

## Investigating durability of concrete using geochemical model

Van Quan Tran\*, Van Loi Giap, Trong Giap Nguyen  
University of Transport Technology, Hanoi 100000, Vietnam

### Article info

#### Type of article:

Original research paper

#### \*Corresponding author:

E-mail address:

quantv@utt.edu.vn

**Received:** 30/2/2022

**Accepted:** 01/10/2022

**Published:** 11/10/2022

**Abstract:** Corrosion of reinforcement due to chloride ions and external sulphate corrosion affects the durability and mechanical properties of concrete construction, reinforced concrete structure in seawater environment and especially for concrete works. frequent contact with water containing high concentrations of sulfate ions. In this paper, a specific example of the effect of external sulfate corrosion on the Mequinenza concrete dam and the effect of concrete types on the diffusion of chloride ions is given. The formation of the mineral thaumasite is harmful to the mechanical properties of concrete. Simulation of external sulfate corrosion for concrete dams is carried out with the help of geochemical models. The model was successful in confirming the formation of thaumasite mineral in the crust of the concrete along with the increase in porosity thereby causing the peeling of the concrete shell that was observed in the actual work. Model of the influence of factors on the diffusion of chlorine ions on the basis of chlorine concentration in concrete. Based on these results, the model helps to predict the durability of the building over time. As well as the data of reinforcement corrosion caused by chlorine and sulfate ions for the actual works are compared with the model results.

**Keywords:** reinforced concrete construction, concrete dams, bridges, chloride ion, sulfate corrosion.

## Nghiên cứu độ bền công trình bê tông theo mô hình hóa học

Trần Văn Quân\*, Giáp Văn Lợi, Nguyễn Trọng Giáp  
Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải, Hà Nội, Việt Nam

### Thông tin bài viết

Bài báo nghiên cứu

\*Tác giả liên hệ:

Địa chỉ E-mail:

quantv@utt.edu.vn

Ngày nộp bài: 30/2/2022

Ngày chấp nhận: 1/10/2022

Ngày đăng bài: 11/10/2022

**Tóm tắt:** Ăn mòn cốt thép do ion clo và ăn mòn sulfat bên ngoài ảnh hưởng tới độ bền và khả năng chịu lực của công trình bê tông, công trình bê tông cốt thép trong môi trường nước biển và đặc biệt đối với các công trình bê tông tiếp xúc thường xuyên với nguồn nước có chứa ion sulfat với nồng độ cao. Trong bài báo này một ví dụ cụ thể về ảnh hưởng của ăn mòn Sulfat ngoài đối với đập bê tông Mequinenza và ảnh hưởng của các loại bê tông đến quá trình khuếch tán các ion clo đối đã được nêu ra. Việc hình thành khoáng thaumasite có hại cho tính chất cơ học của bê tông. Mô phỏng quá trình ăn mòn Sulfat ngoài đối với đập bê tông được tiến hành nhờ sự giúp đỡ của mô hình địa hóa học. Mô hình đã thành công trong việc khẳng định sự hình thành khoáng thaumasite ở lớp vỏ của bê tông cùng với tăng độ rỗng từ đó làm bong tróc lớp vỏ bê tông đã được quan sát trong công trình thực tế. Mô hình ảnh hưởng của các yếu tố đến quá trình khuếch tán các ion clo trên cơ sở nồng độ clo trong bê tông. Dựa trên các kết quả này, mô hình giúp dự đoán được độ bền công trình theo thời gian. Cũng như các số liệu ăn mòn cốt thép do ion clo và Sulfat gây ra đối với các công trình thực tế được so sánh với kết quả mô hình.

**Từ khóa:** công trình bê tông cốt thép, đập bê tông, cầu, ion clo, ăn mòn Sulfat.

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kết cấu bê tông trong khu vực nước biển bị ăn mòn bởi ăn mòn Sulfat và ăn mòn clo. Ăn mòn Sulfat trong bê tông là một trong những sự phá hủy được nghiên cứu rộng rãi trên thế giới [1], [2]. Các nghiên cứu ngày nay cho thấy mối quan tâm rất lớn đến việc sử dụng mô hình vật lý và hoá học để mô phỏng quá trình ăn mòn Sulfat [3]. Các ion Sulfat có thể xâm thực từ hai nguồn khác nhau. Nếu các ion Sulfat xâm nhập vào bê tông từ môi trường ngoài, các ion này sau đó gây ra các phản ứng hóa học làm ảnh hưởng đến kết cấu gọi là ăn mòn Sulfat bên ngoài (External Sulfate Attack-ESA). Ăn mòn Sulfat bên trong có thể xảy ra khi bê tông sử dụng loại xi măng hàm lượng lớn thạch cao cho mục đích làm chậm quá trình thủy hóa xi măng hoặc cốt liệu sử dụng có chứa các khoáng như

thạch cao, sắt sunfua hoặc các muối khác với Sulfat. Mặt khác ăn mòn clo được dự đoán là sự xâm nhập của các ion clo trong các kết dính trong bê tông [4], [5]. Trong trường hợp này các mô hình hầu hết sử dụng mô hình đẳng nhiệt liên kết toàn cục để xác định tổng lượng clorua như 1 hàm clorua tự do, các thông số của đường đăngr nhiệt này cần được hiệu chỉnh trực tiếp trên dữ liệu thí nghiệm nếu có. Trong từng trường hợp các phương pháp dành riêng cho từng loại bê tông và từng loại xi măng.

Hai phản ứng đặc trưng nhất xảy ra trong bê tông do ăn mòn Sulfat là: (1) sự hình thành thạch cao ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) do phản ứng giữa Sulfat và portlandite và (2) sự hình thành của ettringite thứ cấp ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ). Sự hình thành thạch cao và ettringite thứ cấp làm hỏng bê tông

do ứng suất bên trong gây ra sự giãn nở. Sự kết tinh của ettringite thứ cấp có hại hơn nhiều so với thạch cao mới hình thành [6], [7] và đã được nghiên cứu rộng rãi, rất có thể là do ettringite làm hỏng cấu trúc ở mức độ lớn hơn [8]. Biện pháp thông thường nhất được áp dụng để ngăn chặn sự hình thành ettringite thứ cấp là sử dụng xi măng bèn Sulfat có hàm lượng oxit nhôm thấp và chứa xỉ lò cao. Một sản phẩm ăn mòn khác ngoài hai sản phẩm trên đó là thaumasite ( $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ). Đây là sản phẩm nguy hại cho bê tông trong quá trình ăn mòn. Sản phẩm này không phát sinh từ một phản ứng liên quan đến các khoáng nhôm thủy hoá trong bê tông mà nó hình thành ngay cả khi sử dụng bê tông bèn axit với hàm lượng oxit nhôm thấp. Các khoáng thaumasite được hình thành trực tiếp từ phản ứng giữa ion Sulfat và các khoáng C-S-H (jennite và tobermorite). Các khoáng C-S-H có tính chất kết dính và chịu lực chủ yếu của hồ xi măng, do vậy khi các khoáng C-S-H bị hòa tan để kết tủa thaumasite, khối bê tông xi măng có thể dễ dàng bị vỡ vụn dưới những áp lực nhỏ nhất. Nhiều nghiên cứu đã ghi nhận sự ảnh hưởng của thaumasite đến nhiều kết cấu công trình bê tông với nhiều loại xi măng được sử dụng, trong đó có hệ thống ngập nước lợ và nước mặn [9], [10].

Hiện nay nước ta có rất nhiều các công trình bê tông khu ngập nước mặn, nước lợ trải khắp đất nước chịu sự ăn mòn bởi các ion muối ảnh hưởng đến độ bền của kết cấu. Do đó trong nghiên cứu này sẽ giới thiệu mô hình dựa trên cơ sở vật lý và hóa học bao gồm cân bằng nhiệt động lực học, kiểm soát động học và sự tạo phức bề mặt được sử dụng để mô phỏng khả năng liên kết clorua và

sulfat bị ảnh hưởng bởi cation của muối từ những kinh nghiệm thực tiễn đã diễn ra.

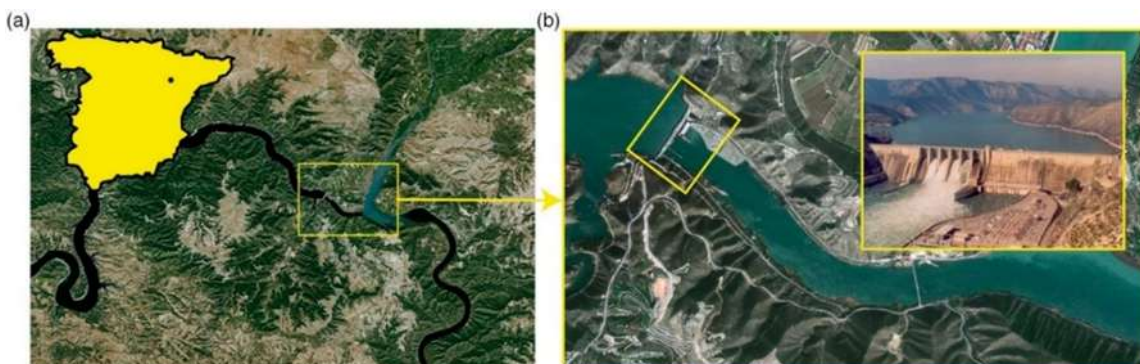
## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Ví dụ về quá trình ăn mòn công trình

Con đập tại Mequinenza là một con đập bê tông trọng lực nằm ở tỉnh Zaragoza, Tây Ban Nha, và nằm ở sông Ebro (Hình 1a) được trích từ nghiên cứu của Chinchón và nnk. [9]. Chiều cao đập tối đa là 79 m và chiều dài đỉnh của nó là 461 m, thể tích đập là  $1,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Hình 1b cho thấy hình ảnh của đập từ phía hạ lưu. Hồ chứa được giữ đầy lần đầu tiên vào tháng 12 năm 1965, phần móng của đập, được hình thành bởi các tầng đá vôi nằm ngang ngăn cách bởi các tầng than mỏng có chứa hàm lượng lưu huỳnh cao (Hình 2).

Bê tông đập Mequinenza được làm bằng cốt liệu đá vôi chứa nhiều carbonate, các cốt liệu này không chứa sắt sunfua  $\text{Fe}_2\text{S}$  và các muối chứa ion Sulfat khác do đó khả năng bị ăn mòn các hợp chất lưu huỳnh khác xuất hiện trong các vật liệu đó, lý do ăn mòn Sulfat bên trong bị loại trừ.

Tuy nhiên, trên hình 3 quan sát thấy có một lượng lớn khoáng ettringite được hình thành gây trương nở tường bê tông do sự tiếp xúc với nước ngầm chảy ra từ các lớp than chứa nhiều ion Sulfat. Hình 4 cho thấy sự xuống cấp mạnh mẽ nhất của bê tông xảy ra ở những khu vực tiếp xúc lâu dài với nước, cụ thể hơn là trong các máng bê tông đóng vai trò thoát nước và các tường chắn bê tông nơi tiếp xúc trực tiếp với tầng đá vôi có đi kèm mạch nước ngầm. Khi mà ăn mòn Sulfat ngoài phản ứng với các khoáng C-S-H làm mất đi tính chất cơ học của lớp bê tông từ đó tạo ra nhiều mảng bê tông bị bong tróc ra khỏi kết cấu.



Hình 1. (a) Vị trí của đập Mequinenza và hồ chứa thủy điện ; (b) Hạ lưu của đập



Hình 2. Lớp than đá xen kẽ giữa 2 lớp đá vôi của tầng địa chất móng



Hình 3. Carbonate hóa và ăn mòn Sulfat của tường bê tông sát với lớp đá địa chất



Hình 4. Các máng bê tông bị mất tính chất cơ học, bị tách rời ra khỏi công trình do thaumasite



**2.2. Mô hình khuếch tán ion**

Mô hình toán chủ yếu xoay quanh định luật Fick thứ 2 và lời giải hàm sai số Crank. Định luật thứ hai của Fick liên quan đến tốc độ thay đổi nồng độ theo thời gian của quá trình khuếch tán các ion phân tử. Tuy nhiên tác động của môi trường biển đến bê tông trong các khu vực khác nhau cũng khác nhau, người ta chia ra làm 2 khu vực chính: Khu vực mà công trình chìm trong nước biển và khu vực mà công trình chịu sự tác động của sóng và thủy triều.

Khu vực mà bê tông chìm trong nước biển:

$$C(x,t) = C_0 + (C_s - C_0) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (1)$$

Trong đó  $C_0$ : nồng độ clorua ban đầu trong bê tông (%);  $C_s$ : nồng độ clorua tích lũy trên bề mặt bê tông (%);  $t$ : thời gian (s);  $x$ : độ sâu trong bê tông (m);  $\operatorname{erfc}$ : hàm sai số Crank.

Hàm sai số Crank:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (3)$$

Nếu giả thiết "D" không phụ thuộc vào thời gian. Thời gian đầu, bê tông không chứa clorua thì giá trị  $C_0$  bằng không và hàm lượng clorua trong nước biển là một giá trị không đổi thì công thức (1.4) được viết lại là:

$$C(x,t) = C_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (4)$$

Khu vực mà bê tông chịu sự tác động của thủy triều, sóng

$$C(x,t) = 2W \left[ \frac{2tX}{\sqrt{\pi}} e^{-X^2} - 2tX^2 \operatorname{erfc}(X) \right] \quad (5)$$

$$X = \frac{\pi^2}{4Dt} \quad (6)$$

Trong đó  $W$ : Hàm lượng ion clorua tích lũy

trên bề mặt bê tông theo đơn vị thời gian.

Công thức ở trên rất khó sử dụng do sự xuất hiện của tham số "W". Trong thực tế, hàm lượng clorua thâm nhập vào trong bê tông thông qua đối lưu không quá quan trọng nhất là với quá trình ăn mòn cốt thép. Do các ion clorua chỉ thâm nhập vào trong bê tông thông qua đối lưu khoảng 1 – 2 cm tính từ bề mặt lớp bê tông và diễn ra trong thời gian rất ngắn. Do vậy, nhiều nghiên cứu đã đưa ra các cách biểu diễn hàm lượng clorua trong bê tông thông qua khuếch tán tại khu vực này, ví dụ như sau:

$$C(x,t)=C(\Delta x,t)\left[1-\operatorname{erfc}\left(\frac{x-\Delta x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right] \quad (7)$$

Trong đó  $\Delta x$ : chiều sâu của vùng clorua thâm nhập do đối lưu;  $C(\Delta x,t)$ : Nồng độ clorua tại độ sâu  $\Delta x$  (%).

### 2.3. Mô hình địa hóa học

Sự xuống cấp hóa học của bê tông được mô phỏng bằng cách sử dụng định luật bảo toàn khối lượng, định luật cân bằng nhiệt động học phản ứng và động lực học phản ứng. Mô hình nhiệt động học và các ứng dụng trong nghiên cứu sử dụng các chất kết dính vô cơ đã được trình bày trong nghiên cứu của tác giả [5], [11]. Sự tương tác của các ion với các khoáng dẫn đến sự hòa tan khoáng cũ và kết tủa các khoáng mới. Độ bão hòa  $\Omega_m$  của khoáng  $m$  được biểu diễn bởi phương trình dưới đây:

$$\Omega_m = K_{s,m}^{-1} \prod_{j=1}^{N_c} (\gamma_j C_j)^{\nu_{mj}} \quad \text{Với } m = 1, \dots, N_p \quad (8)$$

$K_{s,m}$ : hằng số cân bằng của khoáng  $m$ ;  $\nu_{mj}$ : hệ số cân bằng;  $\gamma_j$ : hệ số độ hoạt động của chất cơ bản  $j$ ;  $C_j$ : nồng độ chất  $j$  trong dung dịch (mol/kg nước);  $N_c$ : số lượng chất cơ bản;  $N_p$ : số lượng khoáng dưới cân bằng nhiệt động học.

Trạng thái cân bằng hay không cân bằng của các khoáng trong dung dịch được mô tả thông qua chỉ số bão hòa IS (Index of Saturation):

$$IS_m = \log \Omega_m = 0 \quad (9)$$

Đối với một khoáng, nếu  $IS=0$ , dung dịch ở trạng thái bão hòa, khoáng cân bằng không kết tủa,

không hòa tan. Nếu  $IS<0$ , dung dịch ở trạng thái dưới bão hòa, khoáng tiếp tục bị hòa tan. Trong trường hợp cuối cùng,  $IS > 0$ , dung dịch trên bão hòa, hiện tượng kết tủa khoáng xảy ra.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Ảnh hưởng của quá trình ăn mòn Sulfat đến độ bền bê tông

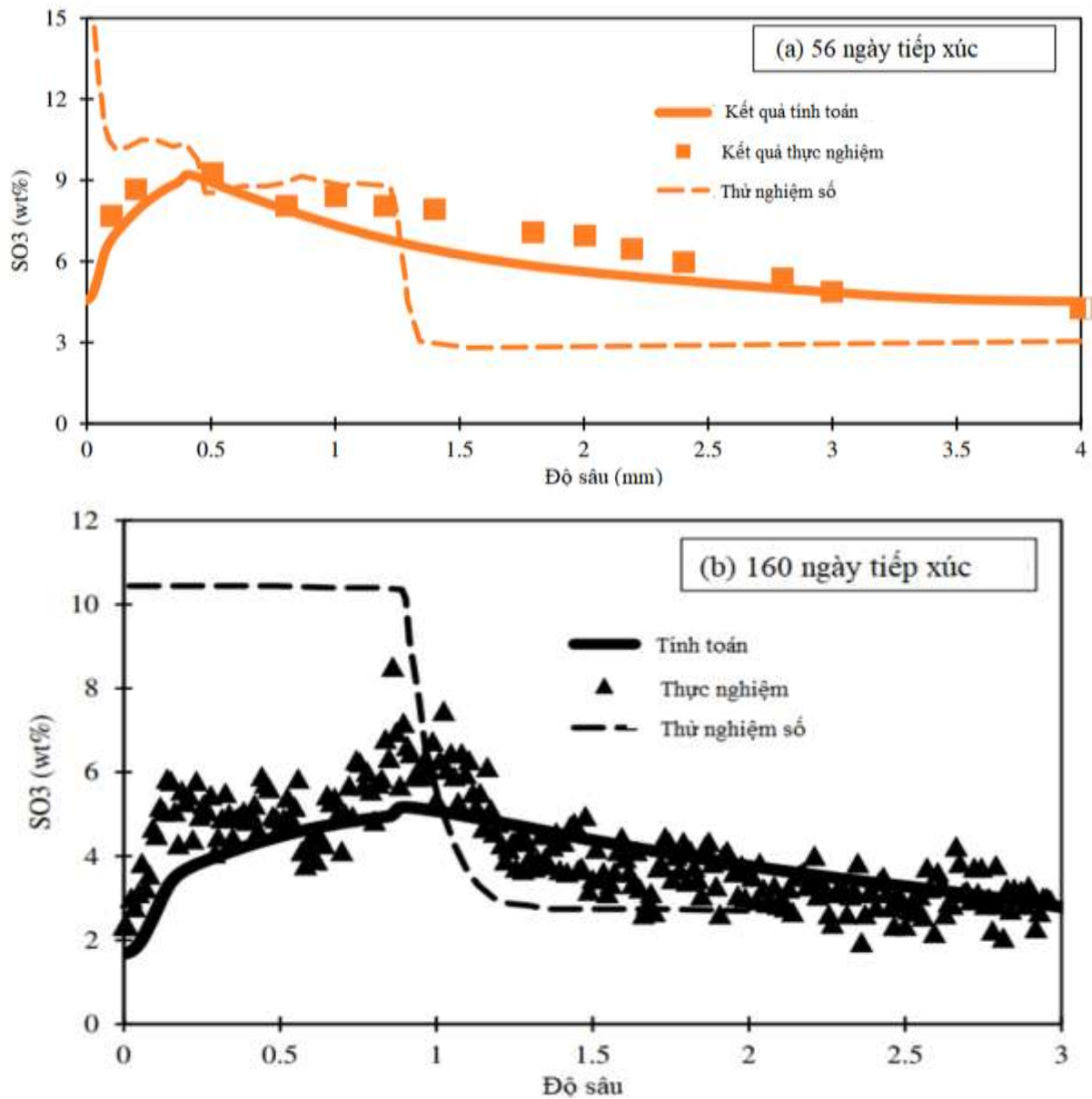
So sánh kết quả thí nghiệm và kết quả mô hình về sự ăn mòn sunphat của bê tông trong 2 môi trường nồng độ sunphat khác nhau và trong 2 khoảng thời gian khác nhau được mô tả trong hình 5. Kết quả của sự so sánh cho thấy mô hình địa hóa học có khả năng sử dụng để nghiên cứu ăn mòn Sulfat trong bê tông với độ chính xác cao. Do vậy mô hình sẽ được ứng dụng vào nghiên cứu sự ăn mòn Sulfat với một trường hợp cụ thể dưới đây.

Sự hư hỏng xuống cấp của đập bê tông Mequinenza được ghi nhận tại thời điểm đập đã xây dựng sau 40 năm. Do vậy thời gian mô phỏng trong mô hình là 40 năm. Các kết quả mô hình về sự thay đổi thành phần khoáng cũng như hệ số rỗng của bê tông được thể hiện tại thời điểm sau 10 năm, 20 năm, 30 năm và 40 năm. Nhiệt độ trung bình được lấy là 20°C. Hàm lượng các khoáng trong bê tông có liên quan đến ăn mòn Sulfat ngoài được thể hiện lần lượt trong các hình 6a, 6b, 6c và 6d với các năm tương ứng là 10, 20, 30 và 40 năm. Độ rỗng của bê tông thay đổi theo thời gian được thể hiện tại hình 7.

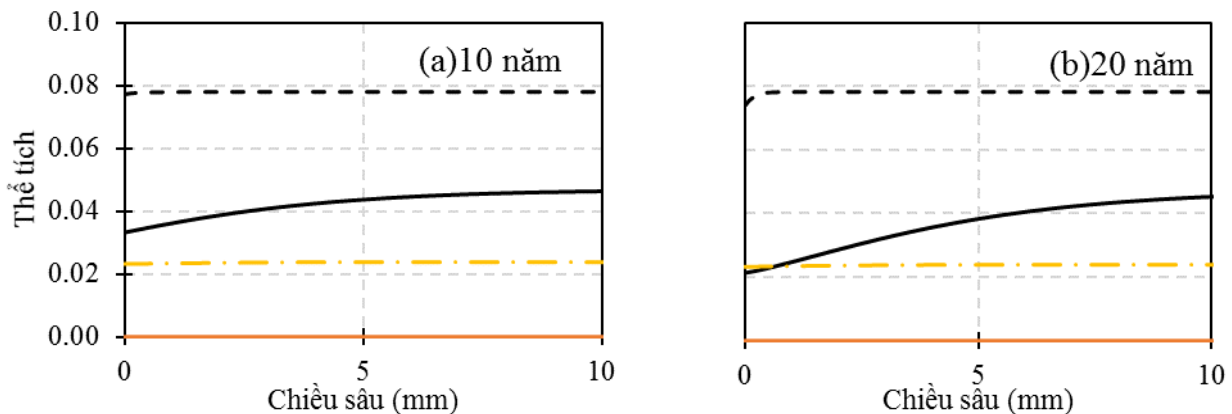
Có thể nhận thấy với việc tiếp xúc trực tiếp với nước ngầm có pH rất thấp khoảng 3.34, tuy nhiên độ bền bê tông vẫn tương đối cao khi mà khoáng bị hòa tan tương đối ít sau 10 năm bê tông tiếp xúc với nước ngầm. Khoáng Portlandite dễ bị hòa tan nhất. Sau 40 năm, khoáng Portlandite bị hòa tan đến hơn 50% hàm lượng ở 5 mm đầu tiên. Việc có mặt của ion Sulfat trong nước ngầm không gây ra việc hình thành khoáng ettringite thứ cấp hoặc thạch cao (gypsum). Sau 10 và 20 năm lượng khoáng C-S-H bị hòa tan rất nhỏ do vậy chưa có sự hình thành khoáng thaumasite. Tuy nhiên hình 7c và 7d cho thấy hàm lượng khoáng C-S-H bị hòa tan nhiều hơn đi kèm với thaumasite kết tủa tại lớp

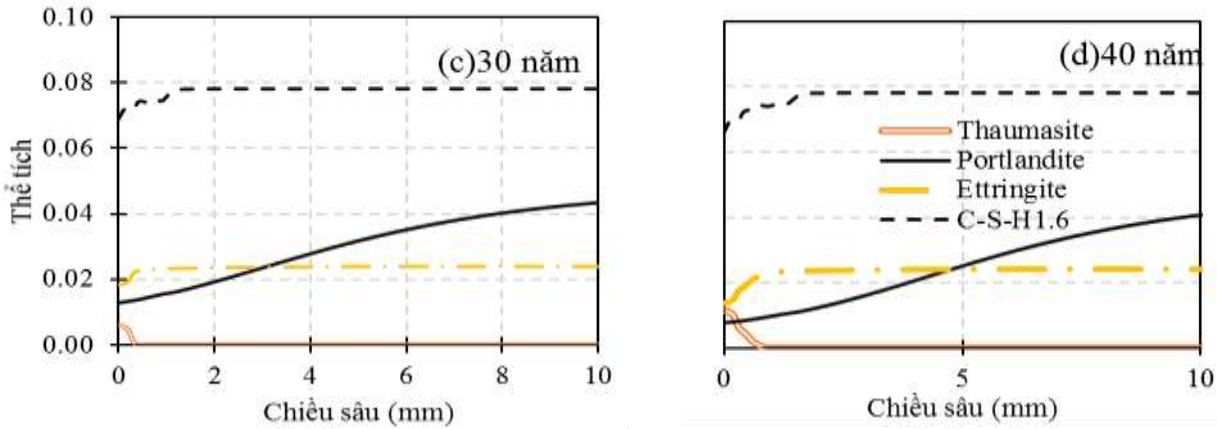
vỏ của bê tông. Đồng thời độ rỗng của lớp vỏ tăng lên theo thời gian trong khoảng 15 mm đầu tiên.

Điều này phù hợp với quan sát thực tế tại hình 4, khi mà có các mảng lớn vỏ bê tông bị bong tróc.

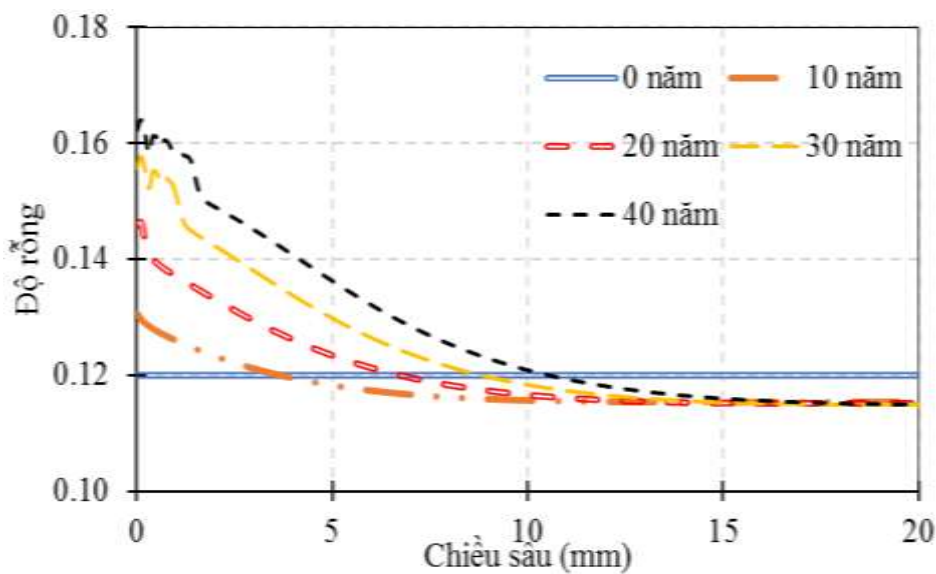


Hình 5. So sánh hàm lượng SO<sub>3</sub> giữa kết quả tính toán và thực nghiệm ở (a) 56 ngày tiếp xúc nồng độ 4g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> và (b) 160 ngày tiếp xúc với nồng độ 3g/l Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ở 20°C [12]





Hình 6. Sự hòa tan kết tủa của các khoáng trong bê tông tiếp xúc với môi trường nước ngầm theo thời gian (a) 10 năm, (b) 20 năm, (c) 30 năm và (d) 40 năm

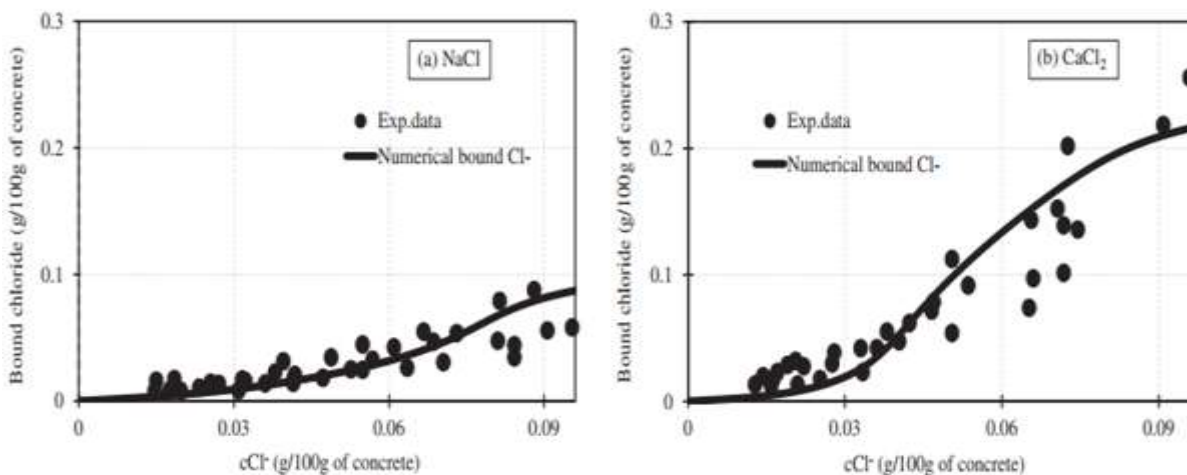


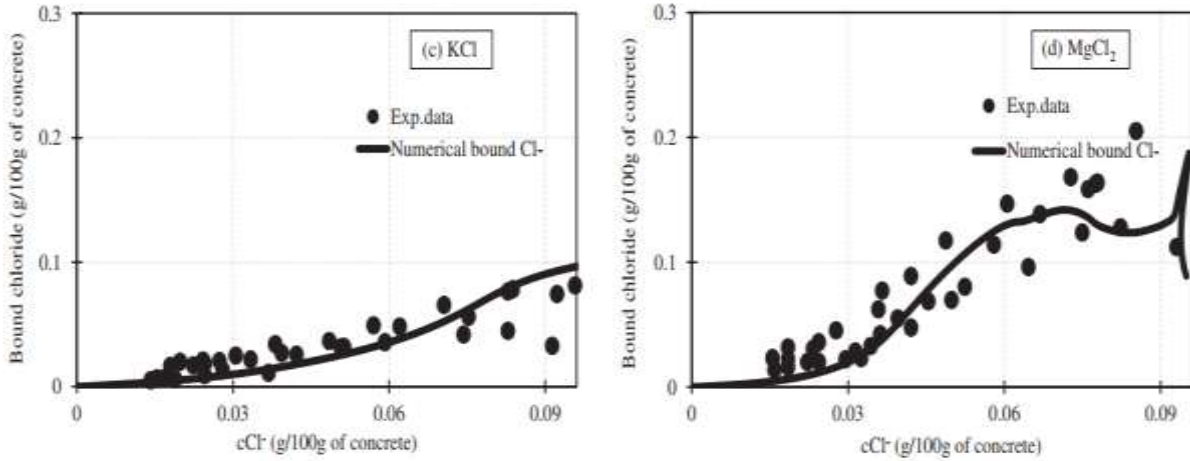
Hình 7. Độ rỗng của 20 mm bê tông theo thời gian [13]

**3.2. Ảnh hưởng của loại bê tông đến quá trình khếch tán các ion clo**

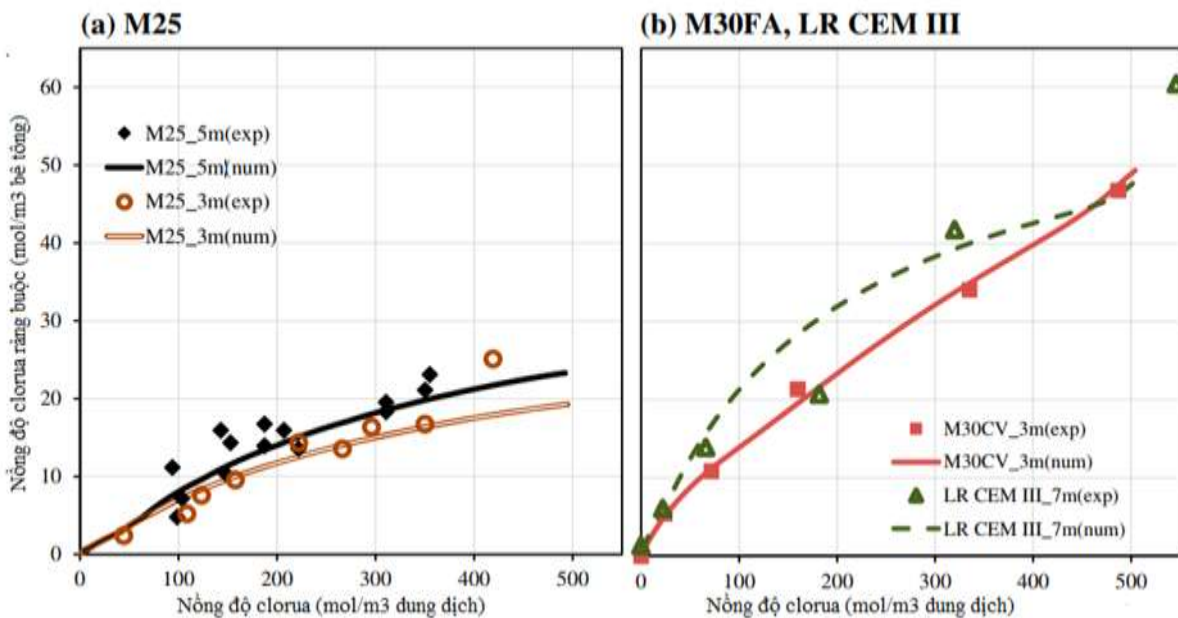
Trong một nghiên cứu đối với các mẫu bê tông M25, M30FA (Bê tông có thêm thành phần tro

bay) và LR CEM III trong thời gian sau 3 tháng và 5 tháng tiếp xúc với môi trường với các ion clorua (Hình 8). Hàm lượng clorua được so sánh giữa số liệu lý thuyết và thực nghiệm ở hình 9 .





Hình 8. Sự phân bố hàm lượng Clo trong bê tông sau 6 tháng tiếp xúc (a) 0,5mol dung dịch NaCl, (b) 0,25 mol dung dịch CaCl<sub>2</sub>, (c) dung dịch KCl 0,5 mol và (d) dung dịch MgCl<sub>2</sub> 0,5 mol ở 20°C của mô hình lý thuyết và thực nghiệm [14]



Hình 9. Sự phân bố hàm lượng Clo trong bê tông (a) M25 sau 5 tháng và (b) M30FA, LR CEM III sau 3 tháng tiếp xúc dung dịch 30g NaCl ở điều kiện 20°C [15]

Các kết quả nghiên cứu trên cho thấy mô hình có sử dụng mô hình đường đẳng nhiệt hàm lượng clorua theo hàm thời gian. Chúng ta có thể thấy rằng mô hình có thể dự báo tốt cho quá trình khếch tán clorua mà không phụ thuộc vào các thông số đo ngoài thực nghiệm.

**4. KẾT LUẬN**

Trong bài báo này đã trình bày được một phần ảnh hưởng của ăn mòn Sulfat, clorua do tác động từ môi trường bên ngoài đối với công trình kết cấu bê tông và bê tông cốt thép.

Đối với công trình đập bê tông cốt thép được xây dựng trên nền địa chất là đá vôi xen kẽ than bùn. Các khoáng thaumasite hình thành do quá trình ăn mòn Sulfat ngoài, các ion Sulfat tác dụng với C-S-H có trong bê tông để hình thành khoáng thaumasite, từ đó làm mất tính chất kết dính của lớp bê tông gây ra suy giảm cơ học. Bên cạnh đó công cụ số là mô hình địa hóa học cũng đã được ứng dụng để nghiên cứu lý thuyết về cơ chế hình thành thaumasite trong bê tông khi có sự ăn mòn Sulfat bên ngoài. Mô hình đã khẳng định việc mất khoáng C-S-H và hình thành thaumasite, cùng với tăng độ



rong ngoài lớp vỏ dẫn đến sự bong tróc lớp vỏ bê tông sau khoảng 40 năm tiếp xúc nước ngầm có chứa ion sulfat. Từ đó mô hình có thể được đưa vào dự đoán việc hình thành khoáng thaumasite của các công trình đập bê tông khác.

Mô hình hóa học có tính đến sự khuếch tán ion kết tủa/ hòa tan và sự tạo phức bề mặt đã được đề xuất để dự đoán phản ứng vận chuyển các ion vào vật liệu kết dính bão hòa. Các kết quả của mô hình cho thấy các loại bê tông khác nhau tiếp xúc với NaCl hoặc với các dung dịch sunphat đã được khảo sát đến. Ảnh hưởng của loại cation liên quan đến clorua cũng trình bày. Mỗi kết quả là so với dữ liệu thực nghiệm hoặc cấu hình số đã thu được trước đó trong tài liệu. Các kết quả tính toán giữa tính toán với thử nghiệm số có sự khác biệt nhỏ chứng rằng mô hình số này có thể được sử dụng như một công cụ đáng tin cậy để dự đoán liên kết clorua khả năng cho các loại bê tông khác nhau tiếp xúc với dung dịch khác nhau hoặc ở môi trường ăn mòn khác nhau.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] C. Ayora, S. Chinchón, A. Aguado, and F. Guirado, "Weathering of Iron Sulfides and Concrete Alteration: Thermodynamic Model and Observation in Dams from Central Pyrenees, Spain," *Cement and Concrete Research*, vol. 28, no. 4, pp. 591–603, Apr. 1998, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00019-2.
- [2] J. S. Chinchón, C. Ayora, A. Aguado, and F. Guirado, "Influence of weathering of iron sulfides contained in aggregates on concrete durability," *Cement and Concrete Research*, vol. 25, no. 6, pp. 1264–1272, Aug. 1995, doi: 10.1016/0008-8846(95)00119-W.
- [3] B. Bary, N. Leterrier, E. Deville, and P. Le Bescop, "Coupled chemo-transport-mechanical modelling and numerical simulation of external sulfate attack in mortar," *Cement and Concrete Composites*, vol. 49, pp. 70–83, May 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.12.010.
- [4] Y. Hosokawa, K. Yamada, B. Johannesson, and L.-O. Nilsson, "Development of a multi-species mass transport model for concrete with account to thermodynamic phase equilibriums," *Mater Struct*, vol. 44, no. 9, pp. 1577–1592, Nov. 2011, doi: 10.1617/s11527-011-9720-2.
- [5] A. Soive, V.-Q. Tran, and M. Gasc-Barbier, "The advantages of using a geochemical transport model including thermodynamic equilibrium, kinetic control and surface complexation to simulate the durability of concretes exposed to chlorides and sulphates," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 23, no. 5, pp. 552–563, May 2019, doi: 10.1080/19648189.2018.1446363.
- [6] J. Chen and M. Jiang, "Long-term evolution of delayed ettringite and gypsum in Portland cement mortars under sulfate erosion," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 812–816, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.03.002.
- [7] J. Chen and M. Jiang, "Long-term evolution of delayed ettringite and gypsum in Portland cement mortars under sulfate erosion," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 812–816, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.03.002.
- [8] S. Diamond, "Delayed ettringite formation — Processes and problems," *Cement and Concrete Composites*, vol. 18, no. 3, pp. 205–215, Jan. 1996, doi: 10.1016/0958-9465(96)00017-0.
- [9] S. Chinchón-Payá, A. Aguado, H. W. Nugterenc, and S. Chinchón, "External sulfate attack in dam concretes with thaumasite formation," *Mater. constru.*, vol. 65, no. 317, p. e042, Mar. 2015, doi: 10.3989/mc.2015.10513.
- [10] A. Campos, C. M. López, A. Blanco, and A. Aguado, "Effects of an internal sulfate attack and an alkali-aggregate reaction in a concrete dam," *Construction and Building Materials*, vol. 166, pp. 668–683, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.180.

- [11] V. Q. Tran *et al.*, “Effect of temperature on the chloride binding capacity of cementitious materials,” *Magazine of Concrete Research*, pp. 1–14, Jan. 2021, doi: 10.1680/jmacr.19.00484.
- [12] A. Soive and V. Q. Tran, “External sulfate attack of cementitious materials: New insights gained through numerical modeling including dissolution/precipitation kinetics and surface complexation,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 83, pp. 263–272, 2017.
- [13] Quân T. V. and Năm N. H., “Độ bền của đập bê tông dưới sự ăn mòn sun phát bên ngoài,” 1, no. 61, Art. no. 61, Nov. 2020.
- [14] V. Q. Tran, A. Soive, S. Bonnet, and A. Khelidj, “A numerical model including thermodynamic equilibrium, kinetic control and surface complexation in order to explain cation type effect on chloride binding capability of concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 191, pp. 608–618, 2018.
- [15] V. Q. Tran, A. Soive, and V. Baroghel-Bouny, “Modelisation of chloride reactive transport in concrete including thermodynamic equilibrium, kinetic control and surface complexation,” *Cement and Concrete Research*, vol. 110, pp. 70–85, 2018.