

ẢNH HƯỞNG CỦA PHỤ GIA KHOÁNG VÀ NHIỆT ĐỘ MÔI TRƯỜNG ĐẾN TUỔI THỌ CỦA CÔNG TRÌNH BÊ TÔNG CỐT THÉP Ở MÔI TRƯỜNG BIỂN

EFFECT OF MINERAL ADDITIVES AND AMBIENT TEMPERATURE ON THE SERVICE LIFE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN THE MARINE ENVIRONMENT

Hồ Văn Quân*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng¹

*Tác giả liên hệ: hvquan@ute.udn.vn

(Nhận bài: 19/8/2022; Chấp nhận đăng: 19/10/2022)

Tóm tắt - Tuổi thọ của các công trình bê tông cốt thép (BTCT) ở các vùng ven biển phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố, chẳng hạn như chất lượng của bê tông (cường độ, khả năng chống thấm nước, chống thấm clorua), cấu tạo của kết cấu BTCT (loại cốt thép, đường kính cốt thép, chiều dày lớp bê tông bảo vệ), vị trí xây dựng công trình (dưới nước, trên bờ),... và phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường. Bài báo này trình bày ảnh hưởng của phụ gia khoáng và nhiệt độ môi trường đến tuổi thọ của các công trình BTCT ở các vùng ven biển Việt Nam. Kết quả nghiên cứu cho thấy, tuổi thọ của công trình BTCT bị ảnh hưởng đáng kể bởi nhiệt độ môi trường, nhiệt độ môi trường càng cao thì tuổi thọ của công trình càng thấp. Kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, sử dụng các phụ gia khoáng như muối silic và tro bay trong bê tông cải thiện đáng kể tuổi thọ của các công trình BTCT ở các vùng ven biển.

Từ khóa - Môi trường biển; tuổi thọ; phụ gia khoáng; nhiệt độ môi trường; ăn mòn cốt thép.

1. Đặt vấn đề

Việt Nam có đường bờ biển trải dài từ Bắc vào Nam với chiều dài khoảng 3260 km chưa kể các hải đảo, đây là điều kiện rất thuận lợi để những nơi có biển phát triển kinh tế biển. Trong những năm gần đây nhiều địa phương đã đầu tư, phát triển mạnh mẽ cơ sở hạ tầng ở các vùng ven biển, do vậy ngày càng có nhiều công trình được xây dựng ở các vùng ven biển, đặc biệt là các công trình hạ tầng giao thông như cầu, bến cảng, ... Các công trình bằng bê tông cốt thép (BTCT) ở các vùng ven biển thường chịu tác động xâm thực mạnh mẽ của môi trường biển dẫn đến ăn mòn cốt thép và hư hỏng. Có thể nói ăn mòn cốt thép là nguyên nhân chính làm hư hỏng và suy giảm tuổi thọ của các công trình BTCT ở môi trường biển [1, 2, 3]. Khi ăn mòn xảy ra, các sản phẩm ăn mòn tích tụ trên bề mặt cốt thép gây giãn nở thể tích làm mất liên kết giữa cốt thép và bê tông, phá vỡ bê tông, làm giảm khả năng chịu tải và cuối cùng là phá hủy công trình [4].

Tuổi thọ của các công trình BTCT ở các vùng ven biển không chỉ phụ thuộc vào chất lượng bê tông (cường độ, khả năng chống thấm,...), cấu tạo kết cấu BTCT (loại cốt thép, đường kính cốt thép, chiều dày lớp bê tông bảo vệ), vị trí xây dựng công trình (vùng dưới nước, trên bờ), ... mà còn phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường (NĐMT). Tùy theo vị trí địa lý của từng vùng biển mà nhiệt độ không khí trung bình năm sẽ khác nhau, nhiệt độ có xu hướng

Abstract - The service life of reinforced concrete (RC) works in coastal areas depends on many factors, such as the quality of the concrete (i.e., strength, water permeability resistance, chloride resistance), structure of reinforced concrete works (i.e., type of reinforcement, diameter of reinforcement, thickness of protective concrete layer), construction location (i.e., underwater, onshore),... and depends on the ambient temperature. This paper presents the influence of mineral additives and ambient temperature on the service life of RC works in coastal areas of Vietnam. Research results show that, the service life of RC works is significantly affected by ambient temperature, the higher the ambient temperature, the shorter the service life of RC works. Research results also show that, using mineral additives such as silica fume and fly ash in cement concrete significantly improves the service life of RC works in coastal areas.

Key words - Marine environment; service life; mineral additives; ambient temperature; reinforcement corrosion.

tăng dần từ vùng biển Bắc bộ đến Nam bộ [5, 6]. Nhiệt độ không khí cao nhất trung bình năm ở vùng biển Bắc bộ (Hải Phòng, Quảng Ninh, Thái Bình, Ninh Bình) khoảng 25,5-27°C, ở vùng biển Nam Trung bộ (Đà Nẵng, Quảng Ngãi, Bình Định, Phú Yên) khoảng 30-31°C, ở vùng biển Nam bộ (Châu Đốc, Cần Thơ, Sóc Trăng, Bạc Liêu, Cà Mau) khoảng 31-32°C [5, 6]. Hiện nay, trên thế giới có nhiều mô hình dự báo tuổi thọ của các công trình BTCT ở môi trường biển, điển hình là các mô hình Life365 [7], Fib [8], DuraCrete [9],... các mô hình này hiện nay đã được sử dụng phổ biến, đặc biệt là mô hình Life365. Ở Việt Nam, TCVN 12041:2017 [10] có hướng dẫn tính toán tuổi thọ của các công trình BTCT ở môi trường biển, tuy nhiên tiêu chuẩn này cũng còn một số hạn chế nhất định, đặc biệt là không xét đến ảnh hưởng của NĐMT biển và sự suy giảm hệ số khuếch tán clorua của bê tông theo thời gian.

Bài báo này trình bày phương pháp tính toán tuổi thọ của công trình BTCT ở các vùng biển Việt Nam với các điều kiện phơi nhiễm khác nhau theo TCVN 12041:2017 và có xét đến ảnh hưởng của NĐMT của từng vùng biển.

2. Thành phần và các chỉ tiêu cơ, lý của bê tông

Thành phần, cường độ nén và hệ số khuếch tán clorua ở 28 ngày (R_{n28} , D_{28}) của các loại bê tông được thể hiện trong Bảng 1.

¹ The University of Danang – University of Technology and Education (Ho Van Quan)

Bảng 1. Thành phần, cường độ nền và hệ số khuếch tán clorua ở 28 ngày của các loại bê tông [11]

Loại bê tông	XM (kg)	N (kg)	TB (kg)	MS (kg)	CKD (kg)	C (kg)	Đ (kg)	N/CKD	SD (kg)
0MS0TB	454	168	0	0	454	625	1167	0,37	4,77
7MS0TB	422,22	168	0	31,78	454	614	1167	0,37	4,99
5MS15TB	363,20	168	68,1	22,70	454	606	1167	0,37	4,77
Loại bê tông	R _{n28} (MPa)		D ₂₈ (mm ² /năm)						
0MS0TB	54,14		206,63						
7MS0TB	56,11		81,29						
5MS15TB	55,60		51,69						

Ghi chú: XM: xi măng; N: nước; TB: tro bay; MS: muối silic; CKD: chất kết dính; C: cát; Đ: đá dăm; N/CKD: tỉ lệ nước - chất kết dính; SD: phụ gia siêu dẻo.

3. Tính toán tuổi thọ của các công trình bê tông cốt thép ở môi trường biển

3.1. Phương trình trạng thái giới hạn

Theo TCVN 12041:2017 [10], phương trình thiết kế dự báo tuổi thọ của công trình BTCT không tính đến bảo trì (thời gian bắt đầu ăn mòn cốt thép) là:

$$(C_S - C_0) \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_a \cdot t}} \right) \right) + C_0 \leq C_{Cr} \quad (1)$$

Trong đó:

x – chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm);

C_0 – hàm lượng clorua ban đầu tại bề mặt cốt thép trong bê tông (% khối lượng bê tông) kể cả trong nguyên liệu và trong quá trình trộn, $C_0 = 0$;

erf – hàm sai số;

t – tuổi thọ không bảo trì (thời gian bắt đầu ăn mòn cốt thép) của công trình (năm);

D_a – hệ số khuếch tán clorua biểu kiến của bê tông (mm²/năm);

C_{Cr} – nồng độ clorua gây ăn mòn cốt thép (% khối lượng bê tông);

C_S – nồng độ clorua bề mặt kết cấu bê tông (% khối lượng bê tông).

Theo Life365 [7], hệ số D_a là một hàm của thời gian và phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường thông qua hệ số k_t như sau:

$$D_a(t) = D_{28} \left(\frac{t_{28}}{t} \right)^m \cdot k_t \quad (2)$$

$$k_t = \operatorname{Exp} \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{20}} - \frac{1}{t^0 C + 273} \right) \right] \quad (3)$$

Trong đó:

$D_a(t)$ – hệ số khuếch tán clorua của bê tông tại thời điểm t và ở nhiệt độ $t^0 C$ (mm²/năm);

D_{28} – hệ số khuếch tán clorua của bê tông ở 28 ngày được xác định trong phòng thí nghiệm (mm²/năm);

t_{28} – thời điểm thí nghiệm xác định hệ số khuếch tán clorua, $t_{28} = 28$ (ngày) = 0,0767 (năm);

U – năng lượng hoạt hóa của quá trình khuếch tán (35000 J/mol);

R – hằng số khí, $R = 8,314$ (J.mol⁻¹.K⁻¹);

T_{20} – nhiệt độ tuyệt đối ứng với $t = 20^0 C$, $T_{20} = 293$ (K);

$t^0 C$ – nhiệt độ C;

m – hệ số suy giảm khuếch tán clorua theo thời gian, là một hằng số tùy thuộc vào loại bê tông.

Life365 [7] qui định thời gian thủy hóa hoàn toàn của bê tông tối đa là 25 năm, do vậy trong công thức (2), t chỉ có giá trị tối đa là 25 năm, khi $t > 25$ năm thì lấy t bằng hằng số là 25 năm.

Với $C_0 = 0$ và thay các phương trình (2), (3) vào phương trình (1) ta được phương trình trạng thái giới hạn khi cốt thép bắt đầu bị ăn mòn như sau:

$$C_S \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_{28} \left(\frac{t_{28}}{t} \right)^m \cdot k_t \cdot t}} \right) \right) = C_{Cr} \quad (4)$$

3.2. Các thông số đầu vào

Trong nghiên cứu này, giả định tính toán tuổi thọ cho một trụ cầu BTCT ở vùng biển Việt Nam trong 2 điều kiện phơi nhiễm: vùng thủy triều (TTR) và vùng khí quyển trên bờ cách mép nước biển 100 m (KQ100).

- Hệ số khuếch tán clorua của các bê tông ở 28 ngày: lấy theo Bảng 1.

- Hệ số m : Hệ số m lấy gần đúng theo kết quả nghiên cứu của Thomas và cộng sự [12] là 0,23, 0,25 và 0,40 tương ứng với các bê tông 0MS0TB, 7MS0TB và 5MS15TB.

- Chiều dày lớp bê tông bảo vệ x : Đối với môi trường biển chịu tác động ăn mòn do clorua, chiều dày lớp bê tông bảo vệ tối thiểu là 55 mm đối với vùng TTR và 45 mm đối với vùng khí quyển trên mặt nước biển [10], chọn $x = 90$ mm cho vùng TTR và $x = 60$ mm cho vùng KQ100.

- Nồng độ clorua bề mặt C_S : Với vùng thủy triều và vùng khí quyển trên bờ cách mép nước biển 100 m, nồng độ clorua bề mặt của KCBT bê tông được thể hiện trong Bảng 2 [10].

Bảng 2. Nồng độ clorua tại bề mặt của KCBT ở vùng thủy triều và khí quyển biển [10]

Thời gian tiếp xúc (năm)	10	20	30	40	50
Khoảng cách từ mép nước biển (m)	C _S (% khối lượng bê tông)				
Vùng thủy triều	0,971	1,233	1,391	1,504	1,592
Trên bờ cách mép nước biển 100 m	0,135	0,176	0,205	0,239	0,249

Nồng độ clorua bề mặt C_S thường được biểu diễn theo qui luật hàm mũ [2, 13, 14] với kết quả như sau:

+ Vùng TTR ($R^2 = 0,996$):

$$C_S(t) = 0,483 \cdot t^{0,308} \quad (5)$$

+ Vùng KQ100 ($R^2 = 0,995$):

$$C_S(t) = 0,055 \cdot t^{0,392} \quad (6)$$

- Nồng độ clorua gây ăn mòn cốt thép C_{Cr} : với các bê

tông không sử dụng phụ gia khoáng hoặc sử dụng tro bay nhỏ hơn 15%CKD thì $C_{Cr} = 0,45\%CKD$ [10], tương đương với $C_{Cr} = 0,085\%$ bê tông.

- Nhiệt độ môi trường $t^{\circ}C$: Ngoài xét điều kiện nhiệt độ tiêu chuẩn khi thí nghiệm xác định hệ số khuếch tán clorua của bê tông trong phòng thí nghiệm là $20^{\circ}C$, ở đây xét thêm ba điều kiện tương ứng với ba vùng biển Bắc bộ, Nam Trung bộ và Nam bộ với nhiệt độ cao nhất trung bình năm tương ứng là $24^{\circ}C$, $28^{\circ}C$ và $32^{\circ}C$.

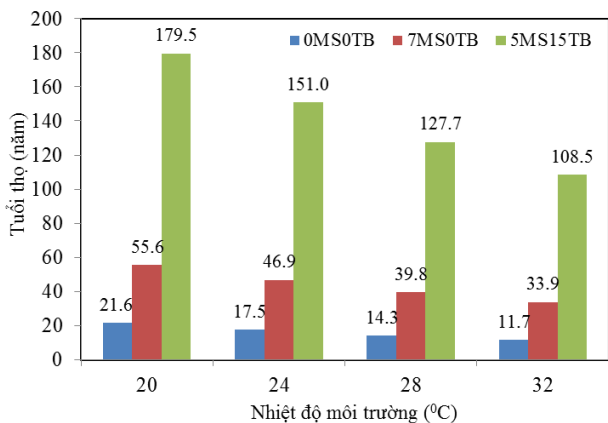
Các thông số đầu vào được thể hiện trong Bảng 3.

Bảng 3. Các thông số đầu vào để tính tuổi thọ của trụ cầu BTCT

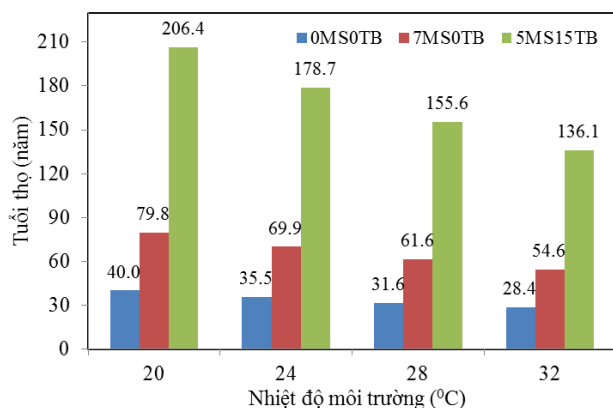
Loại bê tông	Các thông số						
	D (mm ² /y)	m	C_s (%)		C_{Cr} (%)	x (mm)	t ($^{\circ}C$)
			TTR	KQ100			
0MS0TB	176,92	0,23	0,483.t ^{0,308}	0,055.t ^{0,392}	0,085	60, 90	20, 24, 28, 32
7MS0TB	59,29	0,25					
5MS15TB	46,67	0,40					

4. 4. Kết quả và thảo luận

Thay các thông số đầu vào ở Bảng 3 vào phương trình (4) sẽ tính được tuổi thọ của trụ cầu BTCT. Tuổi thọ của trụ cầu BTCT ở các điều kiện phơi nhiễm và NĐMT khác nhau được thể hiện trên các Hình 1 và 2.



Hình 1. Tuổi thọ của trụ cầu BTCT ở vùng TTR với các loại bê tông và NĐMT khác nhau ($x = 90$ mm)



Hình 2. Tuổi thọ của trụ cầu BTCT ở vùng KQ100 với các loại bê tông và NĐMT khác nhau ($x = 60$ mm)

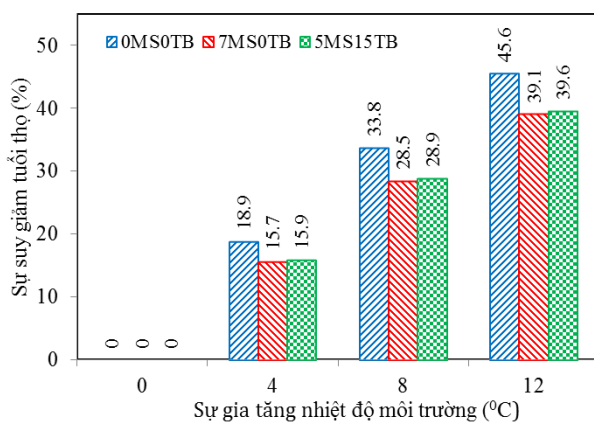
Kết quả trên Hình 1 và 2 cho thấy, NĐMT có tác động làm giảm tuổi thọ của công trình BTCT, sự gia tăng NĐMT càng lớn thì sự suy giảm tuổi thọ của công trình càng sâu.

Ở vùng TTR, tuổi thọ của trụ cầu BTCT sử dụng bê tông 0MS0TB đạt lần lượt là 21,5; 17,5; 14,3 và 11,7 năm tương ứng với NĐMT là 20, 24, 28 và $32^{\circ}C$; Trong khi đó, các bê tông 7MS0TB và 5MS15TB đạt tuổi thọ lần lượt là 55,6, 46,9; 39,8, 33,9 năm và 179,5; 151,0; 127,7; 108,5 năm. Sự gia tăng NĐMT làm giảm tuổi thọ của công trình là do sự gia tăng hệ số khuếch tán clorua dẫn đến lượng clorua thâm nhập vào bê tông đạt đến ngưỡng ăn mòn C_{Cr} nhanh hơn. Khi NĐMT tăng từ 20 lên 24, 28 và $32^{\circ}C$, từ công thức (3) xác định được mức tăng hệ số khuếch tán clorua lần lượt là 1,21; 1,47 và 1,76 lần.

Ở vùng KQ100, mặc dù $x = 60$ mm nhưng tuổi thọ của trụ cầu BTCT tăng lên đáng kể so với vùng TTR, chẳng hạn ở NĐMT là $20^{\circ}C$, tuổi thọ của trụ cầu BTCT đạt lần lượt là 40,0; 79,8 và 206,4 năm tương ứng với các bê tông 0MS0TB, 7MS0TB và 5MS15TB. Tuổi thọ của trụ cầu BTCT ở vùng KQ100 cao hơn đáng kể so với vùng TTR là do sự khác biệt về nồng độ clorua bề mặt C_s , ở vùng TTR nồng độ clorua bề mặt C_s cao hơn nhiều lần so với vùng KQ100 (Bảng 2), sự chênh lệch nồng độ clorua giữa bề mặt và phần bên trong bê tông càng lớn dẫn đến sự thâm nhập clorua vào bê tông càng mạnh và gây ăn mòn cốt thép càng nhanh [4].

Khi so sánh giữa các loại bê tông với nhau, Hình 1 và 2 cho thấy tuổi thọ của trụ cầu BTCT sử dụng các bê tông 7MS0TB và 5MS15TB tăng lên gấp khoảng 2,6 lần và 8,5 lần đối với vùng TTR, gấp khoảng 2,0 lần và 5,0 lần đối với vùng KQ100 so với bê tông 0MS0TB. Các bê tông 7MS0TB và 5MS15TB có tuổi thọ cao là do chúng có hệ số khuếch tán clorua (D) thấp hơn và hệ số suy giảm khuếch tán clorua theo thời gian (m) cao hơn bê tông 0MS0TB.

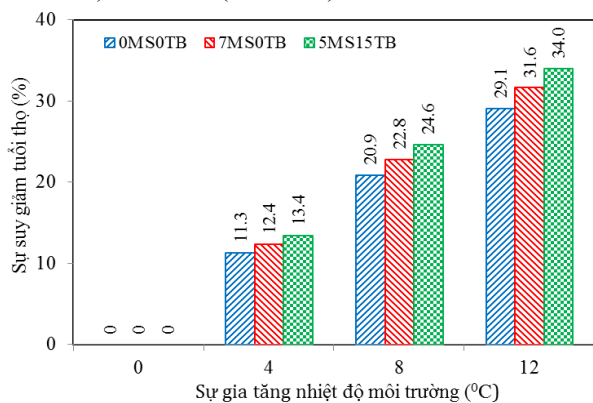
Quan hệ giữa sự gia tăng NĐMT và sự suy giảm tuổi thọ của trụ cầu BTCT ở các điều kiện phơi nhiễm biển được thể hiện trên Hình 3 và 4.



Hình 3. Quan hệ giữa sự gia tăng NĐMT và sự suy giảm tuổi thọ của trụ cầu BTCT ở vùng TTR

Khi NĐMT tăng lên lần lượt là 4, 8 và $12^{\circ}C$, tuổi thọ của trụ cầu BTCT ở vùng TTR với bê tông 0MS0TB giảm lần lượt 18,9% (4,1 năm); 33,8% (7,3 năm) và 45,6% (9,8 năm); Với bê tông 7MS0TB giảm lần lượt 15,7% (8,7 năm); 28,5% (15,9 năm) và 39,1% (21,7 năm); Với bê tông 5MS15TB giảm lần lượt 15,9% (28,5 năm); 28,9% (51,8 năm) và 39,6% (71,0 năm). Đối với vùng KQ100, tuổi thọ của trụ cầu BTCT với bê tông 0MS0TB giảm lần

lượt 11,3% (4,5 năm); 20,9% (8,4 năm) và 29,1% (11,6 năm); với bê tông 7MS0TB giảm lần lượt 12,4% (9,9 năm); 22,8% (18,2 năm) và 31,6% (25,3 năm); với bê tông 5MS15TB giảm lần lượt 13,4% (27,7 năm); 24,6% (50,8 năm) và 34,0% (70,3 năm).



Hình 4. Quan hệ giữa sự gia tăng NĐMT và sự suy giảm tuổi thọ của trụ cầu BTCT ở vùng KQ100

Kết quả trên cũng cho thấy, tác động của sự gia tăng NĐMT đến sự suy giảm tuổi thọ của trụ cầu BTCT ở vùng TTR là lớn hơn so với vùng KQ100. Ở vùng TTR, bê tông 0MS0TB có xu hướng suy giảm tuổi thọ nhanh hơn so với các bê tông 7MS0TB và 5MS15TB; ngược lại ở vùng KQ100, các bê tông 7MS0TB và 5MS15TB lại có xu hướng suy giảm tuổi thọ nhanh hơn một chút so với bê tông 0MS0TB. Điều này có thể là do ảnh hưởng của sự suy giảm hệ số khuếch tán giới hạn tối đa là 25 năm (công thức (2)), nên khi tuổi thọ của công trình càng lớn thì xu hướng giảm tuổi thọ do sự gia tăng NĐMT có xu hướng nhanh hơn.

5. Kết luận và kiến nghị

Một số kết luận và kiến nghị được rút ra từ nghiên cứu này như sau:

Các bê tông sử dụng phụ gia khoáng cải thiện đáng kể tuổi thọ của các công trình BTCT ở môi trường biển. Tuổi thọ của các công trình BTCT khi sử dụng bê tông chứa 7%MS (7MS0TB) và bê tông chứa 5%MS và 15%TB (5MS15TB) tăng lên gấp khoảng 2,6 lần và 8,5 lần đối với vùng TTR ($x = 90$ mm), gấp khoảng 2,0 lần và 5,0 lần đối với vùng KQ100 ($x = 60$ mm) so với bê tông không có phụ gia khoáng (0MS0TB).

Nhiệt độ môi trường ảnh hưởng rất lớn đến tuổi thọ của các công trình BTCT ở môi trường biển. Khi nhiệt độ môi trường tăng lên lần lượt là 4, 8 và 12°C; tuổi thọ của công trình BTCT ở vùng TTR giảm lần lượt khoảng 15,7-18,9%; 28,5-38,5% và 39,1-45,6%; Ở vùng KQ100 giảm lần lượt khoảng 11,3-13,4%; 20,9-24,6% và 29,1-34,0% tùy theo loại bê tông.

Khi dự báo tuổi thọ của các công trình BTCT ở môi trường biển cần phải tính đến nhiệt độ môi trường ở vùng biển nơi xây dựng công trình, ngoài ra nên sử dụng các phụ gia khoáng trong thành phần của bê tông để nâng cao tuổi thọ cho công trình.

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*, Volume 14, 2000, pp. 189-197.
- [2] 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.
- [3] Hồ Văn Quân, "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", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, Vol. 18, No. 5.2, 2020, trang 1-5.
- [4] Hồ Văn Quân, "Thiết kế độ bền của kết cấu bê tông ở vùng khí quyển biển dựa trên xác suất". *Tạp chí khoa học GTVT*, Tập 70, Số 4 (10/2019), trang 299-308.
- [5] Bộ Xây dựng, QCVN 02:2021/BXD, *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia số liệu điều kiện tự nhiên dùng trong xây dựng*, 2021.
- [6] Nguyễn Ngọc Tuấn, Đỗ Thị Phương Thảo, Ninh Thị Kim Anh, Trần Thị Hương, "Xu thế phân bố nhiệt độ nước biển tầng mặt vùng biển đông từ dữ liệu viễn thám". Hội nghị Khoa học Quốc gia về Công nghệ địa không gian trong khoa học trái đất và môi trường, trang 437-446.
- [7] ACI Committee 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, July 2020.
- [8] Fib Bulletin No.34. *Model code for service life design*, 2006.
- [9] 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.
- [10] Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 12041:2017, *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.
- [11] 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* tháng 12/2015, trang 81-84.
- [12] 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 (8), 1999, p. 1207-1214.
- [13] 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, p. 404-419.
- [14] A. Costa and J. Appleton, "Chloride penetration into concrete in marine environment - Part (2): Prediction of long term chloride penetration", *Materials and Structures*, Vol. 32, June 1999, p. 354-359.