

# Sử dụng bê tông tính năng cao để cải thiện độ bền của kết cấu bê tông ở môi trường biển dựa trên phân tích xác suất

## ■ TS. HỒ VĂN QUÂN

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật (Đại học Đà Nẵng)

## ■ ThS. NGUYỄN THỊ LỘC

Trường Cao đẳng Giao thông vận tải Trung ương V

**TÓM TẮT:** Những năm gần đây, sự phát triển của một phương pháp mới để thiết kế độ bền của kết cấu bê tông (KCBT), đó là phương pháp dựa trên xác suất. Phương pháp này có tính đến sự phân tán của các tham số và xác suất sự cố là một hàm của thời gian. Do đó, nó phù hợp với thực tế hơn, cho phép các nhà thiết kế tối ưu hóa trong việc thiết kế tuổi thọ sử dụng ( $T_{sd}$ ) của KCBT. Bài báo trình bày ảnh hưởng của các loại bê tông tính năng cao (HPC) và các điều kiện phơi nhiễm khác nhau đến xác suất sự cố ăn mòn cốt thép ( $P_f$ ) của KCBT ở môi trường biển. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng,  $T_{sd}$  của KCBT được cải thiện đáng kể khi sử dụng HPC. Đồng thời,  $T_{sd}$  của KCBT phụ thuộc đáng kể vào khoảng cách từ KCBT đến mép nước biển, khoảng cách này càng lớn thì  $T_{sd}$  của KCBT càng lớn. Ngoài ra, chiều dày lớp bê tông bảo vệ cũng ảnh hưởng đáng kể đến  $T_{sd}$  của KCBT, với  $T_{sd}$  thiết kế nhất định, chiều dày lớp bê tông bảo vệ giảm đáng kể khi sử dụng bê tông 7SFOFA (7% muối silic) và 5SF15FA (5% muối silic, 15% tro bay) so với bê tông đối chứng OSFOFA.

**TỪ KHÓA:** Bê tông tính năng cao, độ bền, kết cấu bê tông cốt thép, xác suất sự cố ăn mòn, tuổi thọ sử dụng.

**ABSTRACT:** In recent years, a new method to design the durability of concrete structures (KCBT) has been developed based on probability. This method takes into account the dispersion of parameters and the failure probability as a function of time. It is therefore more suitable to practical conditions, allowing the designers to optimize the design of the service life ( $T_{sd}$ ) of KCBT. This paper presents the effect of high-performance concretes (HPC) and different exposure conditions on the reinforcement corrosion failure probability ( $P_f$ ) of KCBT in the marine environment. The study results showed that the  $T_{sd}$  of KCBT was significantly improved when using HPC. The  $T_{sd}$  of KCBT shows the significant dependence on the distance from KCBT to the edge of the sea, the larger this distance is, the longer the  $T_{sd}$  of KCBT. In addition,

the thickness of concrete cover also significantly affects the  $T_{sd}$  of KCBT, with a certain design  $T_{sd}$ , the thickness of concrete cover is significantly reduced in case of using concrete types 7SFOFA (7% silica fume) and 5SF15FA (5% silica fume, 15% fly ash) compared to the control concrete OSFOFA.

**KEYWORDS:** High performance concrete, durability, reinforced concrete structures, probability of corrosion failure, service life.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ăn mòn cốt thép trong KCBT là nguyên nhân chính dẫn đến sự suy giảm  $T_{sd}$  của KCBT ở môi trường biển [1, 2]. Ăn mòn bắt đầu khi nồng độ ion clorua trên bề mặt cốt thép đạt đến ngưỡng gây ăn mòn  $C_{cr}$ , ăn mòn nhanh chóng làm mất tiết diện của cốt thép. Các sản phẩm ăn mòn tích tụ trên giao diện BTCT có thể giãn nở thể tích từ 3 - 6 lần [3] gây mất liên kết, phá vỡ bê tông, làm giảm khả năng chịu tải và  $T_{sd}$  của KCBT.

Hầu hết các mô hình dự báo  $T_{sd}$  của KCBT ở môi trường biển được tính toán theo phương pháp xác định, tức là  $T_{sd}$  của KCBT được xác định là một giá trị duy nhất dẫn đến biên độ sai số lớn [4]. Trong những năm gần đây, sự phát triển của một phương pháp mới để thiết kế độ bền của KCBT dựa trên xác suất [4-7] có xét đến sự phân tán của các tham số đầu vào,  $T_{sd}$  của KCBT được xác định trong một phạm vi xác suất sự cố nhất định, cho phép các nhà thiết kế tối ưu hóa  $T_{sd}$  và các chủ đầu tư quản lý rủi ro của KCBT tốt hơn. Ngoài việc phục vụ để thiết kế  $T_{sd}$  cho các KCBT mới xây dựng, phương pháp này còn có giá trị để đánh giá  $T_{sd}$  còn lại của các KCBT cũ ở môi trường biển khi nồng độ clorua bề mặt cốt thép chưa đạt đến ngưỡng  $C_{cr}$ . Tuy nhiên, phương pháp này thường gặp khó khăn trong việc thu thập các dữ liệu về giá trị trung bình, độ lệch chuẩn và hàm phân phối thống kê của các tham số, vì các dữ liệu này trong thực tế thường bị hạn chế và không có sẵn [4].

Bài báo trình bày ảnh hưởng của các loại HPC và các điều kiện phơi nhiễm khác nhau đến xác suất sự cố ăn mòn ( $P_f$ ) của

KCBT ở môi trường biển, qua đó cũng xác định chiều dày của lớp bê tông bảo vệ (x) để đảm bảo  $T_{rd}$  thiết kế của KCBT.

**2. THÀNH PHẦN VÀ CÁC CHỈ TIÊU CƠ, LÝ CỦA CÁC LOẠI BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO**

Thành phần, cường độ nén và hệ số khuếch tán clorua ở 28 ngày ( $R_{n28}$ ,  $D_{28}$ ) của các loại HPC được thể hiện trong Bảng 2.1 [8].

**Bảng 2.1. Thành phần, cường độ nén và hệ số khuếch tán clorua ở 28 ngày của các loại HPC [8]**

Loại bê tông	XM (kg)	N (kg)	FA (kg)	SF (kg)	CKD (kg)	C (kg)	Đ (kg)	N/CKD	SD (kg)
0SF0FA	475	142,5	0	0	475	674	1167	0,30	10,45
7SF0FA	441,75	142,5	0	33,25	475	663	1167	0,30	10,93
5SF15FA	380	142,5	71,25	23,75	475	654	1167	0,30	9,98
	$R_{n28}$ (MPa)				$D_{28}$ (mm <sup>2</sup> /năm)				
0SF0FA	64				176,92				
7SF0FA	69				59,29				
5SF15FA	71				46,67				

*Ghi chú:* XM: xi măng; N: nước; FA: tro bay; SF: 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. THIẾT KẾ ĐỘ BỀN CỦA KẾT CẤU BÊ TÔNG DỰA TRÊN XÁC SUẤT**

Phương pháp thiết kế độ bền của KCBT dựa trên xác suất được mô tả chi tiết trong [4], có thể tóm tắt như sau:

Sự thâm nhập clorua vào bê tông được mô hình hóa bằng phương trình:

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

Trong đó:  $C(x,t)$  - Nồng độ clorua ở chiều sâu  $x$  (mm) tính từ bề mặt bê tông sau thời gian tiếp xúc  $t$  (năm), (% khối lượng bê tông);  $C_s$  - Nồng độ clorua bề mặt của bê tông (% khối lượng bê tông);  $D(t)$  - Hệ số khuếch tán clorua ở thời điểm  $t$  (mm<sup>2</sup>/năm); erf - Hàm sai số.

$D(t)$  là tham số phụ thuộc vào thời gian như sau:

$$D(t) = D_{28} \cdot k_{cu} \cdot k_{en} \cdot k_{co} \left( \frac{t-28}{t} \right)^m \quad \text{khi } t \leq 25 \text{ năm} \quad (2a)$$

$$D(t) = D_{28} \cdot k_{cu} \cdot k_{en} \cdot k_{co} \left( \frac{t-28}{25} \right)^m \quad \text{khi } t > 25 \text{ năm} \quad (2b)$$

Trong đó:  $D_{28}$  (mm<sup>2</sup>/năm) - Hệ số khuếch tán clorua ở 28 ngày;  $m$  - Hệ số suy giảm khuếch tán clorua theo thời gian;  $k_{en}$  - Hệ số xét đến điều kiện phơi nhiễm;  $k_{cu}$  - Hệ số xét đến điều kiện bảo dưỡng;  $k_{co}$  - Hệ số xét đến chất lượng của bê tông khi thi công ngoài hiện trường so với trong phòng thí nghiệm.

Trạng thái giới hạn khả năng phục vụ của KCBT được xem xét là khi  $C(x,t) \geq C_{cr}$ , phương trình trạng thái giới hạn là:

$$C(x,t) \geq C_{cr} \text{ hay } g = C(x,t) - C_{cr} \geq 0 \quad (3)$$

Xác suất sự cố ăn mòn  $P_f$  được tính như sau:

$$P_f = P[C(x,t) - C_{cr} \geq 0] \quad (4)$$

$P_f$  phải nhỏ hơn trị số xác suất sự cố ăn mòn mục tiêu

$P_{mt}$  nào đó, phương trình (4) trở thành:

$$P_f = P[C(x,t) - C_{cr} \leq P_{mt}] \quad (5)$$

**Bảng 4.1. Các thông số đầu vào để phân tích độ bền của KCBT**

Các thông số	Trường hợp cơ sở $N(\mu, \sigma)$	Phạm vi thay đổi	Tham khảo	
OSF0FA	$D_{28}$ (mm <sup>2</sup> /năm)	(176,92, 26,54)	-	[8]
	$m$	$N(0,23, 0,0345)$	-	[13]

Giá trị của  $P_f$  thường rất nhỏ nên người ta thường biểu thị nó dưới dạng chỉ số độ tin cậy  $\beta$  và được xác định theo công thức:  $P_f = \Phi(-\beta)$  (6)

Với  $\Phi$  là hàm phân phối chuẩn.

Mô hình Fib [7] qui định  $P_{mt} = 10^{-1}$  ( $\beta = 1,3$ ) và  $P_{mt} = 10^{-4}$  ( $\beta = 3,7-4,4$ ) tương ứng với trạng thái giới hạn khởi đầu ăn mòn và trạng thái giới hạn cuối cùng (sụp đổ công trình) tùy theo cấp độ tin cậy. Tiêu chuẩn châu Âu [9] qui định  $P_{mt} = 0,067$  ( $\beta = 1,50$ ) và  $P_{mt} = 10^{-4}$  ( $\beta = 3,72$ ) tương ứng với trạng thái giới hạn khởi đầu ăn mòn và cuối cùng.

$P_f$  thu được từ mô phỏng Monte Carlo được tính theo công thức:

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(r_j, s_j)] \quad (7)$$

Trong đó:  $N$  - Tổng số lần mô phỏng;  $I[g(r_j, s_j)]$  - Hàm chỉ thị cho biết số lần lặp dẫn đến  $P_f$  (trường hợp  $C(x, t) \geq C_{cr}$ ).

Nồng độ clorua bề mặt bê tông  $C_s$  tăng dần theo thời gian tùy thuộc vào điều kiện phơi nhiễm được thể hiện trong Bảng 3.1 [10].

**Bảng 3.1. 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 sát mép nước biển	0,299	0,389	0,453	0,506	0,551
Trên bờ cách mép nước biển 100 m	0,135	0,176	0,205	0,239	0,249

$C_s$  có thể được biểu diễn theo qui luật hàm mũ [11, 12] bằng cách sử dụng phương pháp hồi qui như sau:

- Vùng thủy triều (TTR),  $R^2 = 0,996$ :

$$C_s(t) = 0,483 \cdot t^{0,308} \quad (8)$$

- Vùng khí quyển trên bờ sát mép nước biển (KQ0),  $R^2 = 1,0$ :  $C_s(t) = 0,125 \cdot t^{0,380}$  (9)

- Vùng khí quyển trên bờ cách mép nước biển 100 m (KQ100),  $R^2 = 0,995$ :  $C_s(t) = 0,055 \cdot t^{0,392}$  (10)

Để có được kết quả đáng tin cậy, số lần lặp khi thực hiện mô phỏng Monte Carlo theo công thức (7) cần phải đủ lớn. Ở đây sử dụng 50.000 lần lặp cho tất cả các phân tích và xét ở trạng thái giới hạn khởi đầu ăn mòn tương ứng với  $P_{mt} = 10^{-1}$  ( $\beta = 1,3$ ).

**4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN**

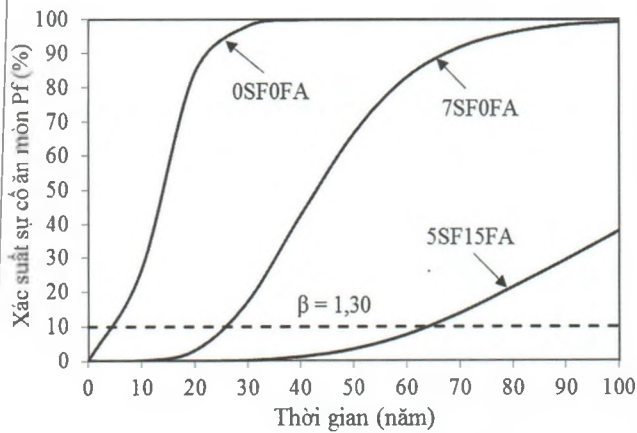
**4.1. Các thông số đầu vào**

Trong nghiên cứu này, các tham số  $D_{28}$ ,  $m$ ,  $C_s$ ,  $C_{cr}$  và  $x$  được xem là các biến ngẫu nhiên có dạng phân bố chuẩn  $N(\mu, \sigma)$ , với  $\mu$  là giá trị trung bình và  $\sigma$  là độ lệch chuẩn, các thông số khác là tất định. Độ lệch chuẩn được giả định là 15% giá trị trung bình cho tất cả các tham số ngẫu nhiên. Các thông số đầu vào được thể hiện trong Bảng 4.1.

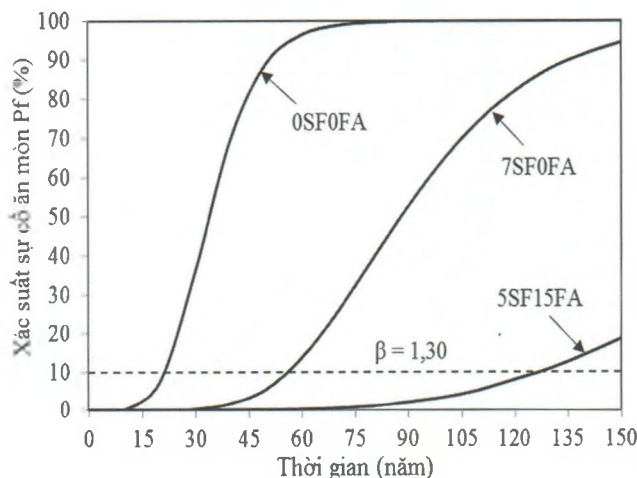
Các thông số		Trường hợp cơ sở N( $\mu, \sigma$ )	Phạm vi thay đổi	Tham khảo
7SF0FA	$D_{28}$ (mm <sup>2</sup> /năm)	(59,29, 9,89)	-	[8]
	m	N(0,25, 0,0375)	-	[13]
5SF15FA	$D_{28}$ (mm <sup>2</sup> /năm)	(46,67, 7,0)	-	[8]
	m	N(0,40, 0,06)	-	[13]
$C_{tr} = 0,4\%$ CKD $\approx 0,075\%$ bê tông		N(0,075, 0,01125)	-	[10]
$C_s$ (%)	TTR	N(0,483, 0,0725).t <sup>0,308</sup>	-	[10]
	KQ0	N(0,125, 0,0188).t <sup>0,380</sup>	-	
	KQ100	N(0,055, 0,0083).t <sup>0,392</sup>	-	
$k_{en}$	Vùng TTR	0,92	-	[6]
	Vùng KQ	0,68	-	
	$k_{cu}$	1,0	-	[4]
	$k_{co}$	1,15	-	
	x (mm)	N(70, 10,5)	20-100	[10, 14]
	t (năm)	50; 100	-	[10, 14]

**4.2. Ảnh hưởng của loại bê tông**

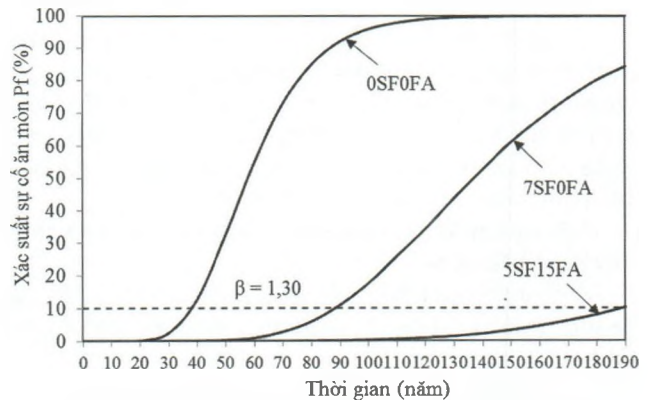
Ảnh hưởng của loại bê tông đến  $P_f$  của KCBT ở các điều kiện phơi nhiễm khác nhau được thể hiện trong các Hình 4.1, 4.2 và 4.3.



Hình 4.1: Ảnh hưởng của loại bê tông đến  $P_f$  của KCBT ở vùng TTR ( $x = 70$  mm)



Hình 4.2: Ảnh hưởng của loại bê tông đến  $P_f$  của KCBT ở vùng KQ0 ( $x = 70$  mm)



Hình 4.3: Ảnh hưởng của loại bê tông đến  $P_f$  của KCBT ở vùng KQ100 ( $x = 70$  mm)

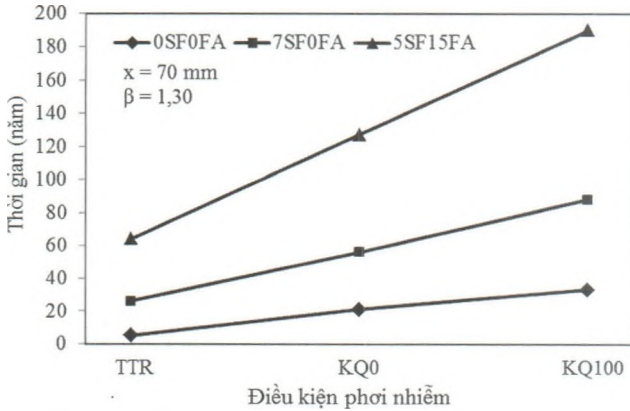
Ở vùng TTR,  $C_s$  rất lớn nên  $T_{sd}$  của KCBT là thấp nhất. Hình 4.1 cho thấy  $P_f$  tăng nhanh theo thời gian,  $T_{sd}$  đạt khoảng 5, 26 và 64 năm tương ứng bê tông OSF0FA, 7SF0FA và 5SF15FA. Với bê tông 7SF0FA và 5SF15FA,  $T_{sd}$  tăng khoảng 5,2 và 12,8 lần so với bê tông OSF0FA.

Ở vùng KQ0,  $C_s$  đã giảm nhưng vẫn có giá trị khá lớn,  $P_f$  có xu hướng tương tự như vùng TTR nhưng  $T_{sd}$  lớn hơn (Hình 4.2).  $T_{sd}$  đạt khoảng 21, 56 và 127 năm tương ứng với bê tông OSF0FA, 7SF0FA và 5SF15FA. Với bê tông 7SF0FA và 5SF15FA,  $T_{sd}$  tăng khoảng 2,7 và 6,0 lần so với bê tông OSF0FA.

Ở vùng KQ100,  $C_s$  đã giảm nhiều nên  $T_{sd}$  đã tăng lên đáng kể (Hình 4.3).  $T_{sd}$  đạt khoảng 38, 88 và 190 năm tương ứng với bê tông OSF0FA, 7SF0FA và 5SF15FA. Với bê tông 7SF0FA và 5SF15FA,  $T_{sd}$  tăng khoảng 2,3 và 5,0 lần so với bê tông OSF0FA.

Các bê tông 7SF0FA và 5SF15FA có  $T_{sd}$  cao gấp nhiều lần so với bê tông OSF0FA do chúng có hệ số  $D_{28}$  thấp và hệ số m cao. Khi so sánh giữa bê tông 7SF0FA và 5SF15FA, thấy rằng  $D_{28}$  chênh lệch không đáng kể nhưng  $T_{sd}$  chênh lệch khá lớn, điều này là do hệ số  $m_{5SF15FA} = 0,40$  lớn hơn đáng kể so với  $m_{7SF0FA} = 0,25$ . Hệ số m là một trong những tham số ảnh hưởng lớn nhất đến  $P_f$  [4, 15-18].

KCBT càng gần mép nước biển thì  $C_s$  càng lớn nên  $T_{sd}$  càng thấp.  $C_s$  càng lớn càng làm tăng chênh lệch nồng độ clorua giữa bề mặt và phần bên trong bê tông dẫn đến sự thâm nhập clorua vào bê tông càng mạnh và ăn mòn bắt đầu sớm hơn [4].

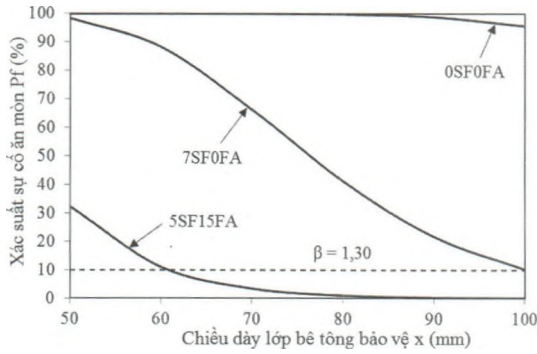


Hình 4.4: Ảnh hưởng của điều kiện phơi nhiễm đến  $T_{sd}$  của KCBT

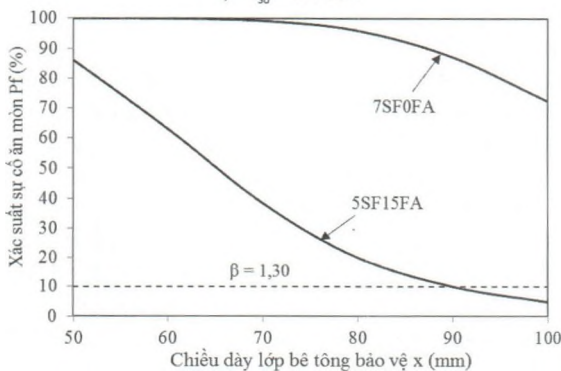
$T_{sd}$  của KCBT ở các điều kiện phơi nhiễm khác nhau được thể hiện trên Hình 4.4,  $T_{sd}$  tăng gần như tuyến tính từ vùng TTR đến KQ100. Với bê tông 0SF0FA,  $T_{sd}$  đạt lần lượt là 5, 21 và 38 năm; với bê tông 7SF0FA,  $T_{sd}$  đạt lần lượt là 26, 56 và 88 năm; với bê tông 5SF15FA,  $T_{sd}$  đạt lần lượt là 64, 127 và 190 năm tương ứng với vùng TTR, KQ0 và KQ100.

**4.3. Ảnh hưởng của điều kiện phơi nhiễm và chiều dày lớp bê tông bảo vệ**

Ảnh hưởng của điều kiện phơi nhiễm và chiều dày lớp bê tông bảo vệ ( $x$ ) đến  $P_f$  được thể hiện trên Hình 4.5 đến Hình 4.7.

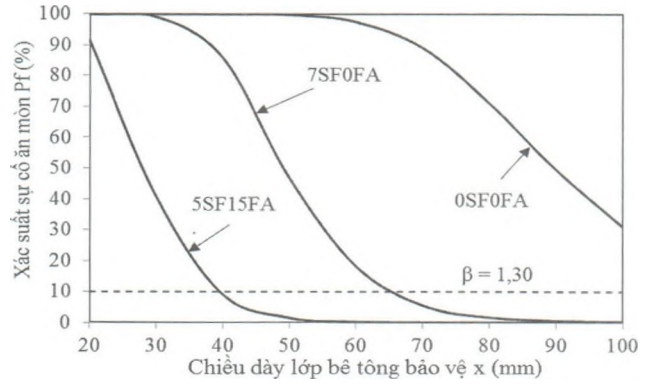


a) -  $T_{sd} = 50$  năm

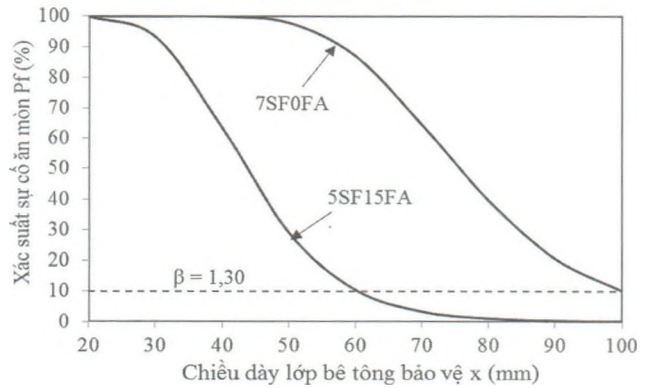


b) -  $T_{sd} = 100$  năm

Hình 4.5: Ảnh hưởng của  $x$  đến  $P_f$  của KCBT ở vùng TTR

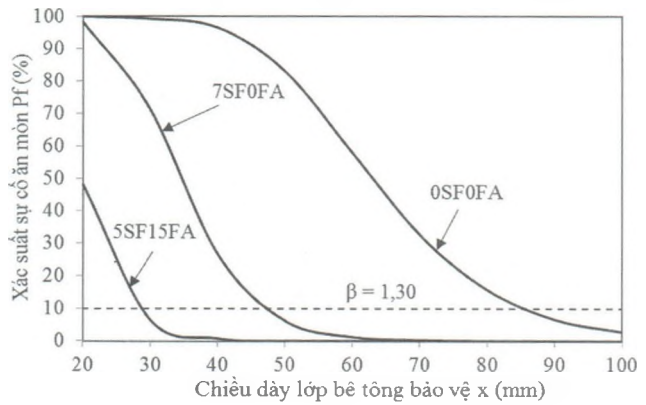


a) -  $T_{sd} = 50$  năm

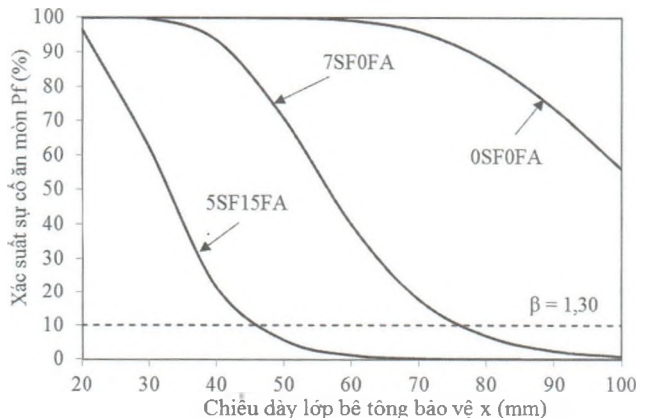


b) -  $T_{sd} = 100$  năm

Hình 4.6: Ảnh hưởng của  $x$  đến  $P_f$  của KCBT ở vùng KQ0



a) -  $T_{sd} = 50$  năm



b) -  $T_{sd} = 100$  năm

Hình 4.7: Ảnh hưởng của  $x$  đến  $P_f$  của KCBT ở vùng KQ100

Ở vùng TTR, Hình 4.5a cho thấy sử dụng bê tông 0SF0FA không thể đạt  $T_{sd} = 50$  năm mặc dù  $x_{max} = 100$  mm. Để  $T_{sd} = 50$  năm, cần phải sử dụng bê tông 7SF0FA và 5SF15FA với  $x$  lần lượt là 100 và 61 mm. Hình 4.5b cho thấy sử dụng bê tông 7SF0FA không thể đạt  $T_{sd} = 100$  năm, cần phải sử dụng bê tông 5SF15FA để  $T_{sd} = 100$  năm với  $x = 90$  mm.

Ở vùng KQ0, sử dụng bê tông 0SF0FA thì  $T_{sd} < 50$  năm (Hình 4.6.a). Để  $T_{sd} = 50$  năm, cần phải sử dụng bê tông 7SF0FA và 5SF15FA với  $x$  lần lượt là 65 và 39 mm. Để  $T_{sd} = 100$  năm (Hình 4.6b) cần phải sử dụng bê tông 7SF0FA và 5SF15FA với  $x$  lần lượt là 100 và 60 mm tương ứng.

Ở vùng KQ100, để  $T_{sd} = 50$  năm (Hình 4.7a), cần  $x$  lần lượt là 85, 47 và 28 mm tương ứng với bê tông 0SF0FA, 7SF0FA và 5SF15FA. Hình 4.7b cho thấy bê tông 0SF0FA không thể đạt  $T_{sd} = 100$  năm, để  $T_{sd} = 100$  năm cần phải sử dụng bê tông 7SF0FA và 5SF15FA với  $x$  lần lượt là 76 và 46 mm.

Kết quả trên cho thấy vùng TTR là nguy hiểm nhất đối với KCBT vì cho  $T_{sd}$  thấp nhất. Ở vùng KQ, KCBT càng sát mực nước biển thì  $T_{sd}$  càng thấp. Chiều dày lớp bê tông bảo vệ ảnh hưởng rất lớn đến  $P_r$ ,  $x$  càng lớn thì  $P_r$  càng nhỏ, kết quả này tương đồng với các nghiên cứu [4, 16-19].

## 5. KẾT LUẬN

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

- Bê tông tính năng cao cải thiện đáng kể  $T_{sd}$  của KCBT, trong đó KCBT sử dụng bê tông 5SF15FA cho  $T_{sd}$  lớn nhất, tiếp theo là bê tông 7SF0FA, kết quả này là do các bê tông này có hệ số  $D_{28}$  thấp và hệ số  $m$  lớn hơn so với bê tông 0SF0FA.

-  $T_{sd}$  của KCBT phụ thuộc rất lớn vào điều kiện phơi nhiễm, khoảng cách từ KCBT đến mép nước biển càng xa thì  $T_{sd}$  càng lớn.  $T_{sd}$  của KCBT sử dụng bê tông 7SF0FA và 5SF15FA đạt trên 100 năm tương ứng với vùng TTR và KQ0; khi sử dụng bê tông 0SF0FA thì  $T_{sd}$  chỉ đạt trên 50 năm với vùng KQ100.

- Khi xây dựng các KCBT ở môi trường biển, đặc biệt là ở vùng thủy triều và sát mép nước biển nên sử dụng bê tông tính năng cao để nâng cao tuổi thọ sử dụng của công trình.

## Tài liệu tham khảo

[1]. A.M. Vaysburd, P.H. Emmons (2000), *How to make today's repairs durable for tomorrow-Corrosion protection in concrete repair*, Constr. Build. Mater., 14, 189-197.

[2]. O.E. Gjorv (2009), *Durability design of concrete structures in severe environments*, Taylor & Francis, London and New York.

[3]. A. Nielsen (1985), *Durability, in Beton Bogen*, Aalborg Cement Company, Aalborg, Portland, pp.200-243.

[4]. Hồ Văn Quân (10/2019), *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, tr.299-308.

[5]. DuraCrete (May 1999), *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.

[6]. DuraCrete (February 2000), *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 17.

[7]. Fib Bulletin No.34 (2006), *Model code for service life design*, p.206, ISBN 978-2-88394-074-1.

[8]. Hồ Văn Quân, Phạm Duy Hữu, Nguyễn Thanh Sang (12/2015), *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 muội silic và tro bay*, Tạp chí GTVT, tr.81-84.

[9]. EN 1990 Eurocode (2002), *Basis of structural design*, British Standards Institution.

[10]. Bộ Khoa học và Công nghệ (2017), *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*.

[11]. A. Costa, J. Appleton (1999), *Chloride penetration into concrete in marine environment - Part (2): Prediction of long term chloride penetration*, Materials and Structures, vol.32, pp.354-359.

[12]. R.N. Swamy, H. Hamada and J.C. Laiw (Jul. 1994), *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, pp.404-419.

[13]. M.D.A. Thomas, M.H. Snehat, S.G. Shashiprakash, D.S. Hopkins and K. Cail (1999), *Use of Ternary Cementitious Systems Containing Silica Fume and Fly Ash in Concrete*, Cement and Concrete Research, vol.29 (8), pp.1207-1214.

[14]. Bộ Khoa học và Công nghệ (2017), *TCVN 11823: Thiết kế Cầu đường bộ*.

[15]. H.W. Song, S.W. Pack, K.Y. Ann (2009), *Probabilistic assessment to predict the time to corrosion of steel in reinforced concrete tunnel box exposed to sea water*, Construction and Building Materials, 23, pp.3270-3278.

[16]. R.M. Ferreira (2008), *Improving Durability Performance of Reinforced Concrete Structures with Probabilistic Analysis*, International Journal of Concrete Structures and Materials, vol.2, no.2, pp.137-143.

[17]. O.E. Gjorv (2013), *Durability design and quality assurance of major concrete infrastructure*, Advances in Concrete Construction, vol.1, no.1, pp.45-63.

[18]. L.J. Wu, Y.J. Zhou, X.J. Kou, M. Jiang (2015), *Reliability-based service life prediction of existing concrete structures under marine environment*, J. Cent. South Univ., 22, 3608-3614.

[19]. O. Sengul (2011), *Probabilistic Design for the Durability of Reinforced Concrete Structural Elements Exposed to Chloride Containing Environments*, Teknik Dergi, vol.22, no.2, pp.5409-5423.

**Ngày nhận bài: 01/4/2022**

**Ngày chấp nhận đăng: 17/5/2022**

**Người phản biện: PGS. TS. Nguyễn Văn Hương  
TS. Phạm Ngọc Phương**