

## Chế độ nhiệt trong bê tông khối lớn ở giai đoạn hạ nhiệt

Lê Quang Trung<sup>1</sup>, Phan Xuân Thực<sup>2</sup>, Lưu Văn Thực<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, trường Đại học Xây dựng Hà Nội

<sup>2</sup> Khoa xây dựng, trường Đại học Vinh

### TỪ KHOÁ

Bê tông khối lớn

Giai đoạn hạ nhiệt

Nứt nhiệt

Chỉ số nứt

Trường ứng suất nhiệt độ

### TÓM TẮT

Một nghiên cứu mô phỏng số đã được thực hiện để điều tra chế độ nhiệt trong bê tông khối lớn ở giai đoạn hạ nhiệt. Phân tích trường ứng suất nhiệt độ trong khối bê tông sẽ được thực hiện bằng cách sử dụng công cụ phân tích nhiệt dạng dòng của phần mềm Midas/Civil. Độ tin cậy và tính chính xác của phương pháp số được đề xuất sẽ được chứng minh thông qua việc so sánh kết quả phân tích số với kết quả thu được từ thí nghiệm. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn ở giai đoạn hạ nhiệt là rất cần thiết. Với cấp phối và các điều kiện biên như mô phỏng, giai đoạn tăng nhiệt diễn ra trong một khoảng thời gian ngắn, khoảng 80 giờ, trong khi giai đoạn hạ nhiệt kéo dài đáng kể, khoảng 1400 giờ, trước khi nhiệt độ trong toàn khối bê tông đạt trạng thái ổn định gần bằng nhiệt độ môi trường. Ở giai đoạn hạ nhiệt, chỉ số nứt nhiệt ở tâm khối giảm đi đáng kể, mặc dù giá trị này vẫn lớn hơn 1.0, nhưng có thể thấy có một xu hướng tiến cận đến 1.0. Điều này cho thấy, hoàn toàn có một nguy cơ nứt do nhiệt ở trong tâm khối ở giai đoạn hạ nhiệt. Nếu xem xét chỉ số nứt tiêu chuẩn là 1.85 tương ứng với xác suất nứt do nhiệt  $\leq 5\%$ , như một số nước thì khối móng được khảo sát đã bị nứt xuyên khối.

### KEYWORDS

Mass concrete

Cooling phase

Thermal cracking

Cracking index

Thermal-stress field

### ABSTRACT

A numerical simulation study has been conducted to investigate temperature regime in mass concrete during the cooling phase. The analysis of the thermal-stress field in mass concrete has been performed using the thermal flow analysis tool of the Midas/Civil software. The reliability and accuracy of the proposed numerical method are demonstrated by comparing the numerical analysis results with experimental data. The research results show that controlling thermal cracking in mass concrete during the cooling phase is essential. With the mix design and boundary conditions as simulated, the heating phase occurs over a short period, approximately 80 hours, while the cooling phase lasts significantly longer, about 1400 hours, before the temperature within the entire concrete mass reaches a stable state, close to the ambient temperature. During this phase, the thermal cracking index at the center of mass concrete decreases significantly, although it remains greater than 1.0. However, there is a clear trend toward reaching 1.0, indicating a potential risk of thermal cracking at the core during the cooling phase. If the standard cracking index of 1.85, which corresponds to a thermal cracking probability of  $\leq 5\%$ , is considered, as in some countries, the mass concrete may have already experienced through-cracking.

### 1. Giới thiệu

Công tác thi công bê tông khối lớn luôn gặp phải những thách thức về mặt kỹ thuật, đòi hỏi cần có các biện pháp kiểm soát nứt do nhiệt do quá trình thủy hóa của xi măng sinh ra lượng nhiệt lớn. Nhiệt độ trong lòng khối bê tông tăng cao sẽ tạo ra sự chênh lệch nhiệt độ đáng kể giữa bề mặt và bên trong lòng khối, từ đó gây ra ứng suất nhiệt. Khi ứng suất kéo do nhiệt sinh ra vượt quá giới hạn chịu kéo của bê tông, hiện tượng nứt bề mặt hoặc nứt xuyên khối sẽ xuất hiện [1-7]. Vì vậy, việc kiểm soát nhiệt độ trong suốt quá trình thi công bê tông khối lớn là yếu tố then chốt để đảm bảo độ bền và an toàn kết cấu cho công trình. Nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn có thể làm giảm tính toàn khối và gây ra mất ổn định kết cấu, từ đó ảnh hưởng tiêu cực đến khả

năng chịu lực và tuổi thọ của công trình. Vấn đề này trở nên nghiêm trọng hơn trong các kết cấu bê tông khối lớn vì kết cấu bê tông khối lớn thường là các bộ phận quan trọng của hệ chịu lực cho công trình [2]. Sự phát triển nhiệt độ trong bê tông khối lớn có thể được chia làm hai giai đoạn chính: i) giai đoạn tăng nhiệt, và ii) giai đoạn giảm nhiệt [8,9]. Sau đó nhiệt độ của khối bê tông sẽ đi vào ổn định cùng với nhiệt độ của môi trường. Trong giai đoạn tăng nhiệt, do quá trình thủy hoá của xi măng, nhiệt độ trong lòng khối bê tông liên tục tăng lên làm cho phần bê tông trong lõi có xu hướng nở ra. Do sự kiểm chế của lớp bê tông phía ngoài nên tại giai đoạn này bê tông phía trong xuất hiện ứng suất nén vốn không gây ra nguy hiểm cho bê tông. Tuy nhiên, lớp bê tông phía ngoài do tiếp xúc trực tiếp với môi trường không khí và bị làm nguội nên có xu hướng co lại. Sự co này gây ra kim giữ đối với lớp

\*Liên hệ tác giả: thuclv@huce.edu.vn

Nhận ngày 09/09/2024, sửa xong ngày 15/10/2024, chấp nhận đăng ngày 18/10/2024

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2024.806>

bê tông đang giãn nở phía bên trong, dẫn đến việc phát sinh ứng suất kéo trên bề mặt khối. Khi ứng suất kéo này vượt qua giới hạn kéo cho phép của bê tông, các vết nứt sẽ hình thành trên bề mặt bê tông. Ngược lại, ở giai đoạn hạ nhiệt, phần bê tông phía trong lõi bắt đầu nguội và co lại. Quá trình co này lại bị cản trở bởi nền đất hoặc chính sự co không đồng đều giữa các phần của khối bê tông đó. Sự kìm giữ này lại gây ra các ứng suất kéo cho bê tông ở trong lòng khối. Ứng suất kéo này sẽ tích tụ dần theo thời gian và khi ứng suất kéo vượt quá giới hạn chịu kéo của vật liệu bê tông, vết nứt sẽ hình thành. Cần chú ý ở đây, các vết nứt xuất hiện ở giai đoạn hạ nhiệt này là các vết nứt sâu, thậm chí là các vết nứt xuyên, gây nguy hiểm cho kết cấu công trình. Tuy nhiên, trong hiểu biết của nhóm tác giả, cho đến nay, phần lớn các nghiên cứu về ứng xử và kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn thường tập trung vào giai đoạn thứ nhất, giai đoạn tăng nhiệt trong khối bê tông [10-14] và [6,7,15-18]. Về mặt pháp lý, hầu hết các quốc gia trên thế giới đều có tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật liên quan quy định các điều khoảng liên quan đến công tác thi công bê tông khối lớn nhằm kiểm soát những vết nứt do nhiệt [19-26]. Tại Việt Nam, các quy định liên quan đến thi công bê tông khối lớn được nêu rõ trong tiêu chuẩn TCVN 9341:2012 [27]. Tuy nhiên, tiêu chuẩn hiện hành đã chưa đề cập nhiều đến việc kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn ở giai đoạn hạ nhiệt, và cho đến nay gần như chưa có một nghiên cứu mô phỏng số nào điều tra về chế độ nhiệt trong bê tông khối lớn ở giai đoạn hạ nhiệt. Vì vậy, việc tiến hành nghiên cứu này là hết sức cần thiết, nhằm cung cấp các thông tin định lượng về chế độ nhiệt trong bê tông khối lớn ở giai đoạn hạ nhiệt. Điều này sẽ là hữu ích cho các nhà thầu và các đơn vị tư vấn thiết kế trong quá trình thi công.

Cho đến nay, phần lớn các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật hiện có trên thế giới về việc kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn đều nhằm hướng tới ba mục tiêu chính: i) kiểm soát nhiệt độ lớn nhất ở tâm của khối bê tông không vượt quá 70-80°C. Điều này là bởi vì khi nhiệt độ của khối bê tông vượt quá 70-80°C, khoáng en-tri-gi-tơ sẽ bị phân hủy và khi khối bê tông nguội lại, khoáng en-tri-gi-tơ sẽ tái kết tinh, dẫn đến sự nở thể tích, gây hư hại cho cấu trúc bê tông [9,28,29]. Hơn nữa, theo ACI 207.1R, cường độ của bê tông có thể suy giảm khi nhiệt độ của bê tông khối lớn đạt mức trên 88°C [30]; ii) kiểm soát chênh lệch nhiệt độ  $\Delta T$  giữa bề mặt và tâm khối bê tông không vượt quá 20°C đến 25°C [27,29,31]. Nhiệt độ sinh ra từ quá trình thủy hóa xi măng, cùng với tốc độ tỏa nhiệt chậm trong khối bê tông, là nguyên nhân chính dẫn đến sự gia tăng nhiệt độ trên toàn khối. Bê tông ở trong lõi có nhiệt độ cao thì có xu hướng giãn nở, trong khi bê tông ở lớp bề mặt bên ngoài, tiếp xúc với môi trường, lại có xu hướng co lại và hạn chế sự giãn nở của bê tông bên trong. Điều này gây ra ứng suất kéo trên bề mặt bê tông, dẫn đến các vết nứt nhiệt khi ứng suất kéo do nhiệt vượt quá ứng suất kéo cho phép [1,28]; gần đây ở Nhật Bản, iii) việc đánh giá sự hình thành các vết nứt trong bê tông khối lớn được thực hiện bằng cách sử dụng chỉ số nứt nhiệt  $I_{cr}$  [24]. Do đó, các phương pháp kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn đều hướng tới việc kiểm soát ba yếu tố trên.

Trong bài báo này, một nghiên cứu mô phỏng số sẽ được thực

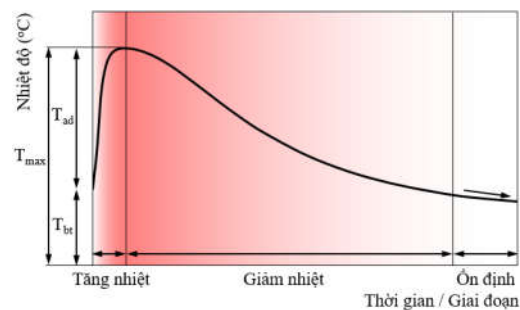
hiện để điều tra chế độ nhiệt trong bê tông khối lớn ở giai đoạn hạ nhiệt. Phân tích trường ứng suất nhiệt độ trong khối bê tông sẽ được thực hiện bằng cách sử dụng công cụ phân tích nhiệt dạng dòng của phần mềm Midas/Civil. Độ tin cậy và tính chính xác của phương pháp số được đề xuất sẽ được chứng minh thông qua việc so sánh kết quả phân tích số với kết quả thu được từ thí nghiệm. Cách làm này không chỉ giúp xác định tính khả thi mà còn nâng cao độ tin cậy trong ứng dụng thực tế. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn ở giai đoạn hạ nhiệt là rất cần thiết. Kết cấu hoàn toàn có thể bị nứt xuyên ở giai đoạn này nếu không có một kế hoạch kiểm soát nứt do nhiệt đúng đắn.

## 2. Các giai đoạn phát triển nhiệt trong bê tông khối lớn

Sự phát triển nhiệt độ trong bê tông khối lớn thường được chia làm 2 giai đoạn chính gồm giai đoạn tăng nhiệt độ và giai đoạn hạ nhiệt [24,32], như được minh họa trong Hình 1. Sau hai giai đoạn này kết cấu sẽ bước vào giai đoạn ổn định nhiệt, và nhiệt độ kết cấu cơ bản sẽ chỉ phụ thuộc vào biến động của nhiệt độ môi trường. Nhiệt độ lớn nhất có thể xuất hiện trong khối bê tông là tổng nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông khi đổ  $T_{bt}$  và nhiệt độ phát sinh do quá trình thủy hóa xi măng  $T_{ad}$ , như Công thức (1). Từ khi nhiệt độ khối bê tông có giá trị ban đầu  $T_{bt}$  đến khi đạt giá trị  $T_{max}$  là giai đoạn tăng nhiệt, sau khi đạt đến  $T_{max}$  thì nhiệt độ trong bê tông giảm dần gọi là giai đoạn giảm nhiệt, và sau đó là sự ổn định nhiệt độ:

$$T_{max} = T_{bt} + T_{ad} \quad (1)$$

trong đó  $T_{bt}$  – Nhiệt độ hỗn hợp bê tông sau khi trộn (°C);  $T_{ad}$  – Nhiệt độ phát sinh do quá trình thủy hoá xi măng tạo ra.



Hình 1. Các giai đoạn phát triển nhiệt độ trong bê tông khối lớn.

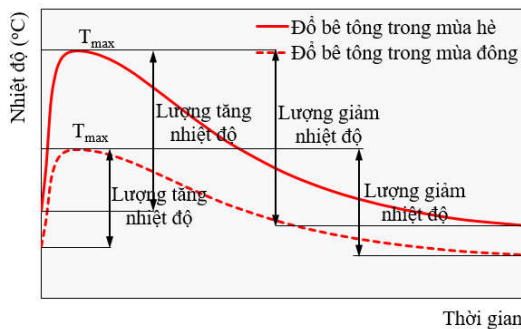
### 2.1. Giai đoạn tăng nhiệt độ

Sau khi đổ bê tông, quá trình thủy hóa của xi măng sẽ sinh ra nhiệt làm nhiệt độ của khối bê tông tăng liên tục. Khối lượng bê tông càng lớn hoặc tốc độ thi công càng nhanh, thời gian tăng nhiệt trong khối bê tông càng kéo dài, có thể lên đến vài tuần. Phần bê tông bên trong lòng khối sẽ tích nhiệt và gây ra hiện tượng giãn nở. Khi nhiệt độ trong lòng khối đạt đỉnh  $T_{max}$ , nó sẽ duy trì ổn định trong vài ngày trước khi giảm dần do quá trình thoát nhiệt ra môi trường xung quanh. Trong giai đoạn tăng nhiệt này, phần bê tông bên ngoài tiếp xúc với không khí sẽ bị làm nguội

nhau, dẫn đến hiện tượng co lại. Trong khi đó phần bê tông trong lòng khối, do có nhiệt độ cao hơn nên vẫn tiếp tục giãn nở. Sự chênh lệch này gây ra sự kìm giữ giữa các lớp, làm phát sinh ứng suất kéo cho lớp bê tông bề mặt. Ở thời điểm này, bê tông đang ở tuổi sớm với khả năng chịu kéo thấp, thông thường chỉ khoảng 0.9-1.0 MPa. Khi ứng suất kéo trên bề mặt vượt quá giới hạn chịu kéo của bê tông, vết nứt sẽ xuất hiện trên bề mặt và từ đó phát triển vào sâu bên trong. Cũng cần chú ý, giá trị nhiệt độ tối đa  $T_{max}$  của bê tông khối lớn chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố bao gồm thành phần bê tông, tỷ lệ cấp phối, loại xi măng sử dụng, nhiệt độ bê tông khi đổ, nhiệt độ môi trường, phương pháp thi công, và loại phụ gia sử dụng. Nhiệt độ phát sinh do thủy hóa của xi măng có thể được tính theo phương trình sau:

$$\Delta T_{\tau} = \frac{X \times Q_{\tau}}{C_b \times \gamma_b} \quad (2)$$

trong đó  $\Delta T_{\tau}$  – Nhiệt độ phát sinh do quá trình thủy hoá xi măng ở tuổi  $\tau$  ngày ( $^{\circ}\text{C}$ );  $X$  – Hàm lượng xi măng trong  $1\text{m}^3$  bê tông (kg);  $Q_{\tau}$  – Nhiệt độ thủy hoá của xi măng (kcal/kg) ở tuổi  $\tau$  ngày. Thông thường, ở tuổi 7 ngày giá trị nhiệt thủy hoá xi măng là 100 đối với xi măng thông thường, 70 với xi măng toả nhiệt vừa và 60 đối với xi măng toả nhiệt thấp, trong khi ở tuổi 28 ngày, các giá trị này lần lượt là 115, 80 và 70;  $C_b$  – Nhiệt dung riêng của bê tông, thường lấy bằng 0,25 (kcal/kg.  $^{\circ}\text{C}$ );  $\gamma_b$  – Trọng lượng riêng của bê tông, thường lấy bằng 2500 (kg/ $\text{m}^3$ ).



**Hình 2.** Sự ảnh hưởng điều kiện thời tiết đến chế độ nhiệt trong bê tông khối lớn.

Bê tông sử dụng chất kết dính có nhiệt thủy hóa cao sẽ dẫn đến nhiệt độ tối đa trong lòng khối bê tông tăng cao. Để kiểm soát hiện tượng này, việc sử dụng các loại xi măng pooc lăng có độ tỏa nhiệt thấp hoặc vừa, cũng như xi măng kết hợp với phụ gia như tro bay, giúp giảm đáng kể nhiệt độ tối đa trong lòng bê tông khối lớn. Việc sử dụng phụ gia hóa học như phụ gia giảm nước, phụ gia cuốn khí và phụ gia siêu dẻo trong bê tông khối lớn không chỉ giúp giảm hàm lượng xi măng mà còn giúp kiểm soát và làm giảm nhiệt độ trong quá trình thủy hóa, đặc biệt trong giai đoạn tăng nhiệt. Khoáng độn như tro bay hoặc xỉ lò cao có tác dụng giảm nhiệt độ phát sinh từ phản ứng thủy hóa của xi măng. Tro bay giúp giảm lượng nhiệt tỏa ra và làm chậm quá trình thủy hóa, trong khi xỉ lò cao hiệu quả trong việc giảm tốc độ tỏa nhiệt. Tài liệu [24] chỉ ra rằng, thay thế 10 kg/ $\text{m}^3$  xi măng bằng xỉ lò cao hoặc tro bay có thể làm giảm nhiệt độ trong bê tông khoảng từ 0.5 $^{\circ}\text{C}$  đến 1 $^{\circ}\text{C}$ . Thời gian thi công, nhiệt độ môi trường và điều kiện khí hậu vào thời điểm

thi công cũng có ảnh hưởng đến nhiệt độ tối đa  $T_{max}$  và quá trình tỏa nhiệt của bê tông khối lớn [24], như được minh họa ở Hình 2. Trong giai đoạn tăng nhiệt, sự tỏa nhiệt chủ yếu xảy ra ở phần bê tông phía ngoài, do tiếp xúc với môi trường không khí và chịu ảnh hưởng của quá trình làm nguội. Tốc độ tỏa nhiệt của khối bê tông tỷ lệ thuận với tỷ số giữa diện tích bề mặt thoát nhiệt và thể tích khối bê tông. Đối với các kết cấu bê tông thông thường không có kích thước lớn, nhiệt thủy hóa của xi măng được giải phóng nhanh, hạn chế sự chênh lệch nhiệt độ trong khối bê tông, do đó, nhiệt độ tối đa không quá lớn và quá trình thoát nhiệt diễn ra nhanh chóng.

## 2.2. Giai đoạn hạ nhiệt độ

Sau khi đạt nhiệt độ lớn nhất  $T_{max}$ , nhiệt độ trong khối bê tông sẽ giữ ổn định trong vài ngày trước khi bắt đầu giảm và bước vào giai đoạn hạ nhiệt. Giai đoạn này có thể diễn ra sau 4 đến 10 ngày tùy thuộc vào kích thước khối bê tông và có thể kéo dài cho đến khi nhiệt độ bên trong và bên ngoài đạt được trạng thái cân bằng. Trong quá trình giảm nhiệt, bê tông phía trong lòng khối co lại do hạ nhiệt, nhưng sự co này bị kìm hãm bởi nền đất hoặc sự co ngót không đồng đều giữa các phần khác nhau của khối bê tông. Điều này tạo ra ứng suất kéo bên trong khối bê tông, khác với ứng suất nén xuất hiện trong giai đoạn tăng nhiệt. Ứng suất kéo dần dần tích lũy theo thời gian, và khi vượt quá giới hạn chịu kéo của bê tông, vết nứt sẽ xuất hiện. Đây thường là các vết nứt sâu, có thể là nứt xuyên qua khối bê tông, gây nguy hiểm cho khả năng chịu lực của kết cấu công trình. Nhiệt độ trong giai đoạn giảm nhiệt tại một vị trí bất kỳ cách bề mặt khối bê tông một khoảng  $x$  có thể được xác định theo công thức sau:

$$\frac{R_x}{R_0} = e^{-x \sqrt{\frac{\pi}{h^2 \times \gamma}}} \quad (3)$$

trong đó  $R_x$  – Nhiệt độ tại vị trí cách bề mặt khối bê tông 1 khoảng  $m$  ( $^{\circ}\text{C}$ );  $R_0$  – Nhiệt độ tại bề mặt của khối, tức  $x = 0 \text{ m}$  ( $^{\circ}\text{C}$ );  $x$  – Khoảng cách của điểm khảo sát (m);  $h^2$  – Mức độ khuếch tán nhiệt độ ( $\text{m}^2/\text{h}$ );  $\gamma$  – Thời gian của chu kỳ nhiệt độ biến động trong ngày;

Việc xác định khoảng thời gian của giai đoạn hạ nhiệt  $t_{nn}$  của bê tông khối lớn là một bài toán phức tạp vì khoảng thời gian  $t_{nn}$  phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau như điều kiện thời tiết, môi trường xung quanh; khả năng tản nhiệt của các loại cốt liệu, xi măng; dạng kết cấu cũng như khối tích của kết cấu. Theo tài liệu [33],  $t_{nn}$  có thể được xác định sơ bộ dựa vào một số đại lượng

$$t_{nn} \in \left\{ \frac{\theta_m}{\theta_0}, f\left(\frac{h^2 \times t}{\theta_0}\right); f(s) \right\} \quad (4)$$

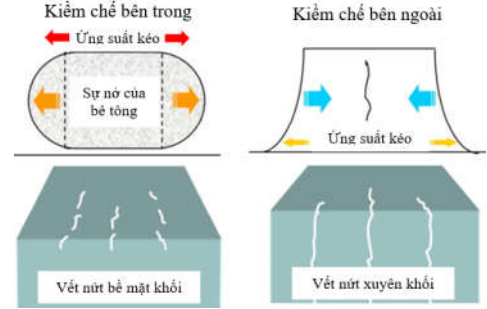
trong đó  $\theta_m$  – là chênh lệch nhiệt độ tại thời điểm khảo sát giữa khối bê tông khối lớn và môi trường xung quanh ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\theta_0$  – là chênh lệch nhiệt độ ban đầu giữa khối bê tông khối lớn và môi trường xung quanh ( $^{\circ}\text{C}$ );  $h^2$  – là hệ số khuếch tán nhiệt độ ( $\text{m}^2/\text{ngày}$ );  $D$  – là bề dày của kết cấu bê tông khối lớn (m);  $t$  – là thời gian (ngày);  $f(s)$  – là loại kết cấu;

Trong nghiên cứu này, việc xác định khoảng thời gian hạ nhiệt  $t_{nn}$  của khối bê tông để khối bê tông đến giai đoạn ổn định nhiệt sẽ được xác định dựa vào quá trình mô phỏng số. Sau giai đoạn hạ nhiệt, nhiệt độ bê tông sẽ duy trì ổn định đến hết tuổi của cấu kiện và chỉ có sự thay

đổi nhỏ diễn ra ở lớp bề mặt do sự thay đổi của nhiệt độ môi trường bên ngoài.

2.3. Cơ chế gây nứt kết cấu bê tông khối lớn

Theo tiêu chuẩn Mỹ ACI 207.1R [19], kết cấu bê tông khối lớn có thể xuất hiện các vết nứt do sự tác động đồng thời của hai yếu tố là chênh lệch nhiệt độ giữa các phần khác nhau của khối bê tông và sự co không đều. Trong khi đó, theo kinh nghiệm của Nga [31], nguyên nhân chính dẫn đến sự hình thành các vết nứt nhiệt trong bê tông khối lớn là sự phân bố nhiệt độ không đều trong khối bê tông giữa tâm khối và bề mặt khối, giữa tâm khối và đáy khối, và giữa tâm khối và các sườn của khối đổ. Như vậy, có thể thấy với các kết cấu bê tông khối lớn dạng khối móng, bê tông khối lớn có thể xảy ra hiện tượng nứt do ứng suất phát sinh từ sự thay đổi thể tích không đều và sự kìm giữ của khối bê tông [24]. Sự thay đổi thể tích này được hình thành từ nhiều yếu tố, bao gồm quá trình co khô, sự ngót, nở nhiệt của bê tông và chênh lệch nhiệt độ  $\Delta T$  giữa các vùng khác nhau trong khối bê tông. Cơ chế nứt trong bê tông khối lớn được mô tả tóm tắt trong Hình 3. Sự thay đổi nhiệt độ trong khối bê tông có thể phân ra làm 2 giai đoạn: i) giai đoạn tăng nhiệt: trong giai đoạn này, nhiệt độ của bê tông liên tục tăng, làm cho phần bê tông phía trong có xu hướng nở nhiệt. Ứng suất phát sinh trong lòng khối bê tông lúc này chủ yếu là ứng suất nén nên không gây nguy hiểm cho kết cấu bê tông. Sau đó, nhiệt độ dần ổn định trong vài ngày, và bê tông không còn có hiện tượng nở hay co. Tuy nhiên, trong giai đoạn tăng nhiệt, phần bê tông phía ngoài lại bị tác động bởi môi trường không khí mát hơn nên có khuynh hướng co lại, nhưng bị lớp bê tông bên trong có nhiệt độ cao hơn kìm giữ. Chính sự kìm giữ này dẫn đến sự hình thành ứng suất kéo trong lớp bê tông bề mặt. Khi ứng suất kéo này vượt quá giới hạn chịu kéo của bê tông, các vết nứt sẽ xuất hiện trên bề mặt bê tông; ii) giai đoạn giảm nhiệt: trong giai đoạn này, phần bê tông phía trong bắt đầu nguội dần và có hiện tượng co lại. Tuy nhiên, quá trình co này bị kìm giữ bởi nền đá hoặc do sự co không đồng đều giữa các phần khác nhau của khối bê tông. Sự kìm giữ này làm phát sinh ứng suất kéo bên trong khối bê tông. Khi ứng suất kéo vượt quá giới hạn chịu kéo của vật liệu bê tông, các vết nứt sẽ xuất hiện. Một yếu tố quyết định giá trị ứng suất kéo trong bê tông chính là chênh lệch nhiệt độ giữa tâm khối bê tông với bề mặt khối  $\Delta T$ . Đây cũng sẽ là một trong ba thông số quan trọng được sử dụng trong bài báo, cùng với nhiệt độ lớn nhất ở tâm khối đổ  $T_{max}$  và chỉ số nứt  $I_{cr}$  để đánh giá hiệu quả của biện pháp làm mát cốt liệu đến chế độ nhiệt trong bê tông khối lớn.



Hình 3. Cơ chế gây nứt trong bê tông khối lớn.

3. Lý thuyết nền tảng về trường nhiệt độ - ứng suất trong bê tông khối lớn

Phân tích nhiệt thủy hóa trong bê tông khối lớn có thể được thực hiện thông qua hai quá trình chính: i) phân tích truyền nhiệt, và ii) phân tích ứng suất nhiệt. Phân tích truyền nhiệt là xác định sự thay đổi nhiệt độ tại các điểm nút theo thời gian, dựa trên các yếu tố như nguồn nhiệt, đối lưu, và dẫn nhiệt liên quan đến quá trình thủy hóa xi măng. Phân tích ứng suất nhiệt sau đó sẽ tính toán ứng suất phát sinh trong bê tông khối lớn ở mỗi giai đoạn, dựa trên sự thay đổi nhiệt độ theo thời gian. Các tính toán này cũng bao gồm sự thay đổi của tính chất vật liệu phụ thuộc vào thời gian và nhiệt độ, hiện tượng co ngót theo thời gian, và từ biến chịu ảnh hưởng bởi cả thời gian và ứng suất.

3.1. Quá trình thủy hoá trong bê tông khối lớn

Dẫn nhiệt là một dạng cơ bản của quá trình truyền nhiệt, liên quan đến sự trao đổi năng lượng. Đây là một trong những cơ chế chủ yếu mà qua đó nhiệt lượng được truyền từ vị trí này sang vị trí khác. Đối với chất lỏng, năng lượng được trao đổi thông qua sự chuyển động hoặc va chạm của các phân tử chất lỏng. Tuy nhiên, đối với chất rắn, như bê tông khối lớn, quá trình dẫn nhiệt diễn ra thông qua sự chuyển động của các electron, từ vùng có nhiệt độ cao đến vùng có nhiệt độ thấp hơn. Mô hình số của bài toán nhiệt độ phi ổn định, có xét đến quá trình tỏa nhiệt do quá trình thủy hóa của xi măng, dựa trên việc giải phương trình của lý thuyết dẫn nhiệt [3,4,34,35], có thể được trình bày như phương trình sau:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q_v \tag{5}$$

trong đó  $T$  là nhiệt độ của phần tử ở thời điểm  $t$  (°C);  $\lambda$  là hệ số dẫn nhiệt của vật liệu (W/m°C);  $q_v$  thể hiện lượng nhiệt được tạo ra trong phạm vi của một đơn vị thể tích vật liệu (W/m³);  $C$  ký hiệu cho nhiệt dung riêng của bê tông, là lượng nhiệt cần thiết để làm tăng nhiệt độ của một kilogram bê tông lên 1°C (J/kg°C);  $\rho$  là khối lượng riêng của bê tông (kg/m³); và  $t$  là thời gian.

Phương trình (5) có thể được viết lại dưới dạng ma trận để dùng cho phương pháp số như sau:

$$C \cdot \dot{T} + \bar{K} \cdot T = Q \tag{6}$$

ở đây  $C$  là ma trận nhiệt dung riêng;  $\bar{K}$  biểu thị ma trận dẫn nhiệt bao gồm cả dẫn nhiệt và đối lưu nhiệt;  $Q$  là vectơ thông lượng nhiệt tổng hợp từ thủy hóa bên trong và đối lưu nhiệt;  $T$  là vectơ nhiệt độ nút; và



Tký hiệu đạo hàm theo thời gian của các vectơ nhiệt độ tại điểm nút.

Hệ số dẫn nhiệt của bê tông thường giảm khi nhiệt độ tăng, đặc biệt là ở gần nhiệt độ môi trường [3,36]. Các điều kiện biên của Phương trình (5) và (6) được diễn giải chi tiết hơn thông qua các phương trình sau:

Ở biên nhiệt độ cố định, chính là điều kiện biên nhiệt độ của đất nền

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (7)$$

trong đó  $k$  là cosin phương của bề mặt truyền nhiệt đang được xem xét, tương ứng với ba hướng không gian  $x, y, z$  và  $T$  là nhiệt độ ở biên ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Ở biên truyền nhiệt, chính là bề mặt giữa các lớp bê tông

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q_V \quad (8)$$

ở đây  $q_V$  lượng nhiệt được tạo ra trên một đơn vị thể tích ở thời điểm  $t$  ( $\text{kcal}/\text{m}^3$ ).

Ở biên đối lưu, chính là bề mặt bê tông tiếp xúc với khuôn đúc hoặc môi trường xung quanh

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T - T_{\infty}) \quad (9)$$

ở đây  $h_c$  là hệ số đối lưu ( $\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{\circ}\text{C}$ ),  $T$  mô tả nhiệt độ ở bề mặt đối lưu ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{\infty}$  là nhiệt độ môi trường ( $^{\circ}\text{C}$ ), và  $n$  là cosin phương của bề mặt truyền nhiệt đang được xem xét.

### 3.2. Nguồn nhiệt

Nguồn nhiệt trong bê tông sinh ra từ nhiệt được sinh ra trong quá trình thủy hóa xi măng bên trong khối bê tông. Quá trình này đóng vai trò quan trọng trong việc xác định sự phát triển nhiệt độ của bê tông trong quá trình gia nhiệt. Xi măng thường chứa các khoáng clinker như  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  và  $\text{C}_4\text{AF}$ . Khi phản ứng với nước, phản ứng thủy hóa của các khoáng clinker này sẽ sinh ra nhiệt. Tùy thuộc vào hàm lượng xi măng và thành phần của từng khoáng, tốc độ phản ứng và lượng nhiệt tỏa ra sẽ là khác nhau. Vì bê tông là một vật liệu có hệ số dẫn nhiệt thấp, nhiệt sinh ra từ quá trình thủy hóa xi măng không thoát ra nhanh mà tích tụ bên trong khối bê tông. Hơn nữa, do tốc độ tỏa nhiệt tỉ lệ thuận với tỷ lệ diện tích bề mặt trên thể tích của bê tông, nên tốc độ tỏa nhiệt trong bê tông khối lớn chậm hơn nhiều so với các kết cấu bê tông thông thường. Theo [24,37], lượng nhiệt sinh ra trên mỗi đơn vị thể tích bê tông và nhiệt độ tương ứng của bê tông ở các thời điểm khác nhau trong quá trình bảo dưỡng được xác định thông qua Phương trình (10) và (11), như sau:

$$q_V = \frac{1}{24} \rho C K e^{-\alpha t} \quad (10)$$

$$T(t) = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (11)$$

trong đó  $q_V$  lượng nhiệt sinh ra trên mỗi đơn vị thể tích ( $\text{kcal}/\text{m}^3$ );  $\rho$  là trọng lượng riêng của bê tông ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $C$  là nhiệt dung riêng của bê tông ( $\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ );  $t$  là thời gian (ngày);  $\alpha$  là hệ số mô tả mức độ thủy hoá, trong khoảng từ 0 đến 1;  $K$  là nhiệt độ tối đa của bê tông trong điều kiện đoạn nhiệt ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T(t)$  là nhiệt độ của bê tông ở tuổi  $t$  (ngày) ( $^{\circ}\text{C}$ ). Chú ý ở đây là mức độ thủy hóa  $\alpha$  phụ thuộc vào nhiều yếu tố như hàm lượng xi măng, nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông, và tuổi của bê tông. Nó chính là là tỷ lệ giữa lượng nhiệt sinh ra từ đầu quá trình thủy hóa đến thời điểm  $t$ , và tổng lượng nhiệt được tạo ra từ quá trình thủy hoá.

### 3.3. Mối quan hệ giữa trường ứng suất và nhiệt độ

Theo [24,38], sự tăng lên trong chênh lệch nhiệt độ  $\Delta T$  giữa các phần trong khối bê tông sẽ dẫn đến sự gia tăng tương ứng của ứng suất nhiệt trong khối bê tông. Mối quan hệ giữa ứng suất nhiệt và chênh lệch nhiệt độ có thể được mô tả thông qua Phương trình (12) dưới đây:

$$\sigma = E \cdot \beta \cdot R \cdot \Delta T \quad (12)$$

ở đây  $\sigma$  là vectơ ứng suất tại điểm khảo sát ( $\text{Kgf}/\text{m}^2$ );  $R$  ký hiệu cho ma trận khả năng chống biến dạng của bê tông, ma trận này mô tả việc bê tông chống lại biến dạng dưới ứng suất và điều kiện khác nhau, và có giá trị từ 0 đến 1;  $E$  là mô đun đàn hồi của bê tông ( $\text{Kgf}/\text{m}^2$ );  $\Delta T$  là vectơ gradient nhiệt độ; và  $\beta$  là hệ số giãn nở nhiệt của bê tông.

### 3.4. Các tham số nhiệt cho quá trình mô phỏng số

#### a) Nhiệt dung riêng

Nhiệt dung riêng của bê tông đóng vai trò quan trọng trong việc xác định sự thay đổi nhiệt độ bên trong khối bê tông. Nó biểu thị lượng nhiệt cần thiết để tăng nhiệt độ của 1 kg bê tông lên  $1^{\circ}\text{C}$ . Thông số này bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như tỷ lệ bọt khí của hồ xi măng, hàm lượng nước, và các thuộc tính nhiệt của các thành phần cấp phối của bê tông. Theo Hiệp hội Bê tông Nhật Bản [24], nhiệt dung riêng của bê tông thường dao động từ 0,27 đến 0,31  $\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ , trong khi tiêu chuẩn ACI 207.2R-07 của Mỹ [22] quy định giá trị này trong khoảng từ 0,22 đến 0,24  $\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ . Trong bài báo này, giá trị nhiệt dung riêng 0.25  $\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$  sẽ được sử dụng, như được mô tả trong Bảng 3.

#### b) Hệ số đối lưu nhiệt

Đối lưu tự nhiên là một quá trình truyền nhiệt, trong đó sự trao đổi nhiệt giữa dòng chất lỏng và bề mặt của khối chất rắn diễn ra do sự chuyển động của các phân tử trong dòng chảy. Cường độ của quá trình đối lưu tự nhiên chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố, bao gồm loại ván khuôn sử dụng, thời gian giữ ván khuôn, các phương pháp bảo dưỡng áp dụng, cũng như tốc độ gió tại khu vực thi công. Ảnh hưởng tích lũy của đối lưu tự nhiên được biểu diễn bằng toán học thông qua định luật làm lạnh của Newton, như được trình bày trong Phương trình (13) dưới đây:

$$Q = h_c A (T_s - T_{\infty}) \quad (13)$$

trong đó  $Q$  là thông lượng nhiệt ( $\text{kcal}/\text{h}$ );  $h_c$  là hệ số đối lưu nhiệt ( $\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}^{\circ}\text{C}$ );  $A$  là diện tích bề mặt ( $\text{m}^2$ );  $T_s$  là nhiệt độ ở bề mặt khối bê tông ( $^{\circ}\text{C}$ ); và  $T_{\infty}$  là nhiệt độ của môi trường xung quanh ( $^{\circ}\text{C}$ ). Chú ý ở đây là hệ số đối lưu  $h_c$  phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm loại dòng chảy, thuộc tính vật lý của dòng chảy, nhiệt độ trung bình của bề mặt tiếp xúc với đối lưu, vị trí, cấu trúc hình học, diện tích tiếp xúc với dòng chảy, và các tham số liên quan khác. Phân tích đối lưu trở nên đặc biệt quan trọng trong bê tông khối lớn, khi mà kiến thức về sự truyền nhiệt giữa bề mặt bê tông và không khí xung quanh là rất cần thiết.

### 3.5. Chỉ số nứt do nhiệt

Theo tài liệu [24], chỉ số nứt do nhiệt  $I_{cr}$  của kết cấu bê tông khối lớn được định nghĩa như là tỉ số của cường độ kéo tách của bê tông chia cho ứng suất kéo do nhiệt được tính trong toàn bộ quá trình diễn biến của nhiệt độ, và được xác định theo Phương trình (14) dưới đây. Khái niệm chỉ số nứt do nhiệt  $I_{cr}$  được đề cập trong hướng dẫn của hiệp hội bê tông Nhận Bản JCI [24] cũng như Viện bê tông Hàn quốc [39].

$$I_{cr} = \frac{f_t(t_e)}{\sigma_t(t_e)} \quad (14)$$

$$f_t(t_e) = C_1 x f'_c(t_e)^{C_2} \quad (15)$$

trong đó  $f_t(t_e)$  – giá trị thiết kế cường độ kéo tách bê tông tại thời điểm  $t_e$  (Kgf/m<sup>2</sup>), xác định theo Phương trình (15);  $\sigma_t(t_e)$  – ứng suất kéo trong kết cấu bê tông tại thời điểm  $t_e$  (Kgf/m<sup>2</sup>);  $C_1, C_2$  – hằng số phụ thuộc vào loại bê tông;  $f'_c(t_e)$  – cường độ nén của bê tông tại thời điểm  $t_e$  (Kgf/m<sup>2</sup>), xác định theo Phương trình (16); và  $t_e$  – tuổi chỉnh nhiệt độ (ngày):

$$f'_c(t_e) = C_1 x f'_c(t_e)^{C_2} \quad (16)$$

ở đây  $a, b$  – hệ số phát triển cường độ, phụ thuộc vào loại bê tông. Trong nghiên cứu này, giá trị  $a, b$  được lấy như ở Bảng 3; và  $f'_c(28)$  – cường độ nén bê tông ở tuổi 28 ngày.

#### 4. Kiểm chứng mô hình và phương pháp mô phỏng số

Mục này được thực hiện nhằm kiểm chứng tính chính xác và độ tin cậy của phương pháp cũng như quy trình mô phỏng đề xuất bằng cách so sánh kết quả từ mô phỏng số với kết quả thực nghiệm. Khối bê tông với kích thước 2,5 × 2,5 × 2,5 m sẽ được thí nghiệm, và kết quả từ mô phỏng số với các điều kiện tương ứng thí nghiệm sẽ được so sánh với kết quả thực nghiệm. Bê tông sử dụng cho khối bê tông có cấp độ bền B30 và độ sụt 16 ± 2 cm. Cấp phối thiết kế chi tiết của các lớp bê tông trên và dưới được trình bày trong Bảng 1. Hệ ván khuôn thí nghiệm làm bằng thép định hình, được đỡ bởi các thanh gỗ kết hợp với các thanh thép và các thanh chống chéo. Phía bên ngoài, hệ ván khuôn được bọc bằng các tấm vật liệu cách nhiệt để giữ nhiệt trong khối bê tông. Trong quá trình thi công, bê tông được đổ liên tục bằng bơm cần và đầm chặt kỹ lưỡng, như mô tả trong Hình 4. Sau khi đổ và hoàn thiện bề mặt, một lớp nylon và vật liệu cách nhiệt được áp dụng để ngăn nhiệt thoát ra. Bê tông được bảo dưỡng khô mà không cần nước. Nhiệt độ bề mặt khối bê tông được theo dõi để kiểm soát sự chênh lệch nhiệt độ giữa lõi và bề mặt. Thiết bị thí nghiệm bao gồm các cảm biến nhiệt độ trong khối bê tông và cảm biến nhiệt độ mặt đất, một thiết bị ghi dữ liệu, thiết bị đo nhiệt độ bảo dưỡng, thiết bị đo nhiệt độ ván khuôn, và một đơn vị đo nhiệt độ và độ ẩm môi trường. Các vị trí đo nhiệt độ trong khối bê tông được hiển thị trong Hình 5 (a). Có ba cọc đo nhiệt độ đặt tại trung tâm, cạnh và góc khối bê tông. Mỗi cọc có sáu vị trí đo nhiệt độ, như mô tả trong Hình 5 (b), với hai cảm biến nhiệt độ ở mỗi vị trí. Việc đặt hai cảm biến nhiệt độ tại một vị trí đảm bảo kiểm soát nhiệt độ chính xác, đảm bảo rằng ngay cả trong trường hợp một cảm biến bị hỏng, kết quả vẫn được ghi lại đầy đủ. Do đó, khối bê tông sẽ có 36 cảm biến nhiệt độ tại 18 vị trí. Ngoài ra, dữ liệu nhiệt độ của lõi lớp bảo dưỡng, bề mặt ván khuôn, và mặt đất cũng được thu thập. Khi nhiệt độ khối bê tông gần đạt nhiệt độ môi trường, lớp bảo

đưỡng sẽ được gỡ bỏ. Lưu ý rằng quá trình đo nhiệt độ và độ ẩm môi trường được ghi lại liên tục, trong khi ở giai đoạn đầu sau khi đổ bê tông, khi nhiệt độ đang tăng, nhiệt độ bê tông được đo mỗi giờ. Sau đó, nhiệt độ được đo mỗi 3 giờ cho đến khi nhiệt độ bê tông dần ổn định với môi trường sau 216 giờ. Phân tích trường ứng suất-nhiệt độ được thực hiện bằng công cụ phân tích nhiệt phần tử hữu hạn của phần mềm Midas/Civil [40]. Mô hình tổng thể bao gồm 10.000 phần tử đặc và 11.781 nút, với mô hình khối bê tông gồm 1.000 phần tử đặc và 1.210 nút. Đầu đo nhiệt độ và bảo dưỡng gồm 9.000 phần tử đặc và 10.571 nút, và các khai báo điều kiện biên được

thể hiện trong Hình 5 (d).

Đầu đo nhiệt độ bảo dưỡng và ván khuôn



Thiết bị đo nhiệt độ và độ ẩm môi trường

Thiết bị đọc dữ liệu

Thiết bị đo nhiệt độ bê tông trong khối bê tông

(a) các thiết bị đo đạc trong thí nghiệm



(b) Đo độ sụt bê tông tại hiện trường



(c) Đo nhiệt độ bê tông trước khi đổ



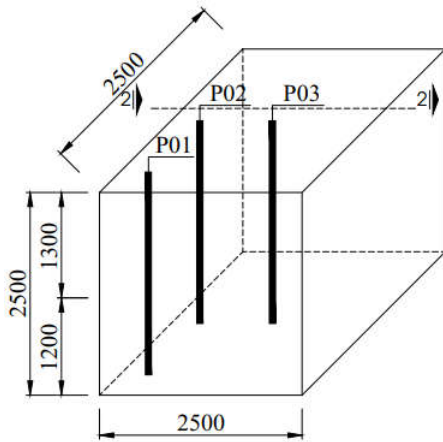
(d) Bảo dưỡng khối bê tông



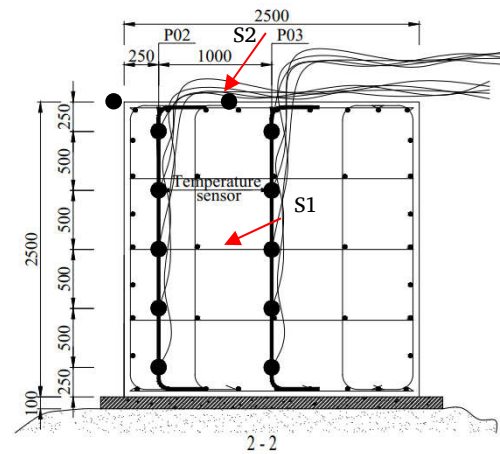
(e) Khối bê tông sau khi đổ bê tông  
**Hình 4.** Thiết bị và quá trình thi công khối bê tông.

**Bảng 1.** Thiết kế cấp phối bê tông cho thí nghiệm.

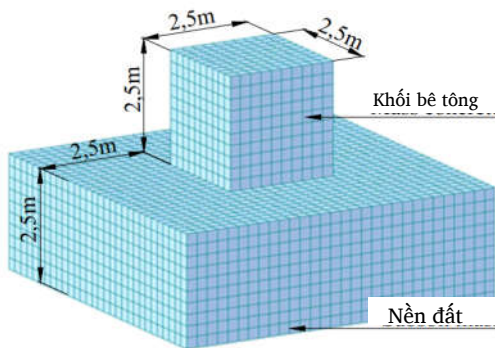
	Xi măng (kg/m <sup>3</sup> )	Tro bay (kg/m <sup>3</sup> )	Phụ gia (kg/m <sup>3</sup> )	Cát (kg/m <sup>3</sup> )	Đá (kg/m <sup>3</sup> )	Nước (kg/m <sup>3</sup> )
Lớp trên (0,5m)	385,0	-	3,80	858,5	1015,0	131,5
Lớp dưới (2,0m)	308,0	77,0	3,80	858,4	1015,2	131,6



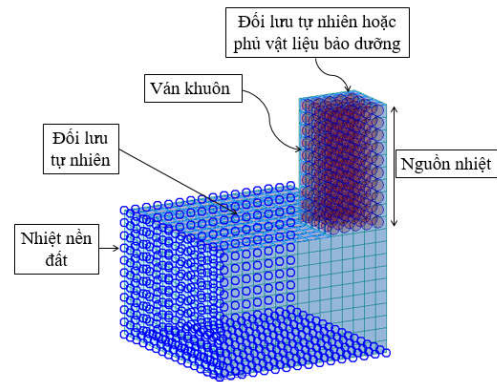
(a) vị trí đặt đầu đo nhiệt độ



(b) vị trí chi tiết của đầu đo

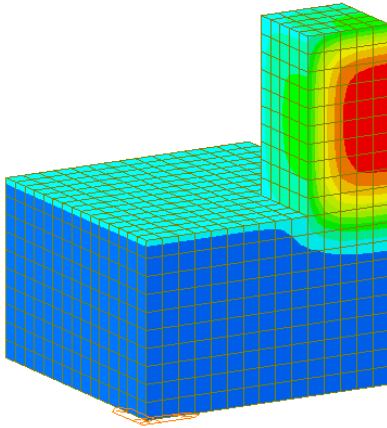


(c) Mô hình số khối bê tông

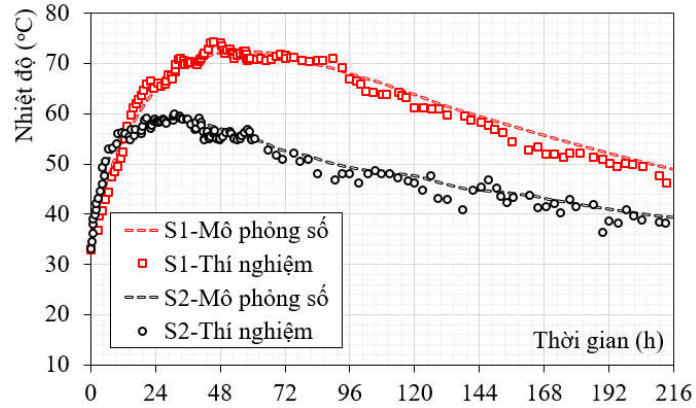


(d) Phân bố trường nhiệt độ trong mô phỏng





(e) Phân bố trường nhiệt độ trong mô phỏng



(f) So sánh sự phát triển nhiệt độ ở điểm S1 và S2 giữa thí nghiệm và mô phỏng số

**Hình 5.** So sánh chế độ nhiệt trong bê tông khối lớn giữa mô phỏng số và thí nghiệm.

Kết quả so sánh về nhiệt độ giữa mô phỏng và thực nghiệm cho thấy biểu đồ phát triển nhiệt độ đo được từ khối bê tông thực nghiệm và mô phỏng số là tương đối gần nhau, như được minh họa trong Hình 5 (f) trong khi phân bố trường nhiệt độ của khối bê tông được thể hiện trong Hình 5 (e). Sự tương đồng về quá trình phát triển nhiệt độ cũng như giá trị lớn nhất của nó tại cả 3 trục khảo sát tâm, biên và góc đã cho thấy độ tin cậy, tính chính xác của quy trình và phương pháp mô phỏng số. Nhiệt độ lớn nhất ở trục tâm theo mô hình số  $T_{max} = 72,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  so sánh với kết quả thực nghiệm là  $T_{max} = 75,3^{\circ}\text{C}$ . Nhiệt độ lớn nhất ở trục biên được tiên đoán bởi mô hình số là  $T_{max} = 66,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  so sánh với kết quả từ thực nghiệm là  $T_{max} = 69,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Trong khi đó, nhiệt độ lớn nhất ở trục góc dự đoán theo mô hình phần tử hữu hạn là  $T_{max} = 64,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  cao hơn so với kết quả từ thực nghiệm chỉ  $2,0^{\circ}\text{C}$ , một sự khác nhau của chỉ  $3,1\%$ . Sự tương đồng trong mô hình phát triển nhiệt độ và các giá trị nhiệt độ cực đại tại các điểm khảo sát đã cho thấy độ tin cậy và tính nhất quán giữa mô phỏng và thí nghiệm. Kết quả này chứng minh độ tin cậy của quá trình mô phỏng số sử dụng công cụ Midas/Civil. Do đó, các kết quả mô phỏng được mở rộng tiếp theo trong bài báo này là có giá trị và có thể phản ánh chính xác ứng xử thực tế của trường ứng suất-nhiệt độ trong khối bê tông.

## 5. Kết quả khảo sát và thảo luận

Việc nghiên cứu chế độ nhiệt trong bê tông khối lớn ở giai đoạn hạ nhiệt được thực hiện thông qua đánh giá 3 thông số chính: i) nhiệt độ lớn nhất ở tâm khối  $T_{max}$ , ii) chênh lệch nhiệt độ giữa trung tâm và bề mặt của khối  $\Delta T$ , và chỉ số nứt nhiệt  $I_{cr}$  quan sát ở tâm khối cho giai đoạn hạ nhiệt. Ngoài ra, thời gian của giai đoạn hạ nhiệt cũng được xem xét, cùng với thời gian ở giai đoạn tăng nhiệt. Hai giá trị này sẽ cung cấp một đại lượng về thời gian phát triển nhiệt trong bê tông khối lớn.

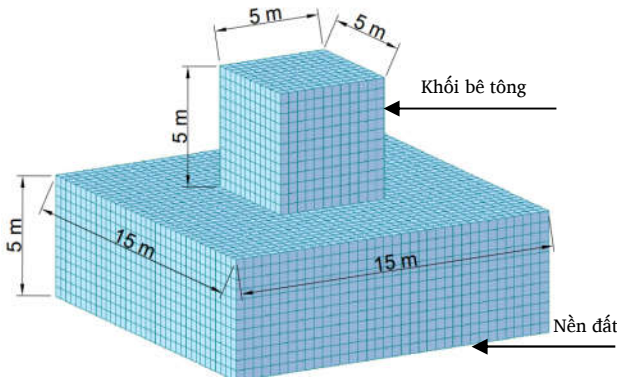
### 5.1. Mô hình số khối bê tông cho khảo sát

Đối tượng cho nghiên cứu khảo sát chế độ nhiệt trong bê tông khối lớn sử dụng giải pháp làm mát cốt liệu là một kết cấu đài móng khối lớn điển hình, bao gồm một khối đất có kích thước  $15,0 \times 15,0 \times 5,0\text{ m}$  và một khối móng bê tông ở phía trên có kích thước  $5,0 \times 5,0 \times 5,0\text{ m}$ ; như minh họa trong Hình 6. Dữ liệu vật liệu bê tông và thuộc tính phân tích nhiệt thủy hóa được sử dụng theo Bảng 3. Thiết kế cấp phối bê tông, với loại bê tông M400 hoặc B35, sẽ được áp dụng trong nghiên cứu, như chi tiết trong Bảng 2. Mô hình tổng thể bao gồm 10000 phần tử khối và 11781 nút, trong đó mô hình khối bê tông gồm 1000 phần tử khối và 1210 nút, còn mô hình khối đất nền bên dưới bao gồm 9000 phần tử khối và 10571 nút. Bỏ qua ảnh hưởng của các kết cấu bê tông lót và cọc. Chênh lệch nhiệt độ được tính toán giữa điểm ở tâm khối và ở bề mặt khối cho cùng một thời điểm. Theo [24], mô hình hóa cốt thép trong bê tông khối lớn là không cần thiết vì sự cản trở của cốt thép thường không đáng kể, do đó tác động lên ứng suất nhiệt là tối thiểu. Thực tế, nhiều nghiên cứu về các vấn đề nhiệt trong bê tông khối lớn không xem xét mô phỏng cốt thép trong phân tích nhiệt. Trong nghiên cứu này, cốt thép sẽ được loại bỏ khỏi mô hình.

**Bảng 2.** Thiết kế cấp phối bê tông cho điều tra số.

Xi măng (kg/m <sup>3</sup> )	Tro bay (kg/m <sup>3</sup> )	Phụ gia (kg/m <sup>3</sup> )	Cát (kg/m <sup>3</sup> )	Đá (kg/m <sup>3</sup> )	Nước (kg/m <sup>3</sup> )
400	0	3,80	858,5	1015,0	131,5





Hình 6. Mô hình khối bê tông cho khảo sát.

Bảng 3. Vật liệu và các thuộc tính về nhiệt

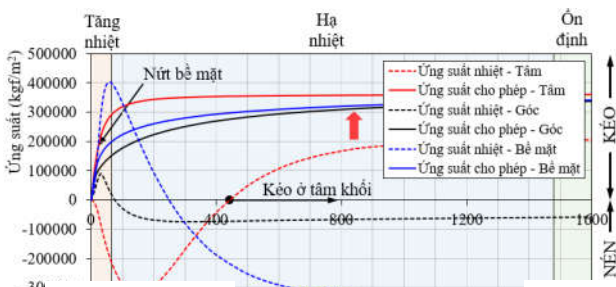
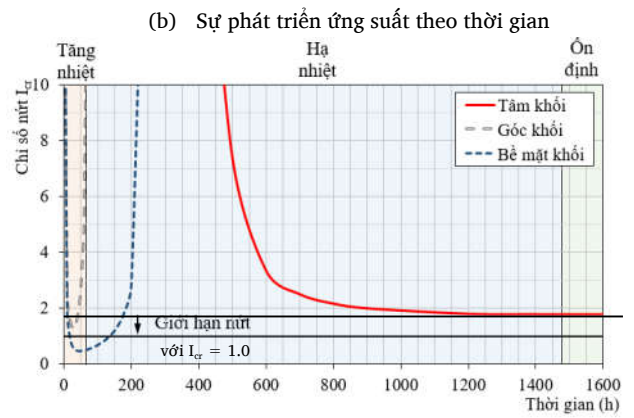
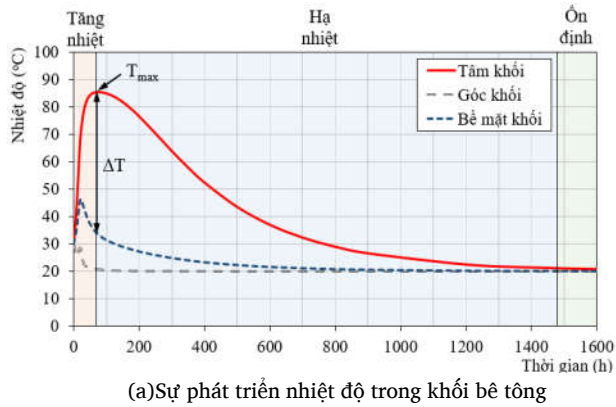
Đặc điểm	Unit	Concrete	Subsoil
Nhiệt dung riêng	kcal/kg°C	0,25	0,2
Khối lượng riêng	kgf/m <sup>3</sup>	2500	1800
Hệ số truyền nhiệt	kcal/m.h. °C	2,3	1,7
Nhiệt độ môi trường	°C	30	20
Hệ số phát triển cường độ nén	ACI	a = 13,9 b = 0,86	-
Mô đun đàn hồi	kG/cm <sup>2</sup>	2,7734 × 10 <sup>5</sup>	1,0 × 10 <sup>4</sup>
Hệ số giãn nở nhiệt	-	1,0 × 10 <sup>-5</sup>	1,0 × 10 <sup>-5</sup>
Hệ số Poisson	-	0,18	0,2
Loại xi măng	-	Thông thường	-
Hệ số dẫn nhiệt ván khuôn thép	W/m <sup>2</sup> .°C	14	-

5.2. Kết quả mô phỏng số và thảo luận

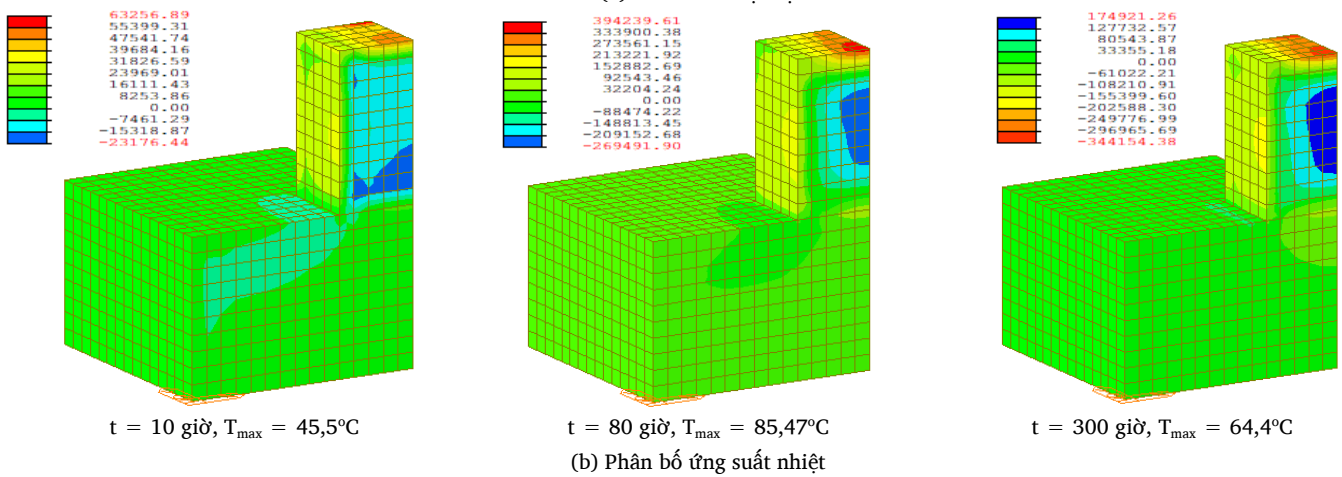
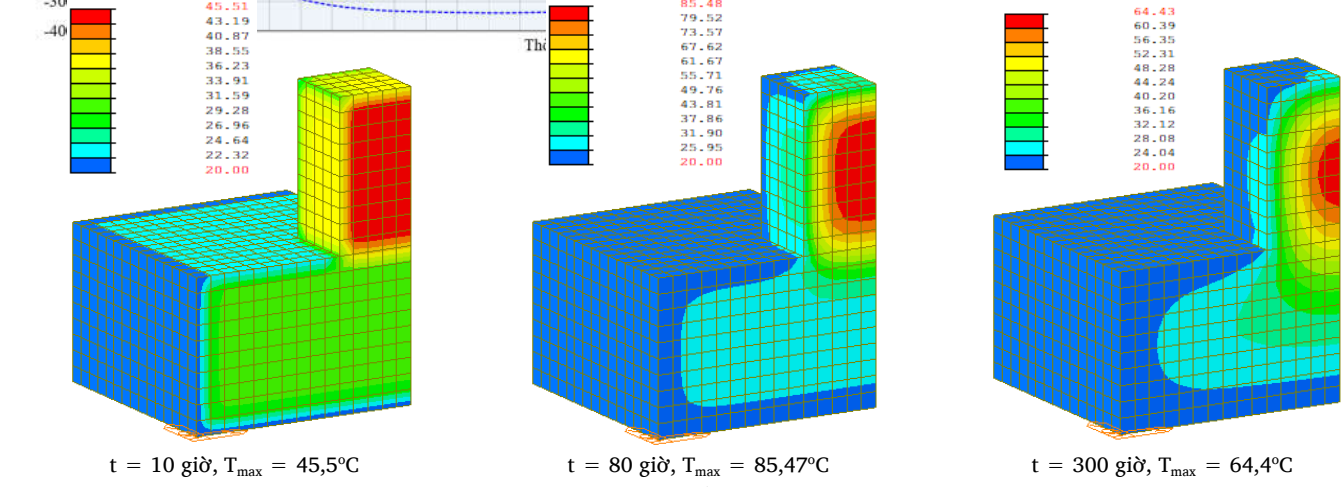
Biểu đồ trong Hình 7 (a) mô tả sự phát triển nhiệt độ trong khối bê tông khối lớn theo thời gian ở 3 vị trí đặc trưng trong khối bê tông: tâm khối, bề mặt khối và góc khối. Có thể thấy giai đoạn tăng nhiệt diễn ra trong một giai đoạn tương đối ngắn, chỉ khoảng 80 giờ từ sau khi đổ bê tông, tuy nhiên, giai đoạn hạ nhiệt lại diễn ra trong một giai đoạn dài hơn đáng kể, khoảng 1400 giờ, và sau đó nhiệt độ toàn khối đi vào ổn định khi mà nhiệt độ ở cả ba điểm đều tiệm cận với mức nhiệt độ của môi trường. Nhiệt độ lớn nhất ở tâm khối đạt  $T_{max} = 85,47^{\circ}C$  sau giai đoạn tăng nhiệt, ở 80 giờ sau khi đổ, và chênh lệch nhiệt độ tương ứng khi đó là  $\Delta T = 52,50^{\circ}C$ . Phân bố trường nhiệt độ trong toàn khối tại được thể hiện trong biểu đồ Hình 8 (a) tương ứng. 10 giờ sau khi đổ bê tông, khối bê tông toả nhiệt và nhiệt độ lớn nhất  $T_{max} = 45,5^{\circ}C$  phân bố ở hầu hết vùng trong khối bê tông, sau đó, tại thời điểm 80 giờ sau đổ, nhiệt độ khối đã đạt cực đại do sự tích tụ nhiệt  $T_{max} = 85,47^{\circ}C$  và tập trung vào vùng lõi nhiều hơn. Sau đó, khối

chuyển sang giai đoạn hạ nhiệt và ở thời điểm 300 giờ sau đổ nhiệt độ lớn nhất trong khối đã giảm xuống  $T_{max} = 64,4^{\circ}C$ .

Xem xét ở tâm khối lớn ứng suất trong bê tông, đường cong phát triển ứng suất do nhiệt và ứng suất kéo cho phép của bê tông khối lớn theo thời gian tại 3 điểm đặc trưng được thể hiện trong Hình 7 (b) trong khi phân bố trường ứng suất do nhiệt tại một số thời điểm được minh hoạ trong Hình 8 (b). Ở vị trí bề mặt của khối bê tông, những giờ đầu sau khi đổ bê tông, ứng suất do nhiệt còn nhỏ và thấp hơn giá trị ứng suất kéo cho phép của bê tông, tuy nhiên, khi nhiệt độ tăng lên, ở thời điểm khoảng 20 giờ sau khi đổ bê tông, ứng suất do nhiệt  $\sigma_n = 153705.7 \text{ kgf/m}^2$  đã vượt qua ứng suất kéo cho phép của bê tông  $\sigma_t = 127865.6 \text{ kgf/m}^2$ , vết nứt bề mặt xuất hiện. Tại thời điểm này ứng suất do nhiệt ở trong lòng khối bê tông, đường màu đỏ nét đứt, đang là nén, do đó, không có vấn đề về các vết nứt có thể xảy ra. Sau đó, khi nhiệt độ tiếp tục phát triển, ứng suất kéo ở bề mặt khối tiếp tục tăng, bề rộng vết nứt tiếp tục phát triển cho đến hết giai đoạn tăng nhiệt. Bước sang giai đoạn hạ nhiệt, ở bề mặt khối, khi ứng suất kéo do nhiệt gây ra giảm đi thì cường độ chịu kéo cho phép của bê tông lại tăng lên theo thời gian, và đến thời điểm 160 giờ sau khi đổ, ứng suất do nhiệt  $\sigma_n = 182792.4 \text{ kgf/m}^2$  đã nhỏ hơn ứng suất kéo cho phép của bê tông  $\sigma_t = 249133.5 \text{ kgf/m}^2$ , không có thêm các vết nứt do nhiệt mới xuất hiện ở bề mặt khối. Trong khi đó, tại tâm khối, giai đoạn hạ nhiệt này, ứng suất do nhiệt, đường màu đỏ nét đứt, đang nén chuyển dần sang kéo ở thời điểm khoảng 450 giờ sau đổ, và ứng suất kéo sẽ tiếp tục phát triển. Nếu trong trường hợp ứng suất kéo này vượt qua ứng suất kéo cho phép của bê tông, kết cấu sẽ bị nứt xuyên khối. Mặc dù trong ví dụ này, chưa có sự xuất hiện của vết nứt xuyên khối, nhưng hoàn toàn có thể nhìn thấy xu hướng phát triển ứng suất kéo do nhiệt tiệm cận với ứng suất kéo cho phép của bê tông ở giai đoạn hạ nhiệt. Xem xét biểu đồ chỉ số nứt Icr, khi chỉ số này nhỏ hơn 1, kết cấu sẽ được xem là nứt, và rõ ràng, kết cấu đã nứt bề mặt ở giai đoạn sớm. Ở giai đoạn hạ nhiệt, chỉ số nứt nhiệt ở tâm khối giảm đi đáng kể, mặc dù giá trị này vẫn lớn hơn 1, nhưng có thể thấy có một xu hướng tiến đến 1, như được minh hoạ trong Hình 7 (c). Điều này cho thấy, hoàn toàn có một nguy cơ nứt do nhiệt ở trong tâm khối ở giai đoạn hạ nhiệt. Và nếu như xem xét chỉ số nứt tiêu chuẩn là 1,85 tương ứng với xác suất nứt do nhiệt  $\leq 5\%$ , như một số nước thì khối móng đã nứt xuyên khối. Như vậy, ở giai đoạn hạ nhiệt, bê tông ở trong lòng khối sẽ chuyển sang trạng thái kéo và nếu như ứng suất kéo này lớn hơn ứng suất kéo cho phép của bê tông thì kết cấu hoàn toàn có thể bị nứt xuyên khối. Vết nứt này là nứt xuyên kết cấu, rất khó sửa chữa và nguy hại.



Hình 7. Chế độ nhiệt trong bê tông khối lớn được khảo sát.



Hình 8. Phân bố ứng suất và nhiệt độ trong khối bê tông được khảo sát.

## 6. Kết luận

Một nghiên cứu mô phỏng số toàn diện đã được thực hiện bằng cách sử dụng công cụ phân tích nhiệt dòng của Midas/Civil để đánh giá chế độ nhiệt trong bê tông khối lớn ở giai đoạn hạ nhiệt. Độ tin cậy và tính chính xác của phương pháp được đề xuất đã được kiểm chứng bằng cách so sánh kết quả phân tích với kết quả thực nghiệm. Từ các kết quả nghiên cứu, có thể rút ra những kết luận dưới đây:

- (1) Với cấp phối và các điều kiện biên như mô phỏng, giai đoạn tăng nhiệt diễn ra trong một khoảng thời gian ngắn, khoảng 80 giờ, trong khi giai đoạn hạ nhiệt kéo dài đáng kể, khoảng 1400 giờ, trước khi nhiệt độ trong toàn khối bê tông đạt trạng thái ổn định gần bằng nhiệt độ môi trường
- (2) Đối với bê tông ở bề mặt khối, ứng suất do nhiệt ở bề mặt bê tông đã vượt qua giới hạn chịu kéo của bê tông ở khoảng 20 giờ sau khi đổ, dẫn đến sự xuất hiện của vết nứt bề mặt. Tuy nhiên, khi ứng suất giảm dần trong giai đoạn hạ nhiệt, không có thêm các vết nứt mới phát sinh sau thời điểm 160 giờ sau khi đổ.
- (3) Trong giai đoạn hạ nhiệt, ứng suất kéo ở tâm khối bê tông có xu hướng tăng và có khả năng vượt quá giới hạn chịu kéo của bê tông, gây ra nứt xuyên khối. Mặc dù trong nghiên cứu này chưa phát hiện ra các vết nứt xuyên khối, nhưng xu hướng phát triển ứng suất kéo tiệm cận với ứng suất kéo cho phép cho thấy nguy cơ này hiện hữu
- (4) Chỉ số nứt  $I_{cr}$  ở tâm khối vẫn lớn hơn 1 trong giai đoạn hạ nhiệt, cho thấy nguy cơ nứt nhiệt ở trong tâm khối vẫn tồn tại. Tuy nhiên, nếu chỉ số nứt tiêu chuẩn là 1.85, tương ứng với xác suất nứt  $\leq 5\%$ , như một số nước trên thế giới, thì khối móng có khả năng đã bị nứt xuyên và gây nguy hại cho kết cấu.

## Tài liệu tham khảo

- [1]. Khalifah HA, Rahman MK, Al-Helal Zakariya, Al-Ghamdi Sami (2016), "Stress generation in mass concrete blocks with fly ash and silica fume-an experimental and numerical study", *Fourth international conference on sustainable construction materials and technologies*: 7-11.
- [2]. Fairbairn Eduardo MR, Azenha Miguel (2019), "Thermal cracking of massive concrete structures", *State of Art Report of the RILEM TC*.
- [3]. Zhang Xiao-fei, Li Shou-yi, Li Yan-long, Ge Yao, Li Hui (2011), "Effect of superficial insulation on roller-compacted concrete dams in cold regions", *Advances in Engineering Software*, 42 (11): 939-943.
- [4]. Onyekachukwu Elemuo Peter, Sharma Puneet, Singh Jagdeep (2017), "Review work on plastic formwork", *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8: 1141-1146.
- [5]. Le Hong-Ha, Vu Chi-Cong, Ho Ngoc-Khoa, Luu Van-Thuc (2020), "A method of controlling thermal crack for mass concrete structures: modelling and experimental study", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 072054.
- [6]. Yu Xianzheng, Chen Jianyun, Xu Qiang, Zhou Zhi (2018), "Research on the influence factors of thermal cracking in mass concrete by model experiments", *KSCE journal of civil engineering*, 22: 2906-2915.
- [7]. Shi Nannan, Ouyang Jianshu, Zhang Runxiao, Huang Dahai (2014), "Experimental Study on Early-Age Crack of Mass Concrete under the Controlled Temperature History", *Advances in materials science and engineering*, 2014 (1): 671795.
- [8]. Bofang Zhu (2013), *Thermal stresses and temperature control of mass concrete*, Butterworth-Heinemann.
- [9]. Đích Nguyễn Tiến (2010), "Công tác bê tông trong điều kiện khí hậu nóng ẩm Việt Nam", *NXB Xây Dựng, Hà Nội*.
- [10]. Thuc Luu Van, Trung Le Quang, Hung Nguyen Manh (2019), "Research on Thermal Cracking Control in Mass Concrete Using a Cooling Pipe System", *Journal of Construction Science and Technology (TCKHCNXD)*, 13 (3V): 99-107.
- [11]. Hai Tran Hong, Thuc Luu Van, Van Phuong Pham Nguyen, Thoan Nguyen Ngoc (2020), "Research on the Distribution of Surface Areas at Risk of Thermal Cracking in Mass Concrete Using Numerical Simulation", *Journal of Construction Science and Technology (TCKHCNXD)*, 14 (5V): 11-26.
- [12]. Ha Le Hong, Khoa Ho Ngoc, Thuc Luu Van, Cong Vu Chi, Thoan Nguyen Ngoc), "Maintenance of mass concrete structures constructed using continuous pouring methods with different heat-releasing mix designs".
- [13]. Vinh Chu Thi Hai, Vinh Bui Duc, Nhat Nguyen Minh, Hai Nguyen Thanh (2023), "Evaluation of heat of hydration in mass concrete using experimental methods and numerical simulation", *Journal of Construction Science and Technology (TCKHCNXD)*, 17 (1V): 101-114.
- [14]. Mien Tran Van, Le Thi Nguyen (2013), "Study of the thermal characteristics of concrete using a high fly ash content", *Journal of Construction Science and Technology (TCKHCNXD)*, 3 (4).
- [15]. Li Liang, Liu Xinghong, Dao Vinh TN, Cheng Yonggang (2016), "Thermal cracking analysis during pipe cooling of mass concrete using particle flow code", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016 (1): 5976862.
- [16]. Zhu Jinsong, Wang Ziyi (2024), "Experimental modeling and quantitative evaluation of mitigating cracks in early-age mass concrete by regulating heat transfer", *Journal of Building Engineering*: 110641.
- [17]. Xin Jianda, Liu Yi, Zhang Guoxin, Wang Zhenhong, Yang Ning, Qiao Yu, Wang Juan (2021), "Comparison of thermal cracking potential evaluation criteria for mass concrete structures", *Materials and Structures*, 54: 1-15.
- [18]. Xu Juncai, Shen Zhenzhong, Yang Song, Xie Xin, Yang Zhengyu (2019), "Finite element simulation of prevention thermal cracking in mass concrete", *International Journal of Computing Science and Mathematics*, 10 (4): 327-339.
- [19]. ACI Committee 207 (2005), *Guide to Mass Concrete (ACI 207.1R-05) (Reapproved 2012)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 30.
- [20]. ACI Committee 207 (2005), *Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete (ACI 207.4R-05) (Reapproved 2012)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 15.
- [21]. ACI Committee 207 (2005), *Report on Roller-Compacted Mass Concrete (ACI 207.5R-11)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 71.
- [22]. ACI Committee 207 (2007), *Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete (ACI 207.2R-07)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 28.
- [23]. ACI Committee 207 (2018), *Report on Practices for Evaluation of Concrete in Existing Massive Structures for Service Conditions (ACI 207.3R-18)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 16.
- [24]. JCI (2008), "Guidelines for control of cracking of mass concrete".