

ẢNH HƯỞNG CỦA SỰ SUY GIẢM HỆ SỐ KHUẾCH TÁN CLORUA ĐẾN TUỔI THỌ CỦA KẾT CẤU BÊ TÔNG DỰA TRÊN PHÂN TÍCH XÁC SUẤT

THE INFLUENCE OF DECREASE IN CHLORIDE DIFFUSION COEFFICIENT ON THE SERVICE LIFE OF CONCRETE STRUCTURES BASED ON PROBABILITY ANALYSIS

Hồ Văn Quân

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng; hvquan@ute.udn.vn

Tóm tắt - Hiện nay có nhiều mô hình tính toán tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép ở môi trường chứa clorua. Các mô hình này đều dựa trên Định luật khuếch tán thứ hai của Fick, trong đó, tham số quan trọng thể hiện sức kháng của bê tông với xâm nhập clorua từ môi trường bên ngoài là hệ số khuếch tán clorua $D(t)$. Hầu hết các mô hình tính toán tuổi thọ đều cho rằng, hệ số $D(t)$ suy giảm theo thời gian, tuy nhiên, sự suy giảm của $D(t)$ theo thời gian trong các mô hình là không nhất quán. Bài báo này phân tích ảnh hưởng của sự suy giảm hệ số $D(t)$ của bê tông theo thời gian đến xác suất sự cố ăn mòn cốt thép dựa trên mô phỏng Monte Carlo. Đồng thời, ảnh hưởng của chiều dày lớp bê tông bảo vệ đến xác suất sự cố ăn mòn cốt thép cũng được xem xét.

Từ khóa - Hệ số khuếch tán clorua; kết cấu bê tông; xâm nhập clorua; mô phỏng Monte Carlo; xác suất sự cố ăn mòn

Abstract - At present there are many models used to calculate the service life of reinforced concrete structures in the chloride-containing environments. All these models are based on Fick's second law of diffusion, in which an important parameter showing concrete resistance to chloride penetration from the external environment is the chloride diffusion coefficient called $D(t)$. Most of the service life calculation models assume that, the $D(t)$ coefficient decreases over time; however, the decrease in $D(t)$ over time is inconsistent through the models. This article analyses the influence of the decrease of the $D(t)$ coefficient over time on the probability of reinforcement corrosion failure based on Monte Carlo simulation. The influence of concrete cover thickness on the probability of reinforcement corrosion failure is also taken into consideration.

Key words - Chloride diffusion coefficient; concrete structures; chloride penetration; Monte Carlo simulation; probability of corrosion failure

1. Đặt vấn đề

Kết cấu bê tông cốt thép (KCBTCT) là một trong những loại kết cấu được sử dụng nhiều nhất trên thế giới. Trong điều kiện bình thường, độ bền (tuổi thọ) của KCBTCT thường là khá cao do sự ăn mòn cốt thép diễn ra rất chậm. Tuy nhiên, khi các KCBTCT được xây dựng trong các môi trường xâm thực thì độ bền của chúng có thể bị suy giảm rất nhanh do sự xâm nhập của các chất có hại từ môi trường bên ngoài, trong số đó, ăn mòn cốt thép trong KCBTCT do xâm nhập clorua từ môi trường biển là phổ biến và nghiêm trọng nhất trên toàn thế giới [1]. Độ bền (tuổi thọ) của KCBTCT được đo bằng một khoảng thời gian nhất định cần thiết mà KCBTCT vẫn duy trì được hình dạng ban đầu, chất lượng và khả năng phục vụ của nó khi tiếp xúc với môi trường bên ngoài [2].

Hiện nay, có nhiều mô hình tính toán tuổi thọ của KCBTCT ở môi trường chứa clorua, hầu hết các mô hình này được thiết lập đều xuất phát từ Định luật khuếch tán thứ hai của Fick. Trong đó, tham số quan trọng thể hiện sức kháng (khả năng chịu tải) của bê tông với xâm nhập clorua từ môi trường bên ngoài là hệ số khuếch tán clorua $D(t)$ của nó. Hầu hết các nghiên cứu đều cho rằng $D(t)$ suy giảm theo thời gian [3-11], tức là sức kháng của bê tông với xâm nhập clorua từ môi trường bên ngoài tăng theo thời gian. Tuy nhiên, sự suy giảm của $D(t)$ theo thời gian trong các mô hình tính toán là không nhất quán. Một số tác giả [3-8] cho rằng, $D(t)$ phụ thuộc hoàn toàn vào thời gian cho đến hết tuổi thọ của KCBTCT; Một số khác [9-11] lại cho rằng, $D(t)$ phụ thuộc vào thời gian chỉ đến một thời điểm nhất định, sau thời gian đó thì hệ số $D(t)$ là không đổi.

Mục tiêu chính của bài báo là phân tích ảnh hưởng của sự suy giảm hệ số khuếch tán clorua của bê tông đến tuổi thọ (xác suất sự cố ăn mòn cốt thép) của KCBTCT dựa trên mô phỏng Monte Carlo. Qua đó, ảnh hưởng của chiều dày lớp bê tông bảo vệ đến xác suất sự cố ăn mòn tương ứng

với các trường hợp của suy giảm hệ số khuếch tán clorua cũng được xem xét.

2. Mô hình dự báo tuổi thọ của KCBTCT do xâm nhập clorua

Tốc độ thâm nhập clorua vào bê tông được coi là một hàm của độ sâu và thường được mô hình hóa bằng Định luật khuếch tán thứ hai của Fick:

$$\frac{dC(x,t)}{dt} = D_c \frac{d^2C(x,t)}{dx^2} \quad (1)$$

Trong đó, $C(x, t)$ = nồng độ ion clorua ở khoảng cách x (mm) tính từ bề mặt bê tông (chiều dày lớp bê tông bảo vệ) sau khi tiếp xúc trong một khoảng thời gian t (s), $D(t)$ = Hệ số khuếch tán clorua (m^2/s).

Giải phương trình (1) với các điều kiện biên được xác định trước [13], kết quả như sau:

$$C(x,t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \Delta x}{\sqrt{4D(t)t}} \right) \right) \quad (2)$$

Trong đó, 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 clorua bề mặt của bê tông (% khối lượng bê tông hoặc chất kết dính); erf = Hàm sai số.

Hệ số khuếch tán clorua $D(t)$ phụ thuộc và suy giảm theo thời gian như sau:

$$D(t) = D_0 \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \quad (3)$$

Trong đó, D_0 = hệ số khuếch tán clorua ở tuổi t_0 , $t_0 = 28$ ngày, m^2/s ; m = Hệ số suy giảm độ khuếch tán clorua, m phụ thuộc thành phần của bê tông và loại chất kết dính sử dụng.

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 KCBTCT ở ngoài hiện trường thì $k_{co} = 1,0$.

Theo [7], $D(t)$ phụ thuộc vào điều kiện môi trường tiếp xúc (k_{en}) và điều kiện bảo dưỡng bê tông (k_{cu}).

Theo [3-8], hệ số khuếch tán clorua của bê tông phụ thuộc hoàn toàn vào thời gian cho đến hết tuổi thọ của kết cấu bê tông (KCBT). Kết hợp các điều kiện trên, phương trình (3) được viết lại như sau:

$$D(t) = D_0 \cdot k_{cu} \cdot k_{en} \cdot k_{co} \left(\frac{t_{28}}{t} \right)^m \quad (4)$$

Theo [9-11], sự suy giảm hệ số khuếch tán theo thời gian chỉ có giá trị đến thời điểm tối đa $t_{max} = 25-30$ năm, khi $t > t_{max}$, hệ số khuếch tán $D(t)$ được xem là không đổi. Trong nghiên cứu này lấy $t_{max} = 25$ năm, phương trình (4) trở thành:

$$D(t) = D_0 \cdot k_{cu} \cdot k_{en} \cdot k_{co} \left(\frac{t_{28}}{t} \right)^m \quad \text{Khi } t \leq 25 \text{ năm} \quad (5.a)$$

$$D(t) = D_0 \cdot k_{cu} \cdot k_{en} \cdot k_{co} \left(\frac{t_{28}}{25} \right)^m \quad \text{Khi } t > 25 \text{ năm} \quad (5.b)$$

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 clo bề mặt 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 [14]

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

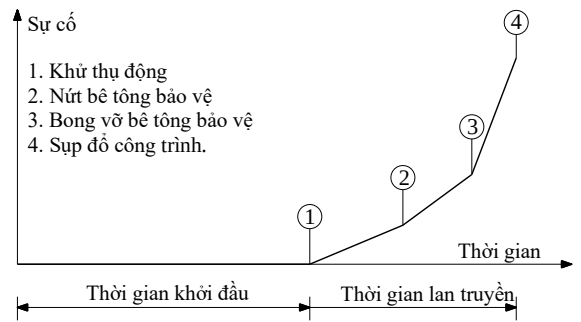
Nồng độ clorua bề mặt bê tông thường được biểu diễn theo qui luật hàm mũ theo thời gian [15-17]. Dùng phương pháp hồi qui ta được phương trình nồng độ ion clorua bề mặt theo thời gian ($R^2 = 0,995$) như sau:

$$C_s(t) = 0,055 \cdot t^{0,392} \quad (\% \text{ khối lượng bê tông}) \quad (6)$$

3. Xác định xác suất sự cố ăn mòn p_f

Trong thiết kế độ bền của KCBT, trạng thái giới hạn cho quá trình suy thoái đánh dấu sự kết thúc tuổi thọ phục vụ phải được xác định. Khi ăn mòn cốt thép trong một KCBT diễn ra, quá trình suy thoái sẽ phát triển như được hiển thị trong Hình 1 [7, 8].

Hình 1 cho thấy, hư hỏng KCBT do ăn mòn cốt thép có hai giai đoạn, giai đoạn bắt đầu ăn mòn (khử màng thụ động) cốt thép không gây hư hỏng các bộ phận kết cấu. Giai đoạn lan truyền ăn mòn thường gây ra các hư hỏng cho các bộ phận kết cấu, hư hỏng nhẹ thường là nứt lớp bê tông bảo vệ, hư hỏng nặng có thể là bong vỡ bê tông mất liên kết với cốt thép gây mất khả năng chịu tải hoặc sụp đổ công trình. 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 [7, 8].



Hình 1. Sự phát triển suy thoái của KCBT do ăn mòn cốt thép [7, 8]

Trong nghiên cứu này, trạng thái giới hạn khả năng phục vụ bắt đầu ăn mòn cốt thép được xem xét. Như vậy, cốt thép sẽ bắt đầu ăn mòn khi nồng độ $C(x, t)$ bằng hoặc lớn hơn C_{Cr} , phương trình trạng thái giới hạn được viết là:

$$C(x, t) \geq C_{Cr} \text{ hay } g = C(x, t) - C_{Cr} \geq 0 \quad (7)$$

Xác suất sự cố ăn mòn cốt thép P_f do xâm nhập clorua dựa trên phương trình trạng thái giới hạn (7) được biểu thị như sau:

$$P_f = P[C(x, t) - C_{Cr} \geq 0] \quad (8)$$

Xác suất sự cố ăn mòn P_f phải nhỏ hơn trị số xác suất sự cố ăn mòn mục tiêu P_{mt} nào đó [7, 8, 12], phương trình (8) trở thành:

$$P_f = P[S(t) - R(t) \geq 0] \leq P_{mt} \quad (9)$$

Người ta thường biểu thị xác suất sự cố ăn mòn P_f dưới dạng chỉ số độ tin cậy β và được xác định theo công thức (10) [7, 8, 12]:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (10)$$

Trong đó, Φ là hàm phân phối chuẩn.

P_{mt} trong phương trình (9) 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 tuổi thọ Fib [8] qui định $P_{mt} = 10^{-1}$ ($\beta = 1,3$) ứng với trạng thái giới hạn khả năng phục vụ khởi đầu ăn mòn.

Sử dụng mô phỏng Monte Carlo để tính xác suất sự cố ăn mòn P_f . Xác suất sự cố ăn mòn P_f thu được từ mô phỏng Monte Carlo là tỷ lệ số lần lặp thỏa mãn phương trình trạng thái giới hạn g (7) trên tổng số lần lặp. Xác suất P_f được xác định như sau:

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(r_j, s_j)] \quad (11)$$

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 lại dẫn đến sự cố ăn mòn (trường hợp $C(x, t) \geq C_{Cr}$).

4. Kết quả và thảo luận

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. Hệ số biến thiên (C_v) được giả định là 15% cho tất cả các tham số và được thể hiện trong Bảng 2.

$D_0 = 6,55 \cdot 10^{-12}$ và $2,58 \cdot 10^{-12}$ (m^2/s) tương ứng với bê tông thường không sử dụng muối silic (0MS) và bê tông sử dụng 7% muối silic (7MS) với tỉ lệ nước/ chất kết dính

(N/CKD) = 0,37 [18]; $\Delta x = 0$ (mm) với vùng khí quyển biển [8]; $x_{\min} = 50$ mm với các KCBTCT ven biển và tuổi thọ thiết kế là 50 và 100 năm [14, 19]; $m = 0,23$ và $0,25$ ứng với bê tông 0MS và bê tông 7MS [6], $C_{Cr} = 0,075\%$ (khối lượng bê tông) [14]; $k_{cu} = 1,0$ với bảo dưỡng bê tông 7 ngày và $k_{en} = 0,68$ với vùng khí quyển biển [7].

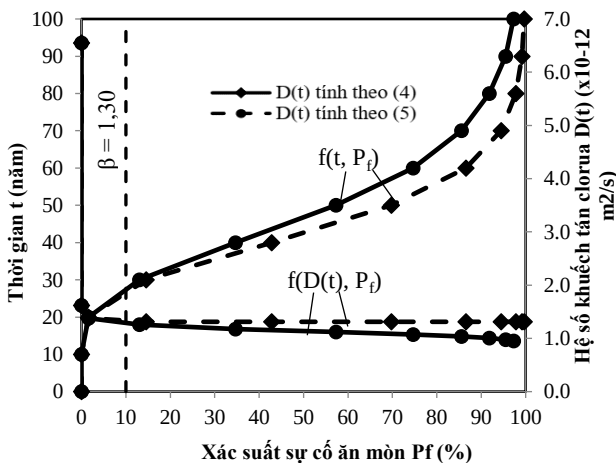
Bảng 2. Các thông số thống kê để phân tích độ bền

	Tham số	Cơ sở N(μ , σ)	Phạm vi	C_v (%)
0MS	D_0 (10^{-12} m ² /s)	N(6,55; 0,983)	-	15
	n	N(0,23; 0,0345)	-	
7MS	D_0 (10^{-12} m ² /s)	N(2,58; 0,387)	-	15
	n	N(0,25; 0,0375)	-	
	C_{Cr} (%)	N(0,075; 0,0113)	-	15
	C_s (%)	N(0,055; 0,0083). $t^{0,392}$	-	15
	x (mm)	N(60; 9,0)	50 - 100	15
	Δx (mm)	0	-	-
	k_{cu}	1,0	-	-
	k_{en}	0,68	-	-
	k_{co}	1,15	-	-
	t (năm)	50 (100)	50-100	-

Trong nghiên cứu này, số lần lặp sử dụng khi mô phỏng Monte Carlo là 50.000 lần cho tất cả các phân tích.

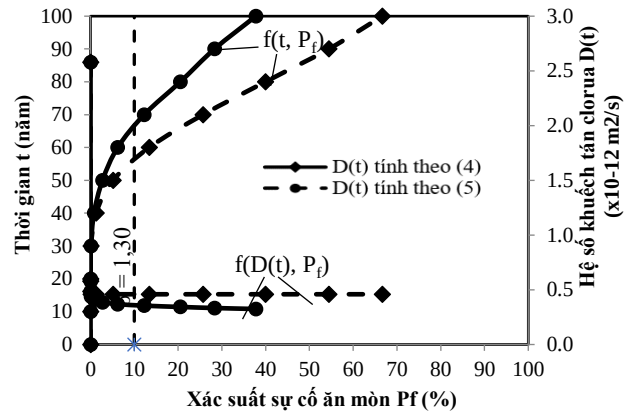
4.1. Ảnh hưởng của sự suy giảm hệ số khuếch tán clorua $D(t)$ đến P_f

Ở mỗi thời điểm t, xác định được hệ số khuếch tán $D(t)$ và xác suất sự cố ăn mòn $P_f(t)$ tương ứng. Đối với bê tông 0MS, quan hệ giữa sự suy giảm hệ số khuếch tán clorua theo thời gian $D(t)$, thời gian t và xác suất sự cố ăn mòn P_f được thể hiện trong Hình 2. Ta thấy rằng, sự suy giảm của $D(t)$ theo thời gian càng lớn ($D(t)$ tính theo (4)) thì xác suất sự cố ăn mòn P_f càng nhỏ (tuổi thọ của KCBTCT càng lớn). Với trường hợp cơ sở x = 60 mm và t = 50 năm, $P_f = 57,3\%$ và $69,8\%$ tương ứng khi $D(t)$ tính theo (4) và (5), tức là P_f giảm khoảng 18% khi $D(t)$ tính theo (4) so với (5). Khi $t < 30$ năm thì P_f cho cả hai trường hợp là như nhau, khi $t \geq 30$ năm thì P_f lớn hơn khi $D(t)$ tính theo (5). Giả sử xác suất sự cố mục tiêu $P_{mt} = 10^{-1}$ ($\beta = 1,3$), thời gian bắt đầu ăn mòn (t_{bd}) của KCBTCT khi $D(t)$ tính theo (4) và (5) là gần như nhau và khoảng 27 năm.



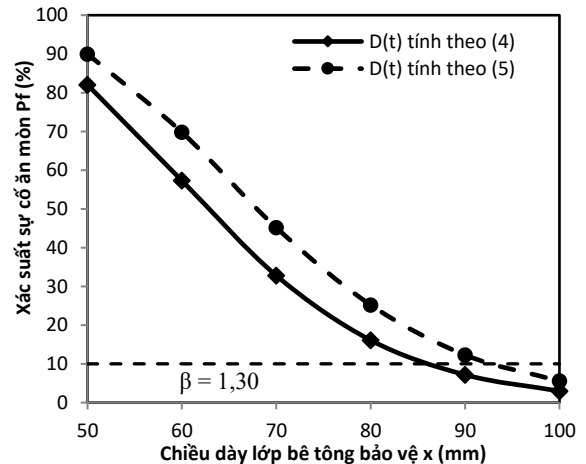
Hình 2. Ảnh hưởng của sự suy giảm $D(t)$ và thời gian t đến xác suất sự cố ăn mòn P_f đối với bê tông 0MS

Tương tự, đối với bê tông 7MS, quan hệ giữa sự suy giảm hệ số khuếch tán clorua theo thời gian $D(t)$, thời gian t và xác suất sự cố ăn mòn P_f được thể hiện trong Hình 3. Ta thấy, P_f có xu hướng tương tự như với bê tông 0MS nhưng mức độ ảnh hưởng thì lớn hơn, vì bê tông 7MS có hệ số m lớn hơn ($m = 0,25$) so với bê tông 0MS ($m = 0,23$). Với trường hợp cơ sở x = 60 mm và t = 100 năm, $P_f = 37,8\%$ và $66,7\%$ tương ứng khi $D(t)$ tính theo (4) và (5), trường hợp này P_f giảm khoảng 43,3% khi $D(t)$ tính theo (4) so với (5). Thời gian bắt đầu ăn mòn của KCBTCT là 67 và 56 năm ($\beta = 1,3$) tương ứng với $D(t)$ tính theo (4) và (5), như vậy tuổi thọ của KCBTCT tăng khoảng 11 năm (19,64%) khi $D(t)$ tính theo (4) so với (5).



Hình 3. Ảnh hưởng của sự suy giảm $D(t)$ và thời gian t đến xác suất sự cố ăn mòn P_f đối với bê tông 7MS

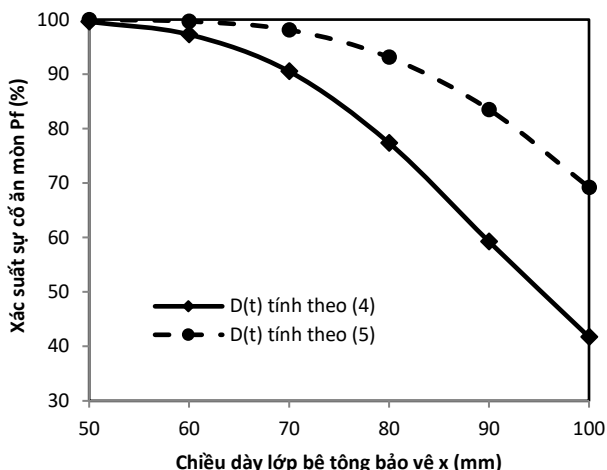
4.2. Ảnh hưởng của chiều dày lớp bê tông bảo vệ x đến P_f tương ứng với sự suy giảm của $D(t)$



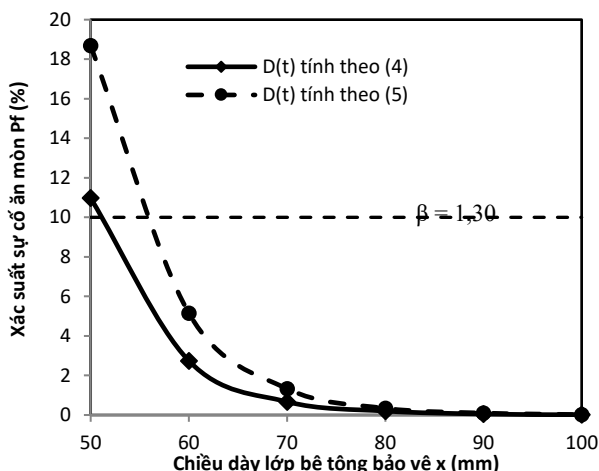
Hình 4. Ảnh hưởng của x đến P_f trong thời gian 50 năm đối với bê tông 0MS

Đối với bê tông 0MS, ảnh hưởng của x đến P_f được thể hiện trên Hình 4 (t = 50 năm) và Hình 5 (t = 100 năm). Ở mỗi giá trị của x, xác suất sự cố ăn mòn P_f nhỏ hơn khi $D(t)$ tính theo (4) so với (5). Khi x tăng lên thì P_f giảm xuống, khi tính với tuổi thọ $t_{bd} = 50$ năm (Hình 4) ta thấy ảnh hưởng sự suy giảm hệ số $D(t)$ đến P_f nhỏ hơn khi tính với tuổi thọ $t_{bd} = 100$ năm (Hình 5). Để đảm bảo $t_{bd} = 50$ năm ($\beta = 1,3$), chiều dày lớp bê tông bảo vệ cần thiết là 86 mm và 93 mm tương ứng với $D(t)$ tính theo (4) và (5), tức là chiều dày lớp bê tông bảo vệ giảm khoảng 7 mm (8%) khi $D(t)$ tính theo (4) so với (5). Khi $t_{bd} = 100$ năm và x đạt đến

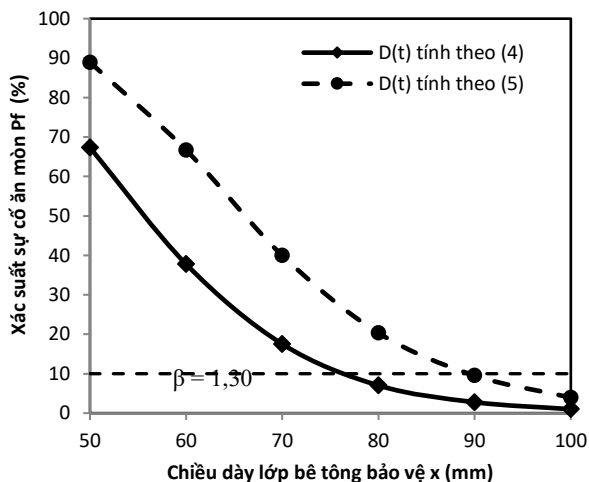
giá trị lớn nhất là 100 mm, cả hai giá trị của P_f (42% và 69%) đều lớn hơn P_{mt} khi $D(t)$ tính theo (4) và (5). Nghĩa là với loại bê tông thường OMS không thể thiết kế KCBTCT đạt được tuổi thọ 100 năm với $P_{mt} = 10\%$.



Hình 5. Ảnh hưởng của x đến P_f trong thời gian 100 năm đối với bê tông OMS



Hình 6. Ảnh hưởng của x đến P_f trong thời gian 50 năm đối với bê tông 7MS



Hình 7. Ảnh hưởng của x đến P_f trong thời gian 100 năm đối với bê tông 7MS

Đối với bê tông 7MS, ảnh hưởng của x đến P_f cũng theo xu hướng như trên và được thể hiện trên Hình 6

($t = 50$ năm) và Hình 7 ($t = 100$ năm). Khi tuổi thọ thiết kế của KCBT là 50 năm, chiều dày lớp bê tông bảo vệ cần thiết là 51 mm và 56 mm tương ứng với $D(t)$ tính theo (4) và (5), tức là x giảm 5 mm (9%) khi $D(t)$ tính theo (4) so với (5). Khi tuổi thọ thiết kế là 100 năm, chiều dày lớp bê tông bảo vệ cần thiết là 76 mm và 90 mm tương ứng với $D(t)$ tính theo (4) và (5), trường hợp này x giảm 14 mm (16%) khi $D(t)$ tính theo (4) so với (5).

Từ các phân tích trên ta thấy rằng, việc sử dụng loại chất kết dính trong bê tông là cực kì quan trọng, mặc dù các bê tông có tỉ lệ N/CKD là như nhau, nhưng bê tông sử dụng 7% MS có hệ số khuếch tán thấp và tuổi thọ của KCBTCT tăng lên đáng kể. Với bê tông 7MS, tuổi thọ của KCBT có thể đạt 100 năm. Trong khi, với bê tông OMS tuổi thọ của KCBT chỉ đạt khoảng 50 năm với chiều dày lớp bê tông bảo vệ là tương đương nhau.

5. Kết luận và kiến nghị

Bài báo sử dụng mô phỏng Monte Carlo để đánh giá ảnh hưởng của sự suy giảm hệ số khuếch tán clorua đến tuổi thọ của KCBT dựa trên phân tích xác suất. Mặc dù, đã có nhiều nghiên cứu về vấn đề này, nhưng việc đánh giá ảnh hưởng của sự suy giảm hệ số khuếch tán clorua theo các quan điểm khác nhau đến tuổi thọ của kết cấu bê tông chưa được nghiên cứu. Hơn nữa, trong nghiên cứu này nồng độ clorua bề mặt bê tông C_s được xem là một hàm phụ thuộc thời gian phù hợp hơn với điều kiện làm việc thực tế của các KCBT ở môi trường biển. Trong khi đó, đa số các nghiên cứu trước đây đều xem C_s là hằng số. Một số kết luận được rút ra từ nghiên cứu này như sau:

- Khi chiều dày lớp bê tông bảo vệ $x = 60$ mm, đối với bê tông OMS, tuổi thọ (thời gian bắt đầu ăn mòn) của KCBTCT khi $D(t)$ tính theo (4) và (5) là xấp xỉ nhau và khoảng 27 năm. Đối với bê tông 7MS, tuổi thọ của KCBTCT khi $D(t)$ tính theo (4) và (5) là 67 năm và 56 năm ($\beta = 1,3$).

- Chiều dày lớp bê tông bảo vệ x càng lớn thì xác suất sự cố ăn mòn P_f càng nhỏ. Đối với bê tông OMS, x giảm khoảng 7 mm (8%) khi $D(t)$ tính theo (4) so với (5) với $t_{bd} = 50$ năm. Đối với bê tông 7MS, x giảm 5 mm (9%) và 14 mm (16%) khi $D(t)$ tính theo (4) so với (5) tương ứng với $t_{bd} = 50$ và 100 năm.

- Loại chất kết dính sử dụng trong bê tông đóng vai trò rất quan trọng trong việc cải thiện tuổi thọ của KCBTCT, khi sử dụng 7%MS trong thành phần bê tông dẫn đến tăng tuổi thọ của KCBTCT khoảng hơn 2 lần so với bê tông thường (không có MS).

Cần nghiên cứu thêm về sự suy giảm của hệ số khuếch tán clorua của bê tông theo thời gian để có các dự báo chính xác hơn. Tuy nhiên, ở thời điểm hiện tại, khi thiết kế tuổi thọ của KCBTCT trong môi trường biển do xâm nhập clorua, để kết quả tính toán tuổi thọ thiên về an toàn, hệ số khuếch tán clorua của bê tông nên vận dụng theo công thức (5).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A.M. Vaysburd, P.H. Emmons, "How to make today's repairs durable for tomorrow-Corrosion protection in concrete repair", *Construction and Building Materials*, vol. 14, 2000, pp. 189-197.

- [2] ACI Committee 201, *ACI 201.2R, Guide to Durable Concrete*, June 2008.
- [3] K. Takewaka, S. Mastumoto, "Quality and cover thickness of concrete based on the estimation of chloride penetration in marine environments", *ACI Special Publication*, vol. 109, 1988, pp. 381–400.
- [4] L. Tang, L-O. Nilsson, "Chloride Diffusivity in High Strength Concrete at Different Ages", *Nordic Concrete Research*, vol. 11, 1992, pp. 162–171.
- [5] P.S. Mangat, B.T. Molloy, "Predicting of long term chloride concentration in concrete", *Materials and structures*, vol. 27, 1994, pp. 338–346.
- [6] M.D.A. Thomas, M.H. Snehata, S.G. Shashiprakash, D.S. Hopkins and K. Cail, "Use of Ternary Cementitious Systems Containing Silica Fume and Fly Ash in Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, pp. 1207-1214.
- [7] 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 R17, February 2000.
- [8] FIB, *Bulletin No.34, Model code for service life design*, February 2006.
- [9] 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 2018.
- [10] S.W. Pack, M.S. Jung, H.W. Song, S.H Kim, K.Y Ann, "Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment", *Cement and Concrete Research*, vol. 40, 2010, pp. 302-312.
- [11] Quanwang Li, Kefei Li, Xingang Zhou, Qinming Zhang, Zhihong Fan, "Model-based durability design of concrete structures in Hong Kong - Zhuhai - Macau sea link project", *Structural Safety*, vol. 53, 2015, pp. 1–12.
- [12] 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.
- [13] J. Crank, *The mathematics of diffusion*, Clarendon Press, Oxford, UK, 1975.
- [14] 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.
- [15] A. Costa, J. Appleton, "Chloride penetration into concrete in marine environment - Part (2): Prediction of long term chloride penetration", *Materials and Structures*, vol. 32, 1999, pp. 354-359.
- [16] R.N. Swamy, H. Hamada and 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*, Jul. 1994, pp. 404-419.
- [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*, tháng 1+ 2/2016, trang 91-94.
- [18] Hồ Văn Quân, Phạm Duy Hữu và 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*, tháng 12/2015, trang 81-84.
- [19] Bộ Khoa học và Công nghệ, *TCVN 11823, Thiết kế Cầu đường bộ*, 2017.

(BBT nhận bài: 19/9/2019, hoàn tất thủ tục phản biện: 11/4/2020)