

MÔ PHỎNG GIẢI NHIỆT CHO DẦM CHUYỂN BÊ TÔNG KHỐI LỚN BẰNG HỆ THỐNG ỐNG LÀM MÁT

Trần Văn Miên^{a,b,*}, Nguyễn Hữu Phú^{a,b}

^aKhoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh,
268 đường Lý Thường Kiệt, quận 10, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^bĐại học Quốc gia TP. HCM, phường Linh Trung, quận Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 10/10/2021, Sửa xong 15/01/2022, Chấp nhận đăng 11/02/2022

Tóm tắt

Từ đầu thế kỷ XXI, công nghệ thi công xây dựng ngày càng phát triển mạnh mẽ, kiến trúc mang tính biểu tượng cho các tòa nhà cao tầng với thiết kế đa dạng phong phú ngày càng được ưa chuộng. Vì vậy, với những thiết kế kiến trúc mang tính biểu tượng như thế đòi hỏi các cấu kiện kết cấu ngày càng phức tạp: kích thước móng lớn, hệ dầm chuyển để thay đổi bước cột, hệ vách lõi cứng kích thước lớn ... để đảm bảo sự làm việc ổn định và lâu dài cho công trình. Hầu hết các cấu kiện đó đều gặp khó khăn trong vấn đề kiểm soát nứt khi thi công bê tông khối lớn do ứng suất nhiệt. Trong bài viết này, tác giả sẽ trình bày về cách mô phỏng bài toán nhiệt bằng phương pháp phần tử hữu hạn (ANSYS), dự đoán kết quả phát triển nhiệt độ của cấu kiện dầm chuyển có sử dụng hệ thống ống giải nhiệt (cooling pipe), khảo sát, so sánh kết quả mô phỏng với số liệu đo nhiệt độ thực tế tương ứng với vị trí lắp đặt sensor cho cấu kiện dầm chuyển, từ đó đưa ra nhận xét một số vấn đề dẫn đến sai số giữa số liệu đo thực tế và kết quả mô phỏng.

Từ khóa: nhiệt hydrat hóa; ống giải nhiệt; bê tông khối lớn; dầm chuyển; phần tử hữu hạn.

PREDICTION OF TEMPERATURE RISE OF MASS REINFORCED CONCRETE TRANSFER BEAM EMBEDDED COOLING PIPE

Abstract

Since the beginning of the twenty-first century, construction technology has grown strongly, high-rise buildings with iconic architecture designed diversely turns increasingly popular. It is required the special structural facts for iconic architectural designs like that: large foundation, transfer beam for column layout change, large regrid core - wall ... to ensure stable and long-term construction. There are the most difficulty in cracking problem of mass concrete as thermal stress generated. In this article, the author will show how to simulate the thermal problem by the finite element method (ANSYS), predicting the temperature increasing results of the transfer beam using the cooling pipe system. Compared with the actual temperature data collected at the construction site, thereby identifying the reason for the actual error between the actual and simulated temperature results to optimize the input data.

Keywords: hydration heat; cooling pipe; mass concrete; transfer beam; finite element.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(1V\)-04](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(1V)-04) © 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Vấn đề nứt liên quan đến nhiệt độ của kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) hoặc bê tông ứng suất trước khối lớn đã và đang là một trong những thách thức đối với kỹ thuật công trình xây dựng trong

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: tvmien@hcmut.edu.vn (Miên, T. V.)

nhiều năm qua, đặc biệt đối với dự án có kết cấu dầm, sàn chuyển thường nằm ở vị trí trên cao, có mặt thoáng rộng tiếp xúc với không khí làm chênh lệch nhiệt độ quá giới hạn cho phép giữa bề mặt bên ngoài và bên trong tâm khối bê tông. Trong khi đó, năng lực của các nhà cung cấp bê tông địa phương vẫn còn rất hạn chế về công nghệ thi công trộn bê tông, nguồn vật liệu đầu vào không đáp ứng đủ điều kiện về nhiệt độ khi thi công bê tông khối lớn. Vì vậy, cần phải có giải pháp kiểm soát nhiệt độ từ bên ngoài như hệ thống ống làm mát khối bê tông để kiểm soát sự chênh lệch nhiệt độ.

Nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước đã thực hiện mô phỏng sự phát triển nhiệt độ trong bê tông khối lớn, và mô phỏng – ứng dụng biện pháp gắn ống giải nhiệt để kiểm soát nhiệt độ cho bê tông khối lớn. Ishikawa [1] đã thực hiện phân tích nhiệt cho đập bê tông kiểu trọng lực với chương trình phần tử hữu hạn bằng phần mềm ADIAN. Waleed và cs. [2] đã trình bày một kỹ thuật phân tích dựa trên phần tử hữu hạn để đánh giá nhiệt độ bên trong thân đập RCC bằng phương pháp FE hai chiều dựa trên công thức Taylor - Galerkin. Riding và cs. [3] so sánh các giá trị nhiệt độ được tính toán từ ba phương pháp dự đoán nhiệt độ bê tông thường được sử dụng: phương pháp tính toán nhiệt độ đơn giản (PCA), phương pháp đồ họa của ACI 207.2R [4], phương pháp truyền nhiệt số (Phương pháp Schmidt) với nhiệt độ thực tế trong tám bộ phận của cầu bê tông được đo trong quá trình xây dựng. Tasri và Susilawati [5] đã nghiên cứu ảnh hưởng nhiệt độ nước làm mát, không gian giữa các ống làm mát đến sự phân bố nhiệt độ và ứng suất nhiệt trong bê tông dựa loại bê tông, tính chất nhiệt và kích thước của các cầu kiện sau làm mát. Chúc và cs. [6] nghiên cứu mô hình dự đoán toán học về chế độ nhiệt trong cầu kiện bê tông khối lớn có sử dụng hệ thống ống làm lạnh.

Các nghiên cứu trước đây, bài toán mô phỏng dự đoán nhiệt độ thường tập trung cho cầu kiện bê tông móng khối lớn, chưa có nghiên cứu đề cập cho bê tông dầm chuyển khối lớn. Vị trí kết cấu dầm chuyển thường nằm ở trên cao bị ảnh hưởng lớn đến tác động của điều kiện môi trường: gió, mưa... Bên cạnh đó, việc thi công bê tông dầm chuyển khối lớn gặp rất nhiều vấn đề: cấp phối bê tông mác cao (C40/50), bê tông phải đạt sớm cường độ để đảm bảo tiến độ thi công, năng lực nhà cung cấp bê tông tại địa phương. Các yếu tố trên tác động lớn việc phát triển nhiệt độ bê tông dầm chuyển khối lớn sau khi đổ. Ngoài ra, các nghiên cứu trong nước còn hạn chế về việc so sánh giữa kết quả mô phỏng với kết quả đo nhiệt độ thực tế của kết cấu bê tông khối lớn. Bài báo này mô phỏng dự đoán sự phát triển nhiệt độ của cầu kiện dầm chuyển BTCT khối lớn được lắp đặt hệ thống ống giải nhiệt (cooling pipe) bằng phương pháp phần tử hữu hạn (ANSYS) với điều kiện biên gần đúng với thực tế thi công và so sánh kết quả mô phỏng với dữ liệu nhiệt độ theo dõi thực tế trên cầu kiện thực đã thi công. Từ đó, đưa ra nhận xét một số vấn đề dẫn đến sai số giữa số liệu đo thực tế và kết quả mô phỏng.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Phương trình truyền nhiệt

Nhiệt sinh ra trong quá trình xi măng hydrat hóa là nguyên nhân chính làm gia tăng nhiệt độ theo thời gian trong kết cấu bê tông khối lớn. Sự phân bố nhiệt độ theo thời gian và không gian trong kết cấu bê tông khối lớn có thể tính toán theo phương trình truyền nhiệt như sau [7]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

trong đó: $a = \frac{k}{c\rho}$ là độ khuếch tán nhiệt độ của bê tông; k là hệ số dẫn nhiệt của bê tông; c là nhiệt dung riêng của bê tông; ρ là khối lượng riêng của bê tông; T là trường nhiệt độ đang xem xét; θ là nhiệt độ đoạn nhiệt tăng lên trong suốt quá trình thủy hóa của xi măng; τ là thời gian; x, y, z là tọa độ tại điểm đang xét.

2.2. Điều kiện biên

Xem xét một khối bê tông khối lớn, quá trình truyền nhiệt ba chiều trong môi trường bất đẳng hướng được mô tả theo phương trình [8]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

trong đó: ρ là khối lượng thể tích của bê tông, (kg/m^3); c là tỷ nhiệt của bê tông, ($\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$); $T(x, y, z, t)$ là nhiệt độ tại tọa độ (x, y, z) tại thời điểm t , ($^\circ\text{C}$); k_x, k_y, k_z là hệ số dẫn nhiệt của vật liệu theo các phương x, y, z ; $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ là tổng lượng nhiệt sinh ra trong đơn vị thể tích trong quá trình thủy hóa của xi măng, (kcal/m^3).

Các điều kiện biên được xem xét:

- Tại biên nhiệt độ không đổi với $t > 0$:

$$T(x, y, z, t) = T_0 \quad (3)$$

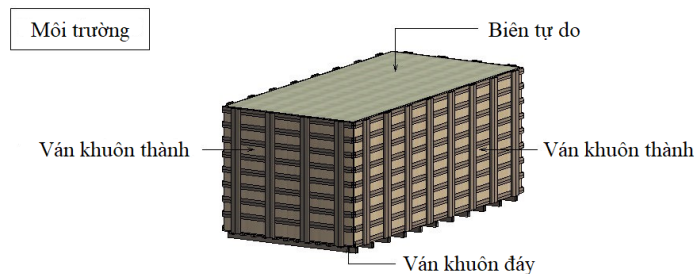
- Tại biên truyền nhiệt với $t > 0$:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z + q(t) = 0 \quad (4)$$

- Tại biên đối lưu với $t > 0$:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z + h_c (T - T_\infty) = 0 \quad (5)$$

trong đó: n_x, n_y, n_z là cosin chỉ phương của mặt truyền nhiệt đang xét; $q(t)$ là nhiệt sinh ra trong một đơn vị thể tích tại thời điểm t , (kcal/m^3); h_c là hệ số đối lưu, ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$); T_∞ là nhiệt độ tại mặt đối lưu, ($^\circ\text{C}$).



Hình 1. Các biên truyền nhiệt trong kết cấu bê tông đầm chuyển khối lớn

2.3. Chương trình phần tử hữu hạn ANSYS

Trong phạm vi trình bày của bài báo này, chương trình phần tử hữu hạn ANSYS [9] được sử dụng để phân tích nhiệt độ trong cấu kiện đầm chuyển BTCT khối lớn. Các thông số đầu vào cho phân tích nhiệt chủ yếu là hệ số đối lưu, nhiệt độ môi trường, tốc độ sinh nhiệt bên trong của bê tông, đặc tính

vật liệu và điều kiện biên nhiệt. Sự phân bố nhiệt độ trong bê tông khối lớn thường là một quá trình nhiệt nhất thời vì nhiệt độ của bê tông khối lớn thay đổi theo thời gian. Phương trình vi phân truyền nhiệt (2) có thể được giải quyết cho sự phân bố nhiệt độ bên trong mặt cắt ngang của bê tông. Các điều kiện biên được sử dụng để phân tích nhiệt là bề mặt đáy và tất cả các bề mặt bên (biên đối lưu). Phương trình (2) có thể được biểu diễn dưới dạng ma trận:

$$[C] \{\dot{T}\} + [\bar{K}] \{T\} = \{Q\} \quad (6)$$

trong đó: $[C]$ là ma trận nhiệt dung riêng, hoặc ma trận tỷ nhiệt; $[\bar{K}]$ là ma trận hệ số truyền nhiệt (dẫn nhiệt, đối lưu); $\{Q\}$ là tổng vector thông lượng nhiệt cho quá trình thủy hóa bên trong và đối lưu nhiệt; $\{T\}$ là vector nhiệt độ nút; $\{\dot{T}\}$ là vector đạo hàm theo thời gian của nhiệt độ nút $\{T\}$.

Mối quan hệ giữa nhiệt độ tại một thời điểm nhất định và tại thời điểm liên tiếp tiếp theo được áp dụng ở đây bằng cách sử dụng quy tắc hình thang Hình 2 như một sơ đồ tích phân theo bước thời gian cho phương trình truyền nhiệt, thể hiện trong Công thức (7) [10]:

$$\{T_{n+1}\} = \{T_n\} + (1 - \Theta)\Delta t \{\dot{T}_n\} + \Theta\Delta t \{\dot{T}_{n+1}\} \quad (7)$$

trong đó: $\{T_n\}$ là nhiệt độ tại thời điểm đã cho; $\{T_{n+1}\}$ là nhiệt độ tại thời điểm kế tiếp; Δt là khoảng thời gian; Θ là hệ số trong phương pháp “lực độ- θ ”.

Phương trình có được bằng cách giải phương trình (6) và phương trình (7) trong miền thời gian bằng số.

$$\left\{ \frac{1}{\Delta t} [C] + \Theta [K] \right\} \{T_{n+1}\} = \left[\frac{1}{\Delta t} [C] - (1 - \Theta) [K] \right] \{T_n\} + (1 - \Theta) \{Q_n\} + \Theta \{Q_{n+1}\} \quad (8)$$

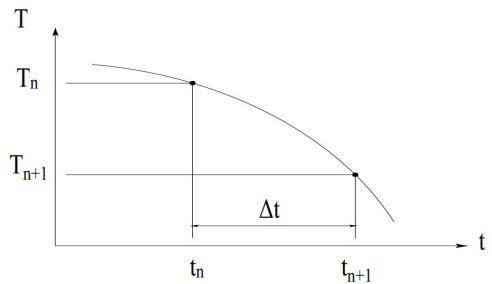
trong đó: Θ bằng 1/2 trong phương pháp Crank – Nicolson. Khi đó, phương trình (8) có thể có dạng tổng quát như sau:

$$[A_G] \{\Delta T\} = \{Q_G\} \quad (9)$$

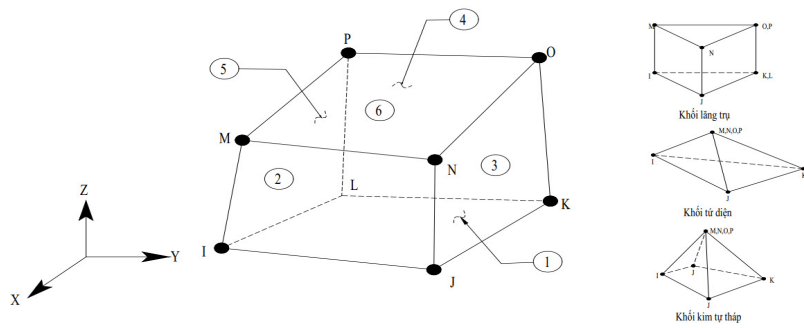
trong đó: $[A_G] = \frac{1}{\Delta t} [C] + \frac{1}{2} [K]$; $\{Q_G\} = \frac{1}{2} (\{Q_n\} + \{Q_{n+1}\}) - 2[K] \{T_n\}$; $\{\Delta T\}$ biểu diễn sự thay đổi nhiệt độ tại điểm nút theo bước thời gian Δt , được sử dụng để tính nhiệt độ ở giai đoạn thời gian tiếp theo bằng công thức (10):

$$\{T_{n+1}\} = \{T_n\} + \frac{1}{2} \{\Delta T\} \quad (10)$$

Giá trị của $[C]$ và $[K]$ trong phương trình trên cũng không đổi đối với mỗi phần tử vì độ dẫn nhiệt, khối lượng riêng và nhiệt dung riêng là những hằng số. Điều này có nghĩa là ma trận $[A_G]$ cho mỗi phần tử có giá trị không đổi cho mỗi khoảng thời gian. Do đó, sự thay đổi nhiệt độ nút chỉ dựa trên giá trị của vectơ thông lượng nhiệt $\{Q_G\}$. Nói cách khác, sự thay đổi nhiệt độ như một hàm số của thời gian được tính toán cho các giá trị thay đổi của tốc độ thủy hóa bê tông và nhiệt độ môi trường xung quanh. Như đã trình bày ở trên, các đại lượng nhiệt được truyền bởi các phần tử có tính chất nhiệt, các phần tử này bao gồm các nút. Phần tử này là phần tử rắn ba chiều, đẳng hướng và tám nút, với một bậc nhiệt độ tự do duy nhất tại mỗi nút. Một phần tử như vậy được gọi là PLANE 70 - 3D Thermal Solid trong ANSYS [9].



Hình 2. Quy tắc hình thang tổng quát với miền thời gian



Hình 3. Phần tử hữu hạn SOLID 70

3. Mô phỏng kiểm soát nhiệt độ cho đầm chuyển BTCT khối lớn bằng ống giải nhiệt (cooling pipe)

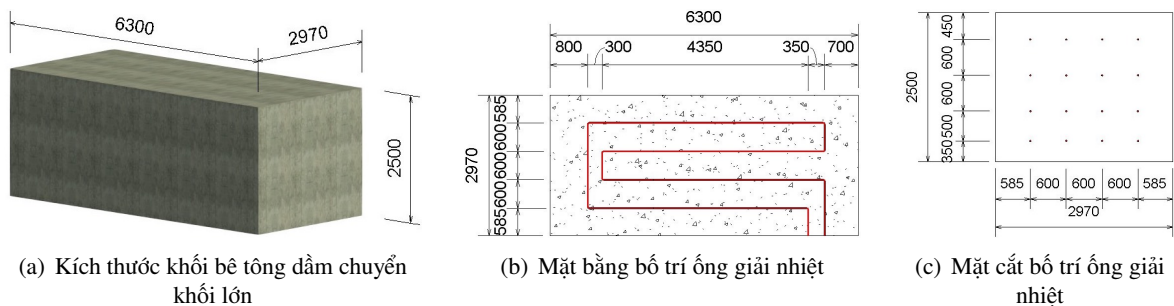
3.1. Khai báo thông số đầu vào mô hình

a. Khai báo vật liệu và kích thước hình học

Cấu kiện đầm chuyển được sử dụng trong nghiên cứu có kích thước $B \times H \times L$ lần lượt là: 2,97 m; 2,3 m; 6,5 m. Tổng lượng bê tông là $44,4 \text{ m}^3$. Đầm chuyển thiết kế sử dụng bê tông với cường độ chịu nén C40/50, cấp phối bê tông C40/50 thể hiện ở Bảng 1. Hệ thống ống giải nhiệt làm bằng thép có chiều dày 2,1 mm được bố trí trong đầm chuyển thành 3 lớp ống, khoảng cách bố trí ống giải nhiệt theo phương ngang và phương đứng là 600 mm (Hình 4). Nước bơm vào hệ thống ống giải nhiệt với nhiệt độ 25-30 °C và lưu lượng 20 lít/phút.

Bảng 1. Cấp phối bê tông đầm chuyển C40/50 tại công trình

Loại vật liệu	Đơn vị	Giá trị
Xi măng PCB40	kg	450
Cát	kg	710
Đá dăm	kg	990
Nước	lít	151
Phụ gia	lít	6,4
Tro bay	kg	130



Hình 4. Kích thước và bố trí ống giải nhiệt bê tông đầm chuyển khối lớn

Bảng 2. Các giá trị đầu vào phân tích nhiệt và ứng suất nhiệt [11]

Thuộc tính	Đơn vị	Giá trị
Hệ số truyền nhiệt k	$\text{kJ/m} \cdot \text{h}/^\circ\text{C}$	8,595
Nhiệt dung riêng c	$\text{kJ/kg}/^\circ\text{C}$	1,001
Khối lượng riêng ρ	kg/m^3	2370
Cường độ chịu nén f_{ck}	kG/m^2	4×10^6
Hệ số giãn nở nhiệt	$^\circ\text{C}$	$1,0 \times 10^{-5}$
Hệ số Poisson		0,2

Sự sinh nhiệt bên trong có thể được tính bằng độ tăng nhiệt đoạn nhiệt Công thức (11) vì nhiệt độ gần tâm của bê tông khối lớn gần như bằng nhiệt độ đoạn nhiệt. Độ lớn của sự gia tăng nhiệt độ đoạn nhiệt và hình dạng của đường cong có thể thay đổi đáng kể tùy thuộc vào hỗn hợp bê tông cụ thể. Phương trình tăng nhiệt độ đoạn nhiệt được hiển thị dưới dạng hàm số mũ do Sukiyaki [10] đề xuất.

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

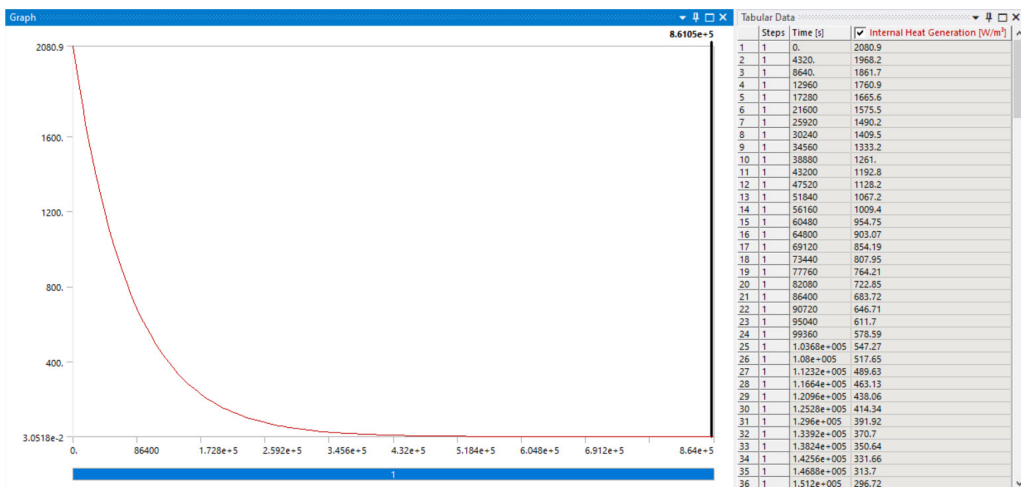
trong đó: T là lượng tăng nhiệt độ đoạn nhiệt tại một thời điểm, ($^\circ\text{C}$); α là hệ số tăng nhiệt độ (tốc độ phản ứng); K là mức tăng nhiệt độ đoạn nhiệt cuối cùng đạt được bằng thử nghiệm, ($^\circ\text{C}$); t là thời gian, (ngày);

Tổng nhiệt lượng tỏa ra trên một đơn vị thể tích có thể nhận được theo phương trình:

$$Q(t) = CpT(t) = Kc\rho(1 - e^{-\alpha t}) \quad (12)$$

Bằng cách đạo hàm công thức (12) theo thời gian, nhiệt sinh ra trên một đơn vị thể tích và đơn vị thời gian có thể được tính như sau:

$$q_h(t) = \frac{\partial Q(t)}{\partial t} = Kc\rho\alpha e^{-\alpha t} \quad (13)$$



Hình 5. Biểu đồ nhiệt sinh ra trên một đơn vị thể tích theo thời gian

Bảng 3. Bảng các thông số tính toán cho tăng nhiệt độ đoạn nhiệt

Thuộc tính	Đơn vị	Giá trị
Nhiệt độ bê tông khi đổ	°C	35,0
Mô đun đàn hồi	GPa	35,2
Hằng số hàm tăng nhiệt độ đoạn nhiệt		$K = 59,6^{\circ}\text{C}; \alpha = 1,113$

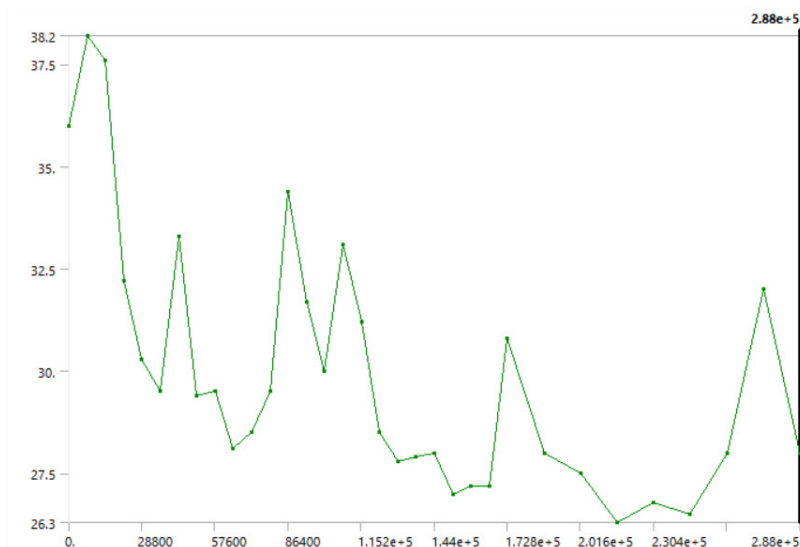
b. Khai báo điều kiện biên

Bảng 4. Dữ liệu đo nhiệt độ môi trường theo thời gian

Thời gian (h)	Thời gian (s)	Nhiệt độ môi trường tại thời điểm t (°C)	Thời gian (h)	Thời gian (s)	Nhiệt độ môi trường tại thời điểm t (°C)
0	0	36	34	122400	28,5
2	7200	38,2	36	129600	27,8
4	14400	37,6	38	136800	27,9
6	21600	32,2	40	144000	28
8	28800	30,3	42	151200	27
10	36000	29,5	44	158400	27,2
12	43200	33,3	46	165600	27,2
14	50400	29,4	48	172800	30,8
16	57600	29,5	52	187200	28
18	64800	28,1	56	201600	27,5
20	72000	28,5	60	216000	26,3
22	79200	29,5	64	230400	26,8
24	86400	34,4	68	244800	26,5
26	93600	31,7	72	259200	28
28	100800	30	76	273600	32
30	108000	33,1	80	288000	28
32	115200	31,2			

Bảng 5. Hệ số đối lưu nhiệt của một số loại ván khuôn [11]

Số hiệu	Loại ván khuôn và phương pháp bảo dưỡng	Hệ số đối lưu nhiệt ($\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
1	Dạng thép, dưỡng hộ bằng phun (độ nhúng sâu < 10 mm)	14
2	Ván ép	8
3	Tấm ủ	6
4	Tấm che dưỡng hộ bê tông, tấm phủ tấm che dưỡng hộ, bao gồm cả tấm ủ	6
5	Lớp xốp polystyrene (chiều dày: 50mm) + ván tấm	2
6	Túi khí kẹp (có tấm dính kèm): 2 tấm, 3 tấm, 4 tấm	6, 4, 2
7	Bề mặt thoáng tiếp xúc trên bê tông, nền đất, đá gốc	14

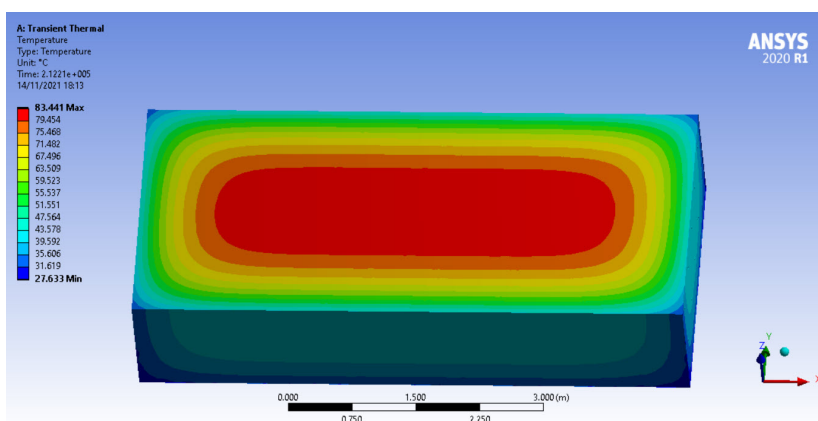


Hình 6. Biểu đồ sự thay đổi nhiệt độ môi trường thực tế

Bảng 6. Bảng các thông số thiết kế đường ống làm mát

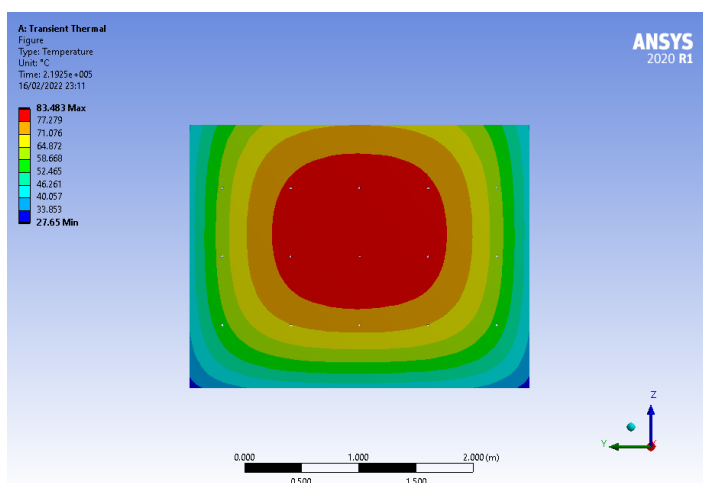
Thuộc tính	Đơn vị	Giá trị
Đường kính ống	mm	27
Chiều dày ống	mm	2,1
Số lớp ống		3
Khoảng cách bố trí ống theo phương ngang	mm	600
Khoảng cách bố trí ống theo phương đứng	mm	600
Nhiệt độ nước cấp	°C	25 - 30
Lưu lượng nước	lít/phút	20

3.2. Kết quả mô phỏng nhiệt độ của dầm chuyển BTCT khối lớn

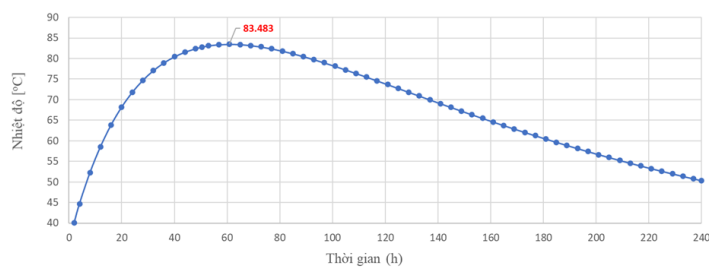


Hình 7. Vùng nhiệt độ tại tâm không có hệ thống ống giải nhiệt dọc theo chiều dài khối bê tông dầm chuyển

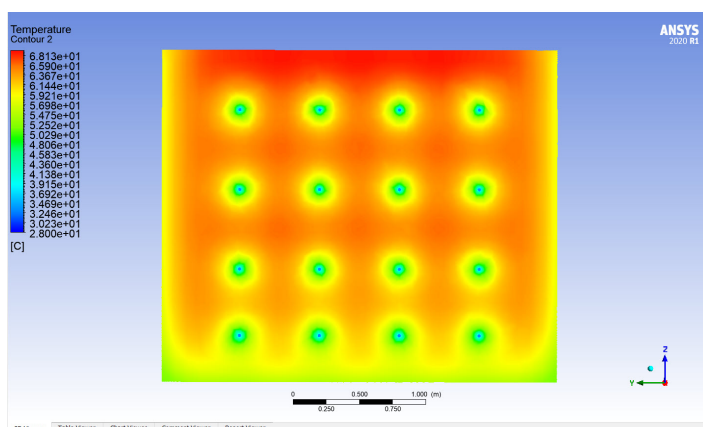
Nhiệt độ tại tâm của đầm chuyển phân bố theo không gian và thời gian được mô phỏng tính toán với trường hợp không lắp đặt và có lắp đặt hệ thống ống giải nhiệt, được thể hiện lần lượt ở các Hình 8 và 10 tương ứng với vị trí lắp đặt sensor số 3 thực tế hiện trường Hình 13.



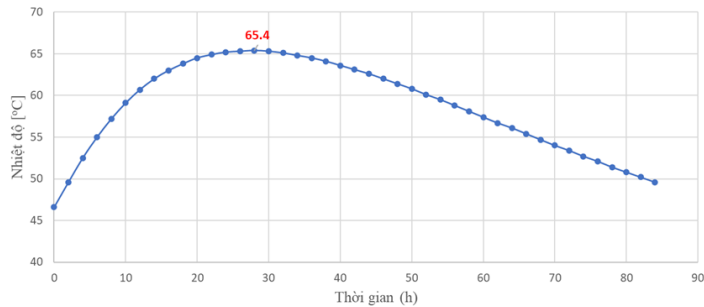
Hình 8. Vùng nhiệt độ trong khối bê tông đầm chuyển (đoạn giữa) không có hệ thống ống giải nhiệt



Hình 9. Biểu đồ phát triển nhiệt độ tại tâm đầm chuyển BTCT không lắp đặt ống giải nhiệt



Hình 10. Vùng phân bố nhiệt độ trong khối bê tông đầm chuyển (đoạn giữa) khi lắp đặt ống giải nhiệt



Hình 11. Biểu đồ phát triển nhiệt độ tại tâm đầm chuyển BTCT có lắp đặt ống giải nhiệt

Các kết quả mô phỏng cho thấy rằng, với bê tông đầm chuyển không có gắn ống giải nhiệt, trong 72 giờ đầu, nhiệt độ khối bê tông liên tục tăng và đạt cực đại tại thời điểm 60h với giá trị $T_{\max} = 83,5^{\circ}\text{C}$. Nhiệt độ $T_{\max} > 71^{\circ}\text{C}$ [12] có nguy cơ xảy ra hiện tượng trì hoãn enttringite, hình thành vết nứt bên trong tâm khối bê tông. Về lâu dài, vết nứt phát triển làm mất khả năng chịu lực của kết cấu đầm chuyển.

Vùng có nhiệt độ lớn phân bố chủ yếu ở khu vực gần tâm khối bê tông và giảm dần ra phía mép biên. Tại thời điểm 60h, chênh lệch nhiệt độ tại tâm khối so với mép trên và mép dưới trong cùng mặt cắt lần lượt là $\Delta T_1 = 11^{\circ}\text{C}$ và $\Delta T_2 = 29^{\circ}\text{C}$. Biên đối lưu nhiệt bên dưới thông qua lớp ván làm thất thoát nhiệt nhanh, trong khi mép biên bên trên được cách nhiệt bằng xốp nên nhiệt độ ít bị thất thoát hơn. Với $\Delta T > 20^{\circ}\text{C}$ khả năng ứng suất kéo sinh ra do sự chênh lệch nhiệt độ sẽ lớn hơn cường độ chịu kéo của bê tông tại cùng thời điểm và từ đó hình thành vết nứt trong kết cấu đầm chuyển [13].

Đối với khối bê tông đầm chuyển có lắp đặt ống giải nhiệt, trong 24 giờ đầu, nhiệt độ khối bê tông liên tục tăng và đạt cực đại tại thời điểm 24h với giá trị $T_{\max} = 68,1^{\circ}\text{C}$. Với nhiệt độ T_{\max} này khó xảy ra hiện tượng trì hoãn enttringite.

Vùng có nhiệt độ lớn phân bố chủ yếu ở khu vực gần tâm khối bê tông và giảm dần ra phía mép biên. Tại thời điểm 60h, chênh lệch nhiệt độ tại mép trên khối đổ so với tâm và mép dưới trong cùng mặt cắt lần lượt là $\Delta T_1 = 4,8^{\circ}\text{C}$ và $\Delta T_2 = 12,9^{\circ}\text{C}$. Sự chênh lệch nhiệt độ giữa biên trên và biên dưới so với tâm khối đều nằm trong khoảng giá trị cho phép $\Delta T < 20^{\circ}\text{C}$ [13], ứng suất kéo do sự chênh lệch nhiệt độ sinh ra không lớn, nhỏ hơn cường độ chịu kéo của bê tông, vì vậy không có khả năng hình thành vết nứt trong đầm chuyển.

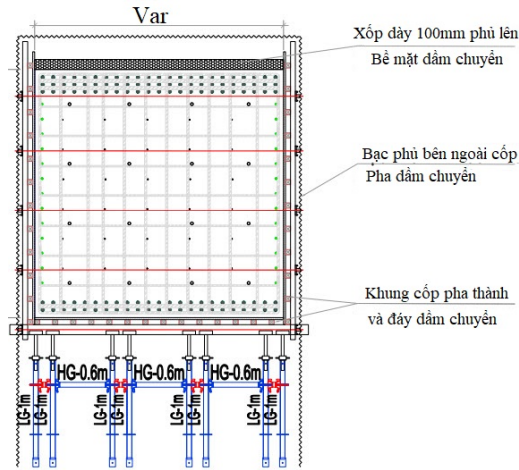
Qua kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 8 và Hình 10, có thể thấy vùng nhiệt độ lớn tập trung phân bố xung quanh tâm khối bê tông trong trường hợp không có bố trí ống giải nhiệt. Trong khi đó, việc bố trí ống giải nhiệt làm phân bố vùng nhiệt độ lớn tập trung xung quanh mép biên trên khối bê tông. Nguyên nhân có sự phân bố khác nhau này là do việc bố trí ống giải nhiệt đi qua tâm khối bê tông đã làm cho sự đối lưu nhiệt ở tâm khối bê tông lớn hơn mép biên trên có bố trí lớp xốp bảo ôn.

4. Theo dõi nhiệt độ khối bê tông đầm chuyển có bố trí hệ thống làm mát thực tế tại hiện trường

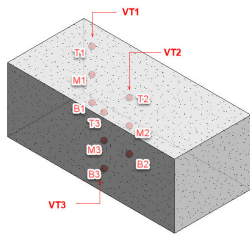
Các lớp vật liệu bảo ôn cho đầm chuyển khối lớn được thể hiện ở Hình 12 bên dưới. Các vị trí lắp đặt sensor theo dõi nhiệt độ của đầm chuyển trong quá trình bảo dưỡng được thể hiện ở Hình 13.

Nhiệt độ của đầm chuyển được ghi nhận 5 ngày liên tục sau khi hoàn thành phủ đầy đủ các lớp ủ nhiệt, nhiệt độ trong đầm chuyển thay đổi theo thời gian được thể hiện ở Hình 14. Kết quả ở Hình 14 cho thấy rằng, khi lắp đặt ống giải nhiệt thì nhiệt độ lớn nhất trong đầm chuyển là $T_{\max} = 69,5^{\circ}\text{C}$ xuất

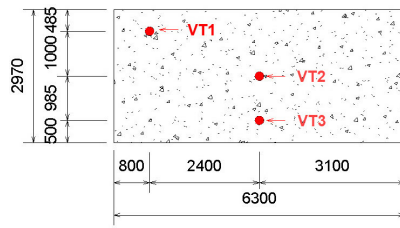
hiện tại thời điểm 12h sau khi hoàn thành ủ nhiệt, vùng nhiệt độ cao tập trung tại mặt trên đến giữa tâm khối bê tông của dầm chuyển.



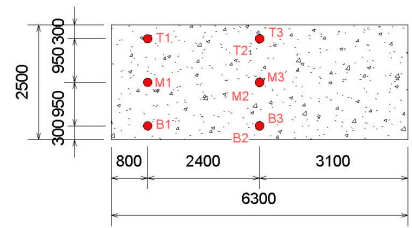
Hình 12. Biện pháp bảo ôn dầm chuyển



(a) Vị trí gắn sensor đo nhiệt độ

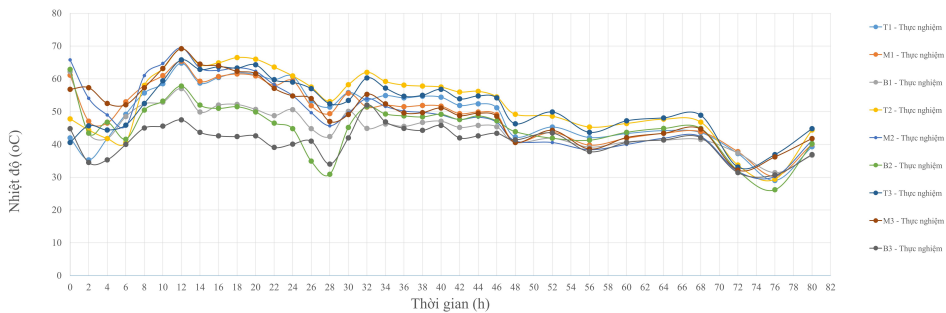


(b) Mặt bằng điểm gắn sensor



(c) Mặt cắt gắn sensor

Hình 13. Vị trí, mặt bằng và mặt cắt phân bố sensor theo dõi nhiệt độ của dầm chuyển

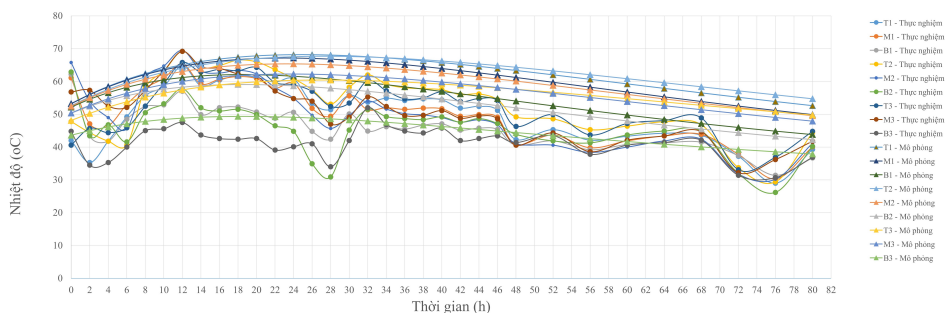


Hình 14. Kết quả theo dõi nhiệt độ bê tông dầm chuyển sau khi ủ nhiệt

Vùng phân bố nhiệt độ cao của khối bê tông tập trung tại mặt trên đến giữa tâm khối của dầm chuyển có thể lý giải là do lớp xốp cách nhiệt phía bên trên hạn chế sự trao đổi nhiệt với môi trường bên ngoài tốt hơn các mặt thành và đáy của dầm chuyển chỉ được đóng ván khuôn gỗ.

Hình 15 thể hiện nhiệt độ tại 3 vị trí trong đầm chuyển, các giá trị nhiệt độ này thu nhận được thông qua mô phỏng tính toán và đo đạc liên tục thực tế trên cấu kiện từ lúc hoàn thành phủ ủ nhiệt và đến 80 giờ sau khi đo nhiệt độ chu kỳ đầu tiên.

Hình 15 cho thấy biểu đồ phát triển nhiệt độ của khối bê tông bằng mô phỏng có dạng đường cong liên tục, nhiệt độ tăng liên tục ở khoảng thời gian 0h đến 24h sau đó giảm dần theo thời gian. Thời điểm đạt nhiệt độ lớn nhất trong đầm chuyển theo kết quả của mô phỏng và thực tế thi công lần lượt là 24h và 12h.



Hình 15. Giá trị nhiệt độ giữa thực nghiệm và mô phỏng tại các điểm gắn sensor

Nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông giữa kết quả mô phỏng so với dữ liệu đo thực tế có sự chênh lệch không đáng kể. Kết quả theo tính toán mô phỏng thì $T_{\max} = 68,1^{\circ}\text{C}$ trong khi kết quả đo nhiệt độ thực tế thì $T_{\max} = 69,5^{\circ}\text{C}$.

Nguyên nhân dẫn đến sai lệch thời điểm đạt nhiệt độ lớn nhất trong đầm chuyển theo kết quả của mô phỏng và thực tế thi công là do:

- Trong thực tế thi công thì nhiệt độ nước cấp đầu vào cho hệ thống giải nhiệt luôn thay đổi theo thời gian, trong khi bài toán mô phỏng giữ cố định nhiệt độ nước bơm vào hệ thống giải nhiệt lắp đặt trong đầm chuyển;
- Trong thực tế thi công, nhiệt độ trong bê tông chỉ bắt đầu được ghi nhận sau khi hoàn thành thi công lớp vật liệu ủ nhiệt trên mặt đầm chuyển;
- Bài toán mô phỏng chưa xét đến sự truyền nhiệt từ cốt thép, trong khi thực tế thi công đầm chuyển được bố trí với lượng thép dày đặc;
- Ngoài ra, đầm chuyển nằm ở vị trí trên cao nên việc bơm bê tông lên cao sẽ làm tăng nhiệt độ bê tông do tác động ma sát của thành ống bơm và hỗn hợp bê tông. Vì vậy, nên sử dụng thông số nhiệt độ ban đầu của bê tông là nhiệt độ được đo sau khi bê tông qua khỏi đường ống bơm.

5. Kết luận

Trong thiết kế thi công kết cấu đầm chuyển BTCT khối lớn cần lưu ý đến biện pháp kiểm soát nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ tại các vị trí của kết cấu trong quá trình dưỡng hộ;

So sánh giữa mô phỏng và thực tế thi công cho thấy, có thể mô phỏng tính toán phân bố nhiệt độ trong kết cấu đầm chuyển BTCT khối lớn theo thời gian và không gian bằng phương pháp phần tử hữu hạn (ANSYS), phương pháp này có độ tin cậy khi dự đoán khá chính xác nhiệt độ lớn nhất xuất hiện trong kết cấu đầm chuyển bê tông khối lớn được kiểm soát nhiệt bằng hệ thống ống giải nhiệt (cooling pipe). Tuy nhiên, có sự sai lệch đáng kể về thời điểm đạt nhiệt độ lớn nhất trong đầm chuyển theo giữa mô phỏng và thực tế thi công, nguyên nhân chủ yếu là do: trong thực tế thi công thì nhiệt

độ nước bơm vào hệ thống ống giải nhiệt không cố định theo thời gian, và nhiệt độ trong đầm chuyển chỉ bắt đầu được đo sau khi hoàn thành phủ vật liệu cách nhiệt trên mặt đầm.

Ngoài ra, kết quả thực nghiệm nhấn mạnh rằng, thực tế thi công có thể kiểm soát nhiệt độ trong đầm chuyển tốt hơn so với mô phỏng khi thực hiện tốt công tác ủ nhiệt và vận hành hợp lý hệ thống giải nhiệt.

Tài liệu tham khảo

- [1] Ishikawa, M. (1991). [Thermal stress analysis of a concrete dam](#). *Computers & Structures*, 40(2):347–352.
- [2] Waleed, A. M., Jaafar, M. S., Noorzai, J., Bayagoob, K. H., Amini, R. (2004). [Effect of Placement Schedule on the Thermal and Structural Response of RCC Dams, Using Finite Element Analysis](#). *Proceedings of Geo Jordan*, American Society of Civil Engineers, 94–104.
- [3] Riding, K. A., Poole, J. L., Schindler, A. K., Juenger, M. C. G., Folliard, K. J. (2006). [Evaluation of Temperature Prediction Methods for Mass Concrete Members](#). *ACI Materials Journal*, 103(5):357–365.
- [4] ACI 207.2R-07 (2008). *Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete*.
- [5] Tasri, A., Susilawati, A. (2019). [Effect of cooling water temperature and space between cooling pipes of post-cooling system on temperature and thermal stress in mass concrete](#). *Journal of Building Engineering*, 24:100731.
- [6] Chức, N. T., Khoa, H. N., Hải, T. H. (2020). [Mô hình dự đoán toán học về chế độ nhiệt trong cấu kiện bê tông khối lớn có sử dụng hệ thống ống làm lạnh](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 14(5V):27–38.
- [7] Yunus, A. C., Afshin, J. G. (2015). Heat Conduction Equation. *Heat and Mass Transfer*, 67–141.
- [8] Bofang, Z. (2014). Conduction of Heat in Mass Concrete, Boundary Conditions, and Methods of Solution. *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete*, Elsevier, 11–47.
- [9] *ANSYS Manuals 2020*.
- [10] Kim, S. G. (2010). *Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement*. Master thesis, Iowa State University, Ames.
- [11] JCI (2016). *Guidelines for Control of Cracking of Mass Concrete*.
- [12] ACI 301-16 (2016). *Specifications for Structural Concrete*.
- [13] TCXDVN 305:2004. *Bê tông khối lớn - Quy phạm thi công và nghiệm thu*.