile materials in simulated Nhatrang seawater, Vietnam. *Transport and Communications Science Journal*, 76(1), 89–101. <https://doi.org/10.47869/tcsj.76.1.8>
- [17] X. Wang, W. Zhang, X. Gu, H. Dai. (2013). Determination of residual cross-sectional areas of corroded bars in reinforced concrete structures using easy-to-measure variables. *Construction and Building Materials*, 38, 846–853. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.060>
- [18] Y.G. Du, L.A. Clark, A.H.C. Chan. (2005). Residual capacity of corroded reinforcing bars. *Magazine of Concrete Research*, 57(3), 135–147. <https://doi.org/10.1680/macr.2005.57.3.135>
- [19] A.S. Krisher. (2003). Technical information regarding coupon testing. ASK Associates. St Louis, Missouri, USA. <https://www.alspi.com/coupon-testing.htm> (truy cập ngày 21/05/2026)