

ĐỘ BỀN CỦA ĐẬP BÊ TÔNG DƯỚI SỰ ẨM MÒN SUN-PHÁT BÊN NGOÀI

Trần Văn Quân

Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải

Nguyễn Hữu Năm

Viện Thủy điện và Năng lượng tái tạo

Phạm Bá Tuấn Anh

Cục Sở hữu trí tuệ

Tóm tắt: Ẩm mòn sun phát bên ngoài ảnh hưởng tới độ bền và khả năng chịu lực của công trình bê tông, đặc biệt đối với công trình đập bê tông tiếp xúc thường xuyên với nguồn nước có chứa ion sun phát với nồng độ cao. Trong bài báo này một ví dụ cụ thể về ảnh hưởng của ẩm mòn sun phát ngoài đối với đập bê tông Mequinenza đã được nêu ra. Việc hình thành khoáng thaumasite có hại cho tính chất cơ học của bê tông. Mô phỏng quá trình ẩm mòn sun phát 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. Dựa trên kết quả này, mô hình giúp dự đoán được độ bền công trình theo thời gian.

Từ khóa: Ẩm mòn sun phát bên ngoài, Đập bê tông, Dự đoán độ bền, Thaumasite, Mô hình địa hóa học.

Summary: External sulfate attack (ESA) affects the durability and strength capacity of concrete, especially for concrete dams that are in constant contact with water containing high concentrations of sulfate ions. In this paper, a concrete example of external sulfate attack on Mequinenza concrete dam is given. The formation of thaumasite mineral is harmful to the mechanical properties of concrete. Simulation of the external sulfate attack for concrete dam was conducted with the help of geochemical model. The model was successful in confirming the formation of thaumasite in the crust of concrete along with increased porosity which peeled off the concrete crust. That was observed in real construction. Based on the results, geochemical model can help to predict the durability of concrete construction.

Keywords: External sulfate attack, Concrete dams, Prediction of concrete durability, Thaumasite formation, Geochemical model

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ẩm mòn sun phát trong bê tông là một trong những sự phá hủy được nghiên cứu rộng rãi trên thế giới [1], [2]. Các ion sun phát có thể xâm thực từ hai nguồn khác nhau. Nếu các ion sun phát xâm nhập vào bê tông từ môi trường ngoài, các ion này sau đó gây ra các phản ứng hóa học gây hại cho kết cấu gọi là ẩm mòn sun phát bên ngoài (External Sun phát Attack-ESA). Nếu

không có sự xâm thực từ bên ngoài mà chính nguồn sun phát có trong bê tông gây hại cho bê tông, thì đây được gọi là ẩm mòn sun phát bên trong (Internal Sulfate Attack-ISA). Ẩm mòn sun phát 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 sun phát. Ẩm mòn sulfate bao gồm một tập hợp

Ngày nhận bài: 04/6/2021

Ngày thông qua phản biện: 16/7/2021

Ngày duyệt đăng: 02/8/2021

các phản ứng có liên quan đến ion sulfate. Trong thiết kế xây dựng, ăn mòn sun phát được hiểu là quá trình ảnh hưởng tới độ bền cũng như khả năng chịu lực của công trình. Hai phản ứng đặc trưng nhất xảy ra trong bê tông do ăn mòn sun phát là: (1) sự hình thành thạch cao ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) do phản ứng giữa sun phát 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 [3] và đã được nghiên cứu rộng rãi, rất có thể là do ettringite làm hỏng cấu trúc ở mức độ lớn hơn [4]. Biện pháp thông thường nhất được áp dụng để ngăn chặn sự hình thành ettringite thứ cấp là sử dụng xi măng bền sun phát có hàm lượng oxit nhôm thấp và chứa xỉ lò cao.

Ngoài hai sản phẩm chính của quá trình ăn mòn sun phát là thạch cao và ettringite thứ cấp, thaumasite ($\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$) cũng là một sản phẩm nguy hại cho bê tông của quá trình ăn mòn sun phát. Tuy nhiên, sản phẩm này không phát sinh từ một phản ứng liên quan đến các khoáng nhôm thủy hóa trong bê tông và do vậy thaumasite có thể được hình thành ngay cả khi sử dụng bê tông bền sun phát với hàm lượng oxit nhôm thấp. Ảnh hưởng của khoáng thaumasite không giống như của thạch cao hay ettringite thứ cấp sinh ra ứng suất trong vì sự trương nở thể tích, mà thay vào đó thaumasite được hình thành trực tiếp từ phản ứng giữa ion sun phát 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 đập bê tông của các công trình thủy điện hay hồ chứa [5], [6].

Tính đến năm 2018, Bộ Công thương thống kê có 385 công trình thủy điện lớn nhỏ vận hành trên khắp cả nước, kéo theo đó là hệ thống công trình đập thủy điện tương ứng, có những thủy điện lớn về quy mô như: Hòa Bình, Sơn La, Lai Châu hay Thác Bà... Tại Việt Nam hiện nay, các công trình đập bê tông thủy điện hiện nay chưa thực sự được nghiên cứu về ảnh hưởng của ăn mòn sun phát nói chung và khoáng thaumasite nói riêng đến độ bền của đập bê tông. Do đó, bài báo này sẽ tập trung đưa ra một ví dụ minh họa về ảnh hưởng của ăn mòn sun phát mà trực tiếp là hình thành khoáng thaumasite đến một công trình đập thủy điện cụ thể. Dựa trên các điều kiện thực tế của công trình đập bê tông và kết quả đánh giá công trình, bài báo đề xuất sử dụng một mô hình số để nghiên cứu mô phỏng quá trình hình thành khoáng thaumasite trong đập bê tông dưới tác động của nước của môi trường xung quanh trong 45 năm.

2. MỘT VÍ DỤ ĐIỂN HÌNH VỀ ĂN MÒN SUN PHÁT ĐỐI VỚI CÔNG TRÌNH ĐẬP BÊ TÔNG

Ví dụ dưới đây được trích từ nghiên cứu của Chinchón và nnk. [5]. 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). 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)



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

Bê tông đập Mequinenza được làm bằng cốt liệu đá vôi chứa nhiều carbonate, các cốt liệu này không chứa sắt sunfua Fe_2S và các muối chứa ion sun phát 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 sun phát bên trong bị loại trừ.



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



Hình 3: Carbonate hóa và ăn mòn sun phát 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



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 sun phát. 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 sun phát 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

3. NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ GIẢI THÍCH CƠ CHẾ CỦA ĂN MÒN SUN PHÁT BẰNG MÔ HÌNH ĐỊA HÓA HỌC

3.1. Tổng quát hóa 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 Nguyễn Hữu Năm [7]. Các ứng dụng của mô hình địa hóa học được dùng trong thiết kế cấp phối gia cố đất sử dụng puzzolan tự nhiên của Nguyễn và nnk [8], [9]. 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 Ω_m của khoáng m được biểu diễn bởi phương trình dưới đây:

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

$K_{s,m}$: hằng số cân bằng của khoáng m ; v_{mj} : hệ số cân bằng; γ_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.

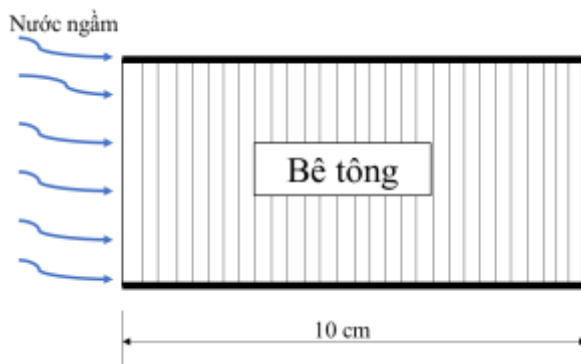
Trạng thái cân bằng hay không cân bằng của các khoáng trong dung dịch được mô tả thông qua chỉ số bão hòa IS (Index of Saturation):

$$IS_m = \log \Omega_m = 0 \quad (2)$$

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.

3.2. Hình học của mô hình

Mô hình một chiều được sử dụng để mô phỏng quá trình tương tác giữa nước ngầm và bê tông của đập. Chiều sâu của lớp bê tông mô phỏng được giả thiết là sâu 10 cm, trong môi trường bão hòa nước. Mô hình được mô phỏng trên phần mềm địa hóa học Phreeqc được phát triển bởi Viện địa chất Hoa Kỳ.



Hình 5: Mô hình 1 chiều của bê tông khi tiếp xúc với nước ngầm

3.3. Điều kiện biên và điều kiện ban đầu của mô hình

Bê tông của đập Mequinenza được thiết kế sử dụng bê tông Portland bình thường, cốt liệu sử dụng đá vôi, do vậy thành phần khoáng hóa của bê tông được giả sử bao gồm các khoáng thủy hóa của xi măng Portland và calcite đại diện cho đá vôi. Độ rỗng của bê tông được giả sử là 0.12. Thành phần khoáng hóa của bê tông được thể hiện trong bảng 1, thành phần được tính toán từ nghiên cứu của Marty và nnk [10]:

Bảng 1: Thành phần khoáng của bê tông [10]

Tên khoáng	Công thức hóa học	Thể tích (%)
CSH1.6	$\text{Ca}_{1.6}\text{SiO}_{3.6} \cdot 2.58\text{H}_2\text{O}$	9.52
KatoiteSi	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_1(\text{OH})_8$	0.88
Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	6.32
Goethite	FeOOH	0.82
Hydrotalcite	$\text{Mg}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	0.34
Ettringite	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	2.98
Calcite	CaCO_3	79.14

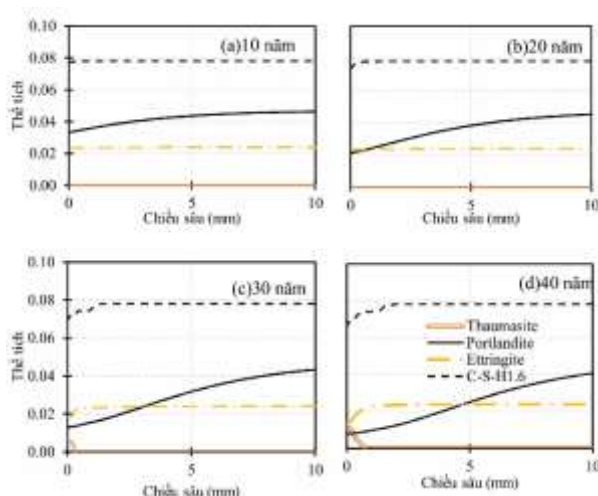
Thành phần nước ngấm chảy ra từ tầng đá vôi và than được thể hiện trong bảng 2 [11]:

Bảng 2: Thành phần hóa học của nước ngấm từ lớp đá vôi và than [10]

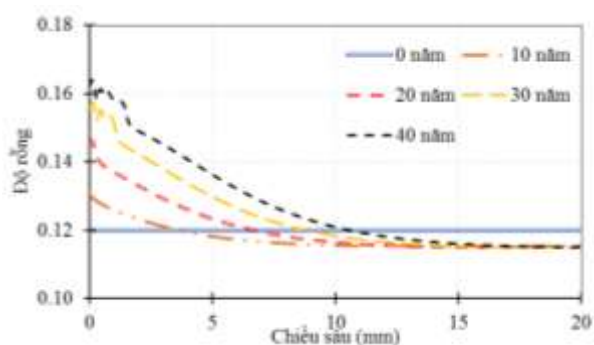
Thành phần ion	Nồng độ (mol/l)
CO_3^{-2}	2.67×10^{-4}
Ca^{+2}	5.35×10^{-5}
Cl^-	1.82×10^{-4}
K^+	2.94×10^{-5}
Na^+	1.79×10^{-4}
Mg^{+2}	2.27×10^{-5}
SO_4^{-2}	2.67×10^{-1}
Al^{+3}	1.02×10^{-5}
pH	3.34

3.4. Kết quả và thảo luận

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 sun phát 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.



Hình 6: Sự hòa tan kết tủa của các khoáng trong bê tông tiếp xúc với môi trường nước ngấm 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

Có thể nhận thấy với việc tiếp xúc trực tiếp với nước ngấm 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 ngấm. 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 sun phát 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 6c và 6d 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.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Trong bài báo này đã trình bày được một phần ảnh hưởng của ăn mòn sun phát ngoài đối với

công trình đập bê tông. Đặc biệt 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 sun phát ngoài, các ion sun phát 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 sun phát bên ngoài. Mô hình đã khẳng định việc mất khoáng C-S-H và hình thành thaumasite, cùng với tăng độ rỗng ngoài lớp vỏ dẫn đến sự bong tróc lớp vỏ bê tông sau khoảng 40 năm tiếp xúc nước ngầm có chứa ion sun phát. Từ đó mô hình có thể được đưa vào dự đoán việc hình thành khoáng thaumasite của các công trình đập bê tông khác.

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] 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.
- [4] 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.
- [5] S. Chinchón-Payá, A. Aguado, H. W. Nugterenc, and S. Chinchón, "External sulfate attack in dam concretes with thaumasite formation," *Mater. construcc.*, vol. 65, no. 317, p. e042, Mar. 2015, doi: 10.3989/mc.2015.10513.
- [6] 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.
- [7] H. N. Nguyễn, "Mô hình nhiệt động lực học và ứng dụng trong nghiên cứu sử dụng các chất

kết dính vô cơ,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, vol. 58, pp. 63–70.

- [8] H. N. Nguyen, V. Q. Tran, A. Q. Ngo, and C. T. Ngo, “Application of thermodynamic model to mix design of stabilized soils,” *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 1295–1300, 2019.
- [9] H. N. Nguyen, V. Q. Tran, A. Q. Ngo, and Q. H. Nguyen, “Using Natural Pozzolan, Cement and Lime for Stabilizing Soil in Earth Dams,” *IJITEE*, vol. 8, no. 10, pp. 2809–2814, Aug. 2019, doi: 10.35940/ijitee.J9595.0881019.
- [10] N. C. M. Marty, C. Tournassat, A. Burnol, E. Giffaut, and E. C. Gaucher, “Influence of reaction kinetics and mesh refinement on the numerical modelling of concrete/clay interactions,” *Journal of Hydrology*, vol. 364, no. 1, pp. 58–72, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.10.013.
- [11] D. Jacques, L. Wang, E. Martens, and D. Mallants, “Modelling chemical degradation of concrete during leaching with rain and soil water types,” *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 8, pp. 1306–1313, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.02.008.