

Mô hình lưới dự báo thời gian bắt đầu ăn mòn cốt thép của bê tông trong môi trường biển

■ TS. PHẠM ĐỨC THỌ; NGUYỄN THỊ NGOAN - Trường Đại học Mở - Địa chất

■ TS. ĐÀO PHÚC LÂM; TS. NGUYỄN THỊ HẰNG - Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

TÓM TẮT: Bài báo giới thiệu kết quả mô phỏng quá trình khuếch tán ion clo trong bê tông, qua đó dự báo thời gian ăn mòn cốt thép và ảnh hưởng của chiều dày lớp bê tông bảo vệ đến thời gian ăn mòn cốt thép trong kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) trong môi trường biển. Mô hình lưới (lattice model) dựa trên đa giác Voronoi và tam giác Delaunay được sử dụng để mô phỏng quá trình khuếch tán của ion clo trong bê tông. Định luật Fick 2 dùng để mô tả quá trình khuếch tán ion clo được số hóa trong mã nguồn mở (open source) OOFEM và việc so sánh kết quả mô phỏng với kết quả giải tích cho thấy tính đúng đắn của mô hình số.

TỪ KHÓA: Mô hình lưới, bê tông môi trường biển, khuếch tán ion clo

ABSTRACT: This paper presents the simulation results of ion chloride diffusion in concrete then estimate the service life (initiation period) due to chloride ingress and effect of the thickness of reinforced concrete cover on the the service life of the concrete structures located in coastal regions. Lattice model is based on a hypothesis that the domain of material is discretized randomly by using Voronoi tessellation and Delaunay triangulation which allows to simulate the chloride diffusion. In this paper, the authors have used this lattice method to develop and implement the Fick's second law for chloride diffusion of concrete in the open source OOFEM in order to validate the model, the numerical simulation results have been compared with the analytical and shown the powerful of the model.

KEYWORDS: Lattice model, concrete in coastal regions, chloride diffusion

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dự báo tuổi thọ của cấu kiện BTCT trong công trình biển đảo là vấn đề rất được quan tâm tại Việt Nam trong thời gian gần đây. Trên thực tế, cấu kiện BTCT làm việc trong hoặc tiếp xúc trực tiếp với môi trường nước nói chung và nước biển nói riêng thường kém bền hơn rất nhiều so với cấu kiện BTCT thông thường do sự xâm nhập của nước (kèm khí CO₂) cũng như các tác nhân xâm

thực khác (ion Cl⁻, ion SO₄²⁻) vào trong bê tông gây ăn mòn cốt thép và suy giảm cường độ nhanh chóng. Trong đó, ăn mòn cốt thép do ion Cl⁻ được xem là nguyên nhân chính dẫn đến suy giảm độ bền và tuổi thọ của bê tông trong môi trường biển. Theo Tuutti [1], ăn mòn cốt thép trải qua theo hai giai đoạn riêng biệt, giai đoạn mới (khởi mào) và giai đoạn phát tán. Giai đoạn đầu là thời gian các ion clo khuếch tán vào trong bê tông, cuối giai đoạn này tương ứng nồng độ ion clo trên bề mặt cốt thép đã đạt tới ngưỡng gây ăn mòn và cốt thép bị mất tính thụ động hóa chống gỉ (depassivation) và bắt đầu quá trình ăn mòn cốt thép. Sau giai đoạn mới là giai đoạn phát tán, sản phẩm ăn mòn sinh ra có tính chất trương nở gây ứng suất kéo trong bê tông, khi ứng suất này vượt qua giới hạn cho phép dẫn đến sự hình thành các vết nứt, sau đó bắt đầu phá hủy lớp bê tông bảo vệ. Nếu ăn mòn không được phát hiện và có các biện pháp khắc phục có thể gây mất khả năng làm việc của kết cấu.

Việc xác định sự thay đổi nồng độ ion clo theo thời gian cho phép xác định thời gian bắt đầu ăn mòn, tương ứng với thời điểm nồng độ ion clo vượt qua hàm lượng clo tới hạn. Sự thay đổi nồng độ ion clorua trong bê tông được thực hiện bởi cơ chế khuếch tán và được miêu tả thông qua định luật thứ hai Fick, 1855 [2]:

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

Lời giải cho bài toán khuếch tán được các tác giả đề xuất bằng phương pháp gần đúng, trong đó có sử dụng hàm sai số (erf) [3-5], có dạng:

$$C_c(x,t) = C_{c0} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (2)$$

Trong đó: C_c(x,t) - Nồng độ ion clo theo chiều sâu và tại thời điểm t; D_c - Hệ số khuếch tán; C_{c0} - Nồng độ ion clorua trên bề mặt. Hàm sai số erf được xác định như sau:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-u^2) du \quad (3)$$

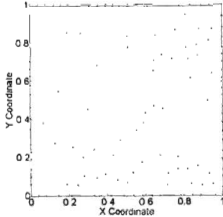
Phương pháp tiếp cận này áp dụng cho bài toán đơn giản, một chiều, do đó kết quả thiếu chính xác không phản ánh được đúng thực tế của kết cấu. Trong bài báo, tác giả giới thiệu mô phỏng số, dựa trên mô hình lưới để mô phỏng quá trình khuếch tán ion clorua trong bê tông, từ đó xác định chính xác được thời gian bắt đầu ăn mòn.

2. MÔ HÌNH LƯỚI

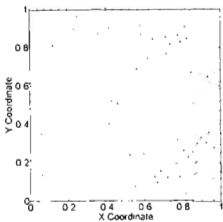
2.1. Khái niệm mô hình lưới

Mô hình lưới được xây dựng dựa trên sơ đồ Voronoi

[6]. Để có thể xây dựng mô hình lưới, trước hết phải xây dựng hệ thống định vị lưới dựa trên phân bố một cách ngẫu nhiên các điểm trong miền nghiên cứu. Có hai thông số để xác định số lượng các điểm này, đó là: Mật độ các điểm $0 < p_g < 1$ (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} . Hai thông số này được sử dụng để kiểm soát số lượng điểm cũng như tính đồng nhất của miền nghiên cứu. Có hai phân bố thường được xem xét để nghiên cứu ảnh hưởng sắp xếp ngẫu nhiên các điểm: Phân bố gần như đều và phân bố không đều (Hình 2.1).



a) - Phân bố gần như đều $d_{min} = 0.05$ và $p_g = 0.5$

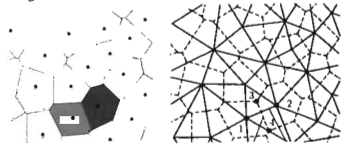


b) - Phân bố không đều $d_{min} = 0.0316$ và $p_g = 0.2$

Hình 2.1: Phân bố điểm ngẫu nhiên trong miền nghiên cứu

Để đảm bảo tốt điều kiện biên, các điểm sẽ được phân bố trên các góc và các cạnh biên trước. Khoảng cách giữa các điểm nằm trên cạnh biên sẽ nhỏ hơn khoảng cách các điểm nằm trong để đảm bảo tốt cấu trúc Voronoi (sẽ trình bày ở phần sau). Mỗi điểm phân bố trong miền nghiên cứu sẽ được kiểm tra để thỏa mãn khoảng cách từ điểm đó đến các điểm xung quanh lớn hơn khoảng cách tối thiểu d_{min} . Sau khi xây dựng xong hệ thống điểm định vị, lưới sẽ được xây dựng dựa trên thuật toán đa giác Voronoi và tam giác Delaunay (Hình 2.2). Các cạnh của tam giác Delaunay là nơi đặt các phần tử dùng cho mô hình ứng xử cơ học và sự hình thành các phần tử theo phương pháp này được gọi chung là rời rạc Delaunay. Cấu trúc Voronoi có thể coi là đối ngẫu hình học của hệ tam giác Delaunay khi mỗi cạnh của mạng lưới này đều nằm trên đường trung trực của một cạnh nào đó thuộc hệ tam giác Delaunay (hay nói cách khác các đỉnh của các đa giác Voronoi chính là tâm đường

tròn ngoại tiếp của các tam giác Delaunay). Các phần tử dùng để mô hình truyền chất (chất lỏng) được đặt dọc theo cạnh của các đa giác Voronoi và được lý tưởng hóa như những ống dẫn 1 chiều để áp dụng trong các mô hình ứng xử thủy học. Sự hình thành của cấu trúc Voronoi theo phương pháp này được gọi chung là rời rạc Voronoi. Sau khi hình thành lưới, tùy thuộc tính chất bài toán (mô hình ứng xử) mà các phần tử lưới được xây dựng theo các quy tắc khác nhau.



a) - Đa giác Voronoi; (b) - Tam giác Delaunay
Hình 2.2

2.2. Mô hình khuếch tán ion clorua trong bê tông

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 chảy của chất lỏng, trong trường hợp 1 chiều, đối với mỗi phần tử được xác định phương trình sai phân từng phần đơn hướng của quá trình truyền chất ở trạng thái không ổn định. Trong trường hợp các phần tử được giả thiết là các ống dẫn 1 chiều, phương trình này được xác định như sau:

$$D_c C + C_c \frac{\partial C}{\partial t} = f \quad (4)$$

Trong đó: D_c - Ma trận khuếch tán của phần tử; C_c - Ma trận dung lượng của phần tử; t - Thời gian; f - Nguồn bên ngoài.

$$D_c = \frac{h}{l} D_l \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}; C_c = \frac{h^2}{12} \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Với: h - Chiều dài phần tử cơ học; l - Chiều dài của phần tử dạng ống; D_l - Hệ số khuếch tán của phần tử.

3. KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH KHUẾCH TÁN ION CLORUA TRONG BÊ TÔNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP MÔ HÌNH LƯỚI TRONG MÃ NGUỒN MỞ OOFEM [7]

Mã nguồn mở OOFEM [7] được viết bằng ngôn ngữ C++ và được phát triển cho hệ điều hành Linux. OOFEM cho phép người sử dụng có thể phát triển các mô hình ứng xử của loại vật liệu mong muốn. Cấu trúc chương trình được thiết kế dạng mô-đun giúp các nhóm nghiên cứu dễ dàng tích hợp các mô-đun độc lập để xây dựng các ứng xử tổ hợp. Với các ưu điểm này, OOFEM có thể được sử dụng để phát triển và mô phỏng các bài toán cơ học, truyền chất và truyền nhiệt. Cấu trúc của phần mềm OOFEM gồm 3 mô-đun chính: Mô-đun dùng để phân tích kết cấu (Structural Module, SM); mô-đun phân tích truyền chất (Transport Module) và mô-đun cơ học chất lỏng (Fluid mechanics Module, FM).

Khi giải quyết các bài toán về ứng xử của vật liệu bê tông bằng phương pháp mô hình lưới trong OOFEM, người sử dụng cần thực hiện 3 công việc chính:

- Thiết lập hình học và chia lưới miền nghiên cứu dựa trên các quy tắc về xây dựng mô hình lưới đã được giới thiệu ở trên. Thuật toán chia lưới được người sử dụng tự lập trình bằng ngôn ngữ C++;

- Thiết lập các điều kiện biên và điều kiện ban đầu bằng lập trình C++;

- Xây dựng các mô-đun về ứng xử của vật liệu và gán ứng xử cho các phần tử lưới đã thiết lập. Để thực hiện nghiên cứu về quá trình khuếch tán ion clorua trong bê tông, nhóm nghiên cứu đã phát triển một mô-đun về khuếch tán ion clorua trong OOFEM dựa trên các phương trình thứ hai của Fick.

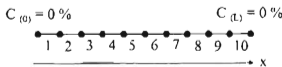
Trong phần này, nhóm nghiên cứu sẽ thực hiện so sánh kết quả bài toán khuếch tán được nhóm phát triển trong OOFEM với kết quả giải tích tương ứng được đề xuất trong nghiên cứu của Bolander [8] cho bài toán khuếch tán. Yêu cầu của bài toán này là tìm hàm $C=C(x,t)$ thỏa mãn phương trình khếch tán (1). Theo bài toán giải tích trong nghiên cứu [8], hàm khuếch tán tại thời điểm ban đầu được lựa chọn có dạng:

$$C(x,t) = \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (6)$$

Với điều kiện ban đầu như trên, điều kiện biên $C(x=0, t) = 0$ và $q = 0$, nghiệm giải tích của bài toán khuếch tán đơn hướng có dạng:

$$C(x,t) = \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) e^{-\frac{\pi^2 D t}{L^2}} \quad (7)$$

Phương trình khếch tán (1) được nhóm nghiên cứu số hóa trong mô-đun khuếch tán 2D phát triển trong OOFEM. Mô hình bài toán khếch tán mà nhóm nghiên cứu sử dụng để so sánh với kết quả giải tích là mô hình 1D được thực hiện với số nút là 11, số phần tử là 10 (Hình 3.1). Các thông số vật lý đầu vào của mô hình được lựa chọn với hệ số khếch tán $D = 1$.

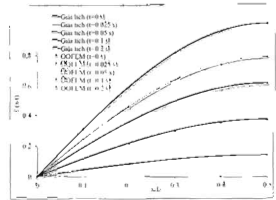


Hình 3.1: Chia lưới và điều kiện biên của bài toán truyền nhiệt tuyến tính

Điều kiện biên: $C(x=0,t) = C(x=L,t) = 0$

Điều kiện ban đầu: $C(x=0.1, t=0) = \sin(0.1\pi)$; $C(x=0.2, t=0) = \sin(0.2\pi)$; $C(x=0.3, t=0) = \sin(0.3\pi)$; $C(x=0.4, t=0) = \sin(0.4\pi)$; $C(x=0.5, t=0) = \sin(0.5\pi)$; $C(x=0.6, t=0) = \sin(0.6\pi)$; $C(x=0.7, t=0) = \sin(0.7\pi)$; $C(x=0.8, t=0) = \sin(0.8\pi)$; $C(x=0.9, t=0) = \sin(0.9\pi)$;

Trong Hình 3.2 biểu diễn giá trị của nhiệt độ phân phối theo hướng x lựa chọn. Có thể dễ dàng nhận thấy sự trùng khớp rõ rệt giữa kết quả chạy trên OOFEM và kết quả giải tích trong nghiên cứu [8], chứng tỏ mô hình lưới có khả năng mô phỏng quá trình khuếch tán ion clorua, phục vụ cho công tác đánh giá tuổi thọ cấu kiện bê tông ven biển.



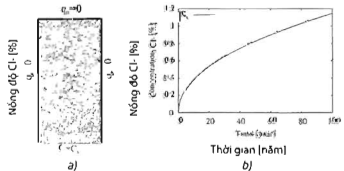
Hình 3.2: So sánh kết quả giải tích và kết quả chạy mô hình trong OOFEM

4. MÔ PHỎNG DỰ BÁO TUỔI THỌ CỦA KẾT CẤU BTCT TRONG MÔI TRƯỜNG VEN BIỂN

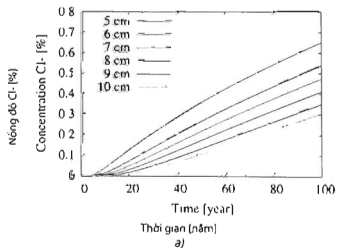
4.1. Xác định thời gian bắt đầu ăn mòn

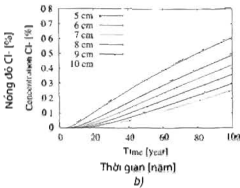
Hình học và điều kiện ban đầu: Kết cấu bê tông được nghiên cứu trong bài báo này có kích thước 100x200mm². Miền nghiên cứu được rời rạc thành các Voronoi trên đó các cạnh được xem như các ống dẫn cho phép vận chuyển ion clorua từ môi trường bên ngoài vào trong bê tông với giả thiết ban đầu nồng độ ion clorua bằng không, $C(x,t=0) = 0$ (Hình 4.1a).

Điều kiện biên: Nồng độ ion clorua trên bề mặt bê tông C thay đổi theo thời gian (Hình 4.1b). Đối với vùng khí quyển khu vực Đà Nẵng, bê tông có cường độ 25-30MPa: $c_s = 0,128 \cdot 0,476$ và hệ số khuếch tán ion clorua được lấy như trong (9). Lưu lượng trên các mặt còn lại bằng 0, được xem như không có sự trao đổi ion clorua với môi trường, ion clorua sẽ khuếch tán từ mặt dưới vào trong bê tông do chênh lệch nồng độ.



a) - Hình học và điều kiện biên; b) - Nồng độ ion clorua trên bề mặt Hình 4.1

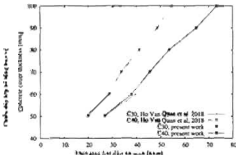




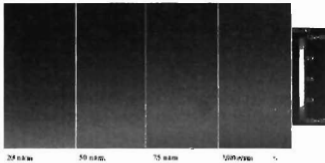
Hình 4.2: Sự thay đổi nồng độ tại các vị trí theo thời gian: a) C30; b) C40

Sự thay đổi nồng độ clo tại mỗi chiều sâu của bê tông theo thời gian đối với bê tông cấp 30MPa (C30) và cấp 40 MPa (C40) được thể hiện trong Hình 4.2. Từ đây cho phép xác định thời gian bắt đầu ăn mòn bằng cách so sánh nồng độ ion clorua tại thời điểm vượt qua nồng độ tới hạn gây ăn mòn cốt thép C_{cl} . Nồng độ này phụ thuộc vào nhiều yếu tố như thành phần bê tông, loại xi măng, điều kiện tiếp xúc... Theo [9], với bê tông cấp C30, $C_{cl} = 0.124\%$ bê tông và với cấp C40, $C_{cl} = 0.157\%$ bê tông.

Kết quả so sánh giữa mô phỏng và giải tích thu được trong nghiên cứu của Hồ Văn Quân và nnk [9] được thể hiện trong Hình 4.3. Với chiều dày bê tông bảo vệ 50mm và 60mm của hai cấp bê tông C30 và C40 mô hình lưới cho kết quả sát với giải tích. Ngoài ra, trong trường hợp chiều dày thay đổi từ 60mm đến 100mm mô hình lưới để dàng xác định được thời gian bắt đầu ăn mòn và sự phân bố ion clorua theo chiều sâu của bê tông tại các thời điểm khác nhau có thể quan sát được trong Hình 4.4.



Hình 4.3: Chiều dày lớp bê tông bảo vệ - thời gian bắt đầu ăn mòn



Hình 4.4: Nồng độ ion clo trong bê tông tại các thời điểm khác nhau của C30

tổng làm việc trong môi trường biển. Kết quả mô phỏng thu được trong bài toán về xác định thời gian bắt đầu ăn mòn của vật liệu bê tông đã được so sánh với kết quả giải tích trong [9] của các nhóm nghiên cứu khác cho thấy sự trùng khớp và bước đầu chứng minh phương pháp mô hình lưới có những ưu điểm vượt trội trong việc mô phỏng phù hợp nhất với ứng xử thực tế của vật liệu bê tông. Ngoài ra, mô hình lưới được hợp thành bởi các phần tử rời rạc để đảm bảo tính không đồng nhất của vật liệu bê tông cũng như cho phép tích hợp các yếu tố hình học và sự phân bố ngẫu nhiên của cốt liệu dựa trên việc xây dựng hệ lưới điểm phân bố ngẫu nhiên cũng như các quy tắc phân bố rời rạc Voronoi và Delaunay.

Kết quả của bài báo có thể làm tài liệu tham khảo cho cán bộ kỹ thuật trong việc kiểm tra, thẩm định cũng như dự báo tuổi thọ của các công trình trong môi trường biển.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Tuutti K. (1982), *Corrosion of steel in concrete*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Ed., Stockholm.
- [2]. Fick, A. E. (1855), *Poggendorff's Annalen der Physik*.
- [3]. Nilsson, L.-O., E. Poulsen, P. Sandberg, H. E. Sorensen, and O. Klinghoffer (1996), *HETEK, Chloride penetration into concrete*, State-of-the-Art, Transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models, Tech., Rep, Report No. 53, The Danish Road Directorate.
- [4]. Neithalath, N., B. J. Pease, J.-H. Moon, F. Rajabipour, and W. J. Weiss (2005), *Considering moisture gradients and time-dependent crack growth in restrained concrete elements subjected to drying*, in International Conference on Advances in Concrete Composites and Structures (ICACS), Chennai, India.
- [5]. Poulsen, E., and L. Mejlbro (2006), *Diffusion of Chloride in Concrete Theory and Application*, Taylor & Francis.
- [6]. Voronoi G. (1908), *Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques, Deuxième mémoire, Recherches sur les parallélogèdes primitifs*, J. Für Reine Angew. Math, 134:198-287.
- [7]. Patzák, B. (2012), *OOFEM - an Object-oriented Simulation Tool for Advanced Modeling of Materials and Structures*, Acta Polytech, 52(6):59-66.
- [8]. Bolander Jr., Berton S. (2004), *Simulation of shrinkage induced cracking in cement composite overlays*, Cem. Concr, Compos, 26:861-871.
- [9]. Hồ Văn Quân, Phạm Duy Hữu, Nguyễn Thanh Sang (2016), *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.

Ngày nhận bài: 01/4/2019

Ngày chấp nhận đăng: 24/4/2019

Người phản biện: PGS. TS. Nguyễn Hoàng Long

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo, các tác giả đã phát triển phương pháp mô hình lưới để mô phỏng sự khuếch tán ion clo trong bê