

PHÂN TÍCH SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ ỐNG THOÁT NHIỆT ĐẾN TRƯỜNG NHIỆT ĐỘ VÀ TRƯỜNG CHỈ SỐ NỨT CỦA KẾT CẤU BÊ TÔNG KHỐI LỚN TRONG GIAI ĐOẠN NHIỆT THỦY HÓA

Lê Văn Minh^{a,*}, Lê Đình Mạnh^b

^aKhoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 19/7/2024, Sửa xong 13/9/2024, Chấp nhận đăng 07/10/2024

Tóm tắt

Nhiệt thủy hóa của xi măng trong các kết cấu bê tông khối lớn là nguyên nhân chính dẫn đến sự chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt và tâm bê tông trong giai đoạn đầu đông rắn. Hệ thống ống thoát nhiệt đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát tình trạng nứt do nhiệt. Các ống này giúp giảm bớt nhiệt bên trong khối bê tông, từ đó làm giảm chênh lệch nhiệt độ và ứng suất nhiệt, hạn chế vết nứt. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số ống thoát nhiệt như đường kính, tốc độ, và nhiệt độ nước làm mát cùng với chất liệu ống đối với trường chỉ số nứt và trường nhiệt độ trong kết cấu dầm chuyên bê tông cốt thép khối lớn. Nhóm tác giả sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn dưới sự hỗ trợ của phần mềm Midas Civil 2022 để phân tích các trường hợp ảnh hưởng, từ đó đưa ra những kết luận về việc lựa chọn các thông số ống thoát nhiệt phù hợp nhằm kiểm soát đỉnh nhiệt và tình trạng nứt ở các kết cấu bê tông khối lớn.

Từ khóa: nhiệt thủy hóa; bê tông khối lớn; ống thoát nhiệt; trường chỉ số nứt; trường nhiệt độ; phương pháp phần tử hữu hạn; dầm chuyên.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF COOLING PIPE PARAMETERS ON THE TEMPERATURE FIELD AND THE CRACKING INDEX FIELD OF MASS CONCRETE STRUCTURES DURING THE THERMAL HYDRATION PHASE

Abstract

The heat hydration of cement in mass concrete structures is the main cause of the temperature difference between the surface and the center of the concrete during the early curing stage. The cooling pipe system plays a crucial role in controlling thermal cracking. These pipes help reduce the internal heat within the concrete mass, thereby decreasing the temperature difference and thermal stress, which limits cracking. In this study, the authors investigate the influence of heat dissipation pipe parameters such as diameter, flow rate, and cooling water temperature, along with the pipe material, on the crack index and temperature field in mass concrete transfer beam structure. The authors use the finite element method with the support of Midas Civil 2022 software to analyze the influencing cases, thereby drawing conclusions on the selection of appropriate heat dissipation pipe parameters to control peak temperatures and cracking in mass concrete structures.

Keywords: heat hydration; mass concrete; cooling pipe; crack index field; temperature fields; the finite element method; transfer beams.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(4V\)-13](https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(4V)-13) © 2024 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: minhlv@huce.edu.vn (Minh, L. V.)

1. Giới thiệu

Các kết cấu chịu lực chính của các nhà cao tầng thường là những kết cấu bê tông khối lớn. Đồng thời, trong quá trình đổ bê tông khối lớn sẽ xảy ra hiện tượng nhiệt thủy hóa xi măng trong khối bê tông. Quá trình này đã làm cho nhiệt độ tại tâm hệ số dẫn nhiệt kém đã tạo ra sự phân bố nhiệt độ không đồng đều tại tâm và bề mặt ngoài của bê tông khối lớn trong suốt thời gian nhiệt thủy hóa. Dẫn tới xuất hiện ứng suất kéo và khi ứng suất kéo lớn hơn cường độ kéo của bê tông thì các vết nứt của bê tông sẽ xảy ra [1]. Các vết nứt xuất hiện không chỉ làm ảnh hưởng đến tuổi thọ của kết cấu mà sẽ còn ảnh hưởng đến quá trình sử dụng sau này. Vấn đề về nứt trong các kết cấu bê tông khối lớn đã tồn tại từ lâu. Và vấn đề này được phát hiện lần đầu tiên vào thế kỷ 20 trong quá trình đổ bê tông ở các cấu kiện có kích thước lớn [2, 3].

Để có thể ngăn chặn sự hình thành vết nứt trong bê tông khối lớn ở giai đoạn xây dựng, cần phải kiểm soát tốt sự chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt cùng với nhiệt độ lớn nhất ở kết cấu bê tông khối lớn. Trong TCVN 9341:2012 [4], giới hạn nhiệt độ chênh lệch tối đa $\Delta T < 20$ °C hoặc giới hạn gradient nhiệt độ tối đa giữa 2 điểm trong khối đổ $M_T \leq 50$ °C/m và trong ACI Committee 301-10 [5] thì có khuyến cáo về giới hạn nhiệt độ tối đa trong tâm khối đổ $T_{\max} < 70$ °C. Cả hai yếu tố trên có thể đạt được bằng cách: Đưa nhiệt độ bê tông ra ngoài bằng phương pháp ống thoát nhiệt và phương pháp làm mát sơ bộ.

Do nhiệt độ ở tâm khối đổ thường lớn hơn nhiều so với nhiệt độ vùng xung quanh, nên việc đưa nhiệt từ vùng tâm khối đổ thoát ra ngoài sẽ làm giảm độ chênh nhiệt độ ΔT giữa lớp bê tông trong và ngoài khối đổ. Phương pháp sử dụng hệ thống ống thoát nhiệt là một trong những phương pháp hiệu quả và được áp dụng phổ biến cho kết cấu bê tông khối lớn. Với phương pháp này ta sử dụng bằng cách đặt một dàn ống thoát nhiệt bằng kim loại trong lòng khối đổ. Trong quá trình bê tông toả nhiệt thì bơm nước lạnh chảy qua hệ thống ống này để đưa nhiệt ra ngoài, giữ sao cho ΔT luôn nhỏ hơn 20 °C. Sau đó bơm vữa xi măng cát vào lấp đầy ống. Biện pháp này thích hợp cho những công trình nằm gần nguồn nước như sông, hồ, ao. Khi tiến hành đưa nhiệt độ bê tông ra ngoài thì nhất thiết phải liên tục kiểm soát diễn biến nhiệt độ trong các phần của khối bê tông. Biện pháp này có ưu điểm nổi bật là có thể hạ nhiệt độ lớn nhất bên trong kết cấu bê tông khối lớn bằng đường ống làm lạnh. Phương pháp này cũng đã được sử dụng đầu tiên vào công trình đập Owyhee năm 1931 [6]. Sau đó, ứng dụng vào công trình đập Hoover năm 1936 [7]. Kể từ khi xây dựng đập Hoover thì biện pháp làm mát bằng dòng nước mát chảy qua các dàn ống đã trở thành biện pháp đem lại hiệu quả trong việc giảm nhiệt độ lớn nhất tại tâm khối bê tông.

Các phần mềm tính toán mô phỏng hiện đại có thể dự đoán được nhiệt độ tại tâm kết cấu bê tông khối lớn (BTKL) đã được các tác giả áp dụng để nghiên cứu. Chẳng hạn như, Liu và cs. [8] đã phân tích mô phỏng trường nhiệt độ trong bê tông với hệ thống làm mát bằng nước mát được dựa trên phần tử nhiệt lỏng, các đường ống làm mát được mô hình hóa như các phần tử đường thẳng bổ sung rõ ràng. Với cơ chế làm mát bằng phương pháp dẫn nhiệt tương đương được suy ra thông qua nguyên lý bảo toàn năng lượng; bỏ qua gradien nhiệt độ của dàn ống làm mát Bofang Zhu [9] đã giới thiệu hiệu ứng của các ống làm mát như một nguồn nhiệt âm và đề xuất một phương pháp dẫn nhiệt tương đương, để tính toán sự thay đổi nhiệt độ trong bê tông khối với lưới phần tử hữu hạn thông thường; Kim và cs. [10] đã triển khai một khoảng cách vi phân giữa hai điểm để mô hình hóa chính xác ống làm mát và áp dụng lý thuyết dòng chảy bên trong để phân tích nhiệt các kết cấu bê tông có làm mát ống; và cũng còn nhiều công trình nghiên cứu về vấn đề kiểm soát nứt trong kết cấu bê tông khối được áp dụng biện pháp hệ thống ống thoát nhiệt để kiểm soát vấn đề nứt [11–14].

Tại Việt Nam cũng đã được nhiều tác giả áp dụng để nghiên cứu như: Nghiên cứu của tác giả Nguyễn Xuân Lam với phân tích các giải pháp bố trí dàn ống thoát nhiệt khi thi công móng móng trụ cầu

BTKL vào năm 2017 [15]; Nguyễn Trọng Chức và cs. [16] nhóm tác phân tích và xây dựng các mô hình dự đoán toán học về chế độ nhiệt trong kết cấu BTKL có sử dụng hệ thống ống làm lạnh từ các vật liệu khác nhau. Kết quả thu được là các hàm toán học, cho phép các kỹ sư dự đoán nhanh chóng chế độ nhiệt trong cấu kiện BTKL mà không cần thiết phải mô hình hóa phần tử hữu hạn. Trần Văn Miên và cs. [17] tác giả đã 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 chuyên có sử dụng hệ thống ống giải nhiệt. Lê Văn Minh và cs. [18] đã so sánh sự chênh lệch về kết quả nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ với hai phương pháp tính toán nhiệt thủy hóa bê tông dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn: Sử dụng phần mềm Midas Civil và Ansys của kết cấu dầm chuyên có sử dụng hệ thống ống làm mát...

Khi thiết kế hệ thống ống thoát nhiệt có rất nhiều yếu tố cần được xem xét như đường kính ống làm mát, độ dày ống, độ dẫn nhiệt vật liệu ống, khoảng cách ống, thời gian làm mát... Cho đến nay, với những kết cấu bê tông khối lớn có sử dụng hệ thống ống thoát nhiệt thì có rất ít các nhà nghiên cứu phân tích và đánh giá sự ảnh hưởng của các thông số hệ thống ống thoát nhiệt đến trường nhiệt độ và trường chỉ số nứt trong kết cấu bê tông khối lớn. Trong bài viết này, với sự giúp đỡ của phần mềm Midas civil 2022 và dựa trên nguyên lý của phương pháp phần tử hữu hạn, nhóm tác giả đã mô tả, phân tích và đánh giá sự ảnh hưởng của các thông số hệ thống ống thoát nhiệt đến trường nhiệt độ và trường chỉ số nứt trong giai đoạn nhiệt thủy hóa của kết cấu dầm chuyên bê tông khối lớn.

2. Cơ sở lý thuyết tính toán nhiệt thủy hóa

2.1. Phương trình truyền nhiệt trong bê tông

Tại một điểm bất kỳ trong trường tính toán, trường nhiệt độ không ổn định $T(x, y, z, t)$ phải thỏa mãn phương trình dẫn nhiệt liên tục (1) [19, 20]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q(t) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

trong đó T là nhiệt độ vật liệu ($^{\circ}\text{C}$); k_x, k_y, k_z là hệ số dẫn nhiệt của vật liệu theo các hướng x, y và z tương ứng; $q(t)$ là tốc độ sinh nhiệt trên một đơn vị thể tích (kcal/m^3); c là nhiệt dung riêng ($\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$); ρ là khối lượng thể tích vật liệu (kg/m^3); t là thời gian (ngày).

$q(t)$ là nhiệt độ đoạn nhiệt tăng lên trong bê tông do quá trình hydrat hóa xi măng. Theo các đánh giá chi tiết theo Bofang [20] $q(t)$ được biểu thị thông qua hàm số mũ của thời gian (hoặc tuổi của bê tông), t , như trong phương trình (2) sau:

$$q(t) = q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \quad (2)$$

trong đó q_{∞} đề cập đến mức tăng nhiệt độ cuối cùng trong bê tông và r là hằng số thực nghiệm.

Để giải được phương trình (1) ta cần biết hai loại điều kiện biên chính chứa biên Dirichlet và Cauchy [20], trong các trường hợp sau:

Biên truyền nhiệt:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l + k_y \frac{\partial T}{\partial y} m + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n + q(t) = 0 \quad (3)$$

Biên đối lưu:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l + k_y \frac{\partial T}{\partial y} m + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n + h(T - T_{\infty}) = 0 \quad (4)$$

trong đó h là hệ số đối lưu ($\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$); T_{∞} là nhiệt độ tại bề mặt đối lưu ($^{\circ}\text{C}$); l, m, n là cosin chỉ phương của các mặt truyền nhiệt đang xét.

2.2. Quá trình truyền nhiệt trong bê tông khi có hệ thống ống thoát nhiệt

Với nhiệt độ tại tâm thông thường sẽ lớn hơn so với bề mặt xung quanh. Việc lựa chọn biện pháp đưa ống làm lạnh vào vùng tâm khối bê tông là rất cần thiết để có thể đưa nhiệt thoát ra khỏi ngoài và sẽ làm giảm nhiệt độ ΔT giữa lớp bê tông trong và ngoài. Khi nước lạnh chảy qua dàn ống thì sẽ xảy ra quá trình trao đổi nhiệt và đưa nhiệt trong lòng khối ra làm giảm nhiệt độ ở khối tâm [4]. Sự đối lưu giữa dòng chảy và bề mặt ống chính là quá trình trao đổi nhiệt. Giá trị nhiệt đối lưu được xác định bởi công thức sau [21, 22]:

$$q_{conv} = h_p A_s (T_S - T_m) = h_p A_s \left(\frac{T_{S,i} + T_{S,o}}{2} - \frac{T_{m,i} + T_{m,o}}{2} \right) \quad (5)$$

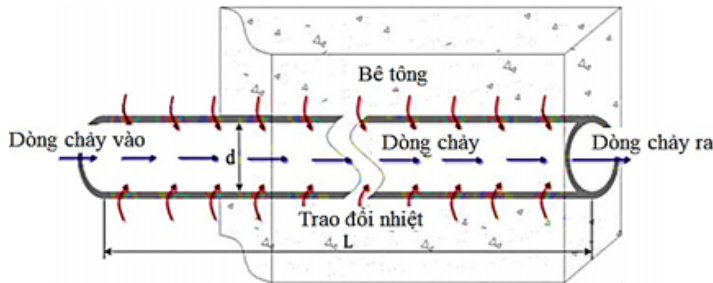
trong đó h_p là hệ số đối lưu của dòng chảy trong ống (kcal/m.h.°C); q_{conv} là nhiệt đối lưu; A_s là diện tích bề mặt ống m^2 ; T_S, T_m là nhiệt bề mặt và chất lỏng trong ống (i là đầu vào, o là đầu ra).

Hệ số đối lưu của dòng chảy trong ống khi vận tốc của dòng chảy nằm trong khoảng 20-60 cm/s [22]:

$$h_p = 4,75u + 43 \quad (6)$$

trong đó u là vận tốc dòng chảy trong ống (cm/s).

Dựa vào cơ chế truyền nhiệt của bê tông khối lớn khi có ống thoát nhiệt ở tâm như (Hình 1) thì ta giải hai phương trình vi phân Fourier theo nguyên lý cân bằng năng lượng trong quá trình truyền nhiệt của ống làm lạnh.



Hình 1. Hình vẽ mô phỏng thể hiện cơ chế truyền nhiệt trong khối bê tông của hệ thống ống thoát nhiệt [23]

Phương trình một là phương trình cơ bản theo lý thuyết truyền nhiệt, có kể đến sự giải phóng nhiệt lượng theo thời gian của quá trình thủy hóa xi măng và được thể hiện như phương trình (1):

Phương trình thứ hai là phương trình có xét đến sự trao đổi nhiệt giữa dàn ống làm lạnh và bê tông và được thể hiện như phương trình (7):

$$\rho_w c_w \left(\frac{\partial T_w}{\partial t} + \vec{u} \nabla T_w \right) = k_w \nabla^2 T_w \quad (7)$$

trong đó T_w là nhiệt độ của nước, °C; k_w là hệ số dẫn nhiệt của nước (kcal/m.°C); c_w là nhiệt dung riêng của nước (kcal/kg.°C); ρ_w là khối lượng riêng của nước (kg/m^3).

Các phương trình Fourier (1) và (7) bằng cách sử dụng các điều kiện biên ban đầu và đường cong đoạn nhiệt trong quá trình thủy hóa xi măng.

2.3. Chỉ số nứt

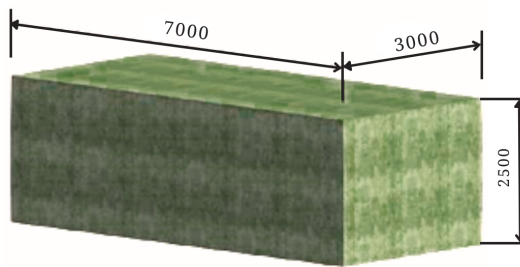
Chỉ số nứt (I_{cr}) của bê tông được xác định theo công thức (8) [24]:

$$I_{cr} = \frac{f_t(t_e)}{\sigma_t(t_e)} \quad (8)$$

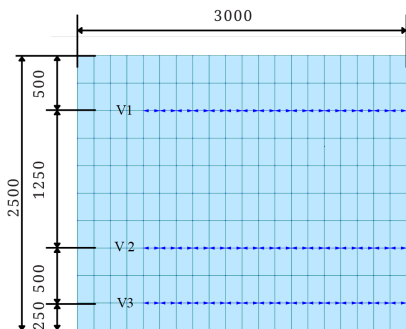
trong đó $f_t(t_e)$ là giá trị cường độ chịu kéo của bê tông tại thời điểm t_e (kgf/m^2); $\sigma_t(t_e)$ là ứng suất kéo trong kết cấu bê tông tại thời điểm t_e (kgf/m^2); Khi giá trị của $I_{cr} < 1$ thì cấu kiện sẽ xuất hiện các vết nứt.

3. Đối tượng nghiên cứu

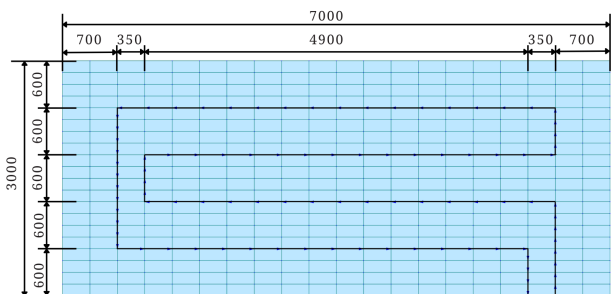
Lựa chọn đối tượng nghiên cứu là kết cấu dầm chuyển Bê tông cốt thép, là cấu kiện có độ cứng và tiết diện hình học tương đối lớn, chịu uốn, chịu cắt, có khả năng vượt nhịp lớn, dùng để chịu tải trọng từ các cột hoặc vách ở tầng trên xuống các cột hoặc vách ở tầng dưới, giúp tạo ra không gian mở ở các tầng dưới mà không cần nhiều cột [25–28]. Đối tượng nghiên cứu là dầm chuyển có kích thước $B \times H \times L$ lần lượt là: 3 m \times 2,5 m \times 7 m và tổng lượng bê tông là 52,5 m³ như (Hình 2(a)). Do nhiệt độ ở trong tâm khối bê tông thường sẽ lớn hơn so với bề mặt xung quanh. Nên việc chọn vị trí đặt ống thoát nhiệt vào các vị trí ở khu vực vùng tâm khối bê tông là rất cần thiết để có thể đưa nhiệt bên trong khối thoát ra ngoài, từ đó làm giảm đỉnh nhiệt cũng như giảm chênh lệch nhiệt độ giữa lớp bê tông bên trong và ngoài khối đổ. Hệ thống ống thoát nhiệt được bố trí trong dầm chuyển thành 3 lớp ống, khoảng cách bố trí ống giải nhiệt theo phương ngang và phương đứng được thể hiện ở (Hình 2(b) và Hình 2(c)). Các thông số ống làm lạnh như (Bảng 2) và các thông số đầu vào để phân tích như (Bảng 1), cấp phối bê tông dùng cho mẫu phân tích như trong (Bảng 3).



(a) Kích thước khối bê tông dầm chuyển khối lớn



(b) Mặt cắt bố trí ống giải nhiệt (V1- Ống 1; V2- Ống 2; V3- Ống 3)



(c) Mặt bằng bố trí ống giải nhiệt

Hình 2. Kích thước và bố trí ống giải nhiệt bê tông dầm chuyển khối lớn

Bảng 1. Thông số đầu vào của kết cấu dầm chuyển [21, 24]

Đặc điểm	Bê tông
Nhiệt dung riêng, ($\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)	0,25
Khối lượng riêng, (kgf/m^3)	2.500

Đặc điểm	Bê tông	
Nhiệt dung riêng, (kcal/kg.°C)	0,25	
Khối lượng riêng, (kgf/m ³)	2.500	
Hệ số dẫn nhiệt, (kcal/m.h.°C)	2,3	
Hệ số trao đổi nhiệt, (kcal/m ² .h.°C)	Khi tiếp xúc với môi trường	14
	Khi tiếp xúc với ván khuôn thép	14
Nhiệt độ môi trường xung quanh, (°C)	30	
Nhiệt độ của bê tông khi đổ, (°C)	30	
Nhiệt độ bảo dưỡng, (°C)	45	
Cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi, (kgf/m ²)	4.000.000	
Hệ số tăng cường độ nén	$a = 13, b = 0,8$	
Môđun đàn hồi ở 28 ngày tuổi, (kgf/m ²)	$3,5894 \times 10^9$	
Hệ số giãn nở nhiệt	$1,0 \times 10^{-5}$	
Hệ số Poisson's	0,2	

Bảng 2. Bảng thông số ống thoát nhiệt sử dụng trong phân tích

Đặc điểm	Đơn vị	Nước lạnh	Ống
Nhiệt dung riêng	kcal/kg.°C	1	-
Khối lượng riêng	kgf/m ³	1.000	7.850
Hệ số đối lưu	kcal/m ² .h.°C	-	320
Nhiệt độ dòng nước	°C	25	-
Tốc độ của nước làm mát	m ³ /h	1,2	-
Đường kính ống	m	0,027	-

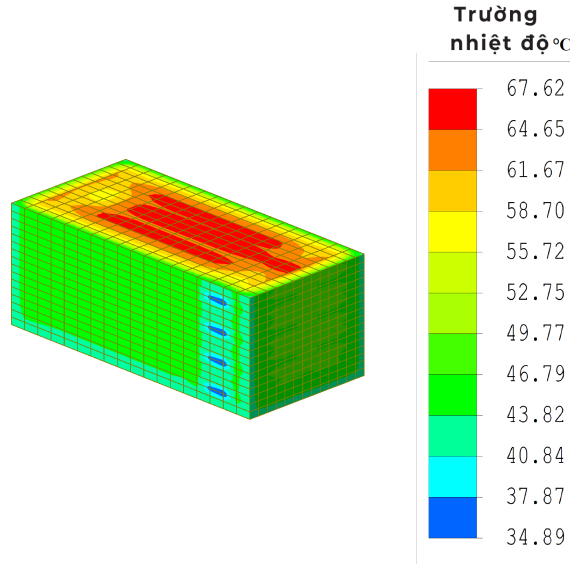
Bảng 3. Bảng cấp phối (Bê tông B35 - M450)

Vật liệu	Giá trị	Đơn vị
Cát	765	kg
Đá	1.100	kg
Nước	101	lít
Bột	420	kg/m ³
Xi măng	308	kg
Tro bay	112	kg
Phụ gia siêu dẻo	5,13	(lít)

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Kiểm chứng và đánh giá độ tin cậy của cách thức mô phỏng với thực nghiệm

Sử dụng mô hình kết cấu dầm chuyển bê tông khối lớn có kích thước $B \times H \times L$ là $2,97 \times 2,5 \times 6,3$ (m), để so sánh với khối dầm chuyển được sử dụng ống thoát nhiệt tại hiện trường đã công bố trong [17]. Việc mô phỏng số bằng phần mềm Midas Civil 2022 với kích thước hình học, thông số đầu vào cũng như phương án bố trí hệ thống ống thoát nhiệt được lấy như phương án thực nghiệm, có kết quả với nhiệt độ lớn nhất là $T_{\max} = 67,62$ °C còn với khối dầm chuyển sử dụng ống thoát nhiệt đo tại hiện trường là $T_{\max} = 69,5$ °C sau khi hoàn thành ủ nhiệt. Vùng phân bố nhiệt độ cao tập trung tại mặt trên đến giữa khối bê tông của dầm chuyển, đặc biệt là tại tâm khối bê tông dầm chuyển.



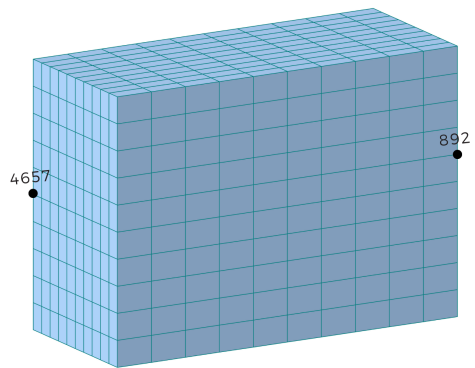
Hình 3. Phân bố nhiệt độ lớn nhất của kết cấu dầm chuyển với cách thức mô phỏng bằng Midas Civil 2022

Nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông giữa kết quả mô phỏng (Hình 3) so với dữ liệu đo thực tế có sự chênh lệch không đáng kể. Kết quả theo tính toán mô phỏng sai lệch so với kết quả thực nghiệm đo tại hiện trường là 2,71%. Nguyên nhân dẫn đến kết quả sai lệch này là do: Quá trình thi công nhiệt độ nước làm mát sẽ luôn thay đổi còn bài toán mô phỏng thì sẽ luôn cố định nhiệt độ bơm vào hệ thống làm mát; bài toán mô phỏng chưa xét đến sự truyền nhiệt từ cốt thép, trong khi thực tế thi công dầm chuyển được bố trí với lượng thép dày đặc...

Với sự sai lệch không đáng kể như trên thì phương pháp mô phỏng có độ tin cậy khi áp dụng dự đoán các kết quả tính toán về nhiệt trong khối bê tông dầm chuyển được kiểm soát bằng hệ thống ống thoát nhiệt.

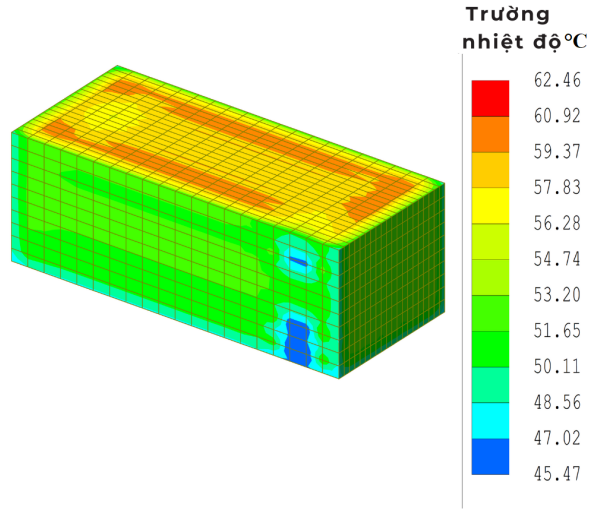
4.2. Kết quả trường độ nhiệt và trường chỉ số nứt trong kết cấu dầm chuyển

Với sự trợ giúp của phần mềm Midas Civil 2022 dựa trên nguyên lý phần tử hữu hạn đã có thể tính toán được chế độ nhiệt (Nhiệt độ tối đa, chênh lệch nhiệt độ tối đa giữa tâm và bề mặt, chỉ số nứt của khối bê tông). Để có thể quan sát rõ rệt sự phát triển và khác nhau của trường nhiệt độ, chênh lệch nhiệt độ và chỉ số nứt trong khối bê tông. Với 2 điểm nghiên cứu chính lần lượt là ở điểm 4657 tại tâm và điểm 892 tại biên của kết cấu dầm chuyển (Hình 4).

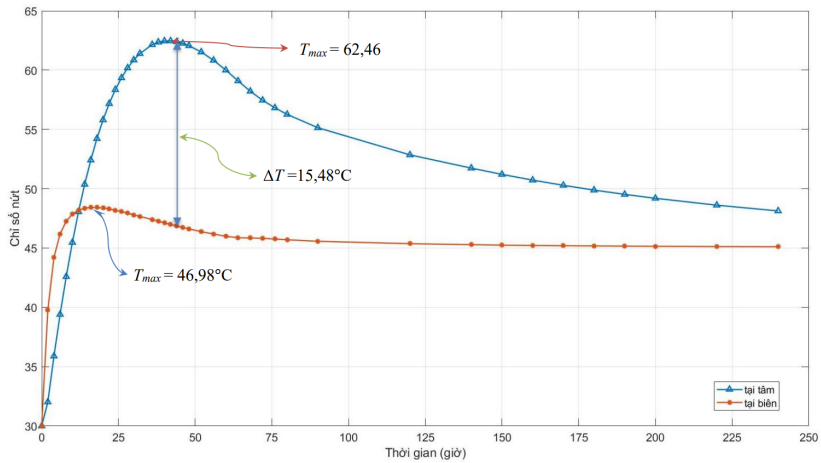


Hình 4. Hai điểm nghiên cứu chính lần lượt là ở tâm và biên được thể hiện 1/4 mô hình kết cấu dầm chuyển

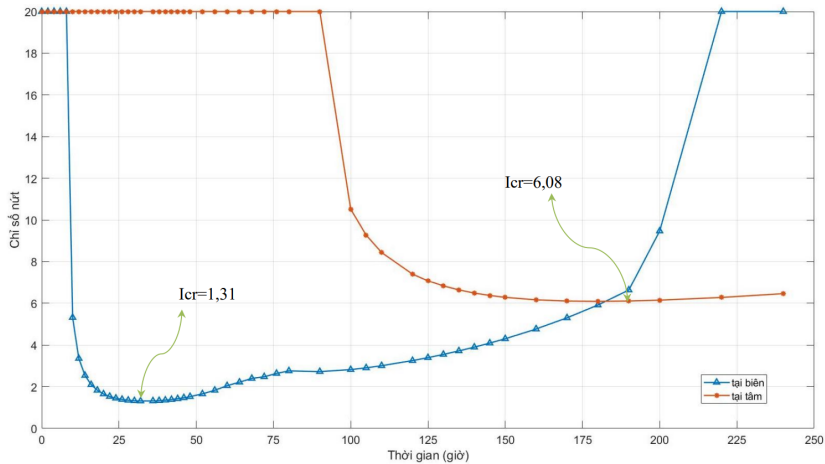
Dựa vào (Hình 5) và (Hình 6) ta thấy ở đây nhiệt độ cao nhất xuất hiện vào thời điểm 40 giờ sau khi bắt đầu đổ bê tông với đỉnh nhiệt độ là 62,46 °C tại tâm khối đổ và 46,98 °C tại vị trí biên vào thời điểm 20 giờ. Điều đó chứng tỏ sử dụng phương pháp hệ thống ống làm lạnh thì nhiệt độ tại tâm thỏa mãn điều kiện $T_{max} < 70$ °C và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông và biên khối bê tông ΔT là 15,48 °C tại thời điểm 40 giờ sau khi đổ thỏa mãn điều kiện chênh lệch nhiệt độ tối đa $\Delta T < 20$ °C của bê tông. Nhìn vào biểu đồ



Hình 5. Phân bố nhiệt độ lớn nhất của kết cấu dầm chuyển



Hình 6. Biểu đồ nhiệt độ lớn nhất của kết cấu dầm chuyển tại tâm và biên của khối bê tông



Hình 7. Chỉ số nứt tại 2 điểm khảo sát ở tâm và biên của kết cấu dầm chuyển

(Hình 7) chỉ số nứt cho thấy với việc sử dụng phương pháp này thì I_{cr} của tâm và biên đều cho kết quả lớn hơn 1 nên khả năng bê tông sẽ không bị nứt theo lý thuyết và thỏa mãn điều kiện hạn chế sự hình thành vết nứt do nhiệt thủy hóa bê tông gây ra.

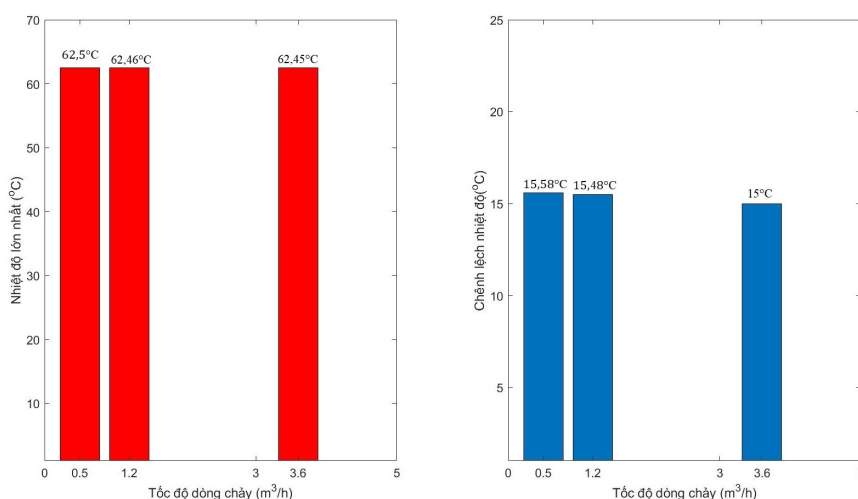
4.3. Khảo sát sự ảnh hưởng các thông số của hệ thống ống thoát nhiệt đến trường nhiệt độ và trường chỉ số nứt trong kết cấu dầm chuyển

a. Khảo sát sự ảnh hưởng của tốc độ dòng chảy

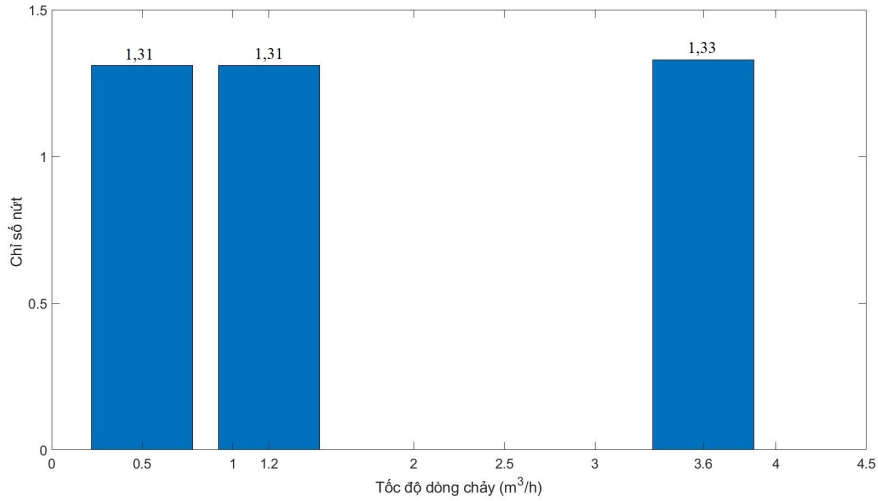
Theo khảo sát ban đầu của hệ thống ống thoát nhiệt, tốc độ dòng nước làm mát là $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$. Để nghiên cứu một trong các thông số chính của hệ thống ống làm mát là tốc độ dòng chảy tác dụng đến việc kiểm soát nhiệt độ và chỉ số nứt, các thông số khác không thay đổi giữ nguyên như ban đầu, trong khi tốc độ dòng chảy được đặt ở mức $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ và $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$. Dựa vào (Hình 8) và (Bảng 4) ta thấy kết quả của tốc độ dòng nước $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ là thấp nhất với $62,45^\circ\text{C}$ so với thông số ban đầu $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$ và tốc độ $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Chênh lệch nhiệt độ tối đa của trường hợp khảo sát với tốc độ dòng nước $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ cũng đã giảm đi so với tốc độ dòng nước trong trường hợp khảo sát ban đầu. Giá trị nhiệt độ lớn nhất xuất hiện trong khối và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa các điểm là yếu tố quyết định đến sự hình thành vết nứt do nhiệt, và kết quả của (Hình 9) cũng đã thể hiện điều đó khi mà chỉ số nứt được khảo sát với trường hợp tốc độ dòng nước $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ là 1,33 cao hơn với trường hợp khảo sát với thông số ban đầu của tốc độ dòng nước $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$ và với trường hợp tốc độ dòng nước là $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Điều đó chứng tỏ rằng với tốc độ dòng nước là $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ có thể coi là tốc độ dòng chảy tốt nhất về hiệu quả kiểm soát nứt do nhiệt trong khối bê tông trong 3 trường hợp khảo sát.

Bảng 4. Kết quả phân tích khi thay đổi tốc độ dòng chảy của ống thoát nhiệt

Tốc độ dòng chảy (m^3/h)	Nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông T_{\max} ($^\circ\text{C}$)	Chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa tâm và bề mặt ΔT_{\max} ($^\circ\text{C}$)	Chỉ số nứt nhỏ nhất trong khối bê tông ($I_{cr \min}$)
3,6	62,45	15	1,33
1,2	62,46	15,48	1,31
0,5	62,50	15,58	1,31



Hình 8. Biểu đồ nhiệt độ lớn nhất trong khối dầm chuyển khi thay đổi tốc độ dòng chảy



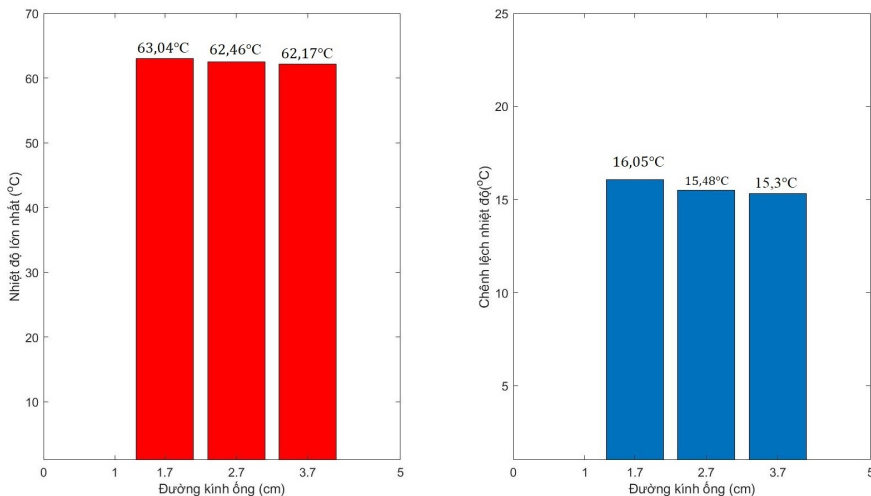
Hình 9. Biểu đồ chỉ số hút nhỏ nhất trong khối đàm chuyển khi thay đổi tốc độ dòng chảy

b. Khảo sát sự ảnh hưởng của đường kính ống thoát nhiệt

Tương tự như các trường hợp thay đổi tốc độ dòng chảy, nhóm tác giả khảo sát với các trường hợp thay đổi đường kính ống thoát nhiệt lần lượt là 0,037 m và 0,017 m. và các thông số khác không thay đổi giữ nguyên như khảo sát ban đầu. Dựa vào kết quả nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ

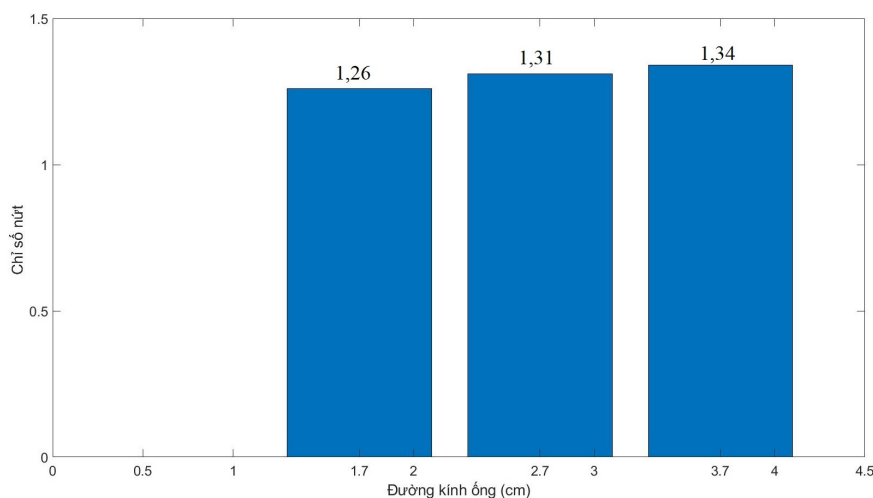
Bảng 5. Kết quả phân tích khi thay đổi đường kính ống thoát nhiệt

Đường kính ống (m)	Nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông T_{max} (°C)	Chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa tâm và bề mặt ΔT_{max} (°C)	Chỉ số hút nhỏ nhất trong khối bê tông ($I_{cr min}$)
0,037	62,17	15,30	1,34
0,027	62,46	15,48	1,31
0,017	63,04	16,05	1,26



Hình 10. Biểu đồ nhiệt độ lớn nhất trong khối đàm chuyển khi thay đổi đường kính ống thoát nhiệt

tại (Hình 10) và (Bảng 5) cho thấy kết quả phân tích đưa ra kết quả tính toán thể hiện nhiệt độ lớn nhất của một điểm (phần tử) bất kỳ ở một thời điểm nhất định của khối bê tông và chênh lệch nhiệt độ tối đa giữa các điểm trong khối bê tông sẽ giảm dần khi đường kính ống tăng dần. Như chúng ta biết, nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa các điểm trong khối bê tông chính là nguyên nhân dẫn đến sự hình thành vết nứt do nhiệt, và kết quả của (Hình 11) cũng đã thể hiện điều đó khi mà chỉ số nứt tại trường hợp phân tích với đường kính ống thoát nhiệt 0,037 m là 1,34 cao hơn so với trường hợp phân tích với thông số ban đầu của đường kính ống thoát nhiệt là 0,027 m và trường hợp đường kính ống thoát nhiệt là 0,017 m. Chúng tôi rằng trường hợp đường kính ống 0,037 m có thể coi là đường kính tốt nhất về hiệu quả kiểm soát nứt do nhiệt trong khối bê tông so với các trường hợp đã phân tích khảo sát.



Hình 11. Biểu đồ chỉ số nứt nhỏ nhất trong khối đầm chuyển khi thay đổi đường kính ống thoát nhiệt

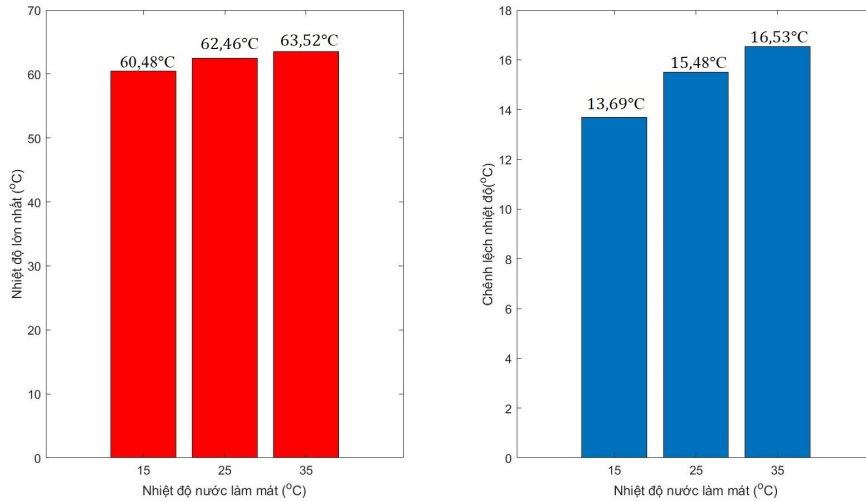
c. Khảo sát sự ảnh hưởng của nhiệt độ nước làm mát

Theo trường hợp khảo sát ban đầu của hệ thống ống thoát nhiệt, nhiệt độ dòng chảy là 25 °C. Để nghiên cứu một trong các thông số chính của hệ thống ống làm mát là nhiệt độ nước làm mát tác dụng đến việc kiểm soát nhiệt độ và chỉ số nứt, các thông số khác không thay đổi giữ nguyên như ban đầu, trong khi nhiệt độ dòng chảy được đặt ở mức 15 °C và 30 °C. Dựa vào (Hình 12) và (Bảng 6) ta thấy kết quả về giá trị đỉnh nhiệt xuất hiện trong khối bê tông ứng với trường hợp nhiệt độ dòng nước 15 °C là thấp nhất với 60,48°C, giảm 3,17 % so với trường hợp nhiệt độ dòng nước là 25 °C và giảm 4,79% so với trường hợp khảo sát ban đầu nhiệt độ dòng nước 25 °C. Trong khi đó chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa các điểm trong khối bê tông của trường hợp khảo sát với nhiệt độ dòng chảy 15 °C có thể giảm đi gần 3 °C so với trường hợp khảo sát nhiệt độ dòng chảy 30 °C và giảm gần 2 °C so với trường

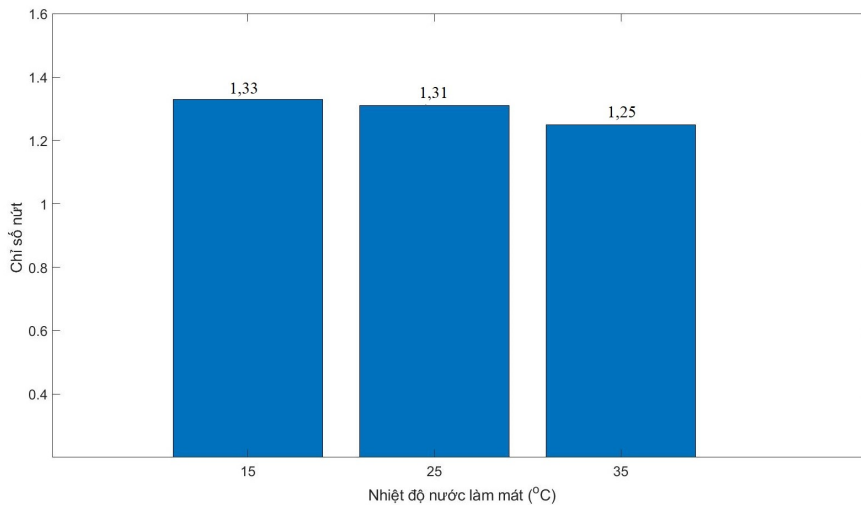
Bảng 6. Kết quả phân tích khi thay đổi nhiệt độ nước làm mát

Nhiệt độ nước (°C)	Nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông T_{max} (°C)	Chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa tâm và bề mặt ΔT_{max} (°C)	Chỉ số nứt nhỏ nhất trong khối bê tông (I_{crmin})
35	63,52	16,53	1,25
25	62,46	15,48	1,31
15	60,48	13,69	1,33

hợp khảo sát ban đầu với nhiệt độ dòng chảy 25 °C. Giá trị đỉnh nhiệt và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa các điểm trong khối bê tông chính là yếu tố quyết định đến sự hình thành vết nứt nhiệt, và kết quả của (Hình 13) của chỉ số nứt nhỏ nhất xuất hiện trong khối bê tông cũng đã thể hiện điều đó. Do đó, với trường hợp phân tích khi nhiệt độ dòng nước là 15 °C có thể coi là trường hợp hiệu quả nhất trong việc kiểm soát nứt do nhiệt so với các trường hợp đã phân tích.



Hình 12. Biểu đồ trường nhiệt độ lớn nhất trong khối đầm chuyển khi thay đổi nhiệt độ nước làm mát



Hình 13. Biểu đồ chỉ số nứt nhỏ nhất trong khối đầm chuyển khi thay đổi nhiệt độ nước làm mát

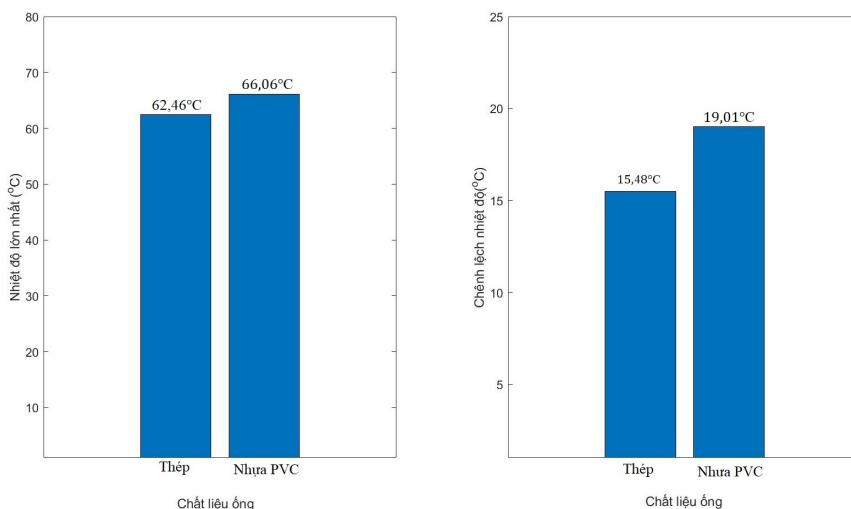
d. Khảo sát sự ảnh hưởng của chất liệu ống thoát nhiệt

Sự khác nhau về tính chất dẫn nhiệt của chất liệu ống sẽ dẫn đến quá trình truyền nhiệt từ bê tông ra bên ngoài ống thông qua đường ống cũng khác nhau. Và khi đó hình thành chế độ nhiệt trong khối bê tông cũng khác nhau. Hệ số đặc trưng nhất của tính chất dẫn nhiệt của vật liệu ống là hệ số dẫn nhiệt và hệ số đối lưu giữa bề mặt ống và phần tử bê tông tiếp xúc. Do hệ số đối lưu của thép lớn hơn nhiều so với hệ số đối lưu vật liệu PVC, điều này dẫn đến giá trị nhiệt độ lớn nhất của bê tông khối lớn khi sử dụng chất liệu thép nhỏ hơn đối với nhựa PVC và được thể hiện ở (Bảng 7) và (Hình 14).

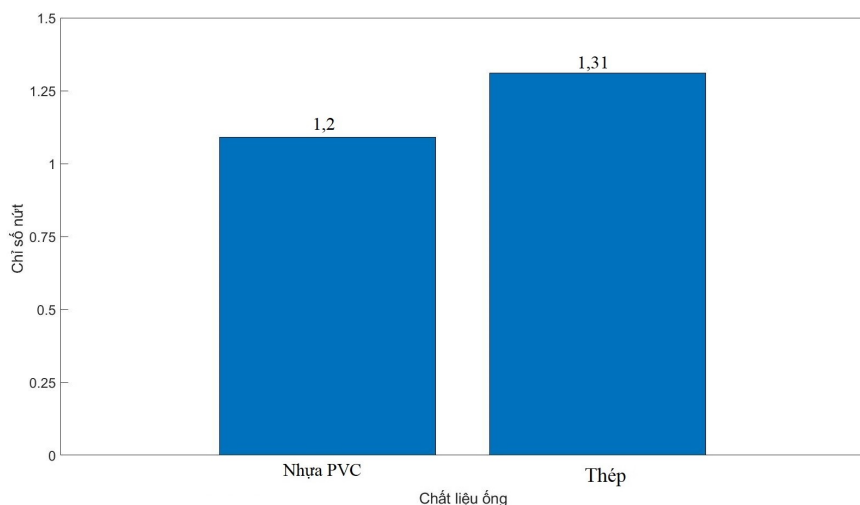
Khi đó dẫn đến chênh lệch nhiệt độ của ống thép cũng sẽ bé hơn ống nhựa PVC và chênh lệch nhiệt độ là yếu tố chính quyết định xuất hiện vết nứt. Như vậy vật liệu làm ống bằng thép là vật liệu có hiệu quả hơn trong việc kiểm soát nứt do nhiệt thủy hóa xi măng (Hình 15).

Bảng 7. Kết quả phân tích khi thay đổi chất liệu ống thoát nhiệt

Chất liệu ống	Nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông T_{max} (°C)	Chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa tâm và bề mặt ΔT_{max} (°C)	Chỉ số nứt nhỏ nhất trong khối bê tông ($I_{cr min}$)
Thép	62,46	15,48	1,31
Nhựa	66,06	19,01	1,20



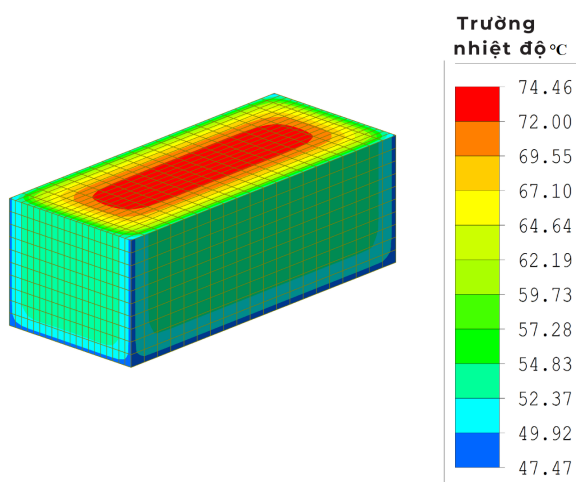
Hình 14. Biểu đồ nhiệt độ lớn nhất trong khối đầm chuyên khi thay đổi chất liệu ống



Hình 15. Biểu đồ chỉ số nứt nhỏ nhất trong khối đầm chuyên khi thay đổi chất liệu ống

4.4. So sánh trường nhiệt độ trong khối bê tông đầm chuyển trong trường hợp đầm không đặt ống thoát nhiệt và trường hợp đầm có đặt hệ thống ống thoát nhiệt

Để đánh giá được sự hiệu quả của hệ thống ống thoát nhiệt trong việc kiểm soát nhiệt khối bê tông đầm chuyển, ta tiến hành so sánh trường nhiệt độ trong khối bê tông đầm chuyển trong trường hợp đầm không đặt ống làm mát và trường hợp đầm có đặt hệ thống ống thoát nhiệt. Tiến hành phân tích với thông số đầu vào của đầm chuyển như (Bảng 1) và cấp phối như (Bảng 3). Theo (Hình 16) trường hợp không sử dụng ống thoát nhiệt, và kết quả cho thấy trị số lớn nhất của nhiệt độ trong khối đầm chuyển và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa các điểm trong khối đầm chuyển luôn lớn hơn so với các trường hợp sử dụng ống thoát nhiệt đã được phân tích ở trên. Với kết quả phân tích ở (Hình 16) thì nhiệt độ lớn nhất xuất hiện trong khối đầm chuyển là 74,46 °C và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa các điểm là 26,99 °C, trị số đó lớn hơn nhiều so với các trường hợp khảo sát ở trên, khi sử dụng ống thoát nhiệt thì nhiệt độ lớn nhất xuất hiện trong khối đầm chuyển chỉ là 62,46 °C và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa các điểm là 15,48 °C.



Hình 16. Phân bố nhiệt độ lớn nhất của kết cấu đầm chuyển khi không sử dụng ống thoát nhiệt

5. Kết luận

Dựa vào kết quả nghiên cứu thu được có thể đưa ra một số kết luận về việc kiểm soát nứt do nhiệt thủy hóa xi măng trong bê tông khối lớn khi sử dụng hệ thống ống thoát nhiệt:

Nghiên cứu này cho thấy hiệu quả của việc sử dụng ống thoát nhiệt để giảm đỉnh nhiệt cũng như giảm chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa các điểm trong khối bê tông, đỉnh nhiệt giảm tới 12 °C tương ứng 16,1% và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa các điểm giảm 11,51 °C tương ứng 41,7%. Hệ thống dòng nước lạnh chạy qua hệ thống ống thoát nhiệt sẽ phân tán nhiệt độ lớn nhất ở tâm khối bê tông thoát ra ngoài khối đổ. Từ đó sẽ làm giảm chênh lệch nhiệt độ ΔT giữa tâm và bề mặt khối đổ.

Việc sử dụng vật liệu ống thoát nhiệt bằng thép cho hiệu quả thoát nhiệt tốt hơn khi sử dụng vật liệu ống làm lạnh bằng vật liệu nhựa PVC. Nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông có sử dụng hệ thống ống thoát nhiệt bằng thép giảm lần lượt là 3,6 °C tương ứng 5,4% và 3,53 °C tương ứng 18,6% so với trường hợp sử dụng hệ thống ống thoát nhiệt bằng vật liệu PVC. Đồng thời chỉ số nứt tăng từ 1,2 lên 1,31 tương ứng là 9,2%.

Sự thay đổi tốc độ dòng chảy và đường kính ống tỉ lệ nghịch với giá trị đỉnh nhiệt và giá trị chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông, đồng thời tỉ lệ thuận với trị số của chỉ số nứt, kết quả nghiên cứu cho thấy: Khi tăng tốc độ dòng chảy từ 0,5m³/h đến 3,6m³/h thì nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch

hiệt độ lớn nhất giữa các điểm trong khối bê tông đầm chuyển giảm lần lượt là 0,05 °C tương ứng 0,08% và 0,08 °C tương ứng 0,51%, đồng thời giá trị chỉ số nứt tăng 0,02 tương ứng 1,53%. Khi thay đổi đường kính từ 0,017 m đến 0,037 m thì nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa các điểm trong khối bê tông đầm chuyển giảm lần lượt là 0,87 °C tương ứng 1,38% và 0,75 °C tương ứng 4,67%, đồng thời giá trị chỉ số nứt tăng 0,08 tương ứng 6,35%.

Mặt khác sự thay đổi nhiệt độ của nước làm mát trong ống thoát nhiệt lại tỉ lệ thuận với với giá trị đỉnh nhiệt và giá trị chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông và đồng thời tỉ lệ nghịch với trị số của chỉ số nứt, kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra rằng khi giảm nhiệt độ nước làm mát trong ống từ 35 °C về 15 °C thì nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa các điểm trong khối bê tông đầm chuyển giảm lần lượt là 3,04 °C tương ứng 4,79% và 2,84 °C tương ứng 17,18%, đồng thời giá trị chỉ số nứt tăng 0,08 tương ứng 6,40%.

Lựa chọn các thông số của ống thoát nhiệt như chất liệu ống, nhiệt độ nước làm mát, đường kính ống, tốc độ dòng chảy một cách hợp lý sẽ hiệu quả trong việc kiểm soát nhiệt trong khối bê tông, trong đó việc thay đổi thông số chất liệu làm ống là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất trong việc giảm đỉnh nhiệt và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông.

Tài liệu tham khảo

- [1] Atrushi, D. S. (2003). *Tensile and compressive creep of early age concrete: testing and modelling*. Norway.
- [2] Javanmardi, F., Léger, P. (2005). [Grouting of cracks in concrete dams: numerical modelling and structural behaviour](#). *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(4):161–173.
- [3] Van Breugel, K. (1998). *Prediction of temperature development in hardening concrete*. RILEM REPORT.
- [4] TCVN 9341:2012. *Bê tông khối lớn - Thi công và nghiệm thu*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Nhà xuất bản Giao thông vận tải, Hà Nội.
- [5] ACI Committee 301-10 (2010). *Specifications for structural concrete*. American Concrete Institute.
- [6] Zuo, Z., Hu, Y., Li, Q., Zhang, L. (2014). [Data mining of the thermal performance of cool-pipes in massive concrete via in situ monitoring](#). *Mathematical Problems in Engineering*, 2014:1–15.
- [7] Glover, R. E. (1949). *Cooling of concrete dams*. Final reports for Boulder canyon project Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver.
- [8] Liu, X., Zhang, C., Chang, X., Zhou, W., Cheng, Y., Duan, Y. (2015). [Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system](#). *Applied Thermal Engineering*, 78: 449–459.
- [9] Zhu, B. (1999). [Effect of cooling by water flowing in nonmetal pipes embedded in mass concrete](#). *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(1):61–68.
- [10] Kim, J. K., Kim, K. H., Yang, J. K. (2001). [Thermal analysis of hydration heat in concrete structures with pipe-cooling system](#). *Computers & Structures*, 79(2):163–171.
- [11] Zhu, B. F. (2003). The equivalent heat conduction equation of pipe cooling in mass concrete considering influence of external temperature. *Journal of Hydraulic Engineering*, 34(3):49–54.
- [12] Yang, J., Hu, Y., Zuo, Z., Jin, F., Li, Q. (2012). [Thermal analysis of mass concrete embedded with double-layer staggered heterogeneous cooling water pipes](#). *Applied Thermal Engineering*, 35:145–156.
- [13] Xie, H., Chen, Y. (2005). [Influence of the different pipe cooling scheme on temperature distribution in RCC arch dams](#). *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 21(12):769–778.
- [14] Chen, S., Su, P., Shahrour, I. (2011). [Composite element algorithm for the thermal analysis of mass concrete: Simulation of cooling pipes](#). *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 21(4):434–447.
- [15] Lam, N. X. (2017). *Phân tích các giải pháp bố trí giàn ống thoát nhiệt khi thi công móng mô trụ cầu bê tông khối lớn*. Trường Đại học Giao thông vận tải.
- [16] 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 (KH-CN XD) - ĐHXD*, 14(5V):27–38.

- [17] Miên, T. V., Phú, N. H. (2022). [Mô phỏng giải nhiệt cho dầm chuyển bê tông khối lớn bằng hệ thống ống làm mát](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 16(1V):35–47.
- [18] Minh, L. V., Công, V. C. (2024). So sánh kết quả tính toán nhiệt thủy hóa trong bê tông khối lớn bằng Midas civil và Ansys. *Tạp chí Xây dựng*, 88–93.
- [19] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. (1996). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, New York.
- [20] Bofang, Z. (2014). [Natural cooling of mass concrete](#). *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete*, Elsevier, 83–103.
- [21] Midas Information Technology (2004). *Heat of hydration - Analysis analysis manual version 7.0.1*.
- [22] Thực, L. V., Trung, L. Q., Hùng, N. M. (2019). [Nghiên cứu kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn bằng cơ chế sử dụng ống làm lạnh](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 13(3V): 99–107.
- [23] ACI Committee 207.R1-96 (2005). *Mass concrete*. American Concrete Institute.
- [24] Japan Concrete Institute (2016). *Guidelines for control of cracking of mass concrete*. Japan.
- [25] Zhang, N., Tan, K.-H. (2007). [Size effect in RC deep beams: Experimental investigation and STM verification](#). *Engineering Structures*, 29(12):3241–3254.
- [26] Lộc, N. X. (2023). Làm việc của dầm chuyển bê tông cốt thép trong nhà cao tầng. *Xây dựng & Đô thị*, 89:69–71.
- [27] Londhe, R. S. (2011). [Shear strength analysis and prediction of reinforced concrete transfer beams in high-rise buildings](#). *Structural Engineering & Mechanics*, 37(1):39.
- [28] Ley, M. T., Riding, K. A., Bae, S., Breen, J. E. (2007). [Experimental verification of strut-and-tie model design method](#). *ACI Structural Journal*, 104(6):749–755.