

Ảnh hưởng của các tham số tới thời gian lan truyền mòn trong kết cấu phơi nhiễm clorua

■ TS. ĐÀO VĂN DINH

Trường Đại học Giao thông vận tải

TÓM TẮT: Nứt bê tông bảo vệ do ăn mòn cốt thép là cơ sở để quyết định thời gian bảo trì sửa chữa kết cấu. Do vậy, dự báo đáng tin cậy khoảng thời gian từ khởi đầu ăn mòn cốt thép đến nứt bê tông bảo vệ là quan trọng. Thời gian này chịu ảnh hưởng của rất nhiều yếu tố có thể kể ra gồm: (1) mật độ dòng điện ăn mòn; (2) tham số kết cấu như chiều dày lớp bê tông bảo vệ, đường kính thép; (3) tham số vật liệu chất lượng của bê tông như cường độ chịu kéo, mô-đun đàn hồi, hệ số từ biến, hệ số poisson; (4) tham số môi trường như nhiệt độ, độ ẩm. Ngoài các yếu tố trên, trong một số trường hợp như cốt thép đai chẳng hạn, ứng suất kéo trong bê tông do ăn mòn có cùng phương trùng với phương ứng suất trong bê tông do tải trọng gây ra sẽ ảnh hưởng tới thời gian này. Bài báo giới thiệu khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố đến thời gian từ khởi đầu ăn mòn cốt thép đến nứt bê tông bảo vệ.

TỪ KHÓA: Ăn mòn, cốt đai, tải trọng.

ABSTRACT: The crack of concrete cover due to corrosion of reinforcement is the basis for deciding the maintenance and repair time of reinforced concrete structures. Therefore, a reliable prediction of the time from the onset of corrosion to the reinforcement to the crack of concrete cover is important. This time is influenced by many factors including: (1) corrosion current density; (2) structural parameters such as concrete cover thickness, steel diameter; (3) quality concrete material parameters such as tensile strength, modulus of elasticity, creep coefficient, Poisson's ratio; (4) environmental parameters such as temperature, humidity. In addition to the above factors in some cases such as stirrup, tensile stress in concrete due to corrosion has the same direction as the direction of stress in the concrete caused by the load will affect this time. This paper introduces investigating the effect of these factors on the time from the corrosion initiation to the full crack of concrete cover.

KEYWORDS: Corrosion, stirrup, reinforced concrete, load.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tuổi thọ sử dụng (service life) của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) do tác động ăn mòn của clo là thời gian từ khi xây dựng đến khi ăn mòn (do clorua) gây ra các hư hại cho

kết cấu tới mức việc tiếp tục sử dụng kết cấu không còn an toàn nữa.

Thời gian này gồm hai giai đoạn kế tiếp nhau: Giai đoạn khởi đầu ăn mòn và giai đoạn lan truyền ăn mòn [7]. Giai đoạn khởi đầu ăn mòn là thời gian kể từ khi kết cấu bắt đầu tiếp xúc với ion clo cho đến khi ion clo xâm nhập vào bê tông tập trung trên bề mặt cốt thép đạt đến ngưỡng nồng độ gây ăn mòn. Giai đoạn lan truyền ăn mòn là thời gian kể từ khi cốt thép bắt đầu bị ăn mòn tới khi ăn mòn gây nứt hoàn toàn bê tông bảo vệ.

$$t = t_1 + t_2 \quad (1)$$

Trong đó: t_1 - Thời gian khởi đầu ăn mòn; t_2 - Thời gian lan truyền ăn mòn.

Thời gian lan truyền của ăn mòn là cơ sở để quyết định thời gian bảo dưỡng, sửa chữa kết cấu. Vì vậy, một dự đoán đáng tin cậy về thời gian từ khi bắt đầu ăn mòn cốt thép đến khi nứt lớp bảo vệ bê tông là rất quan trọng. Thời gian này bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố bao gồm [2,1,4,5]: (1) mật độ dòng ăn mòn; (2) các thông số kết cấu như chiều dày lớp bảo vệ bê tông, đường kính thép; (3) các thông số vật liệu như cường độ chịu kéo, mô-đun đàn hồi, hệ số rã, hệ số poisson của bê tông; (4) thông số môi trường: nhiệt độ, độ ẩm. Ngoài các yếu tố trên, tải trọng còn có ảnh hưởng đến thời gian lan truyền ăn mòn [9,10].

2. MÔ HÌNH XEM XÉT ẢNH HƯỞNG CỦA TẢI TRỌNG ĐẾN THỜI GIAN LAN TRUYỀN ĂN MÒN

2.1. Nứt bê tông bảo vệ do ăn mòn khi không xem xét ảnh hưởng của tải trọng

Đặt ρ là tỷ số giữa khối lượng thép bị hao hụt do ăn mòn (M_{loss}) với khối lượng thép ban đầu (M_s) trên một đơn vị chiều dài:

$$\rho = \frac{M_{\text{loss}}}{M_s} \quad (2)$$

Các giả định cơ bản: (1) Quá trình ăn mòn là đồng nhất về mặt không gian xung quanh cốt thép, dẫn đến áp lực mở rộng hướng tâm đồng đều tại bề mặt phân cách thép - bê tông; (2) Phần bê tông xung quanh thanh cốt thép được coi như một hình trụ có thành dày và chiều dày thành được giả định bằng lớp bê tông bảo vệ thép mỏng nhất; (3) Ứng suất kéo trong hình trụ bê tông thành dày do áp suất giãn nở gây ra được giả định là đồng nhất; (4) Ứng suất do tải trọng không được xem xét.

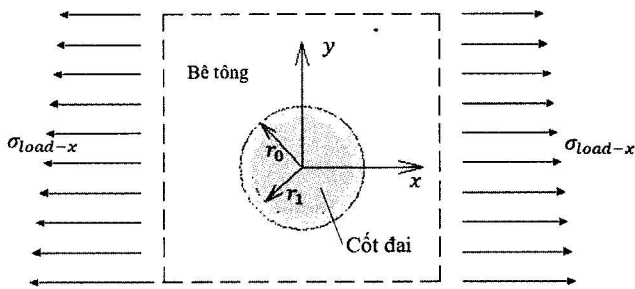
Tại thời điểm ăn mòn làm nứt toàn bộ lớp vỏ bê tông, tỷ số giữa khối lượng thép mất đi so với khối lượng thép ban đầu, ρ trở thành ρ_c . Giá trị của ρ_c khi xem xét các sản phẩm ăn mòn thâm nhập vào các vết nứt hở, theo Chunhua Lu và cộng sự [3].

$$\rho_c = (1 + k \frac{c}{d}) \frac{\left[\frac{2c}{d} \frac{f_{ct}}{E_{ef}} \left[\frac{(r_0 + c)^2 + r_0^2}{(r_0 + c)^2 - r_0^2} + v_c \right] + 1 + \frac{2\delta_0}{d} \right]^2 - 1}{n - 1} \quad (3)$$

Trong đó: c - Chiều dày lớp bê tông bảo vệ (mm); d - Đường kính cốt thép (mm); E_{ef} - Mô-đun đàn hồi có hiệu của bê tông (MPa) - $E_{ef} = 1/(1 + \varphi)$ với φ là hệ số từ biến của bê tông; $r_0 = d/2 + \delta_0$ (mm); δ_0 - Chiều dày vùng xấp bao quanh cốt thép, $\delta_0 = 12 - 20 \mu\text{m}$ [6]; f_{ct} - Cường độ chịu kéo của bê tông (PMA); v_c - Hệ số poisson của bê tông; k - Hệ số biểu thị khả năng lấp đầy vết nứt của gi ($0 < k < 1,0$); n - Hệ số nở thể tích của sản phẩm ăn mòn.

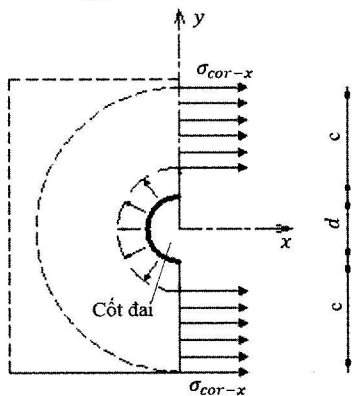
2.2. Nút bê tông bảo vệ do ăn mòn có xét đến ảnh hưởng của tải trọng nút bê tông bảo vệ do ăn mòn khi xem xét ảnh hưởng của tải trọng

Trong cấu kiện chịu uốn và chịu tải dọc trục kết hợp với uốn, ứng suất σ_{load-x} trong bê tông vuông góc với trục của cốt thép đai (cốt thép đai đặt vuông góc với cốt thép dọc) (Hình 2.1).



Hình 2.1: Ứng suất do tải trọng gây ra trong bê tông vuông góc với trục của cốt thép đai

Ứng suất kéo trong trụ bê tông có thành dày được giả định là đồng nhất, σ_{cor-x} như Hình 2.2.



Hình 2.2: Ứng suất kéo do ăn mòn cốt thép gây ra trong bê tông

Các ứng suất σ_{load-x} và σ_{cor-x} trong Hình 2.1 và 2.2 cùng phương, do đó ứng suất tổng hợp do tải trọng và ăn mòn gây ra nứt lớp bê tông bảo vệ như sau:

$$\sigma_{load-x} - \sigma_{cor-x} = f_{ct} \quad (4)$$

Sửa đổi phương trình 3 bằng cách thay f_{ct} bằng $f_{ct} - \sigma_{load-x}$ tỷ số giữa hao hụt khối lượng thép do ăn mòn trên khối lượng thép ban đầu ρ_{c-load} khi xét tác dụng của tải trọng tác dụng là:

$$\rho_{c-load} = (1 + k \frac{c}{d}) \frac{\left[\frac{2c}{d} \frac{(f_{ct} - \sigma_{load-x})}{E_{ef}} \left[\frac{(r_0 + c)^2 + r_0^2}{(r_0 + c)^2 - r_0^2} + v_c \right] + 1 + \frac{2\delta_0}{d} \right]^2 - 1}{n - 1} \quad (5)$$

Trong đó: σ_{load-x} - Ứng suất do tải gây ra; nó là dương khi nó là ứng suất kéo; σ_{load-x} là âm khi nó là ứng suất nén.

Sự mất khối lượng thép do ăn mòn gây ra nứt bê tông bảo vệ $M_{loss-cr}$ khi xét tác dụng của tải trọng là:

$$M_{loss-cr} = \rho_{c-load} M_s = \rho_{c-load} \frac{\pi}{4} \left(\frac{d^2}{10} \right) \rho_s = \rho_{c-load} \frac{\pi}{400} d^2 \times 7,85 = 0,0196 \rho_{c-load} \pi d^2$$

$$M_{loss-cr} = 0,0196 \rho_{c-load} \pi d^2 \quad (6)$$

Lượng thép tiêu thụ có liên quan đến cường độ dòng điện trong ăn mòn điện hóa. Sử dụng định luật Faraday để mô tả sự mất khối lượng của thép do ăn mòn:

$$M_{loss} = \frac{MI_{cor}}{zF} t \quad (7)$$

Trong đó: M_{loss} - Khối lượng hao hụt của thép tiêu thụ (g); M - Khối lượng nguyên tử của sắt, $M = 56 \text{ g/mol}$; z - Hóa trị ion; F - Hằng số Faraday, $=96,500 \text{ C/mol}$; t - Thời gian ăn mòn; I_{cor} - Dòng điện ăn mòn (A);

$$I_{cor} = 1 \times \frac{\pi d}{10} \times i_{cor} \times 10^{-6} = 10^{-7} \pi i_{cor} d \quad (8)$$

Trong đó: i_{cor} - Mật độ dòng ăn mòn ($\mu\text{A/cm}^2$); d - Đường kính thép (mm).

Tổn thất khối lượng của thép do ăn mòn, M_{loss} (g), khi thời gian ăn mòn t tính bằng đơn vị năm:

$$M_{loss} = \frac{56 \times 10^{-7} \pi i_{cor} d}{2,5 \times 96,500} \times 365 \times 24 \times 3600 t = 2,23 \times 10^{-3} i_{cor} dt \quad (9)$$

Sự hao hụt khối lượng của thép do ăn mòn sẽ được tích lũy theo thời gian. Khi M_{loss} bằng $M_{loss-cr}$ thì bê tông bảo vệ sẽ bị nứt toàn bộ.

$$M_{loss} = 2,23 \times 10^{-3} i_{cor} dt = M_{loss-cr} = 0,0196 \rho_{c-load} \pi d^2 \quad (10)$$

Khi (i_{cor}) không thay đổi theo thời gian, thời gian lan truyền ăn mòn (t_{cr}) khi điểm cuối thời gian đó là bê tông bảo vệ nứt hoàn toàn sẽ như sau:

$$t_{cr} = \frac{0,0196 \rho_{c-load} \pi d^2}{2,23 \times 10^{-3} i_{cor} d} = 27,612 \frac{d}{i_{cor}} \rho_{c-load} \quad (11)$$

Khi (i_{cor}) thay đổi theo thời gian, thời gian lan truyền ăn mòn (t_{cr}) khi điểm cuối thời gian đó là bê tông bảo vệ nứt hoàn toàn sẽ như sau:

$$\int_0^{t_{cr}} M_{loss} dt = M_{loss-cr} = 0,0196 \rho_{c-load} \pi d^2 \quad (12)$$

Liu và Weyers [8] đã thực hiện một mối quan hệ thực nghiệm dựa trên 2.927 yers [9] đã thực hiện một mối quan hệ thực nghiệm dựa trên 2.927 phép đo tốc độ ăn mòn từ 7 mẫu tiếp xúc với clo trong vòng 5 năm. Các clorua đã được cho vào trong hỗn hợp ban đầu. Tốc độ ăn mòn được biểu thị bằng đo mật độ dòng điện ăn mòn, tương quan với nhiệt độ, điện trở của bê tông bảo vệ, R_c (Ω), hàm lượng clorua và thời gian tiếp xúc bằng cách sử dụng mô hình hồi quy đa biến phi tuyến đã đưa ra:

$$i_{cor} = 0,926 \exp \left[7,98 + 0,7771 \ln(1,69C_c) - \frac{3006}{T} - 0,000116R_c + 2,24t^{-0,215} \right] \quad (13)$$

Trong đó: i_{cor} - Mật độ dòng điện ăn mòn ($\mu\text{A/cm}^2$); C_c - Tổng hàm lượng clorua (kg/m^3 khối lượng bê tông); T - Nhiệt độ (K); R_c - Điện trở của lớp bê tông bảo vệ (Ω); t - Thời gian từ khởi đầu ăn mòn thép (năm). Điện trở của bê tông bảo vệ sẽ dùng kết quả của Lopez và các cộng sự [5]. R_c là một hàm của độ ẩm (H):

$$R_c = 90,357 H^{-7,2548} [1 + \exp(5 - 50(1 - H))] \quad (14)$$

3. KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THAM SỐ ĐẾN THỜI GIAN LAN TRUYỀN ẨM MÒN

Ví dụ khảo sát là một kết cấu có các tham số như sau:

Tham số kết cấu: $c = 20 - 60$ mm; cốt đai có đường kính:

$d = 9,5$ mm; ứng suất do tải trọng trong bê tông: $\sigma_{load-x} = -5$ MPa \pm 2 MPa;

Tham số vật liệu: $f'_c = 30$ MPa; $f_{ct} = 3,3$ MPa; $E_c = 30.000$ MPa; $\varphi = 2,0$; $\nu = 0,18$; $\delta_0 = 12,5$ μ m; $k = 0,7$; $\gamma_c = 2450$ kg/m³;

Nồng độ clorua bề mặt: $C_s = 0,6\%$ (khối lượng bê tông);

Hệ số khuếch tán ion clo trong bê tông:

$$D = 6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$$

Thời gian khởi đầu ăn mòn cốt thép: 18 năm;

Tham số môi trường: Nhiệt độ $T = 298$ K(25°C); độ ẩm:

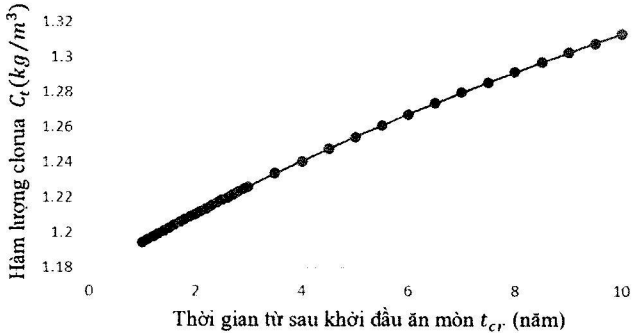
$H = 75\%$.

Hàm lượng clorua trong bê tông tại bề mặt cốt thép theo thời gian được tính toán dựa trên định luật thứ hai của Fick về khuếch tán (giả định nồng độ clorua ban đầu trong bê tông bằng 0) như sau:

$$C(c,t) = \left\{ C_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{c}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} \times \frac{1}{100} \times \gamma_c$$

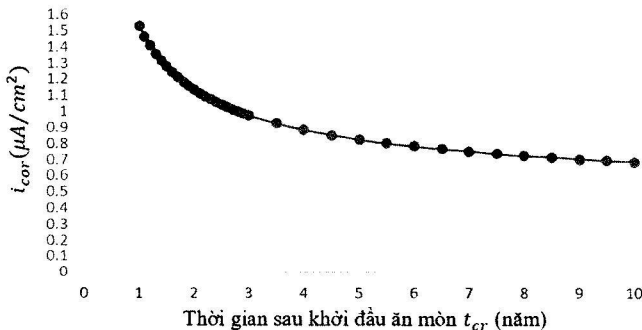
$$C(50,t) = 0,06 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \frac{50 \times 10^{-3}}{2\sqrt{6 \times 10^{-12} (18+t_{cr})}} \right\} \times 24,5 \quad (15)$$

Mối quan hệ giữa hàm lượng clorua trong bê tông tại bề mặt cốt thép $C_{(50,t)}$ và thời gian sau khởi đầu ăn mòn thép t_{cr} theo phương trình (11) với các tham số của ví dụ được thể hiện như Hình 3.1 (khi chiều dày lớp bê tông bảo vệ $c = 50$ mm).



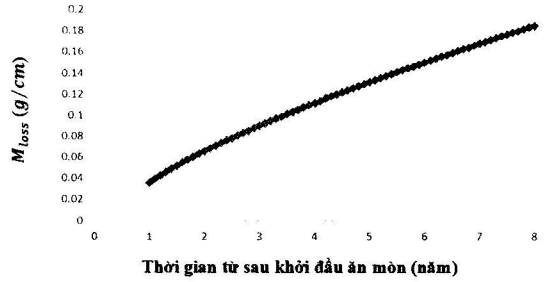
Hình 3.1: Hàm lượng clorua trong bê tông tại bề mặt cốt thép theo thời gian

Mật độ dòng điện ăn mòn phụ thuộc thời gian theo phương trình (13) được tính toán và thể hiện trong Hình 3.2.



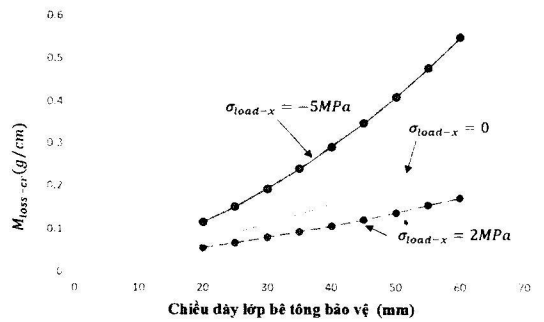
Hình 3.2: Mật độ dòng điện ăn mòn i_{cor} theo thời gian

Khối lượng thép mất mát do ăn mòn tích lũy theo thời gian được tính dựa trên phương trình (9) được thể hiện trong Hình 3.3.



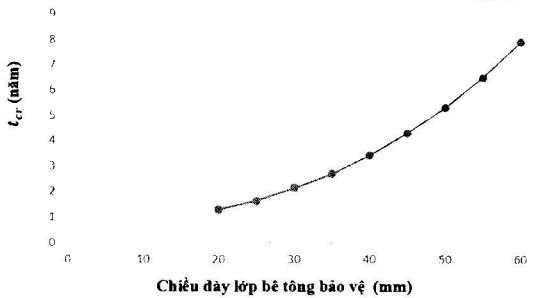
Hình 3.3: Khối lượng mất mát thép do ăn mòn theo thời gian ($c = 50$ mm)

Khối lượng thép mất mát do ăn mòn gây nứt bê tông bảo vệ $M_{loss-cr}$ phụ thuộc vào chiều dày lớp bê tông bảo vệ và ứng suất do tải trọng trong bê tông được tính dựa trên phương trình (5) và (6) được chỉ ra trong Hình 3.4.

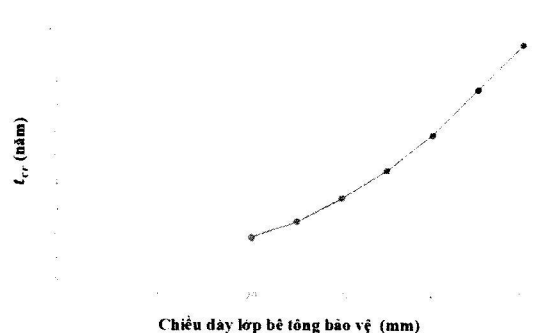


Hình 3.4: Khối lượng mất mát thép do ăn mòn gây nứt theo chiều dày lớp bê tông bảo vệ và các mức ứng suất trong bê tông

Khảo sát ảnh hưởng của chiều dày lớp bê tông bảo vệ đến thời gian lan truyền ăn mòn gây nứt của cốt thép đai được thể hiện trong Hình 3.5 (khi ứng suất trong bê tông $\sigma_{load-x} = 2$ MPa) và Hình 3.6 (khi ứng suất trong bê tông $\sigma_{load-x} = 0$).

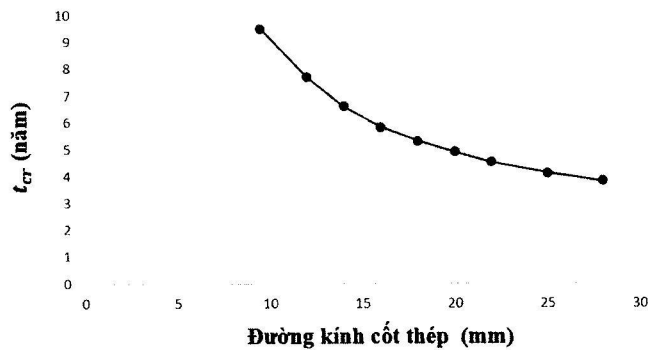


Hình 3.5: Thời gian lan truyền ăn mòn gây nứt theo chiều dày lớp bê tông bảo vệ (khi $\sigma_{load-x} = 2$ MPa; $d = 9,5$ mm)



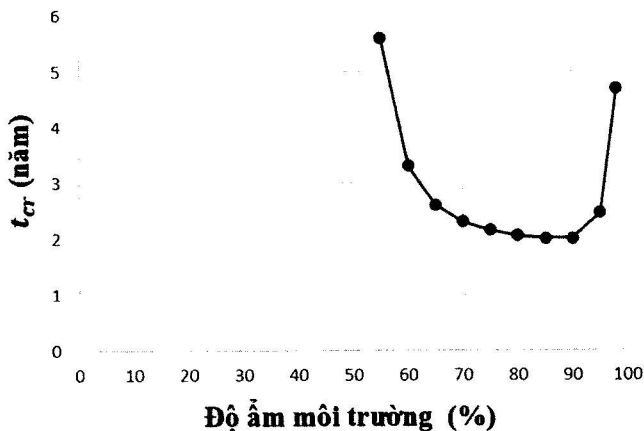
Hình 3.6: Thời gian lan truyền ăn mòn gây nứt theo chiều dày lớp bê tông bảo vệ (khi $\sigma_{load-x} = 0$ MPa; $d = 9,5$ mm)

Ảnh hưởng của đường kính cốt thép đến đến thời gian lan truyền ăn mòn gây nứt được thể hiện trong Hình 3.7.



Hình 3.7: Thời gian lan truyền ăn mòn gây nứt theo đường kính cốt thép (khi $\sigma_{load-x} = 0$ MPa và $c = 50$ mm)

Ảnh hưởng của độ ẩm môi trường đến đến thời gian lan truyền ăn mòn gây nứt được thể hiện trong Hình 3.8.



Hình 3.8: Thời gian lan truyền ăn mòn gây nứt theo độ ẩm môi trường (khi $\sigma_{load-x} = 2$ MPa và $c = 30$ mm; $d = 9,5$ mm)

4. KẾT LUẬN

- Mật độ dòng điện ăn mòn thép trong bê tông giảm theo thời gian, thời gian đầu giảm nhanh, sau đó giảm chậm lại.

- Đối với cốt thép đai, ứng suất do tải trọng gây ra ảnh hưởng mạnh tới thời gian lan truyền ăn mòn gây nứt bê tông bảo vệ.

- Thời gian lan truyền ăn mòn gây nứt tăng lên khi chiều dày lớp bê tông bảo vệ tăng.

- Khi đường kính cốt thép tăng thời gian lan truyền ăn mòn gây nứt giảm.

- Tham số độ ẩm môi trường ảnh hưởng tới thời gian lan truyền ăn mòn gây nứt bê tông bảo vệ: khi độ ẩm thấp <50% và cao >98% thì là lớn nhất; khi độ ẩm từ 70 - 95% thì là nhỏ nhất.

Lời cảm ơn: Xin trân trọng cảm ơn Trường Đại học GTVT đã tài trợ cho đề tài mã số T2021-CT-002.

Tài liệu tham khảo

[1]. Bazant (June 1979), *Physical Model for Steel*

Corrosion in Sea Structures Applications, Journal of the Structural Division, pp.1155-1166.

[2]. Beeby, A. (February 1983), *Cracking, cover and corrosion of reinforcement*, Concrete International, pp.35-40.

[3]. Chunhua Lu, W.J. (2011), *Ronggui Liu Reinforcement corrosion-induced cover cracking and its time prediction for reinforced concrete structures*, Corrosion Science, 53, pp.1337-1347.

[4]. Liu, T. and R.W. Weyers (1998), *Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures*, Cement and Concrete Research, 28 (3): pp.365-379.

[5]. López, W. and J.A. González (1993), *Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement*, Cement and Concrete Research, 23 (2): pp.368-376.

[6]. Maaddawy T. El., K.S. (2007), *A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking*, Cement and Concrete Composites, 29, pp.168-175.

[7]. Tuutti, K. (1980), *Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel*, in Proceedings of the International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment, ACI SP-65, pp.223-236.

[8]. Weyers, L.a. (1998), *Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures*, Cement and Concrete Research, 28 (3): pp.365-379.

[9]. Yang, C.Q.L.a.S.T. (November 2011), *Prediction of Concrete Crack Width under Combined Reinforcement Corrosion and Applied Load*, Journal of Engineering Mechanic @ASCE, pp.722-731.

[10]. Zhicheng Gao, R.Y.L., Anil K. Patnaik (2016), *Effects of sustained loading and pre-existing cracks on corrosion behavior of reinforced concrete slabs*, Construction and Building Materials, 124, pp.776-785.

Ngày nhận bài: 22/3/2021

Ngày chấp nhận đăng: 15/4/2021

Người phản biện: TS. Trần Việt Hưng

TS. Bùi Thị Cẩm Nhung