

Đánh giá ảnh hưởng các thông số đầu vào của hỗn hợp bê tông đến trường nhiệt độ trong bê tông khối lớn

Evaluation of the influence of the input parameters of the concrete mix on the temperature field in the mass concrete

> THS LÊ VĂN MINH¹, TS VŨ CHÍ CÔNG²

¹Trường Đại học Xây dựng Hà Nội; Email: minhlv@huce.edu.vn

²Trường Đại học Xây dựng Hà Nội; Email: congvc@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày ảnh hưởng của các thông số đầu vào như hàm lượng xi măng, nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông đến sự phân bố nhiệt độ trong thân kết cấu bê tông khối lớn trong giai đoạn nhiệt thủy hóa. Hàm lượng xi măng và nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông được sử dụng trong nghiên cứu được giới hạn trong khoảng $(280 - 450)\text{kg/m}^3$ và $(15 - 30)^\circ\text{C}$. Phân tích nhiệt được thực hiện bằng cách sử dụng phương pháp Phần tử hữu hạn dựa trên phần mềm Midas Civil. Sau đó, phương pháp quy hoạch lập thí nghiệm được sử dụng để thiết lập các hàm toán học cho phép xác định nhiệt độ tối đa và chênh lệch nhiệt độ tối đa trong thân kết cấu bê tông. Nghiên cứu chỉ ra rằng hàm lượng xi măng đóng vai trò quyết định so với nhiệt độ ban đầu của bê tông trong việc xác định nhiệt độ tối đa và chênh lệch nhiệt độ tối đa. Bên cạnh đó, các hàm toán học thu được đã phản ánh sự ảnh hưởng và tương quan của các thông số đã nêu đến sự thay đổi nhiệt độ và chênh lệch nhiệt độ của kết cấu bê tông khối lớn.

Từ khóa: Hàm lượng xi măng; nhiệt độ ban đầu; bê tông khối lớn; nhiệt thủy hóa; phần tử hữu hạn; nhiệt độ tối đa; chênh lệch nhiệt độ tối đa; mô hình hàm toán học.

ABSTRACT

The paper presents the influence of input parameters such as cement content, initial temperature of the concrete mixture on the temperature distribution in the body of a large concrete structure during the heat of hydration phase. The cement content and initial temperature of concrete mix used in the study are limited within $(280 - 450)\text{kg/m}^3$ and $(15 - 30)^\circ\text{C}$, in respect. Thermic analysis was performed using the Finas Element method based on Midas Civil software. Then, the experimental planning method is used to establish mathematical functions that allow the determination of the maximum temperature and maximum temperature difference in the body of the concrete structure. Research shows that the cement content plays a decisive role compared to the initial temperature of the concrete in determining the maximum temperature and maximum temperature difference. In addition, the obtained mathematical functions have reflected the influence and correlation of the mentioned parameters on temperature changes and temperature differences of large concrete structures.

Keywords: The cement content; initial temperature; mass concrete; heat of hydration; finite element; maximal temperature; maximum temperature difference; mathematical function model.

1. GIỚI THIỆU

Do nhiệt thủy hóa của xi măng trong kết cấu bê tông khối lớn trong giai đoạn xây dựng, độ dốc nhiệt độ cao giữa môi trường xung quanh và lõi của kết cấu khối được tạo ra khi nhiệt từ khối bê tông không thể tiêu tan nhanh chóng. Kết quả của cơ chế này là các vết nứt hình thành trên bề mặt bê tông do ứng suất nhiệt ở tuổi sớm của bê tông [1]. Hình 1.1 cho thấy cơ học của mặt cắt vết nứt nhiệt gây ra bởi gradien nhiệt độ cao từ quá trình hydrat hóa xi măng.

Nhiệt độ tối đa trong khối bê tông và sự thay đổi nhiệt độ của

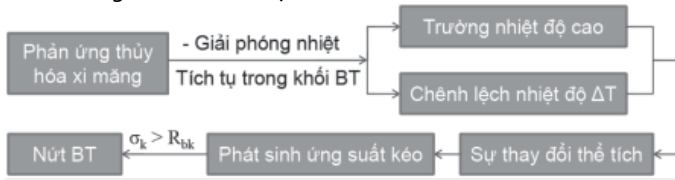
nó theo thời gian phụ thuộc vào các yếu tố sau [2]:

- Tính chất của hỗn hợp bê tông;
- Yếu tố khí hậu;
- Thời gian thi công;
- Chiều dày các lớp đổ;
- Nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông;

Có một số cách để giảm nhiệt độ cao trong kết cấu bê tông khối lớn, chẳng hạn như giảm hàm lượng xi măng, sử dụng hỗn hợp bê tông sinh nhiệt thấp, làm mát trước bê tông, làm mát sau

bê tông bằng cách sử dụng ống làm mát, cách nhiệt bề mặt, hoặc sử dụng bê tông có chứa cốt liệu giãn nở nhiệt thấp.

Bê tông khối lớn có thể bị nứt do ứng suất phát sinh từ sự thay đổi thể tích không đều và bị kìm giữ của khối bê tông [3]. Sự thay đổi thể tích này phát sinh từ các yếu tố như: quá trình co khô, ngót, nở nhiệt của bê tông và độ chênh lệch nhiệt độ ΔT giữa các phần của bê tông. Cơ chế nứt được mô tả tóm tắt ở Hình 1.1



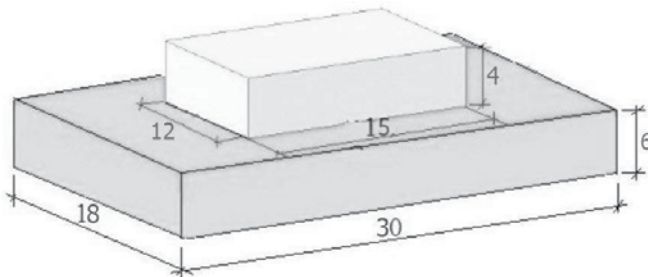
Hình 1.1. Cơ chế hình thành vết nứt nhiệt trong kết cấu bê tông khối lớn ở tuổi sớm.

Ngoài ra, sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm để thiết lập mô hình toán học cũng là một phương pháp thích hợp để khống chế nhiệt độ cực đại trong kết cấu bê tông khối lớn. Mô hình toán học được sử dụng để điều chỉnh hợp lý các thông số cấp phối bê tông nhằm khống chế hoàn hảo nhiệt độ cực đại xuất hiện trong bê tông khối lớn [4].

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Đối tượng nghiên cứu

Trong nghiên cứu, một mô hình 3D bao gồm một khối bê tông có kích thước: 12×15×4 m đặt trên nền 18×30×6 m.



Hình 1.2. Kích thước của mô hình khối bê tông khối

Nhiệt độ xung quanh ảnh hưởng đáng kể đến nhiệt độ tối đa. Nhiệt độ không khí thay đổi theo thời gian được tính theo phương trình sau [5]:

$$t_{air} = 20 + 5 \sin\left(\frac{2\pi\tau}{24}\right) \tag{1}$$

Trong đó: t_{air} -Nhiệt độ không khí trung bình hằng ngày °C
 τ -thời gian (giờ).

Trong nghiên cứu, nhiệt độ ban đầu của nền được giả định bằng 20°C. Ngoài ra, các tính chất của bê tông và nền được sử dụng làm dữ liệu đầu vào để xác định sự phân bố nhiệt độ trong khối bê tông, được trình bày trong Bảng 1.1 [6-7]

Bảng 1.1. Tính chất vật liệu của bê tông và móng

	Bê tông	Nền
Hệ số dẫn nhiệt ($W / m^{\circ}C$)	2.7	1.7
Nhiệt dung riêng ($kJ / kg^{\circ}C$)	0.25	0.2
Tỷ trọng (kg / m^3)	2400	1800
Hệ số đối lưu ($W / m^{(2)} \cdot ^{\circ}C$)	12	14
Nhiệt thủy hóa của bê tông (kJ / kg)	389	-

Mô hình toán học phụ thuộc tham số đầu vào của hỗn hợp bê tông.

Phương pháp quy hoạch thí nghiệm được sử dụng để xây dựng mô hình toán học. Ảnh hưởng của các thông số đầu vào của

hỗn hợp bê tông đến trường nhiệt độ trong bê tông khối lớn được xem xét bằng cách thiết lập hàm mục tiêu. Hàm mục tiêu của mô hình thực nghiệm được biểu diễn bằng giá trị cực đại nhiệt độ $T_i (T_{max}, ^{\circ}C)$ và chênh lệch nhiệt độ cực đại $\Delta T_i (Delta T_{max}, ^{\circ}C)$ của bê tông. Đây là hàm toán học phụ thuộc vào hàm lượng xi măng X_1 thay đổi trong khoảng 280-450 kg / m^3 và nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông X_2 , dao động từ 15-30 °C [11]. Bảng 2 cho thấy mức độ biến thiên của các tham số được sử dụng trong quy hoạch.

Bảng 1.2. Mức độ biến động của các yếu tố đầu vào

Yếu tố đầu vào	Mức độ biến đổi			Khoảng thời gian τ	
	Tham số	Biến	-1		0
X_1	x_1	280	365	450	120
X_2	x_1	15	22.5	30	5

Số lượng thí nghiệm (N) được mô tả lập kế hoạch có thể xác định bởi [12]:

$$N = 2k + 1 \tag{2}$$

Trong đó: k - số lượng tham số được xét k=2; 1- Số thí nghiệm tại trung tâm.

Do đó, giá trị của N=5 được thử nghiệm.

Công thức toán học để xác định nhiệt độ cực đại và chênh lệch nhiệt độ cực đại trong khối bê tông có thể được biểu thị bằng đa thức bậc hai như sau :

$$T_{max} = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_{12} X_1 X_2 \tag{3}$$

$$\Delta T_{max} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 \tag{3a}$$

Phương trình (3) và (3a) được gọi là phương trình hồi quy với các hệ số α_i và β_i được xác định bằng phương pháp bình phương tối thiểu:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^5 y_i X_{ij}}{5}; \beta_i = \frac{\sum_{j=1}^5 y_i X_{ij}}{5} \tag{3b}$$

Phương pháp truyền nhiệt phần tử hữu hạn.

Phương trình truyền nhiệt chỉ phối trong hệ Carte sian toàn cầu có thể được mô tả bằng phương trình Fourier như trong phương trình [8-10]:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial Q_w}{\partial \tau} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}, \tag{4}$$

Trong đó: T - Nhiệt độ vật liệu ($^{\circ}C$); k - hệ số dẫn nhiệt của bê tông ($W / m^{\circ}C$); Q_w - Nhiệt lượng tích lũy bên trong tỏa ra theo thời gian (J / m^3); $\partial Q_w / \partial \tau$ - Suất sinh nhiệt bên trong trên 1 đơn vị thể tích (W / m^3); c - Nhiệt dung riêng ($J / kg^{\circ}C$); ρ - Trọng lượng riêng thể tích (kg / m^3); τ - thời gian (giờ).

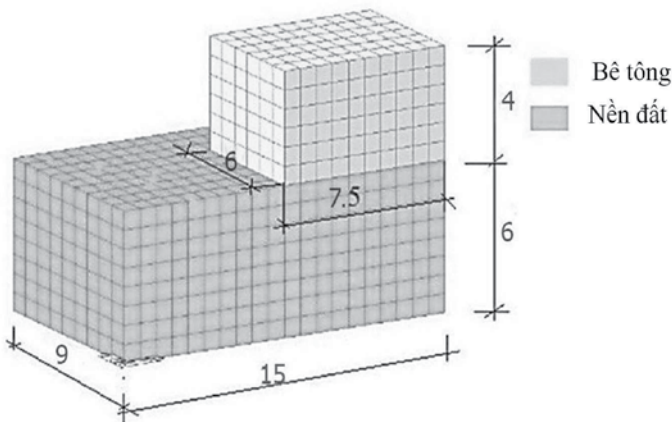
Để giải phương trình (4), cần áp dụng phương trình hợp điều kiện biên, như điều kiện Dirichlet, điều kiện biên Neumann, điều kiện biên Robin và điều kiện biên hỗn hợp [8-10].

Để giải bài toán truyền nhiệt phức tạp như mô tả trong phương trình (4), phần mềm sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn - Midas Civil là một giải pháp phù hợp để phân tích kết cấu nhiệt ứng xử trong khối bê tông [6-7]. Sơ đồ thuật toán cho phân tích nhiệt được giới thiệu trong hình sau.



Hình 1.3. Thuật toán phân tích nhiệt theo phương pháp phần tử hữu hạn cho khối bê tông

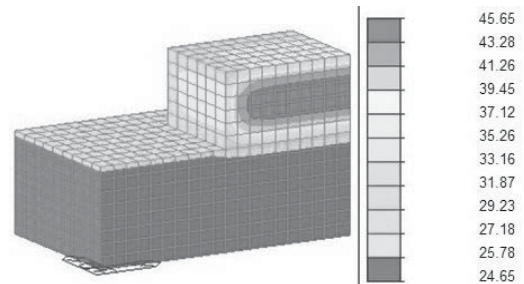
Vì mô hình có tính đối xứng nên sử dụng một phần tư kích thước mô hình thực tế để sử dụng trong mô hình phân tích theo phương pháp phần tử hữu hạn như trong Hình 1.4. Lưới của mô hình được chia với số lượng 1800 phần tử, tương ứng với 2352 nút, được sử dụng để mô phỏng phân tích.



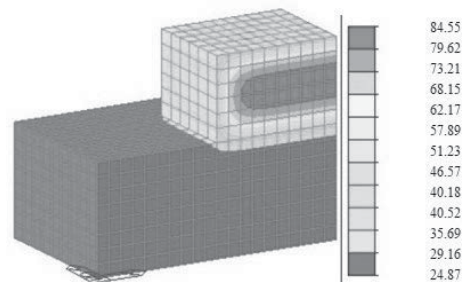
Hình 1.4. Kích thước của khối bê tông khối lớn sử dụng trong mô hình, đơn vị tính (m)

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

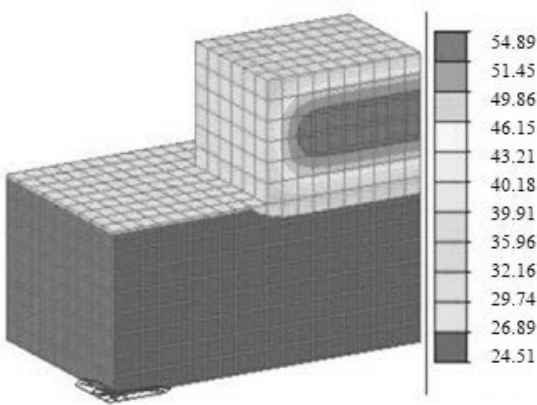
Nhiệt độ tối đa thu được từ phân tích kết quả được thể hiện trong hình 1.5-1.8 và tóm tắt trong Bảng 1.3.



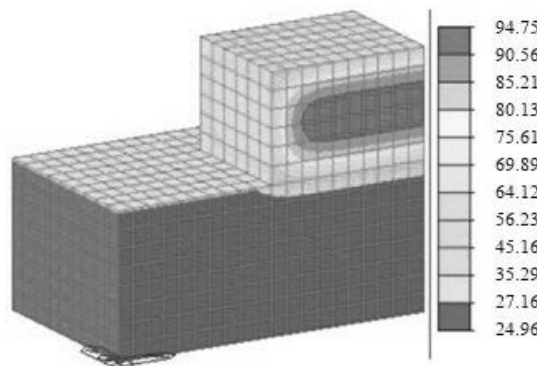
Hình 1.5. Trường nhiệt độ trong khối bê tông ở 72 giờ ($X_1 = 280 \text{ kg / m}^3 ; X_2 = 15^\circ \text{C}$).



Hình 1.6. Trường nhiệt độ trong khối bê tông ở 72 giờ ($X_1 = 450 \text{ kg / m}^3 ; X_2 = 15^\circ \text{C}$).



Hình 1.7. Trường nhiệt độ trong khối bê tông ở 72 giờ ($X_1 = 280 \text{ kg/m}^3$; $X_2 = 30^\circ\text{C}$).



Hình 1.8. Trường nhiệt độ trong khối bê tông ở 72 giờ ($X_1 = 450 \text{ kg/m}^3$; $X_2 = 30^\circ\text{C}$).

Bảng 1.3. Nhiệt độ tối đa và chênh lệch nhiệt độ tối đa trong khối bê tông khối tương ứng với hàm lượng xi măng và nhiệt độ ban đầu khác nhau.

Biến mã hóa		Giá trị thực			
x_1	x_2	Hàm lượng xi măng X_1 (kg/m ³)	Nhiệt độ ban đầu hỗn hợp bê tông X_2 (°C)	Nhiệt độ lớn nhất Tmax (°C)	Chênh lệch nhiệt độ lớn nhất deltaTmax (°C)
-1	-1	280	15	45.65	16.5
1	-1	450	15	84.55	44.1
-1	1	280	30	54.89	22.7
1	1	450	30	94.75	48.5
0	0	365	22.5	69.59	33.5

Có thể thấy rằng sự gia tăng hàm lượng xi măng làm tăng nhiệt độ tối đa nhiều hơn so với việc tăng nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông. Như vậy, khi hàm lượng xi măng dao động trong khoảng 280 – 450 kg/m³ của hỗn hợp bê tông, thì độ gia tăng nhiệt độ lớn nhất là 39.86 °C và độ gia tăng chênh lệch nhiệt độ lớn nhất là 27.6 °C (so sánh Hình 1.5 với Hình 1.6 và Hình 1.7 với Hình 1.8). Ngược lại, nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông thay đổi trong khoảng 15-30°C chỉ góp phần tạo nên sự gia tăng nhiệt độ lớn nhất là 10.2

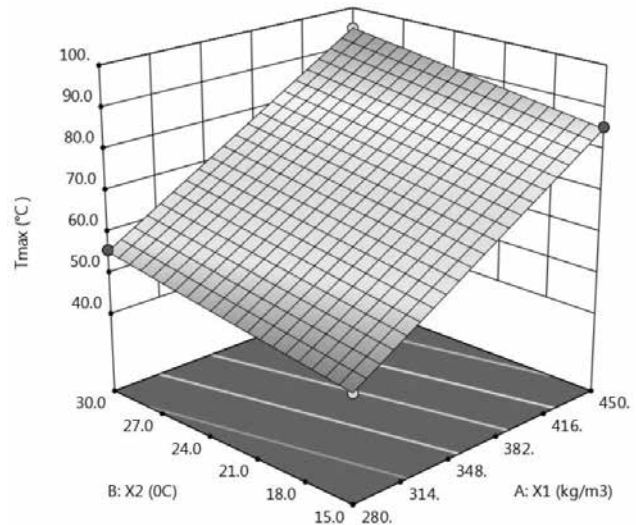
°C và độ gia tăng chênh lệch nhiệt độ lớn nhất là 6.2 °C (so sánh Hình 1.5 với Hình 1.7 và Hình 1.6 với Hình 1.8)

Kết quả của chương trình phân tích nhiệt bằng phương pháp phần tử hữu hạn dựa trên phần mềm - Midas Civil cho thấy nhiệt độ tối đa và chênh lệch nhiệt độ tối đa tương ứng với hàm lượng xi măng và nhiệt độ ban đầu có thể được tóm tắt trong Bảng 1.3. Sau đó, sử dụng phương pháp bình phương tối thiểu để xác định các hệ số trong phương trình (3), ta thu được các mô hình toán học dự đoán nhiệt độ tối đa và chênh lệch nhiệt độ tối đa trong khối bê tông được chỉ ra bởi phương trình (5), (6):

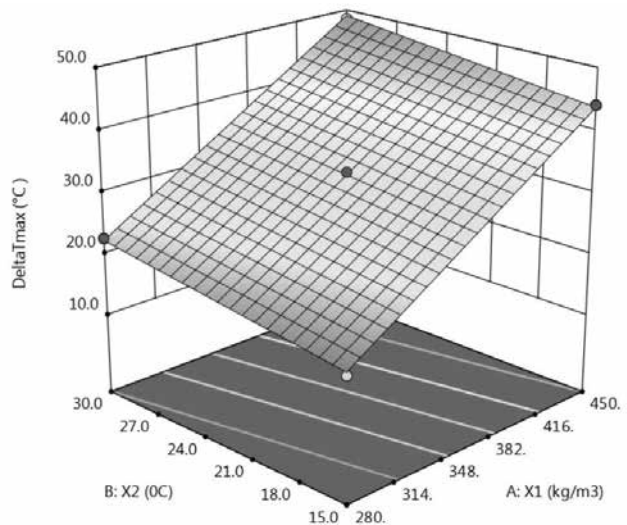
$$T_{\max} = 69.88 + 19.70x_1 + 4.87x_2 \quad (5)$$

$$\Delta T_{\max} = 33.06 + 13.35x_1 + 2.65x_2 \quad (6)$$

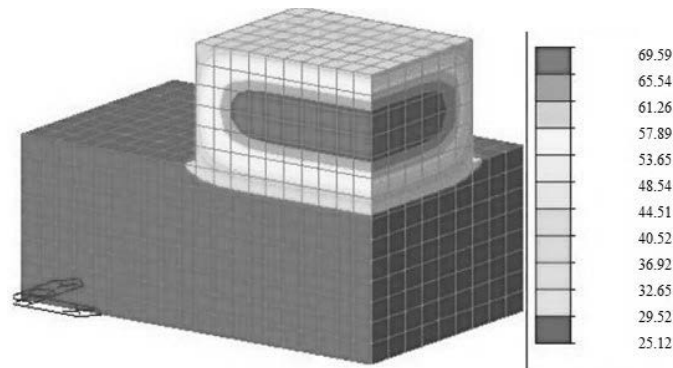
Kết quả thu được ở phương trình (5), (6) cho thấy tất cả các yếu tố trên có tác động khá lớn đến nhiệt độ cực đại và chênh lệch nhiệt độ cực đại của khối bê tông. Nhiệt độ và chênh lệch nhiệt độ chủ yếu phụ thuộc trên các thừa số x_1 (X_1). Bên cạnh đó, Hình 1.9 và Hình 1.10 cho phép nhanh chóng xác định nhiệt độ cực đại (T_{\max}) và chênh lệch nhiệt độ cực đại (ΔT_{\max}) trong thể bê tông khối lớn, tại đó các thông số về hàm lượng xi măng và nhiệt độ ban đầu thay đổi trong phạm vi như đã đề cập trong Bảng 1.2.



Hình 1.9. Biểu đồ được sử dụng để xác định nhiệt độ tối đa trong bê tông khối lớn.



Hình 1.10. Biểu đồ được sử dụng để xác định độ chênh nhiệt độ tối đa trong bê tông khối lớn.



Hình 1.11. Phân bố nhiệt độ trong thân bê tông ở 72 giờ

Kiểm chứng mô hình toán học thu được:

Trường hợp sử dụng hàm lượng xi măng 365 kg/m^3 và nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông là $22.5^\circ\text{C} (x_1 = 0, x_2 = 0)$ để xác định nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông bằng phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng phần mềm Midas Civil. Giá trị thu được của nhiệt độ tối đa $T_{\text{max}} = 69.59^\circ\text{C}$ và chênh lệch nhiệt độ tối đa $\Delta T_{\text{max}} = 33.5^\circ\text{C}$ đa sau 72 giờ kể từ khi bắt đầu xây dựng được thể hiện trong Hình 1.11.

($x_1 = 0; x_2 = 0$, hoặc $X_1 = 365 \text{ kg/m}^3$; $X_2 = 22.5^\circ\text{C}$)

Hình 1.11 cho thấy nhiệt độ tối đa trong khối bê tông $T_{\text{max}} = 69.59^\circ\text{C}$ và chênh lệch nhiệt độ tối đa $\Delta T_{\text{max}} = 33.5^\circ\text{C}$ sau 72 giờ.

Với hàm lượng xi măng 365 kg/m^3 và nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông là $22.5^\circ\text{C} (x_1 = 0, x_2 = 0)$ thay vào phương trình toán học(5), (6) thu được ở trên thì nhiệt độ tối đa $T_{\text{max}} = 69.88^\circ\text{C}$ và chênh lệch nhiệt độ tối đa $\Delta T_{\text{max}} = 33.06^\circ\text{C}$

Sai số tương đối của nhiệt độ tối đa là 0.4 % và chênh lệch nhiệt độ tối đa là 1.3% giữa kết quả thu được từ phương trình toán học và kết quả thu được từ phân tích mô phỏng số theo phương pháp phần tử hữu hạn với Midas Civil mang lại sự đáng tin cậy về độ chính xác của kết quả mô hình toán học thu được.

4. PHẦN KẾT LUẬN

Dựa trên kết quả nghiên cứu, có thể rút ra các kết luận sau:

- Phương pháp quy hoạch thí nghiệm sử dụng trong mô hình phản ánh mối tương quan và ảnh hưởng giữa hàm lượng xi măng và nhiệt độ ban đầu của bê tông đến sự phân bố nhiệt độ và độ chênh nhiệt độ lớn nhất trong thân kết cấu bê tông khối lớn tuổi đầu.

- Hàm toán học T_{max} và ΔT_{max} có thể được sử dụng để tính toán nhiệt độ tối đa và chênh lệch nhiệt độ tối đa trong thân bê tông khối lớn với hàm lượng xi măng và nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông thay đổi trong khoảng $280 - 450 \text{ kg/m}^3$ bê tông và $15 - 30^\circ\text{C}$ tương ứng.

- Hàm lượng xi măng đóng vai trò quyết định trong việc tạo ra nhiệt độ cực đại và chênh lệch nhiệt độ cực đại trong thân bê tông khối lớn khi so sánh với nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông. Do

đó, cần xem xét cẩn thận hàm lượng xi măng trong hỗn hợp bê tông khi kiểm soát nhiệt độ tối đa trong kết cấu bê tông khối lớn.

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho đề tài có mã số 03-2023/KHXD-TĐ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. American Concrete Institute (ACI) (1996), *ACI 207.1R-96 -Mass Concrete*.
2. Malkawi, A.H., Mutasher, S.A., Qiu, T.J. (2003), "Thermal-structural modeling and temperature control of roller compacted concrete gravity dam", *J Perform. Constr. Facilities*, 17(4), tr. 177-187. doi: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2003)17:4(177).
3. Nguyễn Tiến Địch (2010), *Công tác bê tông trong điều kiện khí hậu nóng ẩm Việt Nam*, NXB Xây Dựng, Hà Nội.
4. Adler Y P Markova E V Granovsky Y V 1976 Experiment planning in search of optimum conditions *M.: Nauka* p. 70-92
5. Toan, L.Q, Te, V.T, Hung, V.H (2015), "Additional properties to perfect temperature and software ansys thermal stresses of the rcc dam in Vietnam", *J. Water Res. and Environ. n. Sci.*, 50, tr. 9-15.
6. Vũ Chí Công, Hồ Ngọc Khoa, Lê Văn Minh (2022), "So sánh chỉ số nứt nhiệt được xác định bằng 2 phương pháp: Đánh giá đơn giản và phần tử hữu hạn của công hộp bê tông cốt thép", *Tạp chí Khoa học công nghệ xây dựng*, (1).
7. Vũ Chí Công, Lê Văn Minh, Hồ Ngọc Khoa (2023), "Phân tích xác suất nứt do nhiệt của kết cấu trụ cầu trong quá trình nhiệt thủy hóa xi măng bằng mô phỏng số", *Tạp chí Vật liệu và xây dựng*, (13).
8. J.E Akin (1994), *Finite Element for Analysis and Design*, Academic Press.
9. P. P. Bamforth, D.Chisholm, J.Gibbs, T.Harrison (2008), *Properties of Concrete for use in Eurocode 2*, The Concrete centre.
10. B. Gebhart (1993), *Heat Conduction and Mass Diffusion*, McGraw-Hill.
11. Japan Concrete Institute (2011), "Guideline for control of cracking of mass concrete".
12. Lam, T.V., Bulgakov, B.I., Aleksandrova, O.V., Larsen, O.A., Anh, P.N (2018), "Effect of rice husk ash and fly ash on the compressive strength of high performance concrete", *E3S Web of Conf.* 33, 02030. doi: 10.1051/e3sconf/20183302030.