



CHLORIDE IONS DIFFUSION IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURE UNDER FLEXURAL LOADING: EXPERIMENT AND LATTICE MODELLING

Pham Duc Tho^{1*}, Son Truong Bui¹, Truyen The Tran², Nam Van Vo³

¹Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

²University of Transport and Communications, Hanoi, Vietnam

³ Ho Chi Minh City University of Transport, Hochiminh, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 08/05/2023

Revised: 11/06/2023

Accepted: 14/06/2023

Published online: 15/06/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.5.7>

* *Corresponding author*

Email: phamductho@humg.edu.vn; Tel: +84976415657

Abstract. Chloride ions diffusion is a main reason for localized corrosion of reinforcing steel in concrete. Study on the effect of chloride ions diffusion on corrosion behavior of the steel is of importance for corrosion protection. This paper presents the use of experiment and lattice model to investigate the effect of flexural loading level on the diffusion of chloride during four-point bending test. Three loading levels 0%, 40% and 60% were carried out to study the effect of crack on the chloride profile and diffusivity coefficient. Hydro-mechanical lattice modelling is proposed to model chloride ingress in the concrete under different level loading. The chloride diffusion coefficient of concrete is affected by the crack opening, and there exist upper and lower limits. The experiments show that the development of first crack in beam concrete is occurred at load of 4 kN and the ultimate load at failure is 12.5 kN. These results also show that the increasing chloride profile and diffusivity during the bending test. The proposed model allows predicting the experimental results for higher loading level. As compared with the experimental results, the proposed model is reasonably predicting the free chloride profile for sound and damaged concrete. The proposed model predicts the diffusivity coefficient due to damage up to 80% loading level, the diffusivity increases around ten times undamaged specimen. The present results show that the proposed hydro-mechanical lattice model is a useful tool for predicting the durability of concrete structure under service load.

Keywords: Chloride ion, Bending test, Diffusivity, Lattice model.



KHUẾCH TÁN ION CLORUA TRONG KẾT CẤU DẦM BÊ CỐT THÉP CHỊU UỐN: THÍ NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG SỐ

Phạm Đức Thọ^{1*}, Bùi Trường Sơn¹, Trần Thế Truyền², Võ Văn Nam³

¹Trường Đại học Mở - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Đại học Giao thông vận tải, Hà Nội, Việt Nam

³Trường Đại học Giao thông vận tải thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 08/05/2023

Ngày nhận bài sửa: 11/06/2023

Ngày chấp nhận đăng: 14/06/2023

Ngày xuất bản Online: 15/06/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.5.7>

* Tác giả liên hệ

Email: phamductho@humg.edu.vn; Tel: +84976415657

Tóm tắt. Sự khuếch tán ion clorua là nguyên nhân chính dẫn đến ăn mòn cục bộ cốt thép trong bê tông. Nghiên cứu về ảnh hưởng của sự khuếch tán ion clorua đối với ứng xử ăn mòn của thép có tầm quan trọng đối với việc bảo vệ chống ăn mòn. Bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số bằng mô hình lưới lattice để khảo sát ảnh hưởng của mức độ tải trọng đến sự khuếch tán của ion clorua trong thí nghiệm dầm chịu uốn bốn điểm. Ba mức loại thí nghiệm được thực hiện với các cấp tải trọng 0%, 40% và 60% để nghiên cứu ảnh hưởng của chúng đến nồng độ của ion clorua tại các vị trí khác nhau và hệ số khuếch tán của bê tông. Mô hình lưới lattice thủy- cơ được đề xuất để mô hình hóa sự xâm nhập của clorua trong bê tông dưới các mức tải trọng khác nhau. Hệ số khuếch tán clorua của bê tông bị ảnh hưởng bởi việc mở vết nứt và tồn tại các giới hạn trên và dưới. Các thí nghiệm cho thấy rằng sự phát triển của vết nứt đầu tiên trong bê tông dầm xảy ra ở tải trọng 4 kN và tải trọng giới hạn khi phá hủy là 12,5 kN. Những kết quả này cũng cho thấy rằng nồng độ ion clorua và độ khuếch tán ngày càng tăng trong quá trình thử nghiệm uốn. So sánh với kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình đề xuất dự báo tốt nồng độ ion clorua tự do đối với bê tông còn nguyên vẹn và hư hại. Ngoài ra, mô hình đề xuất dự báo hệ số khuếch tán do mức tải trọng bị phá hủy lên tới 80%, hệ số khuếch tán tăng khoảng 10 lần mẫu không bị hư hại. Các kết quả nghiên cứu cho thấy mô hình lưới thủy-cơ được đề xuất là một công cụ hữu ích để dự đoán độ bền của kết cấu bê tông trong môi trường biển.

Từ khóa: Ion Clorua, Thí nghiệm uốn, Khuếch tán, Mô hình lưới.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông cốt thép (BTCT) là loại vật liệu có khả năng chống thấm tốt và được sử dụng rộng rãi ở vùng ven biển. Sự suy giảm độ bền của bê tông cốt thép là rất quan trọng đối với độ bền, an toàn và tính bền vững của các công trình hạ tầng, đặc biệt là đối với cầu cảng, cầu vượt, cầu và tường chắn sóng bằng bê tông. Đối với bê tông cốt thép trong môi trường biển, ion clorua là một yếu tố rất quan trọng ảnh hưởng đến độ bền trong thời gian sử dụng. Độ bền của kết cấu BTCT phụ thuộc vào sự xâm nhập của clorua vào bê tông được kiểm soát bởi các cơ chế vận chuyển vật lý và hóa học khác nhau, được phân thành bốn loại: khuếch tán; thẩm thấu; di cư; đối lưu và hút mao dẫn. Đối với kết cấu BTCT trong môi trường biển, cơ chế khuếch tán là cơ chế chiếm ưu thế đối với sự xâm nhập của clorua.

Tốc độ xâm nhập của clorua qua các vết nứt cho phép xác định thời gian của giai đoạn bắt đầu ăn mòn, đã được nghiên cứu rộng rãi bằng cả phương pháp thực nghiệm và phương pháp số [1–4]. Tuy nhiên, những nghiên cứu này thường được nghiên cứu trên một kết cấu được xử lý với một vết nứt duy nhất và được tạo ra bởi ứng suất kéo. Một vài nghiên cứu xem xét ảnh hưởng của vết nứt nhỏ do ứng suất đơn trục gây ra đối với sự khuếch tán clorua [2], [4–6]. Hơn nữa, mối quan hệ giữa các hệ số truyền dẫn (nước và ion clorua) với ứng suất rất ít được tìm thấy trong các nghiên cứu. Wang [4] phát triển phương trình Katz-Thompson bằng cách thêm ảnh hưởng của ứng suất đến mối quan hệ giữa hệ số thẩm thấu và hệ số khuếch tán. Trong nghiên cứu của mình, Djerbi [3] đã tiến hành thí nghiệm, đánh giá ảnh hưởng của hệ số phá hủy đến hệ số khuếch tán ion clorua của bê tông và đưa ra mối quan hệ của chúng. Mối tương quan giữa hệ số phá hủy và hệ số khuếch tán ion Clorua được thiết lập bằng cách đưa ra một biến phá hủy do sự suy giảm độ cứng của bê tông bị hư hỏng dưới tác dụng của tải trọng nén một trục. Mẫu bê tông thường và bê tông cường độ cao được sử dụng trong thí nghiệm để xem xét ảnh hưởng của cơ chế xuất hiện và lan truyền vết nứt trong bê tông đến độ thấm khí và thẩm thấu ion Clorua của bê tông. Mẫu bê tông hình trụ được đem gia tải trước với các cấp tải trọng từ 60% - 90% cường độ chịu nén giới hạn của mẫu. Kết thúc thí nghiệm, từ những kết quả có được, Djerbi [3] cho rằng hệ số thẩm thấu đối và hệ số khuếch tán ion clorua tương đối của bê tông thường và bê tông cường độ cao tăng với sự gia tăng của ứng suất dư, trong đó bê tông thường cho thấy giá trị cao hơn. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy sự biến thiên theo một hàm số mũ giữa độ thấm tương đối (hay hệ số khuếch tán tương đối) và biến phá hủy D đối với cả bê tông thường và bê tông cường độ cao.

Kato [7] đề xuất một mô hình mô phỏng xác định nồng độ ion clorua trong bê tông bị nứt trong điều kiện ẩm ướt và làm khô định kỳ. Trong mô hình này, vùng nứt được tạo ra trên bề mặt của bê tông đồng thời xem xét sự cân bằng của tổng lượng clorua trong vùng nứt và trong vết nứt. Aldea [8] và cộng sự, nghiên cứu về ảnh hưởng của vết nứt đến độ thấm nước và ion Clorua của bê tông. Trong nghiên cứu này, các yếu tố bao gồm thành phần vật liệu và chiều rộng vết nứt trung bình có thể ảnh hưởng đến mối tương quan giữa độ rộng vết nứt và độ thấm nước và ion Clorua của bê tông. Các vết nứt được tạo trước trong các mẫu bê tông bằng thí nghiệm ép chế. Độ thấm ion Clorua được đánh giá bằng thí nghiệm thẩm thấu nhanh ion Clorua và độ thấm nước được đánh giá bằng thí nghiệm thẩm thấu nước áp suất thấp. Kết quả tính toán cho thấy tính thấm ion Clorua tăng lên cùng với độ mở rộng vết nứt và độ thấm nước chịu ảnh hưởng đáng kể hơn so với độ thấm ion Clorua.

Gowripalan [9] thực hiện đánh giá ảnh hưởng các vết nứt vi mô và độ thấm ion Clorua của bê tông khi phải chịu một tải trọng nén trước một trục. Nhóm nghiên cứu có nhận xét rằng, khi các mẫu bê tông được dỡ tải hoàn toàn ở cấp tải trọng nén trước là $0,5f_c$, các vùng xuất

hiện vết nứt vì mô có thể hồi phục lại 100% như trạng thái ban đầu. Tuy nhiên, khi dỡ tải ở cấp tải trọng từ 0,7 đến $0,95f_c$, một số vùng vết nứt không có khả năng hồi phục sau khi dỡ tải. Và tính chất này có ý nghĩa quyết định rất lớn tính thấm thấu của bê tông. Độ thấm ion Clorua của bê tông (sau khi dỡ tải) bị ảnh hưởng bởi sự xuất hiện của ứng suất nén trước. Độ thấm ion Clorua trong mẫu bê tông thay đổi không đáng kể khi các cấp tải trọng nén trước còn nhỏ $\sigma/\sigma_{max} \leq 0,7$. Mức độ gia tăng về độ thấm có thể thấy rõ khi các cấp tải trọng nén trước lớn $\sigma/\sigma_{max} > 0,7$

Tất cả các mô hình trên đều xem xét ảnh hưởng của độ rộng vết nứt. Hàm lượng ion clorua trong vùng nứt tăng khi bề rộng vết nứt tăng. Tuy nhiên, nhiều kết quả thí nghiệm cho thấy vết nứt không ảnh hưởng đến sự xâm nhập của clorua khi chiều rộng vết nứt nhỏ hơn một giá trị cụ thể và chiều rộng vết nứt thể hiện ảnh hưởng tương tự đối với sự xâm nhập của clorua khi chiều rộng vết nứt lớn hơn giá trị tới hạn khác Djerbi [3].

Các mô hình đề xuất ở trên không thể giải thích hiện tượng này và cần phải phát triển một mô hình mới để mô phỏng sự xâm nhập của clorua vào bê tông một cách chính xác hơn. Bề rộng vết nứt giảm từ bề mặt vào bên trong đối với hầu hết các kết cấu bê tông cốt thép. Tuy nhiên, phần quan trọng nhất ảnh hưởng đến ăn mòn thép là vết nứt vỏ bê tông, bề rộng của nó có thể coi như không thay đổi. Để đơn giản hóa việc tính toán, bề rộng vết nứt không đổi sẽ được xem xét trong mô hình sau. Nghiên cứu này tập trung vào ảnh hưởng của các vi vết nứt đối với sự khuếch tán clorua của bê tông dưới tải trọng thử uốn bằng các nghiên cứu thực nghiệm và mô hình lưới thủy - cơ.

2. MÔ HÌNH LƯỚI THỦY- CƠ

2.1 Mô hình lưới cơ học

Mô hình lưới (lattice model) được xem là một công cụ mạnh để mô phỏng quá trình phát triển vết nứt trong bê tông [10–12]. Trong phương pháp này vật liệu nghiên cứu được rời rạc hóa thành mạng lưới các phần tử lattice. Hệ thống lưới này được hình thành bằng cách nối các điểm định vị lưới theo một nguyên tắc xác định (sẽ giới thiệu trong phần tiếp theo). Các điểm định vị lưới được sinh ra một cách ngẫu nhiên bằng thuật toán phân bố với 2 thông số đầu vào chính là mật độ phân bố điểm ρ_p (mật độ càng nhỏ, thì phân bố các điểm càng rộng do số lượng điểm ít, và ngược lại) và khoảng cách tối thiểu giữa các điểm d_{min} [13].

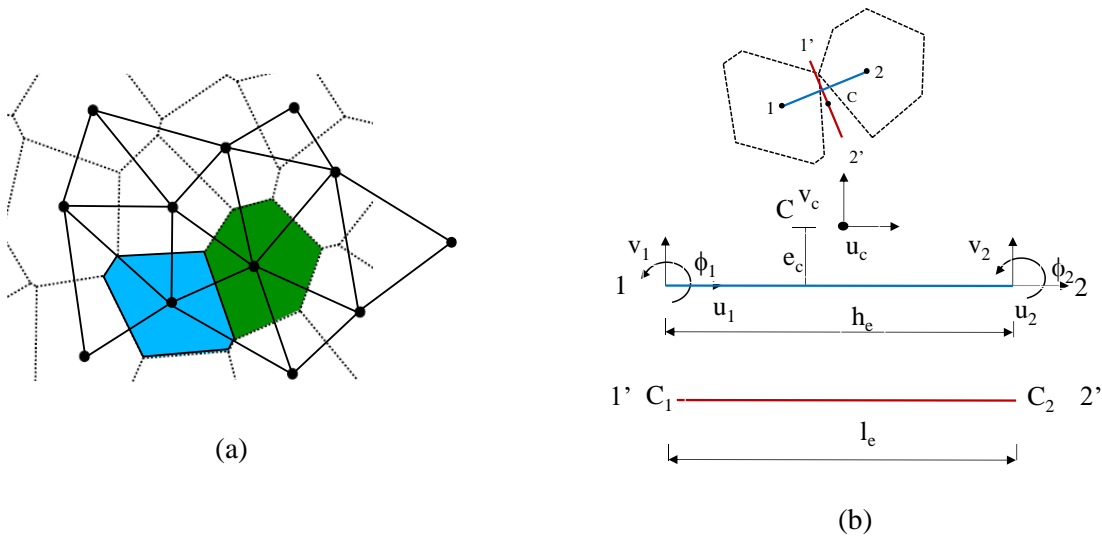
Hai hệ thống lưới riêng biệt: các cạnh của đa giác Voronoi và các cạnh của tam giác Delaunay. Các phần tử lattice mô tả ứng xử cơ học sẽ được đặt dọc theo các cạnh của tam giác Delaunay (đoạn thẳng 1-2) trong khi các phần tử dùng để mô tả quá trình truyền chất (chất lỏng) hoặc truyền nhiệt được đặt dọc theo cạnh của các đa giác Voronoi (đoạn thẳng 1'-2') được lý tưởng hóa như những ống dẫn 1 chiều cho phép vận chuyển ion clorua (Hình 1) [14–17]. Đối với các phần tử lưới cơ học, các phần tử này được đặt trên các cạnh của tam giác Delaunay, tại hai đầu mút của phần tử này (tương ứng với cạnh của tam giác Delaunay) sẽ có 3 bậc tự do bao gồm 2 chuyển vị tịnh tiến u và v cùng với 1 chuyển vị xoay ϕ . Với các phần tử truyền nhiệt hoặc truyền chất (tương ứng với các cạnh của đa giác Voronoi), tại hai đầu mút sẽ có 2 tham số chưa biết là nhiệt độ (bài toán truyền nhiệt), nồng độ (bài toán truyền chất lỏng), áp suất (bài toán về chênh áp trong môi trường không bão hòa). Với các bài toán về ứng xử tổ hợp, việc mô tả sự tổ hợp sẽ được thực hiện tại trung điểm C trên cạnh của đa giác Voronoi (xem hình 1) trong đó e_c là độ lệch tâm so với trục của phần tử cơ học. Tại điểm C,

mối quan hệ giữa vector biến dạng $\varepsilon_c = \{\varepsilon_{nc}, \varepsilon_{sc}\}^T$ (ε_{nc} và ε_{sc} lần lượt là biến dạng pháp tuyến và cắt) và bước nhảy chuyển vị $\bar{u}_c = \{u_c, v_c\}^T$ như sau:

$$\varepsilon_c = \frac{\bar{u}_c}{h_e} = \frac{B\bar{u}_e}{h_e} \quad (1)$$

Trong đó: \bar{u}_c và h_e lần lượt là độ lệch tâm của điểm C và chiều dài của phần tử cơ học
 $\bar{u}_e = \{u_1, v_1, \varphi_1, u_2, v_2, \varphi_2\}^T$; $\bar{u}_c = \{u_c, v_c, \varphi_c\}^T$ (2)

$$B = \begin{bmatrix} -1 & 0 & e_c & 1 & 0 & -e_c \\ 0 & -1 & -h_e/2 & 0 & 1 & -h_e/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$



Hình 1. (a) Voronoi và tam giác Delaunay; (b) Phần tử khuếch tán ion clorua và cơ học [14]–[17].

Ma trận độ cứng địa phương \bar{S} của phần tử lưới khi đó được xác định như sau:

$$\bar{S} = \frac{A}{h_e} B^T D_e B \quad (4)$$

Trong đó $A=l_e t$, l_e là chiều dài của phần tử khuếch tán ion clorua, t là chiều dày ngoài mặt phẳng, D_e là ma trận độ cứng đàn hồi, $D_e = \begin{bmatrix} E & 0 & 0 \\ 0 & \gamma E & 0 \\ 0 & 0 & E \end{bmatrix}$

Trong điều kiện bài toán ứng suất phẳng: $E = \frac{\bar{E}}{1-\nu}$, $\gamma = \frac{1-3\nu}{1+\nu}$ với \bar{E} và ν là mô đun Young's và hệ số Poisson.

Mô hình Thủy-cơ phá hủy đẳng hướng của Mazars:

$$\sigma = (1 - d_e) D_e \varepsilon = (1 - d_e) \bar{\sigma} \quad (5)$$

Biến phá hủy d_e là 1 hàm của biến lịch sử κ , được xác định bởi:

$$f(\varepsilon, \kappa) = \varepsilon_{eq} - \kappa \quad (6)$$

Biến dạng tương đương ε_{eq} được xác định như sau :

$$\varepsilon_{eq}(\varepsilon_s, \varepsilon_n) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (1 - c) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \varepsilon_0 (1 - c) + \varepsilon_n\right)^2 + \frac{c \lambda^2 \varepsilon_s^2}{q^2}} \quad (7)$$

Với trường hợp kéo hoặc nén thuần túy, $\varepsilon_s=0$ dẫn tới $\varepsilon_{eq} = \varepsilon_{cn}$ (chịu nén) hoặc $\varepsilon_{eq} = \varepsilon_m$ (chịu kéo). Biến phá hủy d_e được xác định bằng cách giải phương trình:

$$(1 - d) \kappa = q \varepsilon_0 \exp\left(-\frac{h_e d \kappa}{G_{ft} / f_t}\right) \text{ hoặc } (1 - d) \kappa = c \varepsilon_0 \exp\left(-\frac{h_e d \kappa}{G_{fc} / f_c}\right) \quad (8)$$

Trong các phương trình (7) và (8), tham số biến lịch sử κ là giá trị biến dạng tương đương lớn nhất mà phần tử có thể đạt được. Tham số phá hủy d_e là hàm của biến lịch sử κ và được xác định từ các phương trình (7) và (8) bằng phương pháp lặp Newton-Raphson. Các thông số đầu vào cần thiết của mô hình cơ học bao gồm mô đun đàn hồi E , hệ số Poisson γ , cường độ chịu kéo f_t , cường độ chịu nén f_c , cường độ chịu cắt f_s và năng lượng phá hủy G_f .

2.2 Khuếch tán ion clorua

Mô hình khuếch tán ion Clorua được dựa trên phương trình thứ 2 của Fick (phương trình 1). Trong mô hình lưới, các phần tử dùng để mô phỏng quá trình khuếch tán trong bê tông được giả định là các ống dẫn nằm dọc trên các đa giác Voronoi. Phương trình miêu tả sự khuếch tán ion Clorua trong trường hợp 1 chiều, đối với mỗi phần tử được xác định như sau:

$$D_e C + C_e \frac{\partial C}{\partial t} = f_c \quad (9)$$

Trong đó C là nồng độ ion clorua; f_c là nguồn ngoài; D_e và C_e ma trận độ dẫn và dung lượng :

$$D_e = \frac{A}{l_e} D \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} ; C_e = \frac{D l_e}{6d} \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Ở đây $d = 2$ là thông số hình học có xét đến hình dạng của Voronoi.

Lưu lượng tổng của ion clorua trong bê tông bị nứt có thể được chia thành hai phần: thông lưu trong các phần không bị nứt và lưu lượng trong các phần bị nứt. Các ion clorua khuếch tán trong vết nứt với hệ số khuếch tán D lớn hơn nhiều so với phần không bị nứt. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng, hệ số khuếch tán D thay đổi theo độ mở rộng vết nứt \bar{e} . Hệ số khuếch tán tổng được tính như sau:

$$D = D_0 + D_c \quad (11)$$

Trong đó D_0 là hệ số khuếch tán của bê tông chưa nứt và D_c hệ số khuếch tán gây ra mới uốn. Trong nghiên cứu này, D_c là công thức thực nghiệm đề xuất bởi Djerbi [3].

$$D_c = \begin{cases} 0 & \text{khi } \bar{e} < 21\mu\text{m} \\ (23,84\bar{e} + 8,37) \times 10^{-10} & \text{khi } 21\mu\text{m} \leq \bar{e} \leq 55\mu\text{m} \\ 1,4 \times 10^{-9} & \text{khi } \bar{e} > 55\mu\text{m} \end{cases} \quad (12)$$

3. THÍ NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG SỐ SỰ KHUẾCH TÁN ION CLORUA TRONG DÀM CHỊU UỐN BỐN ĐIỂM

3.1. Thí nghiệm

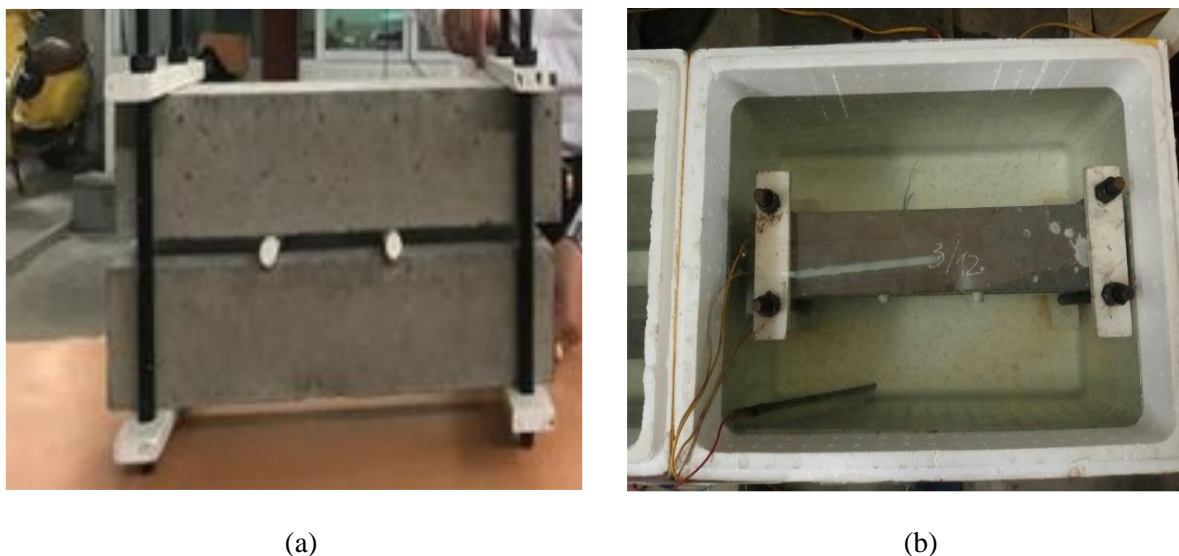
Thành phần cấp phối của loại bê tông C30 được thiết kế theo tiêu chuẩn ACI 211.1 (ACI 211.4R-08, 2020), được trình bày trong Bảng 1. Xi măng sử dụng là PC40 Bút Sơn, Cát dùng để chế tạo bê tông là cát sông Đà có cỡ hạt từ 0,14 đến 5mm - theo TCVN. Việc phân tích thành phần hạt của cốt liệu mịn được thực hiện theo ASTM C136 hoặc AASHTO T27. Hàm lượng các tạp chất có hại trong cốt liệu mịn không được vượt quá giới hạn quy định. Cốt liệu lớn thông được sử dụng là đá dăm, đây là loại đá Bazan lấy từ mỏ đá Hòa Bình có kích thước hạt lớn nhất $D_{max} = 19\text{mm}$. Chất lượng của cốt liệu lớn được đặc trưng bằng các chỉ tiêu: cường độ, thành phần hạt và độ lớn, hàm lượng tạp chất phù hợp với ASTM C33

Bảng 1: Thành phần cấp phối của bê tông cho 1 m³ bê tông C30 và cường độ chịu nén.

Loại bê tông	Xi măng (kg)	Cốt liệu nhỏ (kg)	Cốt liệu lớn (kg)	Nước (kg)	w/c	Cường độ chịu nén ở 28 ngày (MPa)
C30	395	695	1231	170	0,43	41,7

Mẫu dầm có kích thước 500x100x100 mm để xác định hệ số khuếch tán (Hình 2). Các mẫu được chế tạo và bảo dưỡng trong phòng thí nghiệm theo tiêu chuẩn ASTM C192. Các mẫu được bảo dưỡng ban đầu trong khuôn thép 24 giờ rồi bảo dưỡng tiếp cho đến tuổi thí nghiệm 28 ngày trong bể ngâm mẫu. Tiếp theo, mẫu được thực hiện thí nghiệm uốn 4 điểm theo các cấp tải trọng khác nhau 0%, 40% và 60% tải trọng phá hoại. Hai dầm được đặt tải xoay lưng vào nhau Mỗi cặp dầm được ngâm trong dung dịch NaCl 1% trong khoảng thời gian 8 tháng ở nhiệt độ phòng (Hình 2).

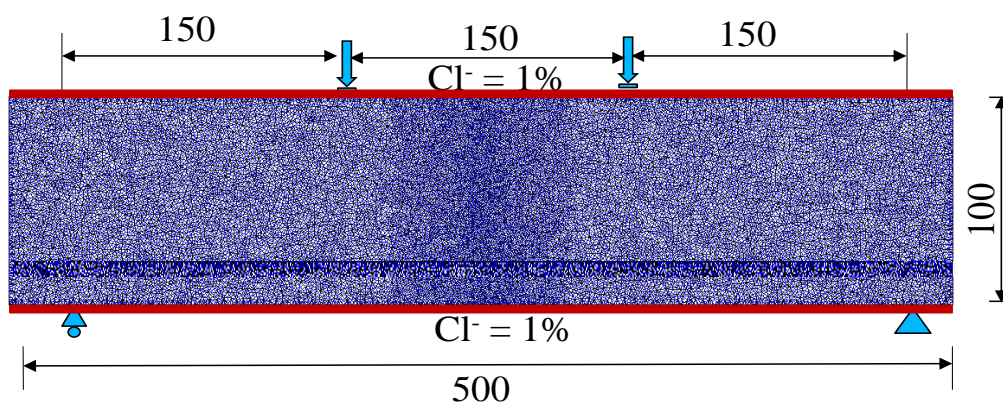
Tại thời điểm xác định, mỗi cặp dầm được vớt ra và để khô tự nhiên ở nhiệt độ phòng trong 7 ngày. Sau đó, bột bê tông được khoan tại vị trí giữa dầm. Hàm lượng clorua trong mẫu bột bê tông được xác định bởi phương pháp phân tích hóa học, theo các chiều sâu 10, 20, 30, 40, and 50 mm tại vị trí giữa dầm dựa trên tiêu chuẩn ASTM C1152, 2020. Thí nghiệm này cho kết quả hàm lượng clorua tổng trong mẫu bê tông.



Hình 2. a) Thí nghiệm dầm chịu uốn bốn điểm; b) Mẫu dầm ngâm trong môi trường muối.

3.2. Mô phỏng số

Trong mô hình 2D, mẫu bê tông có kích thước 500x100mm. Dầm được rời rạc thành các Voronoi trên đó các cạnh được xem như các ống dẫn cho phép vận chuyển ion Clorua từ môi trường bên ngoài vào trong bê tông với giả thiết ban đầu nồng độ ion Clorua bằng không. Hình học và điều kiện biên được thể hiện trong Hình 3.



Hình 3. Hình học, chia lưới và điều kiện biên.

- Đối với bài toán khuếch tán ion clorua: Nồng độ ion clorua trên bề mặt bê tông Cl^- không đổi, lưu lượng trên các mặt còn lại bằng 0, được xem như không có sự trao đổi ion clo với môi trường, ion Clorua sẽ khuếch tán từ mặt dưới vào trong bê tông do chênh lệch nồng độ;

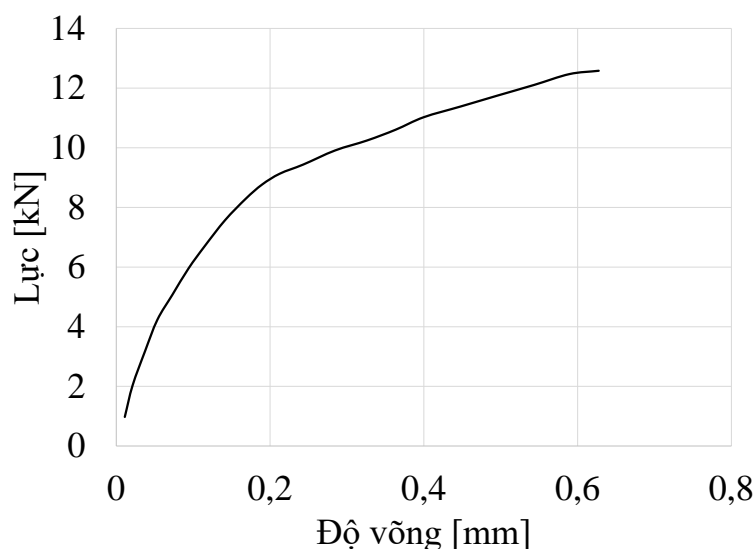
Đối với bài toán cơ học: hai gối được giữ cố định ($D_y = 0$) tại tất cả các điểm và riêng tại điểm đầu tiên, bên trái của gối dưới được giữ $D_x = 0$. Các thông số của mô hình được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Các thông số của mô hình.

Loại bê tông	Mô đun Young's E (GPa)	Cường độ chịu kéo f_t [MPa]	Cường độ chịu nén f_c [MPa]	$c = f_c/f_t$ [-]	$q = f_s/f_t$ [-]	Năng lượng phá hủy G_f [N/m]	Hệ số khuếch tán D_{und} [mm ² /s]
C30	32	4	40	13	2	500	$6,7 \times 10^{-6}$

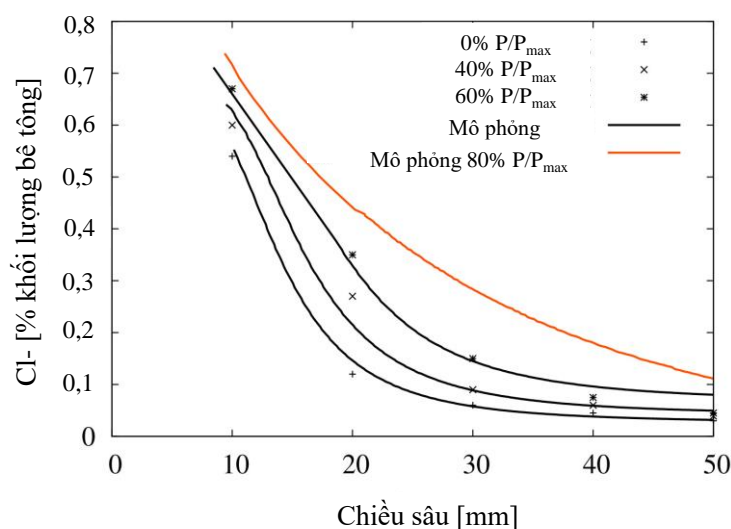
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình 4 thể hiện mối quan hệ lực – độ võng của dầm đến khi phá hoại. Kết quả thực nghiệm cũng cho thấy vết nứt đầu tiên xuất hiện và phát triển tương ứng với giá trị lực tác dụng 4 kN lực tới hạn khi phá hoại là 12,5 kN.



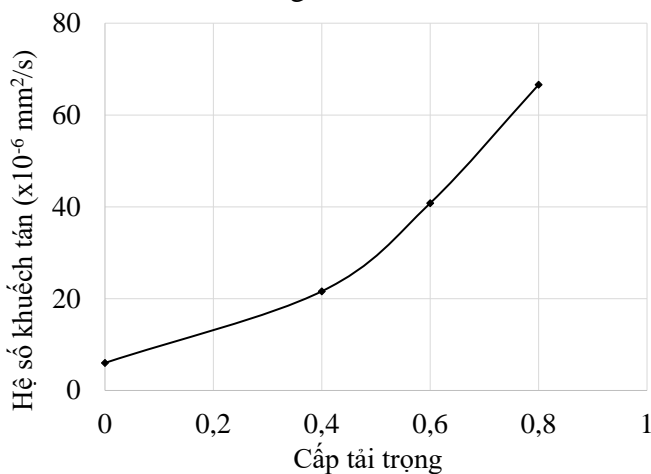
Hình 4. Lực – độ võng.

Hình 5 trình bày kết quả thực nghiệm và mô phỏng số sự thay đổi ion clorua theo chiều sâu tính từ mặt tiếp xúc với dung dịch muối. Có thể lưu ý rằng với sự gia tăng tải, lượng clorua tăng đáng kể, tương ứng với số lượng và độ mở rộng vết nứt tăng. Kết quả cũng cho thấy rằng, ở độ sâu khoảng 20 mm, hàm lượng clorua là khoảng 0,36% ở cấp tải trọng 60% so với tải trọng phá hoại và giảm xuống còn 0,28% cho cấp tải trọng 40% đối với các mẫu vật không bị hư hại, nồng độ clorua là 0,1% khi không tải sau 8 tháng ngâm trong nước muối. Chiều sâu ảnh hưởng của cấp tải trọng khoảng 30 mm, từ 30 mm trở đi sự ảnh hưởng không đáng kể. Ngoài ra kết quả mô phỏng cho kết quả khá trùng khớp với kết quả thực nghiệm khi dự báo nồng độ ion Clorua ở các độ sâu khác nhau và cấp tải trọng khác nhau. Kết quả mô phỏng số cũng cho sự thay đổi nồng độ ion Clorua theo chiều sâu khác nhau ở cấp tải 80%.



Hình 5. So sánh thực nghiệm và mô phỏng số nồng độ ion Clorua theo chiều sâu.

Cuối cùng, mô hình được đề xuất dự báo hệ số khuếch tán theo cấp tải trọng phá hoại lên đến 80%, được hiển thị trong Hình 6. Có thể thấy rằng, hệ số khuếch tán tăng ở cấp tải trọng được dự báo tăng khoảng mười lần mẫu kết cấu khi không chịu tải.



Hình 6. Cấp tải trọng - Hệ số khuếch tán.

5. KẾT LUẬN

Từ kết quả của nghiên cứu, có thể rút ra một số kết luận sau đây:

- Kết quả thí nghiệm cho thấy, vết nứt đầu tiên xuất hiện trên dầm tương ứng với tải trọng tác dụng là 4 kN và tải trọng giới hạn khi dầm bị phá hủy là 12,5 kN;

- Tải trọng tác dụng có ảnh hưởng rõ rệt đến nồng độ ion clorua trong khoảng chiều dày 30 mm;

- Mô hình lưới có xét đến ảnh hưởng của độ mở rộng vết nứt đến hệ số khuếch tán có thể dự báo khá tốt sự thay đổi hệ số khuếch tán theo cấp tải trọng. Cụ thể ở cấp tải trọng 80%, mô hình dự báo cho thấy hệ số khuếch tán tăng khoảng 8 lần so với kết cấu khi chưa chịu tải trọng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. C.-M. Aldea, S. P. Shah, A. Karr, Effect of Cracking on Water and Chloride Permeability of Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11 (1999) 181-187. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:3\(181\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:3(181))
- [2]. M. Ismail, A. Toumi, R. François, R. Gagné, Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in cracked mortar samples, *Cem. Concr. Res.*, 38 (2008) 1106–1111. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.009>.
- [3]. A. Djerbi, S. Bonnet, A. Khelidj, V. Baroghel-bouny, Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete, *Cem. Concr. Res.*, 38 (2008) 877-883. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.10.007>
- [4]. J. Wang, P. A. M. Basheer, S. V. Nanukuttan, A. E. Long, Y. Bai, Influence of service loading and the resulting micro-cracks on chloride resistance of concrete, *Constr. Build. Mater.*, 108 (2016) 56–66. <https://doi.org/doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.01.005>
- [5]. Chun-ping Gu, Guang Ye, Wei Sun, A review of the chloride transport properties of cracked concrete: experiments and simulations SpringerLink, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 16 (2015) 81–92.
- [6]. T. T. Tran, D.T Phạm, M.N Vu, V.Q Truong, X.B Ho, N.L Tran, T.Nguyen - Sy, Q.D To, Relation between water permeability and chloride diffusivity of concrete under compressive stress: Experimental investigation and mesoscale lattice modelling, *Constr. Build. Mater.*, 267 (2021) 121164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121164>
- [7]. E. Kato, Y. Kato, T. Uomoto, Development of Simulation Model of Chloride Ion Transportation in Cracked Concrete, *J. Adv. Concr. Technol.*, 3 (2005) 85-94.
- [8]. C.-M. Aldea, S. P. Shah, A. Karr, Effect of Cracking on Water and Chloride Permeability of Concrete, *J. Mater. Civ. Eng.*, 11 (1999) 181–187.
- [9]. N. Gowripalan, V. Sirivivatnanon, C. C. Lim, Chloride diffusivity of concrete cracked in flexure, *Cem. Concr. Res.*, 30 (2000) 725–730. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00216-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00216-7)
- [10]. E. Schlangen, J. G. M. van Mier, Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structures, *Mater. Struct.*, 25 (1992) 534–542.
- [11]. R. Ince, A. Arslan, B. L. Karihaloo, Lattice modelling of size effect in concrete strength, *Eng. Fract. Mech.*, 70 (2003) 2307–2320. [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(02\)00219-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(02)00219-9)
- [12]. H. Sadouki, J. G. M. van Mier, Meso-level analysis of moisture flow in cement composites using a lattice-type approach, *Mater. Struct.*, 30 (1997) 579–587. <https://doi.org/10.1007/bf02486899>
- [13]. A. Okabe, B. Boots, K. Sugihara, *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [14]. G. Voronoi, Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Deuxième mémoire. Recherches sur les paralléloèdres primitifs, *J. Für Reine Angew. Math.*, 134 (1908) 198–287.
- [15]. P. Grassl, A lattice approach to model flow in cracked concrete, *Cem. Concr. Compos.*, 31 (2009) 454–460.
- [16]. D. T. Pham, T. D. Nguyen, M. N. Vu, A. Chinkulkijniwat, Mesoscale approach to numerical modelling of thermo-mechanical behaviour of concrete at high temperature, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, 25 (2019) 1392-1348. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19648189.2019.1577762>
- [17]. D. T. Pham, L. Sorelli, M. Fafard, M.-N. Vu, Hydromechanical couplings of reinforced tensioned members of steel fiber reinforced concrete by dual lattice model, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech*, 45 (2020) 191-207. <https://doi.org/10.1002/nag.3148>