



DURABILITY DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES IN THE MARINE ATMOSPHERE ZONE BASE ON PROBABILISTIC

Ho Van Quan

University of Technology and Education, University of Danang, No 48 Cao Thang Street, Danang, Vietnam.

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 10/09/2019

Revised: 03/11/2019

Accepted: 04/11/2019

Published online: 16/12/2019

<https://doi.org/10.25073/tcsj.70.4.17>

* Corresponding author

Email: Vanquan0877@gmail.com, hvquan@ute.udn.vn; Tel: 0905.548169

Abstract. Most current service life calculation models of concrete structures due to chloride penetration are calculated by the deterministic method, this means that the service life of concrete structures is a unique value which results in a large margin of error. Durability design of concrete structures that is based on probabilistic method could accurately estimate the range of failure probability by taking into account dispersion of parameters of the model. The main objective of this study is to present the durability design of concrete structures that are penetrated by chloride in the marine atmosphere zone using the probability method based on Monte Carlo simulation. Moreover, this study evaluates the influence of some parameters on the probability of corrosion failure. Research results show that the concrete cover thickness x is the parameter that has the most effect on the service life of concrete structures, followed by the concrete age coefficient m , critical chloride concentration C_{Cr} , surface chloride concentration C_S and diffusion coefficient D_0 .

Keywords: durability, reinforced concrete structures, chloride penetration, Monte Carlo simulation, probability of corrosion failure, service life.

© 2019 University of Transport and Communications



THIẾT KẾ ĐỘ BỀN CỦA KẾT CẤU BÊ TÔNG Ở VÙNG KHÍ QUYỂN BIỂN DỰA TRÊN XÁC SUẤT

Hồ Văn Quân

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng, Số 48 Cao Thắng, Đà Nẵng, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 10/09/2019

Ngày nhận bài sửa: 03/11/2019

Ngày chấp nhận đăng: 04/11/2019

Ngày xuất bản Online: 16/12/2019

<https://doi.org/10.25073/tcsj.70.4.17>

* Tác giả liên hệ

Email: Vanquan0877@gmail.com, hvquan@ute.udn.vn; Tel: 0905.548169

Tóm tắt. Hầu hết các mô hình tính toán tuổi thọ sử dụng của KCBT hiện tại do xâm nhập clorua được tính theo phương pháp xác định, tức là tuổi thọ sử dụng của KCBT được xác định là một giá trị duy nhất dẫn đến biên độ sai số lớn. Thiết kế độ bền của KCBT dựa trên phương pháp xác suất có thể xác định chính xác phạm vi xác suất sự cố do tính đến độ phân tán của các tham số trong mô hình. Mục tiêu chính của nghiên cứu này là trình bày thiết kế độ bền của KCBT ở vùng khí quyển biển do xâm nhập clorua theo phương pháp xác suất dựa trên mô phỏng Monte Carlo. Đồng thời, đánh giá ảnh hưởng của một số tham số đến xác suất sự cố ăn mòn cốt thép. Kết quả nghiên cứu cho thấy tham số chiều dày lớp bê tông bảo vệ x ảnh hưởng lớn nhất đến tuổi thọ sử dụng của KCBT, theo sau là hệ số tuổi m, nồng độ clorua tới hạn C_{cr} , nồng độ clorua bề mặt và hệ số khuếch tán D_0 .

Từ khóa: độ bền, kết cấu bê tông cốt thép, xâm nhập clorua, mô phỏng Monte Carlo, xác suất sự cố ăn mòn, tuổi thọ sử dụng.

© 2019 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ăn mòn cốt thép là mối đe dọa lớn nhất đối với độ bền và tuổi thọ sử dụng của các kết cấu bê tông (KCBT) trong các môi trường khắc nghiệt [1]. Trong điều kiện bình thường, dung dịch lỗ rỗng bê tông có độ kiềm cao hình thành một màng thụ động mỏng trên bề mặt cốt thép bảo vệ cốt thép khỏi bị ăn mòn. Tuy nhiên, đối với các KCBT tiếp xúc với môi trường biển chứa clorua, việc xâm nhập các ion clorua vào bê tông có thể gây khử màng động của cốt thép và bắt đầu ăn mòn. Ăn mòn cốt thép bắt đầu khi nồng độ ion clorua trên bề mặt cốt thép đạt đến giá trị ngưỡng gây ăn mòn. Ăn mòn do clorua nhanh chóng làm mất tiết diện của cốt thép, các sản phẩm ăn mòn tích tụ trên giao diện bê tông-cốt thép giãn nở gây phá vỡ bê tông và

mất liên kết với cốt thép làm suy giảm tuổi thọ của KCBT.

Hầu hết các mô hình tính toán tuổi thọ sử dụng của KCBT hiện tại do xâm nhập clorua được tính theo phương pháp xác định, tức là tuổi thọ sử dụng của KCBT được xác định là một giá trị duy nhất dẫn đến biên độ sai số lớn. Vì trong một hỗn hợp bê tông có thể có sự thay đổi đáng kể trong các tính chất của nó, hay với cùng một KCBT, các tính chất của nó có thể khác nhau đáng kể từ bộ phận này sang bộ phận khác hoặc thậm chí trong cùng một bộ phận kết cấu, cũng có thể thay đổi từ điểm này sang điểm khác [2], có nghĩa là sự phân tán trong các tính chất của vật liệu, KCBT và môi trường không được tính đến trong phương pháp xác định. Để khắc phục hạn chế trên, việc dự báo tuổi thọ sử dụng của KCBT có thể được phân tích chính xác theo phương pháp xác suất, vì phương pháp này có tính đến sự phân tán (sự không chắc chắn) của các tham số và tuổi thọ sử dụng được xác định trong một phạm vi xác suất sự cố [3, 4, 5, 6]. Tuy nhiên, việc sử dụng phương pháp xác suất thường gặp khó khăn trong việc thu thập dữ liệu về giá trị trung bình, độ lệch chuẩn và hàm phân phối thống kê của các tham số, vì trong thực tế dữ liệu có sẵn cho các tham số thường bị hạn chế. Hơn nữa, phương pháp này phụ thuộc rất nhiều vào phương pháp số để phân tích, tức là phải sử dụng các phần mềm thống kê kết hợp các phương pháp phân tích độ tin cậy.

Hiện nay phương pháp thiết kế độ bền của KCBT dựa trên xác suất đã được một số tác giả nghiên cứu và áp dụng [3, 4, 5, 6], tuy nhiên ở Việt Nam các nghiên cứu về vấn đề này vẫn còn khiêm tốn. Mục tiêu chính của nghiên cứu này là trình bày thiết kế độ bền của KCBT ở vùng khí quyển biển do xâm nhập clorua theo phương pháp xác suất dựa trên mô phỏng Monte Carlo. Đồng thời, đánh giá ảnh hưởng của một số tham số đến xác suất sự cố ăn mòn.

2. THIẾT KẾ ĐỘ BỀN CỦA CÁC KẾT CẤU BÊ TÔNG

2.1. Phương pháp thiết kế hiện tại

Trong các tiêu chuẩn của Châu Âu như EN 206-1 [7], tiêu chuẩn của Mỹ ACI 318 [8] hay tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 12041:2017 [9], để đảm bảo KCBT đủ tuổi thọ sử dụng thiết kế, một số giới hạn được đưa ra dựa trên các điều kiện vật liệu và môi trường mà KCBT tiếp xúc, gồm có: tỷ lệ nước/xi măng (N/X) tối đa, hàm lượng xi măng tối thiểu và chiều dày lớp bê tông bảo vệ tối thiểu. Mục đích của các quy định chung này là bảo đảm độ bền lâu của KCBT ở các môi trường xâm thực nhưng lại không có qui định rõ ràng về tuổi thọ sử dụng. Khi tất cả các điều kiện vật liệu và cấu tạo của KCBT thỏa mãn các tiêu chí qui định trong các tiêu chuẩn, tương ứng với loại điều kiện môi trường mà KCBT được xây dựng ở đó thì được ngầm hiểu là chúng sẽ đáp ứng tuổi thọ sử dụng thiết kế qui định. Không phải lúc nào cũng đúng khi cho rằng tuổi thọ sử dụng của KCBT có thể đạt được bằng một số tiêu chí được xác định trước như vậy [10]. Ngoài các yêu cầu về các tính chất vật liệu, môi trường và cấu tạo của KCBT, thì độ phân tán của các tham số cần phải được tính đến và đánh giá cùng với các trạng thái giới hạn. Do đó, phương pháp thiết kế dựa trên xác suất là cần thiết để xác định tuổi thọ sử dụng của các KCBT [11, 12].

2.2. Phương pháp thiết kế dựa trên xác suất

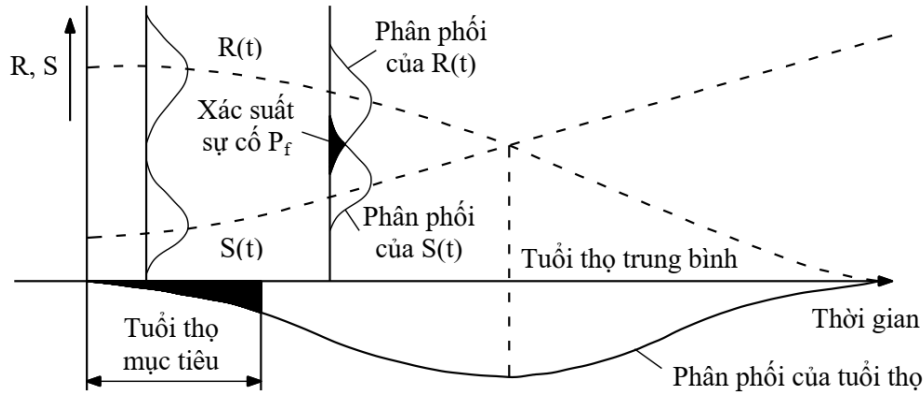
Nguyên tắc thiết kế độ bền cũng tương tự như thiết kế kết cấu, tức là khả năng chịu tải (sức kháng) của kết cấu (R) phải cao hơn hoặc bằng tải trọng tác dụng (S) như sau:

$$R \geq S \text{ hay } g = R - S \geq 0 \quad (1)$$

Trong đó g là hàm trạng thái giới hạn. Vì cường độ và độ bền của KCBT thay đổi theo thời gian, nên cả R và S được xem là các tham số phụ thuộc thời gian. Khi $S \geq R$ sự cố sẽ xảy ra, do đó xác suất sự cố P_f được tính như sau:

$$P_f = P[S(t) - R(t) \geq 0] \quad (2)$$

$R(t)$ có thể không đổi hoặc giảm dần theo thời gian, $S(t)$ có thể không đổi hoặc tăng dần theo thời gian, do đó xác suất sự cố sẽ tăng dần theo thời gian như trên Hình 1 [3, 4, 5].



Hình 1. Các nguyên tắc xác định xác suất sự cố và tuổi thọ sử dụng mục tiêu [3, 4, 5].

Trong Hình 1, $R(t)$ và $S(t)$ được thể hiện dưới dạng hai đường cong phân phối theo trục tung. Ở giai đoạn đầu, hai đường cong này tách rời nhau, nhưng theo thời gian chúng xích gần và chồng lên nhau diễn ra từ thời điểm t_1 đến t_2 . Sự chồng chéo ngày càng tăng sẽ phản ánh xác suất sự cố P_f xảy ra càng lớn do sự suy thoái của KCBT. Xác suất sự cố phải nhỏ hơn trị số xác suất sự cố mục tiêu P_{mt} nào đó [3, 4, 5], phương trình (2) trở thành:

$$P_f = P[S(t) - R(t) \geq 0] \leq P_{mt} \quad (3)$$

Vì giá trị của P_f thường rất nhỏ nên người ta thường biểu thị nó dưới dạng chỉ số độ tin cậy β và được xác định theo công thức (4) [3, 4, 5]:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (4)$$

Trong đó Φ là hàm phân phối chuẩn.

Xác suất sự cố mục tiêu P_{mt} trong phương trình (3) thường được qui định trên cơ sở xem xét các chi phí đầu tư ban đầu, chi phí bảo trì và sửa chữa. Mô hình Fib [5] qui định $P_{mt} = 10^{-1}$ ($\beta = 1,3$) với trạng thái giới hạn khả năng phục vụ khởi đầu ăn mòn và $P_{mt} = 10^{-4}-10^{-6}$ ($\beta = 3,7-4,4$) tùy theo cấp độ tin cậy ứng với trạng thái giới hạn cuối cùng là sụp đổ công trình.

3. MÔ HÌNH XÂM NHẬP ION CLORUA VÀO BÊ TÔNG VÀ XÁC ĐỊNH XÁC SUẤT SỰ CỐ ĂN MÒN CỐT THÉP

3.1. Mô hình xâm nhập ion clorua vào bê tông

Tốc độ thâm nhập ion clorua vào bê tông được coi là một hàm của độ sâu theo thời gian và được mô hình hóa bằng phương trình (5) dựa trên lời giải từ Định luật khuếch tán thứ hai của Fick trong trường hợp nồng độ clorua ban đầu $C_0 = 0$, $D(t)$ và C_s là không đổi như sau:

$$C(x,t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \Delta x}{\sqrt{4D(t)t}} \right) \right) \quad (5)$$

Trong đó: $C(x, t)$ = nồng độ ion clorua ở khoảng cách x (mm) tính từ bề mặt bê tông sau thời gian tiếp xúc t (năm), (% khối lượng bê tông hoặc chất kết dính); Δx = độ sâu của vùng đối lưu trên lớp bê tông bảo vệ (mm) mà quá trình xâm nhập ion clorua khác với định luật 2 của Fick; C_s = nồng độ clo bề mặt của bê tông (% khối lượng bê tông hoặc chất kết dính); $D(t)$ = Hệ số khuếch tán clorua ở thời điểm t , $\text{mm}^2/\text{năm}$; erf = Hàm sai số.

Phương trình (5) là xét cho trường hợp khuếch tán một chiều, tức là khuếch tán diễn ra trên một bề mặt của KCBT và theo hướng vuông góc. Trong thực tế, khuếch tán clorua có thể diễn ra theo một chiều (đối với tường, bản) hoặc hai chiều (đối với cột, dầm). Trong nghiên cứu này, xét trường hợp đơn giản là khuếch tán một chiều nên vẫn sử dụng phương trình (5).

Theo [4, 5, 13], hệ số khuếch tán clorua phụ thuộc vào thời gian như sau:

$$D(t) = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \quad (6)$$

Trong đó: D_0 = Hệ số khuếch tán ion clo ở tuổi $t_0 = 0,0767$ năm (28 ngày), $\text{mm}^2/\text{năm}$; m = Hệ số suy giảm độ khuếch tán tùy thuộc thành phần của bê tông và loại chất kết dính.

Khi thi công bê tông ngoài hiện trường, chất lượng bê tông sẽ kém hơn so với chế tạo trong phòng thí nghiệm nên hệ số khuếch tán còn phụ thuộc điều kiện thi công bê tông (k_{co}). Nếu các tính chất của bê tông được xác định từ KCBT ở ngoài hiện trường thì $k_{co} = 1,0$.

Theo [4], $D(t)$ phụ thuộc vào điều kiện môi trường tiếp xúc (k_{en}) và điều kiện bảo dưỡng bê tông (k_{cu}). Theo [12], trong công thức (6) t chỉ có giá trị đến thời điểm tối đa là 25 năm, khi $t > 25$ năm, hệ số khuếch tán $D(t)$ được xem là không đổi.

Kết hợp các điều kiện trên, phương trình (6) được viết lại như sau:

$$D(t) = D_0 k_{cu} k_{en} k_{co} \left(\frac{t_{28}}{t} \right)^m \quad \text{Khi } t \leq 25 \text{ năm} \quad (7)$$

$$D(t) = D_0 k_{cu} k_{en} k_{co} \left(\frac{t_{28}}{25} \right)^m \quad \text{Khi } t > 25 \text{ năm} \quad (8)$$

Theo TCVN 12041:2017 [14], C_s là hàm phụ thuộc thời gian và khoảng cách từ KCBT đến mép nước biển. Xét trường hợp khoảng cách từ KCBT đến mép nước biển trong phạm vi 100 m, nồng độ clorua bề mặt bê tông là hàm phụ thuộc thời gian như Bảng 1.

Bảng 1. Nồng độ ion clorua tại bề mặt của KCBT ở vùng khí quyển trên mặt nước cách mép nước biển trong phạm vi 100 m [9].

| Thời gian tiếp xúc (năm) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C_s (% khối lượng bê tông) | 0,135 | 0,176 | 0,205 | 0,239 | 0,249 |

Nồng độ clorua bề mặt bê tông có thể được biểu diễn theo qui luật hàm mũ theo thời gian [15, 16, 17]. Dùng phương pháp hồi qui ta được phương trình nồng độ clorua bề mặt theo thời gian ($R^2 = 0,995$) như sau:

$$C_s(t) = 0,055t^{0,392} \text{ (% khối lượng bê tông)} \quad (9)$$

3.2. Xác định xác suất sự cố ăn mòn cốt thép

Hư hỏng KCBT do ăn mòn cốt thép trong thời hạn phục vụ thường được chia thành hai giai đoạn, giai đoạn đầu tiên là bắt đầu ăn mòn (khử màng thụ động) cốt thép, giai đoạn này

không gây hư hỏng trong các bộ phận kết cấu. Giai đoạn thứ hai là lan truyền ăn mòn, khi KCBT hư hỏng vượt quá một mức độ nhất định (thường thể hiện bằng bề rộng vết nứt) có thể xem kết cấu hay bộ phận kết cấu mất khả năng chịu tải [12]. Trạng thái giới hạn khả năng phục vụ của KCBT có thể là sự cố bắt đầu ăn mòn cốt thép hoặc nứt lớp bê tông bảo vệ, trong khi trạng thái giới hạn cuối cùng là công trình mất khả năng chịu tải hoặc bị sụp đổ [4, 5].

Đối với công trình mới, người ta thường xem trạng thái giới hạn khả năng phục vụ là khi cốt thép bị khử màng thụ động hoặc nứt lớp bê tông bảo vệ [2, 4, 6, 12], vì sau thời điểm này, chi phí bảo trì, sửa chữa tăng đáng kể và độ an toàn của KCBT bắt đầu suy giảm. Ở đây, trạng thái giới hạn khả năng phục vụ bắt đầu ăn mòn cốt thép được xem xét, tức là khi nồng độ clorua tích tụ ở bề mặt cốt thép $C(x, t)$ bằng hoặc lớn hơn nồng độ clorua tới hạn gây ăn mòn C_{Cr} , phương trình trạng thái giới hạn được viết là:

$$C(x, t) \geq C_{Cr} \text{ hay } g = C(x, t) - C_{Cr} \geq 0 \quad (10)$$

Xác suất sự cố ăn mòn P_f do xâm nhập clorua dựa trên phương trình trạng thái giới hạn (10) được biểu thị như sau:

$$P_f = P[C(x, t) - C_{Cr} \geq 0] \quad (11)$$

Hiện có một số phương pháp để tính xác suất các sự cố P_f như phương pháp độ tin cậy bậc nhất, phương pháp độ tin cậy bậc hai hoặc mô phỏng Monte Carlo [3, 4]. Ở đây, sử dụng mô phỏng Monte Carlo, tại mỗi mô phỏng các tham số là các biến ngẫu nhiên theo các phân phối xác suất đã được xác định và giá trị của hàm trạng thái giới hạn (10) được tính toán. Xác suất sự cố ăn mòn P_f thu được từ mô phỏng Monte Carlo được tính theo công thức (12):

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(r_j, s_j)] \quad (12)$$

Trong đó, N là tổng số lần mô phỏng và $I[g(r_j, s_j)]$ là hàm chỉ thị cho biết số lần lặp dẫn đến sự cố ăn mòn P_f (trường hợp $C(x, t) \geq C_{Cr}$).

Để có được kết quả đáng tin cậy, số lần lặp đủ lớn khi thực hiện mô phỏng Monte Carlo là cần thiết. Trong nghiên cứu này sử dụng 50.000 lần lặp cho tất cả các phân tích.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bảng 2. Các tham số thống kê để phân tích độ bền.

| Tham số | Trường hợp cơ sở $N(\mu, \sigma)$ | Phạm vi thay đổi | C_v (%) | Tham khảo |
|------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-----------|-----------|
| D_0 (mm ² /năm) | $N(176,60; 26,49)$ | 176,60; 220,75; 264,90 | 15 | [18] |
| n | $N(0,23; 0,0345)$ | 0,23; 0,2875; 0,345 | 15 | [13] |
| C_{Cr} (%) | $N(0,075; 0,0113)$ | 0,075; 0,09275; 0,1125 | 15 | [9] |
| C_s (%) | $N(0,055; 0,0083).t^{0,392}$ | 0,055; 0,0688; 0,0825 | 15 | [9] |
| x (mm) | $N(60; 9,0)$ | 60; 75; 90 | 15 | - |
| Δx (mm) | 0 | - | - | [5] |
| k_{cu} | 1,0 | - | - | [4] |
| k_{en} | 0,68 | - | - | [4] |
| k_{co} | 1,15 | - | - | - |
| t (năm) | 50 | 50; 100 | - | [9, 14] |

Trong nghiên cứu này, các tham số D_0 , m , C_s , C_{Cr} và m được xem là các biến ngẫu nhiên có dạng phân bố chuẩn $N(\mu, \sigma)$, với μ là giá trị trung bình và σ là độ lệch chuẩn, các tham số khác là hằng số. Để đánh giá độ nhạy của các tham số đến xác suất sự cố ăn mòn, giá

trị trung bình của chúng được tăng thêm lần lượt 25% và 50% so với trường hợp cơ sở nhưng hệ số biến thiên (C_v) vẫn giữ không đổi, và được giả định là 15% (độ lệch chuẩn bằng 15% giá trị trung bình) cho tất cả các tham số như trong Bảng 2.

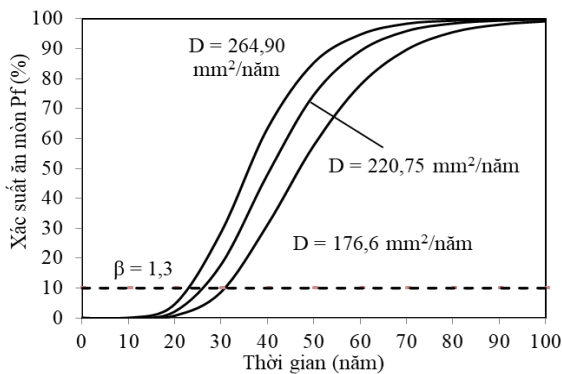
$D_0 = 176,60$ ($\text{mm}^2/\text{năm}$) với bê tông không sử dụng phụ gia khoáng (PGK) với tỉ lệ nước/xi măng (N/X) = 0,30 [18]; $x_{\min} = 50$ mm đối với các KCBT ven biển [9, 14], ở đây chọn $x = 60$ mm; $\Delta x = 0$ (mm) với vùng khí quyển biển [5]; tuổi thọ sử dụng thiết kế là 50 và 100 năm [9, 14]; $m = 0,23$ với bê tông không sử dụng PGK [13], $C_{Cr} = 0,075\%$ (khối lượng bê tông) [9]; $k_{cu} = 1,0$ với bảo dưỡng KCBT 7 ngày và $k_{en} = 0,68$ với vùng khí quyển biển [4].

4.1. Ảnh hưởng của hệ số khuếch tán ion clorua D_0

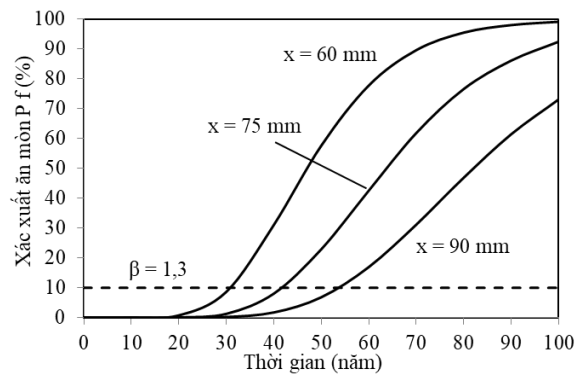
Ảnh hưởng của hệ số khuếch tán D_0 đến xác suất sự cố ăn mòn P_f được thể hiện trong Hình 2. Ta thấy rằng trong một thời gian nhất định, khi giữ nguyên các tham số khác, sự gia tăng của D_0 dẫn đến gia tăng P_f , điều này là do độ khuếch tán càng cao thể hiện việc vận chuyển các ion clorua vào trong bê tông càng nhanh, hệ số D_0 phụ thuộc vào chất lượng của bê tông chủ yếu là tỉ lệ N/X và loại chất kết dính (CKD) [4, 5, 12, 13]. Giả sử $P_{mt} = 10^{-1}$ ($\beta = 1,3$), Hình 2 cho thấy rằng thời gian bắt đầu ăn mòn của KCBT lần lượt là khoảng 31, 26 và 23 năm tương ứng với hệ số khuếch tán $D_0 = 176,60$; 220,75 và 264,90 $\text{mm}^2/\text{năm}$.

4.2. Ảnh hưởng của chiều dày lớp bê tông bảo vệ x

Ảnh hưởng của x đến P_f được thể hiện trong Hình 3. Khi x tăng lên thì P_f giảm xuống, hay nói cách khác nếu P_f là như nhau thì thời gian bắt đầu ăn mòn cốt thép tăng lên. Để có thể bắt đầu ăn mòn, các ion clorua bên ngoài phải được vận chuyển từ bề mặt bê tông đi qua lớp bảo vệ và đến cốt thép, do đó, chiều dày lớp bê tông bảo vệ càng lớn làm cho nồng độ clorua đạt đến cốt thép ở mức tới hạn càng lâu và tuổi thọ của KCBT càng lớn. Như vậy chiều dày lớp bê tông bảo vệ là một trong những tham số quan trọng nhất ảnh hưởng đến tuổi thọ của KCBT. Nếu lấy $P_{mt} = 10^{-1}$ ($\beta = 1,3$), thời gian bắt đầu ăn mòn của KCBT lần lượt là khoảng 31, 42 và 54 năm tương ứng với chiều dày lớp bê tông bảo vệ $x = 60, 75$ và 90 mm.



Hình 2. Ảnh hưởng của hệ số khuếch tán ion clorua đến xác suất sự cố ăn mòn P_f .



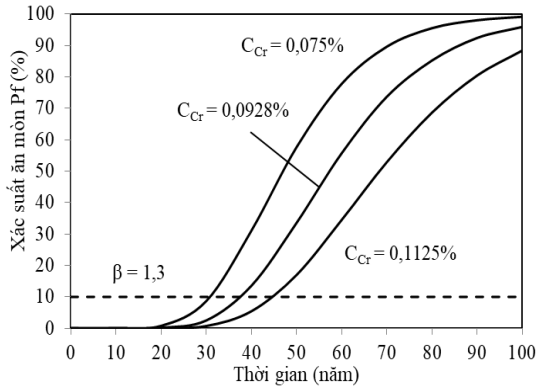
Hình 3. Ảnh hưởng của chiều dày lớp bê tông bảo vệ đến xác suất sự cố ăn mòn P_f .

4.3. Ảnh hưởng của nồng độ clorua tới hạn C_{Cr}

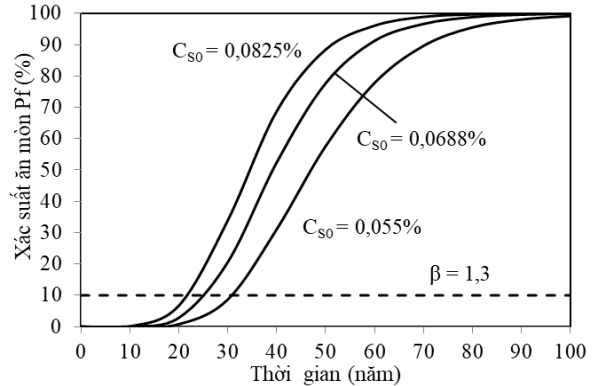
Hình 4 cho thấy ảnh hưởng của C_{Cr} đến P_f tương tự như chiều dày lớp bê tông bảo vệ, tức là P_f giảm khi C_{Cr} tăng lên. Rõ ràng khi C_{Cr} tăng lên dẫn đến thời gian để các ion clorua từ bên ngoài xâm nhập vào bê tông đạt đến mức C_{Cr} tăng lên và do đó P_f giảm xuống. Nồng độ C_{Cr} phụ thuộc vào chất lượng bê tông (tỷ lệ N/X , loại CKD) và loại thép sử dụng [4, 5, 12, 19]. Nếu lấy $P_{mt} = 10^{-1}$ ($\beta = 1,3$), thời gian bắt đầu ăn mòn của KCBT lần lượt là khoảng 31, 37 và 45 năm tương ứng với $C_{Cr} = 0,075, 0,09275$ và $0,1125\%$.

4.4. Ảnh hưởng của nồng độ clorua bề mặt bê tông C_s

Ảnh hưởng của C_s đến P_f được thể hiện trong Hình 5, C_s tăng lên làm cho P_f tăng lên. Vì C_s càng cao sẽ làm tăng chênh lệch nồng độ clorua giữa bề mặt và phần bên trong của bê tông càng lớn dẫn đến sự vận chuyển clorua vào bê tông càng nhanh, kết quả là clorua đạt đến nồng độ C_{Cr} diễn ra nhanh hơn. Nồng độ C_s phụ thuộc thời gian, chất lượng của bê tông (tỉ lệ N/X, loại CKD) và loại môi trường tiếp xúc [4, 5, 9, 16]. Thời gian bắt đầu ăn mòn của KCBT lần lượt là khoảng 31, 25 và 22 năm tương ứng với $C_{S0} = 0,055; 0,0688$ và $0,0825\%$.



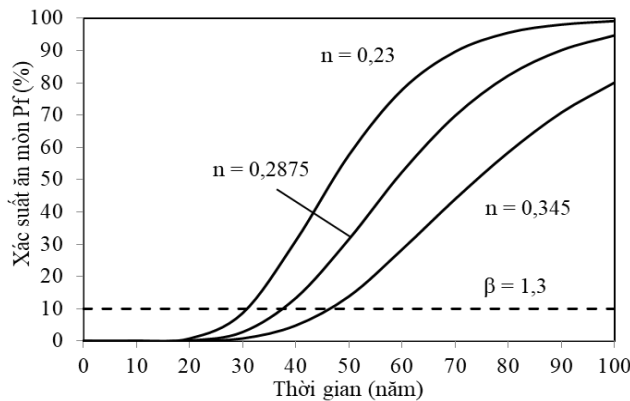
Hình 4. Ảnh hưởng của nồng độ clorua tới hạn đến xác suất sự cố ăn mòn P_f .



Hình 5. Ảnh hưởng của nồng độ clorua bề mặt bê tông đến xác suất sự cố ăn mòn P_f .

4.5. Ảnh hưởng của hệ số tuổi m

Ảnh hưởng của m đến P_f được thể hiện trong Hình 6, m càng lớn thể hiện sức kháng của bê tông với xâm nhập clorua từ môi trường theo thời gian càng lớn (hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông theo thời gian càng thấp) dẫn đến P_f giảm xuống (tăng tuổi thọ của KCBT). Hệ số m phụ thuộc chủ yếu vào loại CKD và điều kiện môi trường tiếp xúc [4, 5, 12, 13]. Thời gian bắt đầu ăn mòn của KCBT lần lượt là khoảng 31, 38 và 46 năm tương ứng với hệ số $m = 0,23; 0,2875$ và $0,345$.



Hình 6. Ảnh hưởng của hệ số tuổi m đến xác suất sự cố ăn mòn P_f .

4.6. Đánh giá độ nhạy của các tham số đến xác suất sự cố ăn mòn P_f

Để đánh giá ảnh hưởng của sự thay đổi các tham số đến P_f , ta sử dụng hệ số độ nhạy S_Y xác định theo công thức:

$$S_Y = \frac{\Delta P_f / P_f}{\Delta Y / Y} \quad (13)$$

Trong đó: S_Y là độ nhạy của tham số Y ; $\Delta Y/Y$ là sự thay đổi giá trị trung bình của tham số Y (%); $\Delta P_f/P_f$ là sự thay đổi của xác suất sự cố ăn mòn tương ứng (%).

Xét ở thời điểm $t = 50$ năm, độ nhạy của từng tham số ngẫu nhiên được thể hiện trong Bảng 3. Khi tăng giá trị trung bình của D_0 , C_s thì P_f tăng lên, ngược lại, khi tăng giá trị trung bình của x , C_{Cr} , m thì P_f giảm xuống. Khi so sánh độ nhạy, tham số ảnh hưởng lớn nhất đến tuổi thọ của KCBT là chiều dày lớp bê tông bảo vệ x , theo sau là m , C_{Cr} , C_s , và D_0 . Ta thấy rằng độ nhạy của tham số D_0 là thấp nhất, trong khi các nghiên cứu [20, 21] cho thấy độ nhạy của D_0 chỉ đứng sau x . Sự thay đổi độ nhạy này có thể là do sự khác nhau về giá trị và sự hạn chế của các tham số đầu vào, trong các nghiên cứu [20, 21], sự suy giảm hệ số khuếch tán clorua tính đến hết tuổi thọ của KCBT, C_s độc lập với thời gian; trong khi trong nghiên cứu này, sự suy giảm hệ số khuếch tán clorua chỉ tính đến 25 năm và C_s phụ thuộc vào thời gian.

Bảng 3. Độ nhạy của các tham số đối với xác suất sự cố ăn mòn P_f ở thời điểm $t = 50$ năm.

| Tham số | $\Delta Y/Y$ (%) | $\Delta P_f/P_f$ (%) | S_Y |
|----------|------------------|----------------------|-------|
| D_0 | 25 | 29,35 | 1,17 |
| | 50 | 47,91 | 0,96 |
| x | 25 | -60,23 | -2,41 |
| | 50 | -88,14 | -1,76 |
| C_{Cr} | 25 | -41,79 | -1,67 |
| | 50 | -70,55 | -1,41 |
| C_s | 25 | 34,78 | 1,39 |
| | 50 | 53,43 | 1,07 |
| m | 25 | -45,26 | -1,81 |
| | 50 | -75,99 | -1,52 |

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày một quy trình thiết kế độ bền của KCBT ở vùng khí quyển biển do xâm nhập clorua dựa trên xác suất bằng Mô phỏng Monte Carlo, có tính đến độ phân tán của các tham số và kết quả được thể hiện là xác suất sự cố ăn mòn P_f . Kết quả phân tích cho thấy, xác suất sự cố ăn mòn P_f bị ảnh hưởng bởi nhiều tham số, khi tăng giá trị trung bình các tham số D_0 , C_s dẫn đến P_f tăng tại một thời điểm nhất định, ngược lại khi tăng giá trị trung bình của các tham số x , C_{Cr} và m dẫn đến P_f giảm. Tham số ảnh hưởng lớn nhất đến xác suất sự cố ăn mòn P_f là chiều dày lớp bê tông bảo vệ x , tiếp đến là các tham số m , C_{Cr} , C_s và D_0 .

Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy rằng để tăng tuổi thọ (giảm P_f) của KCBT do xâm nhập clorua cần phải giảm giá trị các tham số D_0 , C_{Cr} và tăng giá trị các tham số C_{Cr} và m , điều này có nghĩa là phải tăng chất lượng của bê tông bằng cách giảm tỉ lệ N/X và sử dụng loại chất kết dính (các loại phụ gia khoáng) phù hợp. Đồng thời khi thiết kế KCBT ở môi trường xâm thực, chiều dày lớp bê tông bảo vệ phải được lựa chọn một cách thỏa đáng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. OE. Gjrv, Concrete in the oceans, Mar Sci Commun., 1 (1975) 51-74.
- [2]. O.E. Gjrv, Durability Design and Construction Quality of Concrete Structures, Advances in Concrete Construction, 1 (2013) 45-63. <https://doi.org/10.1007/s13369-010-0033-5>
- [3]. DuraCrete: Probabilistic Methods for Durability Design, The European Union – Brite EuRam III, Project No. BE95-1347: Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures, Document R0, January 1999.

- [4]. DuraCrete: General Guidelines for Durability Design and Redesign, The European Union – Brite EuRam III, Project No. BE95-1347: “Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures”, Document R 15, February 2000.
- [5]. Fib Bulletin, No.34, Model code for service life design, 2006.
- [6]. ISO 13823, General Principles on the Design of Structures for Durability, International Organization for Standardization, 2012.
- [7]. EN 206-1, Concrete - Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity, 2000.
- [8]. ACI Committee 318, ACI 318 Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2011.
- [9]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 12041: Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép – Yêu cầu chung về thiết kế độ bền lâu và tuổi thọ trong môi trường xâm thực, 2017.
- [10]. O.E. GjØrv, Durability of Concrete Structures and Performance-Based Quality Control, International Conference on Performance of Construction Materials in the New Millennium, Cairo, 10s, 2003.
- [11]. B. Cather and B. Marsh, Service Life of Concrete Structures - Current and Emerging Approaches, International Seminar on the Management of Concrete Structures for Long Term Serviceability, Sheffield, 1997, p. 21-32.
- [12]. ACI Committe 365, Life-365, Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides. Version 2.2.3, September 28, 2018.
- [13]. M.D.A. Thomas, M.H. Snehata, S.G. Shashiprakash, D.S. Hopkins, K. Cail, Use of Ternary Cementitious Systems Containing Silica Fume and Fly Ash in Concrete, Cement and Concrete Research, 29 (1999) 1207-1214. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00096-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00096-4)
- [14]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 11823: Thiết kế Cầu đường bộ, 2017.
- [15]. R.N. Swamy, H. Hamada, J.C. Laiw, A critical evaluation of chloride penetration into concrete in marine environment” in “Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete”, Proceedings of an International Conference, University of Sheffield, England, 404-419, 1994.
- [16]. A. Costa, J. Appleton, Chloride penetration into concrete in marine environment - Part (2): Prediction of long term chloride penetration, Materials and Structures, 32 (1999) 354-359.
- [17]. Hồ Văn Quân, Nguyễn Văn Tươi, Phạm Thái Uyết, Trần Thế Truyền, Thực nghiệm phân tích sự thay đổi nồng độ clo bề mặt các công trình bê tông cốt thép theo thời gian ở môi trường biển, Tạp chí GTVT, 1+2 (2016) 91-94.
- [18]. Hồ Văn Quân, Phạm Duy Hữu, Nguyễn Thanh Sang, Cải thiện độ chống thấm ion clo và kéo dài tuổi thọ kết cấu bê tông ở môi trường biển bằng cách sử dụng kết hợp muối silic và tro bay, Tạp chí GTVT, 12 (2015) 81-84.
- [19]. P.S. Mangat, B.T. Molloy, Prediction of Long-Term Chloride Concentration in Concrete, Materials and Structures, 27 (1994) 338-346. <https://doi.org/10.1007/BF02473426>
- [20]. O. Sengul, Probabilistic Design for the Durability of Reinforced Concrete Structural Elements Exposed to Chloride Containing Environments, Teknik Dergi, 22 (2011) 5409-5423.
- [21]. R. Muigai, P. Moyo, M. Alexander, Durability design of reinforced concrete structures: a comparison of the use of durability indexes in the deemed-to-satisfy approach and the full probabilistic approach, Materials and Structures, 45 (2012) 1233–1244. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9829-y>