

Phương pháp xác định hệ số khuếch tán ion clorua trong bê tông

A method for determining the chloride ion diffusion coefficient in concrete

> TS PHẠM HOÀNG¹, TS NGÔ VIỆT ĐỨC^{2,*}

¹Bộ môn Xây dựng Nhà & CTCTN, Học viện Kỹ thuật Quân sự

²Khoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

*Email: ducnv@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Ion clorua (Cl^-) là một trong những tác nhân có ảnh hưởng lớn đến độ bền của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT), đặc biệt đối với các công trình làm việc trong môi trường biển hoặc môi trường có chứa muối. Ion clorua xâm nhập qua hệ thống lỗ rỗng của bê tông, khi chạm đến vị trí cốt thép, quá trình ăn mòn sẽ bắt đầu. Tốc độ xâm nhập ion clorua vào bê tông phụ thuộc vào nhiều yếu tố, trong đó hệ số khuếch tán là một tham số quan trọng để mô tả khả năng vận chuyển ion trong vật liệu. Việc xác định chính xác hệ số này có ý nghĩa quan trọng trong đánh giá khả năng chống xâm nhập clorua và dự báo tuổi thọ kết cấu BTCT. Bài báo trình bày cơ sở của quá trình xâm nhập ion clorua vào bê tông, làm rõ khái niệm hệ số khuếch tán biểu kiến và hệ số khuếch tán hiệu dụng, đồng thời phân tích các phương pháp xác định hệ số khuếch tán ion clorua, đề xuất định hướng lựa chọn phương pháp xác định phù hợp.

Từ khóa: ion clorua; bê tông cốt thép; khuếch tán clorua; độ bền; tuổi thọ kết cấu.

ABSTRACT

Chloride ions (Cl^-) are among the major factors affecting the durability of reinforced concrete structures, particularly those exposed to marine environments or chloride-containing environments. Chloride ions penetrate concrete through its pore system and when they reach the reinforcing steel, the corrosion process may initiate. The rate of chloride ion ingress into concrete depends on various factors, among which the chloride ion diffusion coefficient is an important parameter for characterizing the transport of chloride ions through the material. Accurate determination of this coefficient is essential for evaluating the resistance of concrete to chloride ingress and predicting the service life of reinforced concrete structures. This paper presents the fundamental principles of chloride ion ingress into concrete, clarifies the concepts of the apparent diffusion coefficient and the effective diffusion coefficient and analyzes methods for determining the chloride ion diffusion coefficient. Based on this analysis, an appropriate approach for selecting the determination method is proposed.

Keywords: Chloride ions; reinforced concrete; chloride diffusion; durability; structural service life.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

BTCT là loại vật liệu được sử dụng phổ biến trong các công trình xây dựng và hạ tầng kỹ thuật nhờ khả năng chịu lực tốt, độ bền cao và khả năng thích ứng với nhiều điều kiện khai thác. Tuy nhiên, trong quá trình sử dụng, kết cấu BTCT có thể chịu tác động đồng thời của nhiều yếu tố môi trường, làm suy giảm dần các đặc tính ban đầu của vật liệu và kết cấu. Trong số đó, sự xâm nhập của ion clorua là một trong những nguyên nhân quan trọng gây suy giảm độ bền, đặc biệt đối với các công trình làm việc trong môi trường biển hoặc thường xuyên tiếp xúc với các nguồn chứa muối.

Ion clorua tồn tại phổ biến trong nước biển, vùng ven biển và môi trường có chứa muối. Khi bề mặt bê tông tiếp xúc với môi trường chứa clorua, các ion này có thể xâm nhập vào hệ thống lỗ rỗng và di chuyển từ bề mặt vào sâu bên trong. Quá trình vận chuyển phụ thuộc vào đặc tính của vật liệu và điều kiện môi trường. Ion clorua tự bản thân không gây phá hoại trực tiếp cho bê tông, khi ion clorua chạm đến bề mặt cốt thép và đạt đến một mức nhất định, lớp bảo vệ cốt thép bị phá vỡ và

quá trình ăn mòn bắt đầu phát triển [1, 2]. Có thể xem quá trình tác động của ion clorua lên kết cấu BTCT như sau: Môi trường chứa clorua → ion clorua xâm nhập bê tông → ion clorua lan truyền đến vị trí cốt thép → phá vỡ trạng thái thụ động → khởi đầu ăn mòn cốt thép → phát triển ăn mòn → suy giảm độ bền và tuổi thọ kết cấu.

Trong chuỗi quá trình này, tốc độ xâm nhập của ion clorua từ môi trường vào bê tông có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Nếu bê tông có khả năng làm chậm sự xâm nhập, thời gian để ion clorua đạt đến cốt thép sẽ dài hơn và nguy cơ ăn mòn cốt thép được trì hoãn. Ngược lại, nếu ion clorua có thể di chuyển nhanh qua bê tông, thời gian đến khi đạt ngưỡng gây ăn mòn có thể giảm đáng kể.

Có thể thấy rõ, tuổi thọ của kết cấu BTCT làm việc trong môi trường có ion clorua quan hệ chặt chẽ với khả năng chống lại sự xâm nhập và tốc độ khuếch tán của ion clorua trong bê tông.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ QUÁ TRÌNH KHUẾCH TÁN ION CLORUA

2.1. Cơ chế xâm nhập

Bê tông là vật liệu có cấu trúc rỗng với hệ thống lỗ rỗng có kích thước và mức độ liên thông khác nhau. Khi bê tông tiếp xúc với môi trường chứa ion clorua, các ion này có thể xâm nhập thông qua hệ thống lỗ rỗng và các vùng liên thông trong vật liệu.

Trong điều kiện đơn giản, khi có sự chênh lệch nồng độ giữa bề mặt và bên trong bê tông, ion clorua có xu hướng chuyển động từ nơi có nồng độ cao đến nơi có nồng độ thấp. Đối với quá trình khuếch tán một chiều, tuân theo định luật Fick thứ nhất:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

Trong đó: J - Dòng khuếch tán ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$); D - Hệ số khuếch tán (m^2/s); C - Nồng độ (mol/m^3); x - Chiều sâu tính từ bề mặt bê tông (m). Dấu âm trong phương trình thể hiện hướng chuyển động của ion từ nơi có nồng độ cao đến nơi có nồng độ thấp.

2.2. Phương trình khuếch tán

Khi xét sự thay đổi nồng độ ion clorua theo cả chiều sâu và thời gian, quá trình vận chuyển có thể được mô tả bằng định luật Fick thứ hai:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Nếu giả thiết hệ số khuếch tán là không đổi và quá trình xâm nhập xảy ra theo một chiều, nghiệm của phương trình có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$C(x, t) = C_i + (C_s - C_i) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

Trong đó: $C(x, t)$ - Nồng độ ion clorua tại chiều sâu x và thời gian t ; C_i - Nồng độ ion clorua ban đầu trong bê tông; C_s - Nồng độ ion clorua tại bề mặt bê tông; D - Hệ số khuếch tán ion clorua; x - Chiều sâu tính từ bề mặt; t - Thời gian tiếp xúc với môi trường; erfc - Hàm sai số bổ sung.

2.3. Hệ số khuếch tán biểu kiến và hệ số khuếch tán hiệu dụng

Có hai khái niệm cần phân biệt là hệ số khuếch tán biểu kiến và hệ số khuếch tán hiệu dụng.

Hệ số khuếch tán biểu kiến D_a thường được xác định từ sự thay đổi của nồng độ clorua trong bê tông theo thời gian, giá trị D_a phản ánh đặc tính vận chuyển tổng hợp trong điều kiện thí nghiệm. Do có xét đến hiện tượng cố định clorua trong vật liệu nên có thể làm giảm lượng ion tự do tham gia vận chuyển.

Hệ số khuếch tán hiệu dụng D_e được sử dụng để mô tả khả năng vận chuyển của ion trong hệ thống lỗ rỗng của bê tông dưới những điều kiện và giả thiết nhất định.

Vì vậy, khi sử dụng kết quả thí nghiệm để đánh giá độ bền, cần xác định rõ loại hệ số khuếch tán, phương pháp xác định và điều kiện thí nghiệm. Đây cũng là cơ sở để lựa chọn phương pháp xác định hệ số khuếch tán phù hợp với từng mục đích cụ thể.

2.4. Các yếu tố ảnh hưởng đến hệ số khuếch tán

Hệ số khuếch tán ion clorua phụ thuộc vào đặc tính của bê tông và điều kiện môi trường. Trong đó, hệ thống lỗ rỗng của bê tông có vai trò đặc biệt quan trọng. Các yếu tố như tỷ lệ nước/xi măng, loại và thành phần xi măng, mức độ thủy hóa, độ rỗng, độ bão hòa và khả năng cố định ion clorua đều có thể làm thay đổi khả năng vận chuyển ion trong bê tông [4, 5]. Do vậy, hệ số khuếch tán không nên xem là một hằng số cố định mà phải gắn với điều kiện vật liệu, môi trường và phương pháp xác định.

3. CÁC PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH HỆ SỐ KHUẾCH TÁN ION CLORUA

Hệ số khuếch tán ion clorua trong bê tông có thể được xác định bằng nhiều phương pháp khác nhau. Về nguyên tắc, các phương pháp này dựa trên hai cơ chế vận chuyển chính: Khuếch tán tự nhiên do chênh lệch nồng độ và sự di chuyển ion dưới tác dụng của điện trường. Có thể phân loại các phương pháp xác định hệ số khuếch tán ion clorua thành bốn nhóm:

1. Khuếch tán tự nhiên đạt trạng thái ổn định.
2. Khuếch tán tự nhiên chưa đạt trạng thái ổn định.
3. Tác dụng điện trường đến trạng thái khuếch tán ổn định.
4. Tác dụng điện trường đến trạng thái khuếch tán chưa ổn định.

Sự khác nhau cơ bản giữa các phương pháp nằm ở động lực gây ra sự chuyển động của ion clorua, trạng thái vận chuyển tại thời điểm đo, thời gian thí nghiệm và cách xác định hệ số khuếch tán. Các phương pháp khuếch tán tự nhiên có điều kiện vận chuyển gần với quá trình xảy ra trong kết cấu thực tế, nhưng cần thời gian dài. Ngược lại, việc sử dụng điện trường có thể làm tăng tốc độ di chuyển của ion clorua và rút ngắn đáng kể thời gian thí nghiệm.

3.1. Phương pháp khuếch tán tự nhiên đạt trạng thái ổn định

Phương pháp khuếch tán tự nhiên ở trạng thái ổn định dựa trên sự chuyển động của ion clorua dưới tác dụng của gradient nồng độ.

Mẫu bê tông được đặt giữa hai khoang dung dịch. Một phía của mẫu tiếp xúc với dung dịch có nồng độ ion clorua cao, trong khi phía còn lại có nồng độ thấp hơn hoặc không chứa ion clorua. Sự chênh lệch nồng độ tạo ra dòng khuếch tán ion clorua xuyên qua mẫu, được xác định từ tốc độ gia tăng nồng độ clorua trong dung dịch phía nồng độ thấp [3].

Ưu điểm lớn nhất của phương pháp là cơ chế vận chuyển hoàn toàn dựa trên khuếch tán tự nhiên, do đó có ý nghĩa tốt trong việc nghiên cứu cơ chế xâm nhập ion clorua. Tuy nhiên, hạn chế chính là thời gian thí nghiệm rất dài. Đối với mẫu bê tông thông thường có chiều dày khoảng 3 cm, thời gian để đạt trạng thái ổn định có thể kéo dài trên một năm [3]. Điều này làm cho phương pháp không thuận lợi khi cần đánh giá nhanh nhiều loại bê tông hoặc để so sánh các loại vật liệu chế tạo.

3.2. Phương pháp khuếch tán tự nhiên chưa đạt trạng thái ổn định

Khác với phương pháp trạng thái ổn định, phương pháp khuếch tán tự nhiên ở trạng thái này không yêu cầu chờ cho quá trình khuếch tán đạt trạng thái ổn định.

Sau một khoảng thời gian, khi ion clorua từ bề mặt mẫu phía tiếp xúc với dung dịch có nồng độ cao xâm nhập vào bên trong bê tông, mẫu được lấy ra và xác định sự phân bố nồng độ ion clorua theo chiều sâu. Kết quả sẽ xác định được hệ số khuếch tán biểu kiến D_a thông qua nghiệm của định luật Fick thứ hai, bằng cách khớp đường cong phân bố nồng độ clorua thực nghiệm với nghiệm của phương trình Fick thứ hai.

Ưu điểm của phương pháp là điều kiện gần với quá trình xâm nhập ion clorua tự nhiên và không cần sử dụng điện trường. Phương pháp cũng không yêu cầu chờ đến khi đạt trạng thái ổn định nên có thời gian thí nghiệm ngắn hơn đáng kể so với phương pháp đạt trạng thái ổn định. Tuy nhiên, phương pháp vẫn cần thời gian tương đối dài và yêu cầu xác định nồng độ clorua tại nhiều chiều sâu. Việc lấy mẫu và phân tích hóa học có thể làm tăng thời gian và công sức thí nghiệm [3].

3.3. Phương pháp tác dụng điện trường đến trạng thái khuếch tán ổn định

Mẫu bê tông được đặt giữa hai khoang dung dịch và hai điện cực được bố trí ở hai phía của mẫu. Khi đặt hiệu điện thế giữa hai điện cực, ion clorua chịu tác dụng của điện trường và chuyển động theo hướng tương ứng với điện tích của ion. Cơ chế vận chuyển lúc này không chỉ phụ thuộc vào gradient nồng độ mà còn chịu ảnh hưởng của gradient điện thế. Thực hiện thí nghiệm đến khi dòng ion clorua đi qua mẫu đạt trạng thái ổn định, kết hợp với chiều dày mẫu, nồng độ dung dịch, hiệu điện thế và các thông số liên quan, có thể xác định hệ số khuếch tán.

Sơ bộ phương pháp khuếch tán tự nhiên, việc sử dụng điện trường giúp quá trình đạt trạng thái ổn định nhanh hơn, giảm đáng kể thời gian thí nghiệm [3, 4].

3.4. Phương pháp tác dụng điện trường đến trạng thái khuếch tán chưa ổn định

Đây là phương pháp có ý nghĩa đặc biệt đối với nghiên cứu thực nghiệm vì có thể rút ngắn đáng kể thời gian xác định hệ số khuếch tán [3, 4]. Phương pháp này dựa trên việc tạo ra sự di chuyển cưỡng bức của ion clorua qua mẫu bằng điện trường, sau đó xác định chiều sâu xâm nhập của ion clorua để tính hệ số khuếch tán biểu kiến.

4. PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ CÁC PHƯƠNG PHÁP

Các phương pháp xác định hệ số khuếch tán ion clorua trong bê tông được xây dựng trên những cơ chế vận chuyển khác nhau. Vì vậy, việc lựa chọn phương pháp không chỉ phụ thuộc vào khả năng thực hiện thí nghiệm mà trước hết phải căn cứ vào mục đích xác định hệ số khuếch tán. Bảng 1 tổng hợp thông tin cơ bản của các phương pháp.

Bảng 1. Tổng hợp các phương pháp xác định hệ số khuếch tán ion clorua trong bê tông

Tiêu chí	Khuếch tán tự nhiên - trạng thái ổn định	Khuếch tán tự nhiên - trạng thái chưa ổn định	Có điện trường - trạng thái ổn định	Có điện trường - trạng thái chưa ổn định
Động lực vận chuyển	Gradient nồng độ	Gradient nồng độ	Điện trường + gradient nồng độ	Điện trường + gradient nồng độ
Trạng thái	Ổn định	Chưa ổn định	Ổn định	Chưa ổn định
Thời gian thực hiện	Rất dài	Dài	Ngắn	Rất ngắn
Điều kiện gần thực tế	Cao	Cao	Trung bình	Thấp
Đại lượng đặc trưng	D_e	D_a	D_e	D_{nssm}
Phân tích kết quả	Dòng Cl^- qua mẫu	Giá trị Cl^- theo chiều sâu	Dòng Cl^- qua mẫu	Giá trị Cl^- theo chiều sâu
Ưu điểm chính	Mô phỏng tự nhiên	Mô phỏng tự nhiên, không cần trạng thái ổn định	Nhanh hơn khuếch tán tự nhiên	Rất nhanh
Hạn chế chính	Thời gian rất dài	Cần phân tích Cl^- theo chiều sâu	Xác định mối quan hệ giữa 2 đại lượng	Giới hạn về khả năng sử dụng
Phạm vi nên sử dụng	Nghiên cứu trong điều kiện gần với môi trường thực tế	Nghiên cứu quá trình vận chuyển, các đặc trưng khuếch tán trong điều kiện tự nhiên	Đánh giá ảnh hưởng của các thông số vật liệu	Cần thời gian ngắn, cần một tham số định lượng để đánh giá

Bảng 1 cho thấy một sự đánh đổi giữa mức độ mô phỏng điều kiện tự nhiên và tốc độ thí nghiệm. Mức độ gần với điều kiện tự nhiên thì thời gian thí nghiệm tăng. Ngược lại, nếu giảm thời gian thí nghiệm thì cần diễn giải rõ hệ số thu được để xác định cụ thể khả năng sử dụng của kết quả.

Có thể thấy rõ việc sử dụng các phương pháp khác nhau trong việc thiết lập và hiệu chỉnh các mô hình tính tốc độ thấm của ion clorua trong vật liệu bê tông xi măng của các tác giả như Duracrete, Maage và Poulsen, Takewaka, Francy... [6].

5. KẾT LUẬN

Hệ số khuếch tán ion clorua trong bê tông là một tham số quan trọng để đánh giá khả năng chống lại sự xâm nhập của ion clorua và phục vụ dự báo độ bền của kết cấu BTCT. Các phương pháp xác định hệ số khuếch tán có thể được thực hiện ở điều kiện mô phỏng tự nhiên hoặc kết hợp với điện trường; đồng thời được đo ở trạng thái ổn định hoặc trạng thái chưa ổn định. Phương pháp xác định khi dòng ion chưa đạt trạng thái ổn định có ưu điểm rõ rệt về thời gian thí nghiệm do đó phù hợp với việc đánh giá nhanh.

Việc xác định chính xác hệ số khuếch tán ion clorua không chỉ giúp đánh giá chất lượng và khả năng chống xâm nhập clorua của bê tông mà còn tạo cơ sở định lượng cho quá trình dự báo thời gian

bắt đầu bị ăn mòn, tốc độ ăn mòn của cốt thép và tuổi thọ của kết cấu BTCT.

Hệ số thu được từ mỗi phương pháp có ý nghĩa vật lý khác nhau và phụ thuộc vào các giả thiết của phương pháp. Do vậy, khi sử dụng hệ số khuếch tán trong mô hình dự báo tuổi thọ, cần xác định rõ phương pháp thí nghiệm, điều kiện thí nghiệm và loại hệ số thu được.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] BARON, OLLIVIER. Durabilité des bétons. Presses Ecole Nationale Ponts et Chaussées, 1992.
- [2] VU.N.T. Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé: approche expérimentale et probabilité. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, 2011.
- [3] F. DEBY. Approche probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, 2008.
- [4] DURACRETE. Probabilistic Performance based durability design of concrete structures. Brit Euram Project, n°1347, 1999.
- [5] E. POULSEN. Description of exposure to Chloride of Marine Concrete Structures Proposal for a standard. International RILEM Workshop Chloride penetration into concrete, 1995.
- [6] DUC.N.V. Giới thiệu một số mô hình tính tốc độ thấm của clorua trong vật liệu bê tông xi măng và khả năng ứng dụng trong điều kiện Việt Nam. Tạp chí Giao thông vận tải, ISSN 2354-0818, tháng 11, tr. 67-70, 2018.