

MÔ HÌNH DỰ ĐOÁN SỰ KHUẾCH TÁN ION CLORUA VÀO VẾT NỨT BÊ TÔNG CỐT THÉP TRONG MÔI TRƯỜNG BIỂN

Ngày nhận bài: 14/07/2014

Ngày nhận lại: 14/08/2014

Ngày duyệt đăng: 09/09/2014

*Nguyễn Thị Hồng Nhung*¹
*Vũ Quốc Hoàng*²
*Nguyễn Ninh Thụy*³

TÓM TẮT

Đến nay, bê tông cốt thép đã trở thành một loại vật liệu được sử dụng rộng rãi trong các công trình xây dựng trên thế giới. Ngày nay, việc đánh giá sự suy giảm và dự đoán tuổi thọ công trình bê tông cốt thép là rất quan trọng và cần thiết. Trong môi trường biển, ion clorua là nguyên nhân nguy hiểm nhất gây ra sự ăn mòn bê tông cốt thép. Dưới tác dụng của tải trọng, các vết nứt sẽ xuất hiện trên bề mặt bê tông cốt thép. Chúng làm giảm hiệu suất hoạt động của bê tông cốt thép và từ đó độ bền của bê tông cốt thép cũng giảm xuống đáng kể. Do đó, các nhà khoa học đã đề xuất một số mô hình dự đoán sự xâm nhập clorua vào trong bê tông để đánh giá độ bền của công trình. Trong nghiên cứu của Hoàng (Hoàng 2012), tác giả đã đưa ra mô hình dự đoán sự xâm nhập clorua vào bê tông cốt thép trong môi trường biển. Sự xâm nhập clorua này chịu ảnh hưởng bởi các đặc điểm của vết nứt bê tông cốt thép. Nghiên cứu sau đây đưa ra các kết quả thực nghiệm nghiên cứu nhằm đánh giá, phát triển và tăng độ chính xác cho mô hình đã đề xuất của Hoàng với các loại bê tông cốt thép khác nhau (bê tông cốt thép sử dụng tro bay và bê tông cốt thép sử dụng silicafume).

Từ khóa: ion clorua, vết nứt, dự đoán, mô hình, bê tông cốt thép.

ABSTRACT

Up to now, reinforced concrete has become one of the most materials used widely in construction building in the world. Nowadays, evaluating deterioration and predicting the service life of reinforced concrete are very important and necessary. In marine environment, chloride ions is the most dangerous agent causes diffusion of reinforced concrete. Under action of load capacity, cracks will appear on surface reinforced concrete. They make performance of the reinforced concrete structure decrease even in the early stage of its service life. So, the scientists suggested some models for predicting the chloride diffusion of concrete to evaluate service life of construction. In 2012, Hoàng proposed model for predicting the chloride diffusion of concrete in marine environment. This chloride diffusion is effected by the characteristics of crack reinforced concrete. This paper reports the results of experimental investigation to evaluate, develop and confirm the Hoàng's model with two types concrete reinforced (fly ash concrete reinforced and silicafume concrete reinforced).

Keywords: Chloride ion, crack, prediction, model, reinforced concrete.

¹ Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc gia TP.HCM. Email:hongnhung0117@yahoo.com

^{2,3} TS, Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc gia TP.HCM.

1. Đặt vấn đề

Trong môi trường biển, ion clorua là nguyên nhân chính gây ra sự xuống cấp trong cấu trúc bê tông cốt thép. Ion clorua xâm nhập xuyên qua lớp bê tông bảo vệ, tích tụ trên bề mặt cốt thép đến một giá trị tới hạn sẽ phá hủy lớp oxit bảo vệ và gây ra hiện tượng ăn mòn cốt thép trong bê tông cốt thép. Hiện tượng ăn mòn cốt thép làm giảm tiết diện và làm xấu đi mối liên kết giữa cốt thép và bê tông, sau đó dẫn đến sự suy giảm hiệu suất của các kết cấu bê tông cốt thép (Djerbi, Bonnet và cộng sự 2008). Trong suốt quá trình tuổi thọ công trình, vết nứt có thể xảy ra vào bất cứ lúc nào bởi nhiều nguyên nhân. Dưới tác dụng của tải trọng, vết nứt ngày càng phát triển và lan rộng một cách nhanh chóng. Ngoài việc làm suy giảm kết cấu công trình, các vết nứt này còn là một đường dẫn lý tưởng cho các ion clorua xâm nhập vào bên trong kết cấu bê tông cốt thép. Do đó, vết nứt của bê tông có ảnh hưởng đến độ bền cấu trúc bê tông cốt thép. Bởi vai trò và ý nghĩa quan trọng của vấn đề này, một số nghiên cứu đã đưa ra mô hình sự xâm nhập clorua vào bê tông tại vị trí nứt và không nứt. Tuy nhiên, các nghiên cứu này đa phần nghiên cứu dựa trên các đường nứt song song hoặc các vết nứt nhân tạo. Thêm vào đó, vật liệu các nghiên cứu dùng để thực nghiệm chủ yếu là bê tông không cốt thép. Trong mô hình của Hoàng (Hoàng 2012), các vết nứt được khảo sát là vết nứt thực tế và vật liệu nghiên cứu là

bê tông cốt thép dùng xi măng OPC. Trong môi trường biển, việc nghiên cứu sử dụng phụ gia khoáng hoạt tính để nâng cao tính bền của bê tông đã được quan tâm từ lâu trên thế giới. Do đó, nghiên cứu này nhằm phát triển và làm tăng độ chính xác cho mô hình của Hoàng (Hoàng 2012) trên nền vật liệu bê tông cốt thép có sử dụng phụ gia khoáng hoạt tính thay thế một phần xi măng.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Cơ sở khoa học

2.1.1. Sự ăn mòn cốt thép trong vết nứt bê tông cốt thép

Đối với công trình bê tông cốt thép, sự ăn mòn cốt thép do clorua gây ra là mối đe dọa nguy hiểm nhất. Cơ chế ăn mòn cốt thép trong bê tông cốt thép là sự ăn mòn kim loại. Cơ chế của quá trình ăn mòn kim loại là điều cần thiết cho quá trình ăn mòn xảy ra (Chánh và Miền 2010). Tuy nhiên, cốt thép trong bê tông có thể được bảo vệ khỏi sự xâm thực bởi lớp màng thụ động hình thành trên bề mặt thép (Bayliss và Deacon 2004). Lớp màng thụ động này không thể duy trì mãi mà sẽ bị phá hủy khi hàm lượng clorua đạt đến một giới hạn hàm lượng nhất định. Giới hạn hàm lượng clorua này gọi là hàm lượng clorua tới hạn. Sự xâm nhập của clorua có thể phá hủy lớp thụ động trên bề mặt cốt thép trong bê tông trước khi ăn mòn bê tông. Hàm lượng clorua tới hạn thay đổi khác nhau tùy theo tiêu chuẩn.

Bảng 1. Hàm lượng clorua tới hạn theo một số tiêu chuẩn

Tiêu chuẩn	Hàm lượng clorua tới hạn (% khối lượng xi măng)
BS 8110 (1985)	0.4
ACI 222 (1994)	0.2
AS 3600 (1994)	0.8 (kg/m ³)
CEB-FIP	0.4
ACI 318	0.2
NS 3420 – Na Uy	0.4
RILEM	0.4

Khi lớp màng thụ động bị phá hủy, sự trao đổi electron ở 2 điện cực kết hợp với sự cung cấp oxi và điều kiện môi trường, các phản ứng hóa học xảy ra để tạo thành rỉ sắt. Rỉ sắt này làm giảm thể tích cốt thép nhanh chóng và làm giảm đáng kể khả năng chịu lực của kết cấu bê tông cốt thép. Việc tăng thể tích bên trong này được xem là nguyên nhân chính dẫn đến sự mở rộng của vết nứt lớp bê tông bảo vệ (El-Reedy 2008).

2.1.2. Mô hình dự đoán sự xâm nhập clorua vào vết nứt bê tông cốt thép

Quá trình khuếch tán clorua vào trong vết nứt bê tông cốt thép được mô tả là một quá trình hai giai đoạn, gồm: giai đoạn xâm thực ban đầu và giai đoạn phát triển xâm thực (Tuutti 1982). Giai đoạn xâm thực ban đầu được định nghĩa là khoảng thời gian kể từ khi clorua bắt đầu xâm nhập từ môi trường bên ngoài, xuyên qua lớp bê tông bảo vệ, và tích tụ tại bề mặt cốt thép và tăng dần nồng độ đến giá trị tới hạn đủ để phá vỡ lớp màng bảo vệ cốt thép. Sau đó, là bắt đầu vào trạng thái ăn mòn, phát triển xâm thực. Giả định sự khuếch tán ion là cơ chế duy nhất của sự xâm nhập clorua vào BTCT, định luật thứ hai Fick được áp dụng cho mô hình dự đoán giai đoạn đầu xâm thực như sau:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \times \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

Trong đó :

C: hàm lượng clorua

D_a : hệ số khuếch tán clorua

x: chiều sâu (từ bề mặt tiếp xúc)

t: thời gian.

Giai đoạn phát triển xâm thực được định nghĩa là thời gian cần thiết cho sự ăn mòn xảy ra để gây ra “sự phá hủy tới hạn” của cấu trúc hoặc kết cấu công trình. Trong suốt quá trình làm việc, cấu kiện sẽ xuất hiện các vết vi nứt (không thể nhìn được bằng mắt thường) và các vết nứt (có thể nhìn được bằng mắt thường).

Tại khu vực xuất hiện vết nứt, hệ số khuếch tán clorua tăng lên gấp ngàn lần so với vị

trí vết vi nứt (Takewaka, Yamaguchi và Maeda 2003) (Hoàng, Stitmannaitum và Takafumi 2011). Do đó, những vị trí nứt này là khu vực rất nguy hiểm, có ảnh hưởng lớn đến thời gian xâm thực ban đầu và làm giảm tuổi thọ công trình một cách nhanh chóng. Trong bài nghiên cứu này, chiều sâu vết nứt được xác định là đường kính từ miệng vết nứt đến nơi vết nứt có bề rộng là 30 μm . Bởi vì khi bề rộng vết nứt nhỏ hơn 30 μm thì ảnh hưởng không đáng kể đến hệ số khuếch tán clorua (Djerbi, Bonnet, Khelidj và Baroghel-bouny 2008) (Ismail, Toumi và cộng sự 2008). Theo giả định trên, hệ số khuếch tán clorua trung bình được tính như sau: (Hoàng, Stitmannaitum và Takafumi 2012)

$$D_a = D_{av} = \frac{D_{cr} + D_{un-eff}}{2} \quad (2)$$

Trong đó:

D_{cr} được tính dựa trên bề rộng vết nứt (w) và theo phương trình sau: (Djerbi, Bonnet, Khelidj và Baroghel-bouny 2008) (Hoàng 2012)

$$\begin{cases} D_{cr}(\text{m}^2/\text{s}) = (2 \times 10^{-11}) \times w - 4 \times 10^{-10}, & \text{khi } 30\mu\text{m} \leq w \leq 80\mu\text{m} \\ D_{cr}(\text{m}^2/\text{s}) \approx 14 \times 10^{-10}, & \text{khi } w > 80\mu\text{m} \end{cases} \quad (3)$$

$$D_{un-eff} = 0.58L \times 10^{-12} + D_{un-cr} \quad (4)$$

Trong đó:

L: chiều sâu vết nứt;

D_{un-cr} : hệ số khuếch tán tại vị trí không nứt.

2.1.3. Kiểm tra độ tương thích của mô hình dự đoán và giá trị thực nghiệm (Anderson, Bai và cộng sự 1999), (Heath 2002)

Tại mỗi giá trị chiều sâu của vết nứt, xác định được 1 giá trị hàm lượng clorua theo thực nghiệm (Y_i) và 1 giá trị hàm lượng clorua theo dự đoán (\widehat{Y}_i). Độ tương thích của giá trị thực nghiệm và mô hình dự đoán được kiểm tra thông qua giá trị R^2 . Giá trị R^2 nằm trong khoảng $0 \leq R^2 \leq 1$. Khi $R^2 = 0$, giá trị thực nghiệm không có mối liên hệ với mô hình đã dự đoán. $R^2 = 1$ chứng tỏ các giá trị thực

thực nghiệm chính xác hoàn toàn so với mô hình đã đề xuất. Có nghĩa là, R^2 càng gần 1 thì giá trị thực nghiệm càng gần đúng với giá trị dự đoán. Giá trị thực nghiệm tương thích với mô hình dự đoán khi $R^2 \geq 0.8$. Giá trị R^2 được tính toán theo mô hình hồi quy:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (5)$$

Trong đó:

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$$

Với :

Y_i : giá trị thực nghiệm

\bar{Y} : giá trị thực nghiệm trung bình

\hat{Y}_i : giá trị dự đoán

2.2. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Nghiên cứu này thực nghiệm trên hai loại bê tông cốt thép: bê tông cốt thép sử dụng 20% tro bay (FA) và bê tông cốt thép sử dụng 10% silicafume (SF) (Xem Bảng 2). Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu là xi măng, cốt liệu lớn, cốt liệu nhỏ, phụ gia khoáng hoạt tính là tro bay và silicafume, thép Ø8. Xi măng sử dụng là xi măng PCB40. Cốt liệu lớn là đá có $D_{max} = 20$ mm. Cốt liệu nhỏ là cát sông có modul là 2.3. Hai loại cốt liệu này được rửa sạch, sấy khô để loại bỏ các hạt bụi, bùn, sét và hàm lượng clorua bên trong cốt liệu. Các mẫu vuông 150x150x150 mm được đúc để đánh giá cường độ chịu nén của mẫu.

Bảng 2. Cấp phối bê tông

		Đơn vị	1 m ³
FA	Nước	kg	210
	Đá	kg	1050
	Xi măng	kg	280
	Cát	kg	686.5
	Tro bay	kg	70
SF	Nước	kg	210
	Đá	kg	1050
	Xi măng	kg	315
	Cát	kg	694.9
	Silicafume	kg	35

2.3. Tạo vết nứt cho mẫu bằng thí nghiệm tải uốn 3 điểm

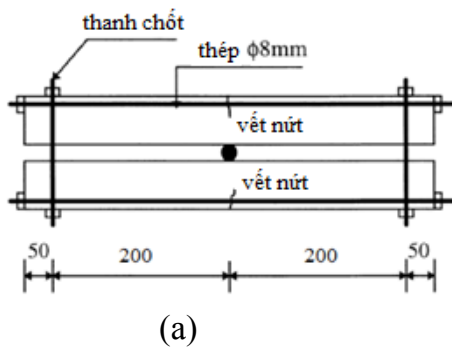
Mẫu nghiên cứu là mẫu dầm có kích thước 100x100x500 mm. Sau khi đúc bê tông, các mẫu được dưỡng hộ trong khuôn trong một ngày. Sau đó, mẫu được mang đi dưỡng hộ trong nước 27 ngày tiếp theo. Sau 27 ngày, mẫu được vớt ra và để khô ở nhiệt độ phòng. Tiếp theo, mẫu được thực hiện thí nghiệm uốn 3 điểm để tạo vết nứt (Gowripalan, Sirivivatnanon và Lim 2000). Đường nứt được tạo xuất hiện tại điểm giữa của dầm. Hai dầm được đặt tải xoay lưng vào nhau và vết nứt được mở rộng từ 0.08 mm đến

0.2 mm (Xem Hình 1). Vết nứt có hình dạng gần giống với vết nứt thật xuất hiện trên bề mặt bê tông (Xem Hình 2). Sau đó, phủ lớp epoxy lên các bề mặt của dầm chỉ trừ mặt chịu uốn. Chiều sâu vết nứt được thay đổi theo sự thay đổi tải trọng. Trước khi thực hiện quá trình xâm nhập clorua, bề rộng và chiều sâu vết nứt được đo bằng thiết bị kính hiển vi điện tử. Việc xác định đỉnh của vết nứt bằng mắt thường rất khó khăn do vết nứt có hình dạng khúc khuỷu và rất phức tạp. Vì vậy trong bài viết này, chiều sâu vết nứt được đề cập đến là chiều sâu tính từ bề mặt mặt phẳng nứt đến nơi vết nứt có bề rộng 30 μ m. Bề rộng và chiều sâu vết nứt được đo bằng kính

hiện vi điện tử để xác định mối liên hệ giữa chúng. Bề rộng vết nứt trên bề mặt uốn được đo tại 9 điểm với khoảng cách 1 cm (Xem Hình 2).

Mỗi cặp dầm được ngâm trong dung dịch NaCl 10% trong các khoảng thời gian khác nhau 4 tuần, 8 tuần, 16 tuần ở nhiệt độ phòng.

Hình 1. Vết nứt được tạo bởi thí nghiệm uốn 3 điểm (Gowripalan và cộng sự., 2000)



Hình 2. Vết nứt trên bề mặt dầm



Hình 3. Mẫu ngâm trong thùng dung dịch NaCl



2.4. Xác định hàm lượng clorua bằng phương pháp phân tích hóa học

Tại thời điểm xác định, mỗi cặp dầm được vớt ra và để khô tự nhiên ở nhiệt độ phòng trong 7 ngày. Sau đó, bột bê tông được khoan và thu thập tại vị trí nứt và không nứt của dầm (Xem Hình 4). Hàm lượng clorua trong mẫu bột bê tông được xác định bởi

phương pháp phân tích hóa học, dựa trên tiêu chuẩn Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete (ASTM-C1152, 1997). Thí nghiệm này cho kết quả hàm lượng clorua tổng trong mẫu bê tông. Thí nghiệm như sau: Cho 10g bột bê tông đã thu thập vào cốc thủy tinh 250ml. Cho 75ml nước cất và 25ml dung dịch axit HNO_3 (1:1) vào cốc thủy tinh và dùng đũa khuấy đều. Sau đó,

cho tiếp vào cốc 3ml dung dịch H_2O_2 và khuấy đều. Để tĩnh hỗn hợp trong 2 phút rồi cho tiếp vào 10 giọt dung dịch HNO_3 (1:1). Sau đó, cho cốc thủy tinh lên bếp và nung. Khi dung dịch sôi, cốc được mang xuống để dung dịch nguội. Tiếp đó, cho từ từ dung dịch NaOH vào cho đến khi dung dịch đạt được độ pH nằm trong khoảng 6-7 (thử bằng giấy quỳ). Dung dịch sau khi đạt độ pH được lọc qua giấy lọc và chứa trong bình tam giác và mang đi chuẩn độ. Phương pháp chuẩn độ được thực hiện theo tiêu chuẩn ASTM-C114, 2000. Hàm lượng clorua được xác định theo công thức sau:

$$C\% = 3.545 \times \frac{\Delta V \times N}{W} \quad (6)$$

Trong đó:

C: Hàm lượng clorua trong hỗn hợp bột bê tông (%)

ΔV : Thể tích dd $AgNO_3$ 0.1M (ml)

N: Nồng độ mol dd $AgNO_3$ sử dụng (0.1M)

W: Khối lượng bột bê tông cân xét nghiệm (g)

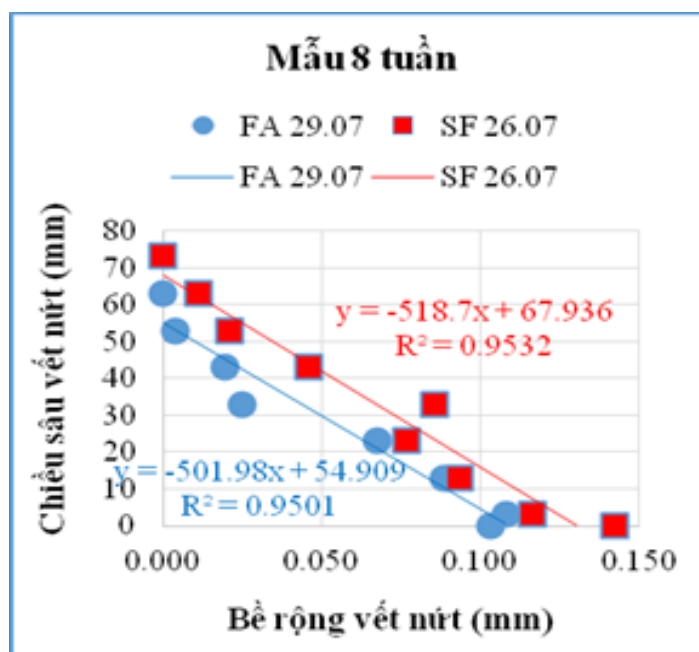
Hình 4. Lỗ khoan bê tông tại vị trí nứt và vị trí không nứt



3. Các kết quả thí nghiệm

3.1. Mối liên hệ giữa bề rộng và chiều sâu vết nứt

Hình 5. Mối liên hệ giữa bề rộng và chiều sâu vết nứt

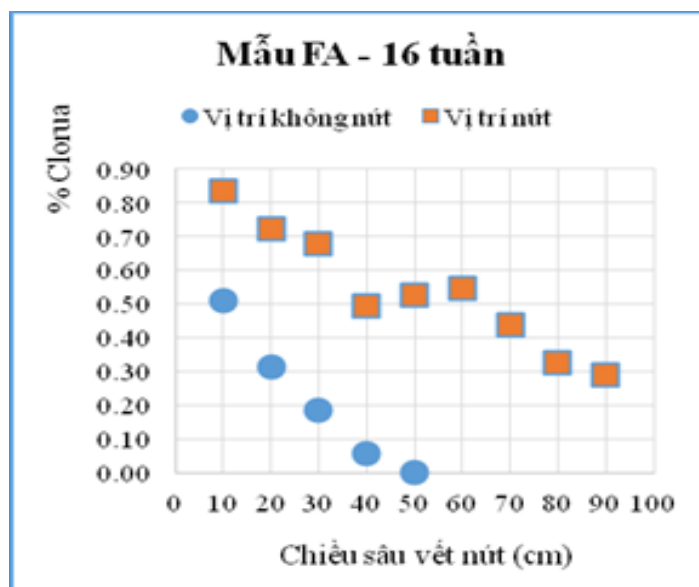


Hình 5 thể hiện mối liên hệ giữa bề rộng và chiều sâu vết nứt trong quá trình chịu tải. Kết quả cho thấy bề rộng vết nứt lớn nhất là ở tại vị trí bề mặt mẫu dầm và có xu hướng ngày càng giảm dần theo đường nứt đến đỉnh vết nứt. Trong nghiên cứu này, thí nghiệm uốn 3 điểm làm vết nứt có hình dạng khúc khuỷu, có

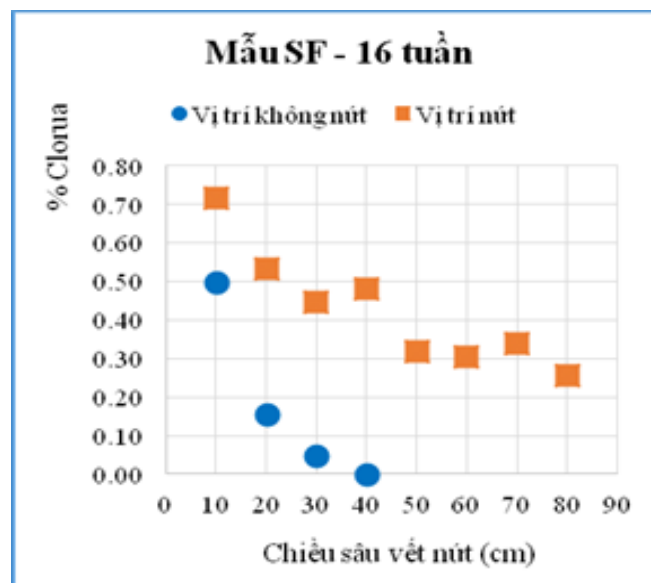
dạng chữ V và kích thước vết nứt khá giống với vết nứt thực tế. Do đó, sự xâm nhập của clorua vào trong vết nứt bê tông cốt thép có thể được đánh giá một cách chính xác do hệ số khuếch tán clorua tiếp tục thay đổi tương ứng với bề rộng vết nứt dọc theo đường nứt.

3.2. Sự xâm nhập ion clorua tại vị trí bê tông nứt và bê tông không nứt

Hình 6. Hàm lượng clorua của mẫu FA ngâm 16 tuần tại vị trí nứt và không nứt



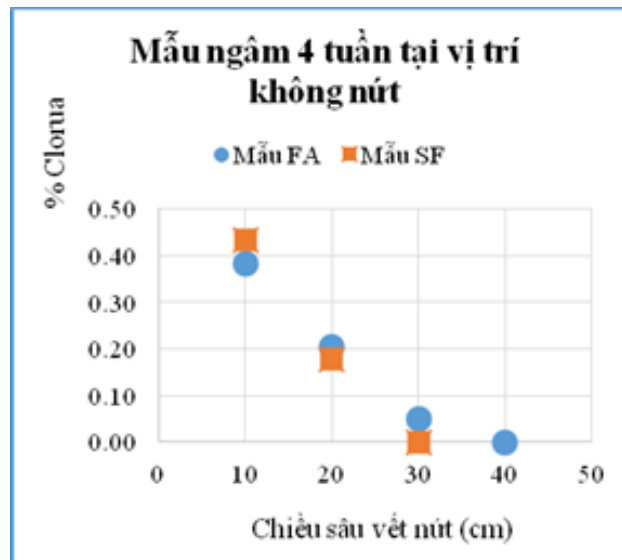
Hình 7. Hàm lượng clorua của mẫu SF ngâm 16 tuần tại vị trí nứt và không nứt



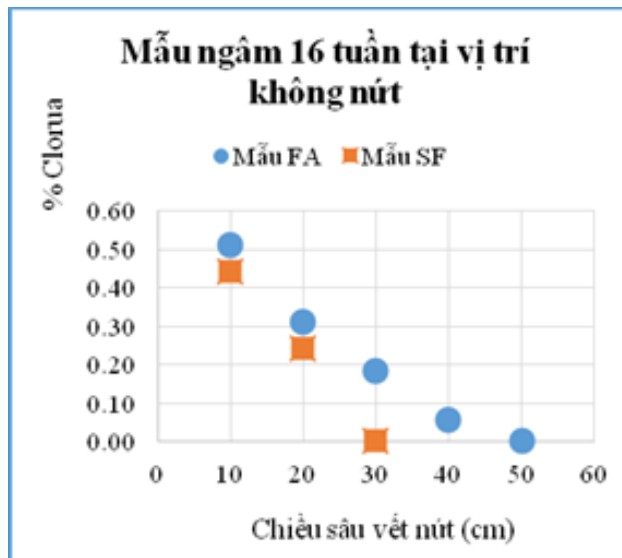
Kết quả nồng độ clorua xâm nhập vào bê tông cốt thép tại vị trí nứt và không nứt được thể hiện ở Hình 6 và Hình 7. Tại cùng độ sâu của dầm, hàm lượng clorua tại vị trí nứt cao hơn tại vị trí không nứt. Nguyên nhân là do tốc

độ xâm nhập của dòng ion clorua không chỉ phụ thuộc vào sự hấp thụ, sự thấm qua, sự khuếch tán,... mà còn là sự dịch chuyển với hàm lượng vô cùng lớn và phụ thuộc chủ yếu vào bề rộng vết nứt tại điểm đang xét.

Hình 8. So sánh hàm lượng clorua của mẫu FA và SF ngâm 4 tuần tại vị trí không nứt

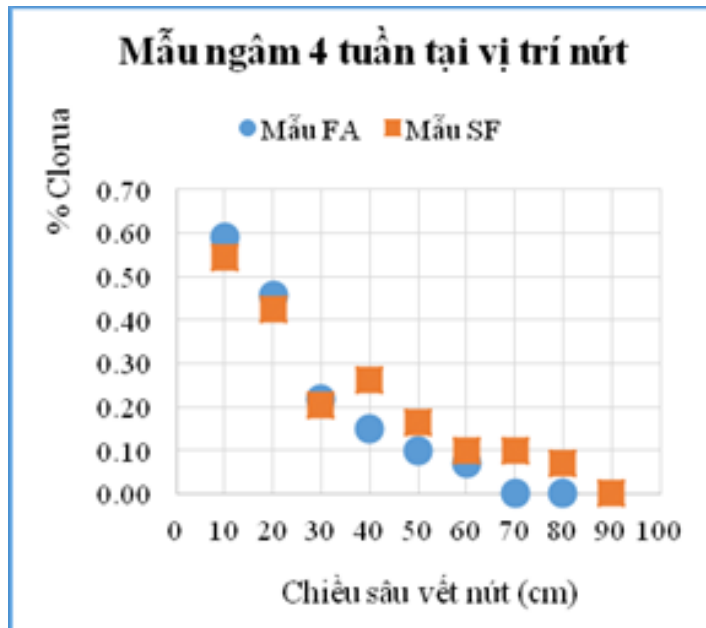
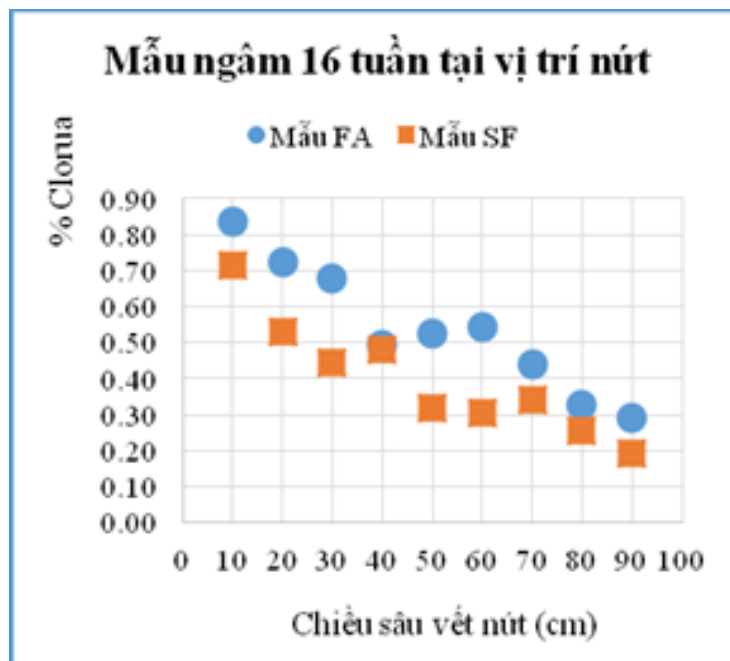


Hình 9. So sánh hàm lượng clorua của mẫu FA và SF ngâm 16 tuần tại vị trí không nứt



Tại vị trí không nứt, hàm lượng clorua của mẫu FA lớn hơn của mẫu SF. Silicafume là phụ gia khoáng hoạt tính có độ mịn cao hơn tro bay. Do đó, cấu trúc của bê tông dùng silicafume đặc chắc hơn bê tông dùng tro bay.

Vì vậy, tại vị trí không nứt, sự xâm nhập của clorua phụ thuộc vào vật liệu chế tạo bê tông. Bê tông càng đặc chắc, sự xâm nhập clorua vào trong bê tông càng kém.

Hình 10. So sánh hàm lượng clorua của mẫu FA và SF ngâm 4 tuần tại vị trí nứt**Hình 11. So sánh hàm lượng clorua của mẫu FA và SF ngâm 16 tuần tại vị trí nứt**

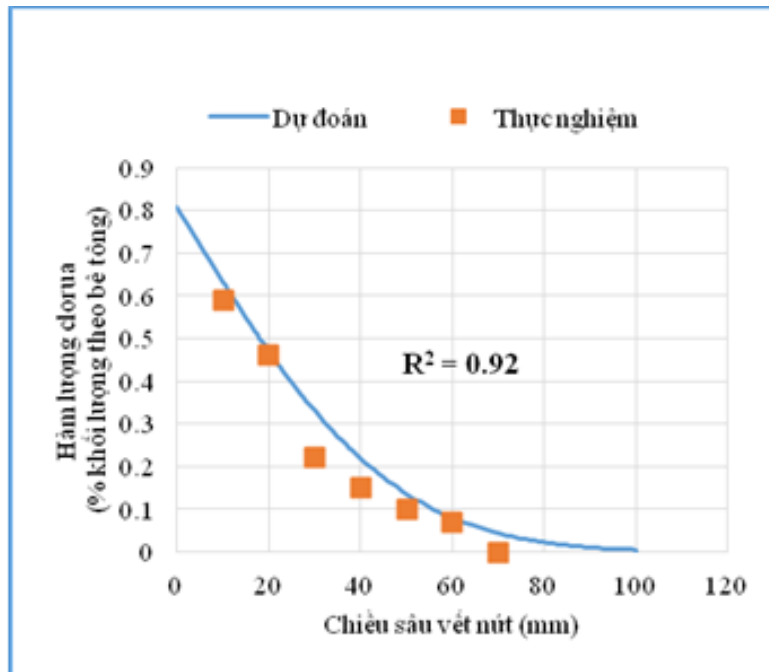
Tại vị trí nứt, hàm lượng clorua không phụ thuộc vào vật liệu chế tạo bê tông. Với mẫu ngâm 4 tuần, bề rộng và chiều sâu vết nứt mẫu FA là 0.072 mm và 60 mm; bề rộng và chiều sâu vết nứt mẫu SF là 0.092 mm và 60 mm. Với mẫu ngâm 16 tuần, bề rộng và chiều sâu vết nứt mẫu FA là 0.179 mm và 70 mm; bề

rộng vết nứt mẫu SF là 0.106 mm và 70 mm.

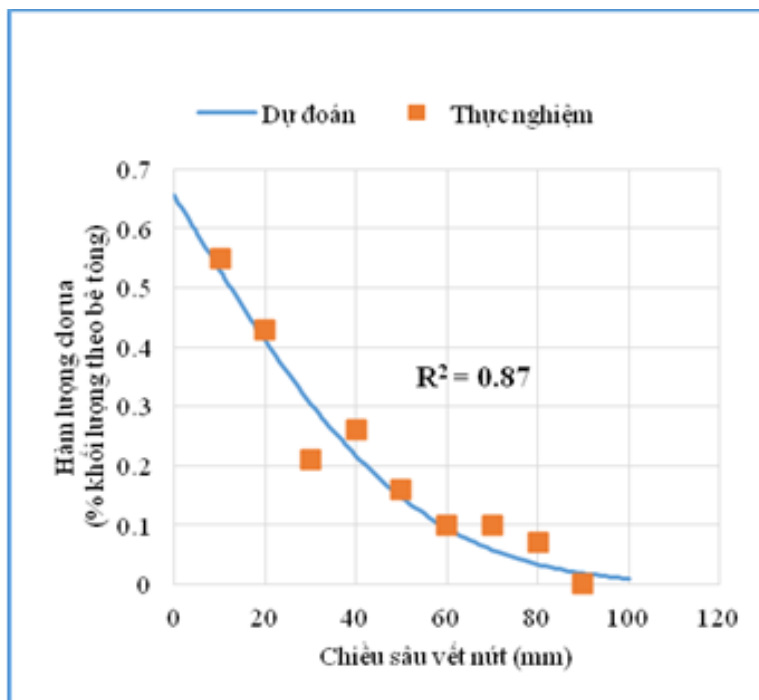
Hình 10 và Hình 11 cho thấy vết nứt càng lớn thì hàm lượng clorua xâm nhập vào càng nhiều. Điều đó có nghĩa là khi cấu kiện bê tông xuất hiện vết nứt, sự khuếch tán của clorua phụ thuộc hoàn toàn vào các đặc điểm vết nứt (cụ thể là bề rộng và chiều sâu vết nứt).

3.3. Hàm lượng clorua theo thực nghiệm và hệ số khuếch tán clorua tại vết nứt theo dự đoán:

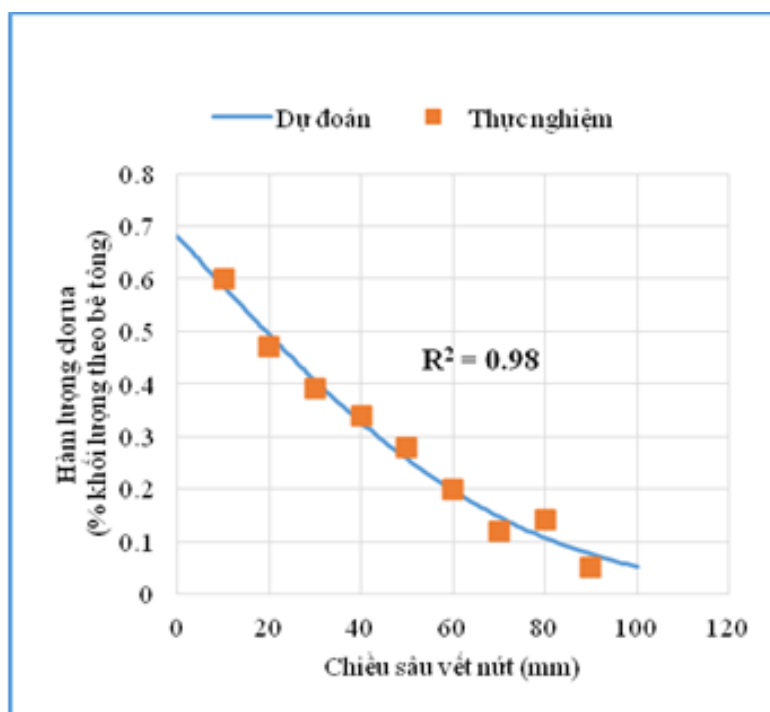
Hình 12. Hàm lượng clorua theo thực nghiệm và hệ số khuếch tán clorua tại vết nứt theo dự đoán (Mẫu FA ngâm 4 tuần)



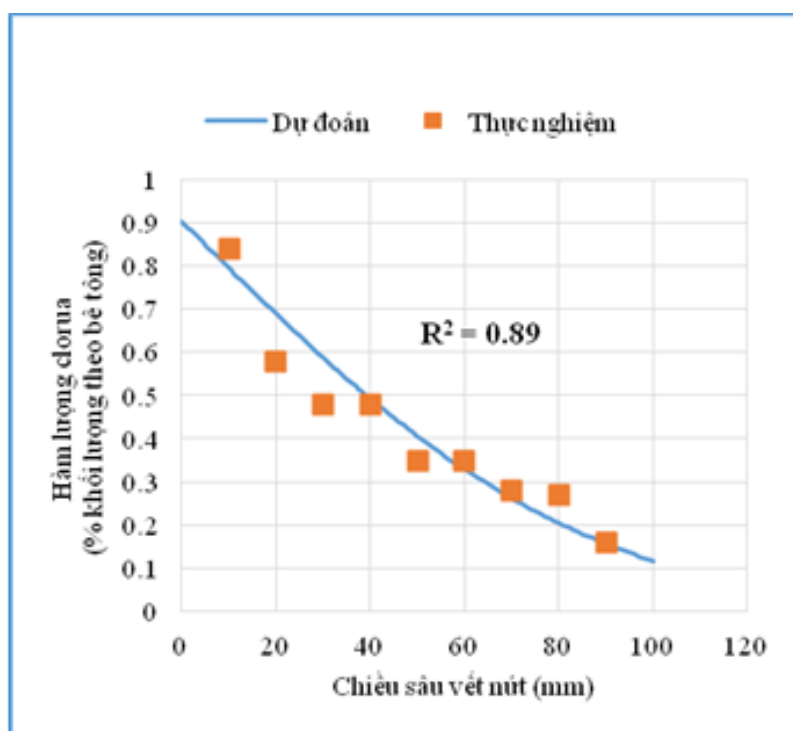
Hình 13. Hàm lượng clorua theo thực nghiệm và hệ số khuếch tán clorua tại vết nứt theo dự đoán (Mẫu SF ngâm 4 tuần)



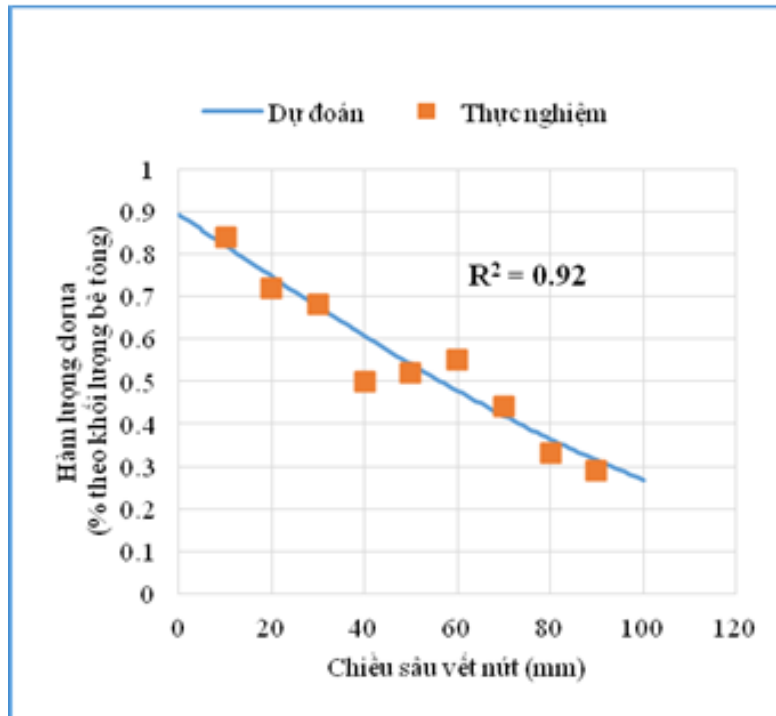
Hình 14. Hàm lượng clorua theo thực nghiệm và hệ số khuếch tán clorua tại vết nứt theo dự đoán (Mẫu FA ngâm 8 tuần)



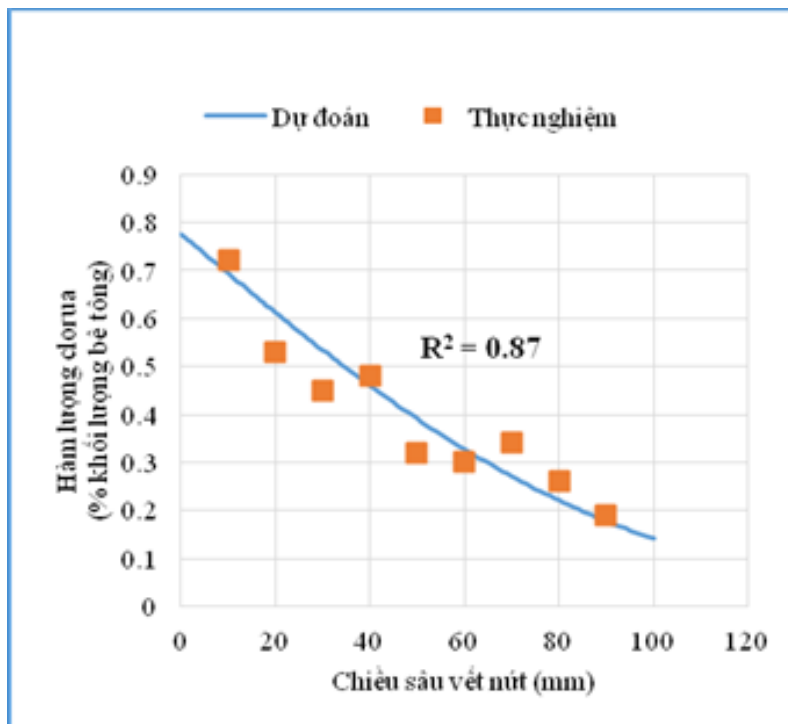
Hình 15. Hàm lượng clorua theo thực nghiệm và hệ số khuếch tán clorua tại vết nứt theo dự đoán (Mẫu SF ngâm 8 tuần)



Hình 16. Hàm lượng clorua theo thực nghiệm và hệ số khuếch tán clorua tại vết nứt theo dự đoán (Mẫu FA ngâm 16 tuần)



Hình 17. Hàm lượng clorua theo thực nghiệm và hệ số khuếch tán clorua tại vết nứt theo dự đoán (Mẫu SF ngâm 16 tuần)



Các hình từ 11-16 thể hiện hàm lượng clorua tại vết nứt theo thực nghiệm và thể hiện hệ số khuếch tán clorua tại vết nứt theo dự đoán của một số mẫu được ngâm tại các thời điểm khác nhau. Ở đây, các điểm màu cam là các giá trị hàm lượng clorua được xác định từ thực nghiệm (ASTM C1152-1997). Đường màu xanh là đường thể hiện hàm lượng tổng nồng độ clorua tại các vị trí chiều sâu khác nhau trong bê tông theo mô hình đã được trình bày ở mục 2.1.2. Để đánh giá sự tương thích và độ chính xác của mô hình và giá trị thực nghiệm, hệ số (R^2) được tính toán theo mục 2.1.3. Từ các hình 11 – 16 ta nhận thấy cho kết quả khá tốt giữa các kết quả dự đoán và thực nghiệm thể hiện bằng các giá trị $R^2 > 0.8$. Quá trình khuếch tán ion clorua vào bê tông cốt thép bên cạnh việc chịu ảnh hưởng trực tiếp từ các đặc điểm của vết nứt còn chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố tự nhiên khác. Do đó, độ chính xác của các mô hình khi dự đoán các hiện tượng liên quan tới các điều kiện tự nhiên thì với hệ số tương thích R^2 đạt được như trên là một kết quả rất tốt, nó đánh giá độ chính xác của mô hình trong việc dự đoán các điều kiện tự nhiên ảnh hưởng đến độ bền của bê tông cốt thép trong điều kiện môi trường xâm thực clorua.

4. Kết luận

Vết nứt thực tế có thể được tạo bằng cách dùng phương pháp tải uốn 3 điểm.

Tương tự với các nghiên cứu trước, sự xâm nhập clorua vào vết nứt bê tông cốt thép không phụ thuộc vào loại vật liệu chế tạo bê tông (các loại phụ gia khoáng khác nhau).

Quá trình xâm nhập clorua vào vết nứt bê tông cốt thép chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi các đặc tính vết nứt (bề rộng và chiều sâu vết nứt). Đồng thời, quá trình xâm nhập của clorua cũng bị ảnh hưởng bởi các thông số của vết nứt, như hình dạng khúc khuỷu của vết nứt.

Mô hình dự đoán sự xâm nhập clorua vào vết nứt bê tông cốt thép đã được đề xuất bởi Hoàng (2012) cho kết quả khá tốt khi độ chính xác được đánh giá thông qua việc so sánh với các giá trị thực nghiệm sử dụng các loại bê tông với các thành phần cấu tạo khác nhau, OPC, SF và FA.

Các kết quả của mô hình dự đoán tương thích tốt với kết quả thực nghiệm. Mô hình này có thể được áp dụng để dự đoán sự khuếch tán ion clorua vào vết nứt bê tông cốt thép trong môi trường có chứa clorua và có thể áp dụng để đánh giá độ bền cũng như tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép trong môi trường xâm thực biển.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Anderson, E., Bai, Z., Bischof, C., Blackford, S., Demmel, J., Dongarra, J., Croz, J. D., Greenbaum, A., Hammarling, S., McKenney, A. và Sorensen, D. (1999). *LAPACK Users' Guide*. Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia.
2. Bayliss, D. và Deacon, D. (2004). *Steelwork Corrosion Control*. Taylor & Francis.
3. Nguyễn Văn Chánh và Trần Văn Miên (2010). *Ăn mòn và chống ăn mòn bê tông cốt thép*. Đại học Quốc gia Tp. Hồ Chí Minh.
4. Djerbi, A., Bonnet, S., Khelidj, A. và Baroghel-bouny, V. (2008). "Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete". *Cement and Concrete Research*, số 38, tr. 877 - 883.
5. El-Reedy, M. A. (2008). *Steel-reinforced concrete structures: assessment and repair of corrosion*. CRC Press.

6. Gowripalan, N., Sirivivatnanon, V. và Lim, C. C. (2000). "Chloride diffusivity of concrete cracked in flexure". *Cement and Concrete Research*, số 30, tr. 725 - 730.
7. Heath, M. T. (2002). *Scientific Computing: An Introductory Survey*. McGraw-Hill New York.
8. Vũ Quốc Hoàng 2012. *Model for chloride ingress into reinforced concrete structure under load and marine environment*. Department of Civil Engineering, Doctor of Philosophy.
9. Vũ Quốc Hoàng, Stitmannathum, B. và Takafumi, S. (2011). *Experimental Study on Chloride Penetration Depth of Cracked Concrete*. in The Twenty-Fourth KKCNN Symposium on Civil Engineering. Hyogo, Japan.
10. Vũ Quốc Hoàng, Stitmannathum, B. và Takafumi, S. (2012). "Prediction of Chloride Profile at Crack Location in Reinforced Concrete under Flexural Loading". *ASEAN Engineering Journal 2012*, số 2, tr. 50-64.
11. Ismail, M., Toumi, A., François, R. và Gagné, R. (2008). "Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in cracked mortar samples". *Cement and Concrete Research*, số 38, tr. 1106 - 1111.
12. Takewaka, K., Yamaguchi, T. và Maeda, S. (2003). "Simulation Model for Deterioration of Concrete Structures due to Chloride Attack". *Journal of Advanced Concrete Technology*, số 1, tr. 139 - 146.
13. Tuutti (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm, Sweden.