Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, NUCE 2020. 14 (5V): 27–38

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

Nguyễn Trọng Chức[a,*], Hồ Ngọc Khoa[b], Trần Hồng Hải[b]

[a]*Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật Quân sự, số 236 đường Hoàng Quốc Việt, quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam*
[b]*Khoa Xây dựng dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng, số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 25/8/2020, Sửa xong 14/10/2020, Chấp nhận đăng 16/10/2020

Tóm tắt

Phản ứng hóa học giữa các khoáng của xi măng với nước trong quá trình thủy hóa xi măng đã tạo ra một lượng nhiệt lớn trong kết cấu bê tông khối lớn (BTKL). Lượng nhiệt đó tích tụ bên trong khối bê tông và tạo ra chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt của khối bê tông, hệ quả là nguy cơ cao hình thành vết nứt nhiệt trong kết cấu. Bài báo này, 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 (PTHH). Bên cạnh đó, khi sử dụng vật liệu ống làm lạnh là thép, nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông có thể giảm 10% so với nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông có sử dụng hệ thống ống làm lạnh bằng vật liệu PVC.

Từ khoá: chế độ nhiệt; nhiệt độ lớn nhất; chênh lệch nhiệt độ; bê tông khối lớn; vết nứt nhiệt; ống làm lạnh.

THE MATHEMATICAL PREDICTION MODEL FOR TEMPERATURE REGIME IN THE MASS CONCRETE BLOCK USING THE COOLING PIPE SYSTEM

Abstract

The chemical reaction between the minerals of cement and water during cement hydration, which has created a large amount of heat in the mass concrete structure. This amount of heat builds up inside the concrete and creates a temperature difference between the center and the surface of the concrete block as a result of, high risk of forming thermal cracks in the structure. This paper analyzes and constructs the mathematical prediction models for the temperature regime in mass concrete structures with the cooling pipe system from different materials. The result gives the mathematical functions, which allow engineers to quickly predict the temperature regime in the mass concrete structure without the need for finite element modeling. Besides, when using the steel cooling pipe, the maximum temperature in concrete blocks can be reduced by 10% compared to the maximum temperature in concrete blocks using PVC pipe cooling systems.

Keywords: temperature regime; maximum temperature; temperature difference; mass concrete; thermal crack; cooling pipe.

https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(5V)-03 © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Trong quá trình thủy hóa xi măng, lượng nhiệt do thủy hóa xi măng tăng đáng kể bên trong kết cấu. Theo định nghĩa về kết cấu BTKL thì với thể tích đồ sộ như móng nhà, móng cầu, dầm cầu,

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* ntchuc.mta198@gmail.com (Chức, N. T.)

đập... chúng được gọi chung là kết cấu BTKL [1–3]. Trên bề mặt của kết cấu BTKL dưới tác động của nhiệt độ môi trường, nhiệt độ của chúng sẽ giảm nhanh chóng so với nhiệt độ bên trong (tâm) của kết cấu. Điều đó dẫn đến sự chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt khối bê tông [4]. Hệ quả của sự chênh lệnh nhiệt độ trên kết hợp với sự hạn chế biến dạng đã hình thành ứng suất kéo. Khi ứng suất kéo hình thành vượt quá cường độ kéo cho phép của bê tông thì các vết nứt nhiệt xảy ra. Các vết nứt xuất hiện không chỉ ảnh hưởng đến tuổi thọ kết cấu mà còn ảnh hưởng đến quá trình khai thác sau này. Đặc biệt, trên thế giới cũng như ở Việt Nam, vấn đề kiểm soát nứt do nhiệt thủy hóa xi măng đối với kết cấu BTKL được đông đảo các nhà khoa học quan tâm và nghiên cứu [5–8].

Để ngăn ngừa sự hình thành vết nứt nhiệt trong cấu kiện BTKL trong quá trình xây dựng, cần thiết phải kiểm soát chế độ nhiệt (nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ) trong kết cấu BTKL. Theo nghiên cứu [9], để tránh hình thành vết nứt nhiệt thì nhiệt độ lớn nhất không được vượt quá 70 °C và chênh lệch nhiệt độ bên trong khối bê tông nhỏ hơn 20 °C. Cả hai yếu tố trên có thể đạt được bằng cách hạ nhiệt độ thành phần của khối bê tông (điều chỉnh nhiệt độ ban đầu hỗn hợp bê tông) – phương pháp làm mát trước hoặc bằng cách cho dòng nước lạnh chảy qua đường ống bên trong ống bê tông – phương pháp làm lạnh sau.

Phương pháp sử dụng hệ thống ống làm lạnh là một trong những phương pháp hiệu quả và được sử dụng phổ biến cho kết cấu BTKL [10]. Ưu điểm nổi bật của phương pháp này là hạ nhiệt độ lớn nhất bên trong cấu kiện BTKL bằng đường ống làm lạnh. Phương pháp này lần đầu tiên được áp dụng vào công trình đập Owyhee năm 1931 [11]. Tiếp đó, được ứng dụng vào công trình đập Hoover năm 1936 [12]. Thời gian sau đó, việc áp dụng hệ thống ống làm lạnh đã trở nên phổ biến hơn trong cấu kiện BTKL.

Một trong những nghiên cứu đầu tiên về sử dụng hệ thống ống làm lạnh đã được báo cáo bởi Cục Bureau of Reclamation của Hoa kỳ [13]. Báo cáo chỉ ra rằng, bê tông được mô hình hóa dạng cột và ống làm lạnh được đặt bên trong khối bê tông. Bề mặt của cột bề tông được gắn cách nhiệt và sự phân bố nhiệt độ trong khối bê tông được tính vào giai đoạn tuổi muộn, tức là khoảng thời gian mà phản ứng thủy hóa xi măng đã hoàn thành. Ngày nay, với sự phát triển của phương pháp PTHH đã xác định được trường nhiệt độ bên trong khối bê tông khi mô hình hóa đường ống làm lạnh là phần tử đường [14].

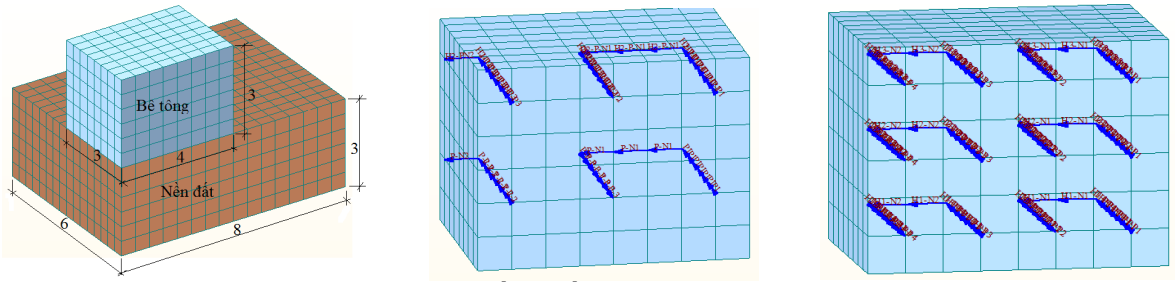
Khi thiết kế hệ thống ống làm lạnh có rất nhiều yếu tố cần được xem xét như đường kính ống làm mát, độ dày ống, độ dẫn nhiệt vật liệu ống, khoảng cách ống... những yếu tố kể trên đã được rất nhiều các tác giả nghiên cứu và đánh giá [15–17].

Cho đến nay, có rất ít các nhà nghiên cứu xây dựng hàm toán học để dự đoán chế độ nhiệt trong cấu kiện BTKL có sử dụng hệ thống ống làm lạnh từ các vật liệu khác nhau. Đáng chú ý nhất là các công bố của GS.TSKH Aniskin N.A. và cộng sự thuộc Đại học xây dựng nghiên cứu Quốc gia Matxcova – Liên bang Nga đã xây dựng khá hoàn chỉnh mô hình dự đoán chế độ nhiệt trong công trình đập bởi vật liệu bê tông thường và bê tông đầm lăn với các yếu tố được xem xét như: hàm lượng xi măng, loại xi măng, tốc độ thi công, nhiệt độ hỗn hợp ban đầu của bê tông, chiều dày lớp đổ, nhiệt độ môi trường... [18–20]. Tuy nhiên, với những kết cấu BTKL có sử dụng ống làm lạnh từ vật liệu khác nhau thì chưa được giải quyết trọn vẹn. Trong nghiên cứu này, với sự giúp đỡ của phương pháp PTHH đã xây dựng mô hình dự đoán toán học về chế độ nhiệt trong cấu kiện BTKL có sử dụng hệ thống ống làm lạnh bằng vật liệu ống khác nhau. Kết quả nghiên cứu cho phép các kỹ sư dự đoán nhanh chóng giá trị chế độ nhiệt trong cấu kiện BTKL để ngăn ngừa, điều chỉnh và kiểm soát sự hình thành vết nứt nhiệt xảy ra trên cấu kiện BTKL.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Kích thước hình học của mô hình phân tích số 3D với khối bê tông có kích thước 8 × 6 × 3 m, được đặt trên nền có kích thước 16 × 12 × 3 m.



(a) Mô hình 3D của 1/4 kích thước cấu kiện BTKL, đơn vị m

(b) Bố trí ống làm lạnh bước 1,5 m × 1,5 m

(c) Bố trí ống làm lạnh bước 1,0 m × 1,0 m

Hình 1. Mô hình phân tích số và sơ đồ bố trí ống làm lạnh

Do tính chất đối xứng hai trục nên sử dụng 1/4 mô hình để phân tích số và được thể hiện ở Hình 1. Số lượng 2509 phần tử và 1920 nút được sử dụng để mô phỏng phân tích bài toán nhiệt. Các tính chất vật lý của bê tông và nền được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Các đặc tính vật lý của vật liệu sử dụng trong phân tích

Đặc điểm	Đơn vị	Bê tông	Lớp nền
Nhiệt dung riêng	kcal/kg.°C	0,26	0,21
Khối lượng riêng	kg/m^3	2400	2600
Hệ số dẫn nhiệt	kcal/m.h.°C	2,49	1,81
Hệ số trao đổi nhiệt khi tiếp xúc môi trường	kcal/m^2.h.°C	12	12
Hệ số trao đổi nhiệt khi tiếp xúc ván khuôn gỗ	kcal/m^2.h.°C	8	-
Nhiệt độ môi trường	°C	30	25
Môđun đàn hồi	kG/cm^2	$2{,}5 \times 10^5$	$1{,}0 \times 10^4$
Hệ số giãn nở nhiệt		$1{,}0 \times 10^{-5}$	$1{,}0 \times 10^{-5}$
Hệ số poisson's		0,20	0,30

Ở tuổi sớm ngày cũng như thời kỳ khai thác của công trình, tồn tại rất nhiều các yếu tố ảnh hưởng đến chế độ nhiệt trong cấu kiện bê tông khối lớn. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, để xây dựng mô hình dự đoán toán học về chế độ nhiệt trong cấu kiện BTKL có sử dụng hệ thống ống làm lạnh thì các yếu tố cơ bản sau được đưa vào nghiên cứu xem xét bao gồm:

- $X_1(X)$ là hàm lượng xi măng Pooclang thường thay đổi trong khoảng (250–400), kg/m^3 [9];
- $X_2(T_{bd})$ là nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông trong khoảng (15–30), °C;
- $X_3(T_n)$ là nhiệt độ nước làm lạnh qua ống trong khoảng (8–15), °C [20];
- Phân bố ống làm lạnh theo phương ngang và dọc là 1,5 m × 1,5 m và 1,0 m × 1,0 m [16];
- Vật liệu ống làm lạnh là thép và nhựa PVC.

Giả sử rằng hàm toán học về chế độ nhiệt trong cấu kiện bê tông khối lớn cần xác định là hàm đa thức xấp xỉ, được viết dưới dạng (1) [18].

$$Y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (1)$$

Số lượng thí nghiệm số cần thiết N trong quy hoạch được xác định theo công thức (2).

$$N = 2^k + 1 \quad (2)$$

trong đó k là số các yếu tố cần xem xét; 1 là số lần lặp thí nghiệm số ở tâm; vì vậy $N = 9$.

Phương trình (1) được gọi là phương trình hồi quy với các hệ số b_i được xác định bằng phương pháp bình phương tối thiểu.

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^{8} y_i X_{ij}}{8} \quad (3)$$

Để kiểm tra tính đúng đắn của mô hình toán học thu được, một thí nghiệm số chi tiết được thực hiện ở tâm các yếu tố (giá trị trung bình của giá trị tối đa và tối thiểu của mỗi biến khảo sát).

Ma trận thí nghiệm số cần thực hiện để xác định chế độ nhiệt trong cấu kiện bê tông khối lớn với hệ thống ống làm mát được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Ma trận thực nghiệm số với ba yếu tố khảo sát

#	x_1	x_2	x_3	Giá trị của các yếu tố		
				X_1, kg/m^3	X_2, °C	X_3, °C
1	−1	−1	−1	250	15	8
2	1	−1	−1	400	15	8
3	−1	1	−1	250	30	8
4	1	1	−1	400	30	8
5	−1	−1	1	250	15	15
6	1	−1	1	400	15	15
7	−1	1	1	250	30	15
8	1	1	1	400	30	15
9*	0	0	0	325	22,5	11,5

Trong đó: các giá trị mã hóa x_1, x_2 và x_3 nằm trong khoảng $(-1, +1)$ tương ứng với giá trị nhỏ nhất và lớn nhất của giá trị thực X_1, X_2 và X_3. Khi $x_1 = x_2 = x_3 = 0$ tương ứng với các giá trị thực của X_1, X_2 và X_3 là giá trị trung bình (ở tâm).

Bên cạnh đó, thời gian duy trì hệ thống ống làm lạnh sau 6 giờ đổ bê tông và kéo dài đến hết 7 ngày đầu tiên sau khi đổ. Sơ đồ bố trí các hàng ống làm lạnh được trình bày ở Hình 1. Các thông số của nước và ống làm lạnh được trình bày ở Bảng 3 [15, 21].

Nguồn nhiệt trong hỗn hợp bê tông là tham số quan trọng trong việc xác định trường nhiệt độ trong cấu kiện bê tông khối lớn. Có rất nhiều nghiên cứu lý thuyết cũng như thực nghiệm để xác định sự gia tăng nhiệt độ đó [9]. Theo hướng dẫn tiêu chuẩn JCI của Nhật Bản, khi không có điều kiện thí nghiệm thì sự tăng đoạn nhiệt trong bê tông được xác định theo phương trình (4) [9]. Phương trình của sự tăng đoạn nhiệt trên phụ thuộc vào hàm lượng xi măng (X) và nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông (t_{bd}) [9]. Các hằng số của phương trình (4) được xác định trong Bảng 4.

$$T(t) = T_\infty \left[1 - \exp\left\{-r_{AT}(t - t_{0,Q})^{S_{AT}}\right\}\right] \quad (4)$$

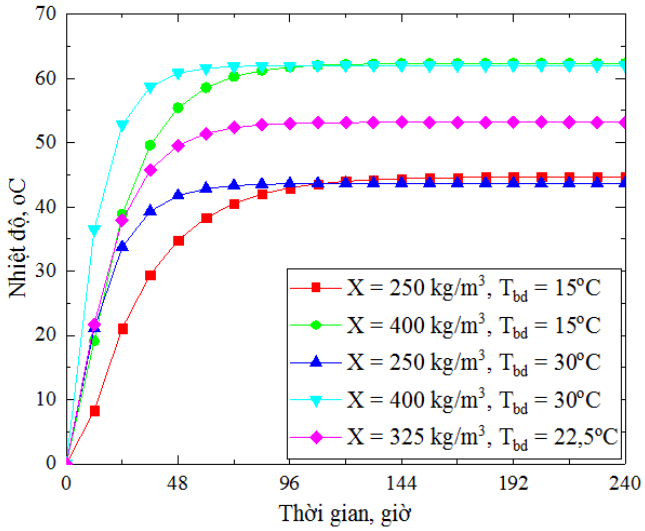
Bảng 3. Các thông số của ống lạnh

Đặc điểm chất liệu	Đơn vị	Nước lạnh	Ống làm mát	
		-	Thép	PVC
Nhiệt dung riêng	kcal/kg°C	1,0	0,16	0,22
Khối lượng riêng	kg/m^3	1000	7800	1400
Hệ số đối lưu	kcal/m^2.h.°C	-	500	41,6
Nhiệt độ dòng nước	°C	(8-15)	-	-
Tốc độ chảy	m^3/h	1,2	-	-
Đường kính ống ngoài	m	-	0,03	0,03
Chiều dày ống	m		0,002	0,002

trong đó t là tuổi bê tông, ngày; $T(t)$ là nhiệt độ đoạn nhiệt ở tuổi t ngày, °C; T_∞ là nhiệt độ cực đại, °C; r_{AT}, S_{AT} là các hệ số đặc trưng cho tốc độ gia tăng nhiệt độ; $t_{0,Q}$ là tuổi bắt đầu tăng nhiệt độ, ngày.

Bảng 4. Các hàm số và các tham số của phương trình (1) được xác định cho cấp phối bê tông với hàm lượng xi măng từ 250 kg/m^3 đến 400 kg/m^3

Các hàm số	250 kg/m^3 ≤ X ≤ 400 kg/m^3	
$T_\infty = a_{AT} + b_{AT}T_{bd}$	$a_{AT} = 17{,}5 + 0{,}113X$	$b_{AT} = -0{,}146 + 3{,}08.10^{-4}X$
$r_{AT} = a_{AT} + b_{AT}T_{bd}$	$a_{AT} = -0{,}426 + 2{,}07.10^{-3}X$	$b_{AT} = 0{,}0471 + 1{,}88.10^{-5}X$
$S_{AT} = 1$		
$t_{0,Q} = a_{AT}.exp(-b_{AT}T_{bd})$	$a_{AT} = 0{,}832 - 5.31.10^{-4}X$	$b_{AT} = 0{,}0482 + 6{,}8.10^{-5}X$



Hình 2. Đường cong đoạn nhiệt phụ thuộc vào hàm lượng xi măng (X) và nhiệt độ ban đầu (T_{bd}) theo tiêu chuẩn JCI của Nhật Bản

Từ các giá trị như hàm lượng xi măng X, nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông T_{bd} khảo sát thay vào phương trình (4) cho ta được đường cong đoạn nhiệt theo tiêu chuẩn JCI Nhật Bản và trình bày ở Hình 2.

2.2. Nguyên lý cơ bản của quá trình truyền nhiệt trong khối bê tông có sử dụng hệ thống ống làm lạnh

Chế độ nhiệt trong cấu kiện BTKL khi sử dụng hệ thống ống làm lạnh được xác định dựa trên việc giải hai phương trình vi phân Fourier theo nguyên lý cân bằng năng lượng. Một 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 (5) [22]

$$k_c \nabla^2 T_c + Q_h = \rho_c c_c \frac{\partial T_c}{\partial t} \tag{5}$$

trong đó T_c là nhiệt độ của bê tông ở tuổi t ngày, °C; k_c là hệ số dẫn nhiệt của bê tông, kcal/m.°C; Q_h là nhiệt lượng tỏa ra do thủy hóa xi măng, kcal/h.m^3; c_c là nhiệt dung riêng của bê tông, kcal/kg.°C; ρ_c là khối lượng riêng của bê tông, kg/m^3; t là thời gian, ngày.

Phương trình thứ hai có tính đến sự trao đổi nhiệt giữa hệ thống ống làm lạnh và bê tông và được thể hiện như phương trình (6) [22]

$$\rho_w c_w \left(\frac{\partial T_w}{\partial t} + \vec{u} \nabla T_w \right) = k_w \nabla^2 T_w \tag{6}$$

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 (5) và (6) bằng cách sử dụng các điều kiện biên ban đầu và đường cong đoạn nhiệt trong quá trình thủy hóa xi măng.

Sự hình thành chế độ nhiệt trong cấu kiện bê tông khối lớn không chỉ phụ thuộc vào quá trình tăng nhiệt do thủy hóa xi măng mà còn phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác như nhiệt độ môi trường, loại ván khuôn... Bên cạnh đó, quá trình truyền nhiệt đối lưu giữa bề mặt bê tông và không khí xung quanh được thể hiện bằng định luật Newton. Điều kiện biên đối lưu được đưa bởi phương trình (7) [22]

$$q_{doiluu} = h_c(T_c - T_{kk}) \tag{7}$$

trong đó T_c là nhiệt độ bê tông, °C; T_{kk} là nhiệt độ không khí, °C; h_c là hệ số đối lưu giữa bề mặt bê tông và không khí, kcal/m^2.h.°C.

Hiện nay, với sự trợ giúp của các phần mềm phân tích kết cấu như Ansys, Midas civl, Abaqus... dựa trên nguyên lý phần tử hữu hạn đã giải quyết được bài toán chế độ nhiệt trong cấu kiện BTKL có sử dụng ống làm lạnh [23]. Trong nghiên cứu này, mô hình 3D trong phần mềm Midas civil đã được tác giả sử dụng để xác định các mục tiêu nghiên cứu đặt ra.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Xây dựng mô hình toán học dự đoán chế độ nhiệt trong cấu kiện bê tông khối lớn có sử dụng hệ thống ống làm lạnh

Với sự giúp đỡ của phần mềm Midas/civil dựa trên nguyên lý phần tử hữu hạn đã xác định được chế độ nhiệt (nhiệt độ tối đa, chênh lệch nhiệt độ tối đa giữa tâm và bề mặt khối bê tông) của ma trận

Bảng 5. Giá trị nhiệt độ tối đa (T_{max}) và chênh lệch nhiệt độ tối đa (ΔT_{max}) trong cấu kiện bê tông khối lớn có sử dụng hệ thống ống làm mát bằng vật liệu thép

#	x_1	x_2	x_3	Giá trị của các yếu tố			Bước ống 1,5 m × 1,5m		Bước ống 1 m × 1 m	
				X_1, kg/m^3	X_2, °C	X_3, °C	T_{max}	ΔT_{max}	T_{max}	ΔT_{max}
1	−1	−1	−1	250	15	8	35,08	16,03	31,63	15,02
2	1	−1	−1	400	15	8	49,70	22,62	47,2	16,53
3	−1	1	−1	250	30	8	47,39	22,01	43,87	18,56
4	1	1	−1	400	30	8	62,51	33,84	60,01	27,08
5	−1	−1	1	250	15	15	46,12	18,02	42,65	16,07
6	1	−1	1	400	15	15	55,03	24,56	52,53	19,65
7	−1	1	1	250	30	15	52,03	23,04	48,89	18,05
8	1	1	1	400	30	15	66,51	35,02	64,01	29,16
9*	0	0	0	325	22,5	11,5	51,82	22,97	50,17	19,67

Bảng 6. Giá trị nhiệt độ tối đa (T_{max}) và chênh lệch nhiệt độ tối đa (ΔT_{max}) trong cấu kiện bê tông khối lớn có sử dụng hệ thống ống làm mát bằng bằng vật liệu PVC

No	x_1	x_2	x_3	Giá trị của các yếu tố			PVC 1,5 m × 1,5 m		PVC 1 m × 1 m	
				X_1, kg/m^3	X_2, °C	X_3, °C	T_{max}	ΔT_{max}	T_{max}	ΔT_{max}
1	−1	−1	−1	250	15	8	45,41	15,27	38,87	15,15
2	1	−1	−1	400	15	8	54,86	23,29	52,08	17,76
3	−1	1	−1	250	30	8	54,78	23,58	52,17	18,13
4	1	1	−1	400	30	8	70,78	35,36	66,51	28,44
5	−1	−1	1	250	15	15	49,27	20,18	49,01	18,48
6	1	−1	1	400	15	15	57,47	24,69	55,37	19,85
7	−1	1	1	250	30	15	56,68	24,62	55,11	19,77
8	1	1	1	400	30	15	72,70	36,08	69,34	30,14
9*	0	0	0	325	22,5	11,5	56,90	24,91	53,76	19,50

thí nghiệm số với loại ống làm lạnh và bước đặt ống khác nhau. Kết quả của chế độ nhiệt được thể hiện trong các Bảng 5 và 6.

Sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất, các hàm đa thức xấp xỉ nhận được từ kết quả nhiệt độ tối đa, chênh lệch nhiệt độ tối đa trong cấu kiện bê tông khối lớn có sử dụng hệ thống ống làm lạnh bằng vật liệu khác nhau được thể hiện bởi các hàm số biểu diễn bởi các phương trình (8)÷(15).

+ Với ống làm mát bằng vật liệu thép

Khi bước đặt ống là 1,5 m × 1,5 m.

$$T_{max} = 51{,}79 + 6{,}65x_1 + 5{,}31x_2 + 3{,}12x_3 + 0{,}75x_1x_2 - 0{,}96x_2x_3 - 0{,}79x_1x_3 + 0{,}63x_1x_2x_3 \quad (8)$$

$$\Delta T_{max} = 24{,}39 + 4{,}61x_1 + 4{,}09x_2 + 0{,}77x_3 + 1{,}34x_1x_2 - 0{,}22x_2x_3 + 0{,}01x_1x_3 + 0{,}03x_1x_2x_3 \quad (9)$$

Khi bước đặt ống là 1,0 m × 1,0 m.

$$T_{max} = 48{,}85 + 7{,}09x_1 + 5{,}35x_2 + 3{,}17x_3 + 0{,}73x_1x_2 - 0{,}92x_2x_3 - 0{,}84x_2x_3 + 0{,}58x_1x_2x_3 \quad (10)$$

$$\Delta T_{max} = 20{,}02 + 3{,}09x_1 + 3{,}18x_2 + 0{,}72x_3 + 1{,}82x_1x_2 - 0{,}33x_2x_3 + 0{,}58x_1x_3 + 0{,}07x_1x_2x_3 \quad (11)$$

+ Với ống làm mát bằng vật liệu PVC
Khi bước đặt ống là 1,5 m × 1,5 m.

$$T_{\max} = 57{,}74 + 6{,}21x_1 + 5{,}99x_2 + 1{,}28x_3 + 1{,}79x_1x_2 - 0{,}33x_2x_3 - 0{,}15x_1x_3 + 0{,}16x_1x_2x_3 \quad (12)$$

$$\Delta T_{\max} = 24{,}38 + 4{,}47x_1 + 4{,}53x_2 + 1{,}01x_3 + 1{,}34x_1x_2 - 0{,}57x_2x_3 - 0{,}48x_1x_3 + 0{,}40x_1x_2x_3 \quad (13)$$

Khi bước đặt ống là 1,0 m × 1,0 m.

$$T_{\max} = 54{,}81 + 6{,}02x_1 + 5{,}98x_2 + 2{,}40x_3 + 1{,}13x_1x_2 - 0{,}96x_2x_3 - 0{,}87x_2x_3 + 0{,}84x_1x_2x_3 \quad (14)$$

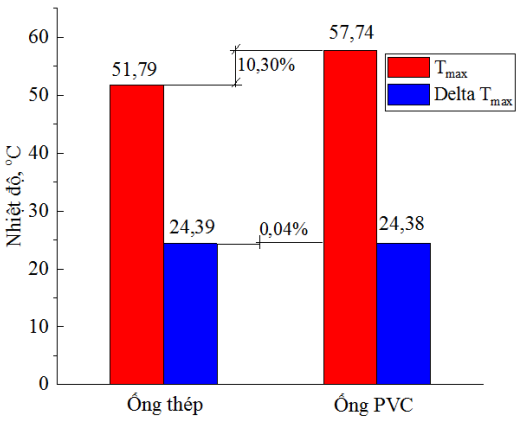
$$\Delta T_{\max} = 20{,}97 + 3{,}08x_1 + 3{,}16x_2 + 1{,}10x_3 + 2{,}08x_1x_2 - 0{,}26x_2x_3 - 0{,}15x_1x_3 + 0{,}16x_1x_2x_3 \quad (15)$$

Từ các hàm toán học về chế độ nhiệt trong cấu kiện bê tông khối lớn khi sử dụng hệ thống ống làm lạnh, ta có thể đưa ra những nhận xét sau:

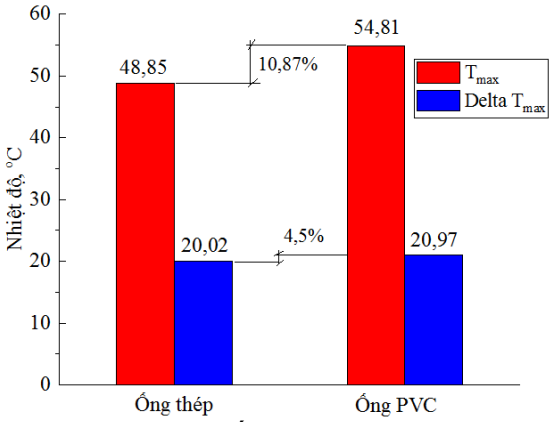
- Tất cả các yếu tố như hàm lượng xi măng (X), nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông (T_{bd}), nhiệt độ dòng nước (T_n), vật liệu ống làm lạnh và bước của ống làm lạnh đều ảnh hưởng đến giá trị chế độ nhiệt trong cấu kiện bê tông khối lớn. Thật dễ nhận ra, hàm lượng xi măng (X) với mức độ ảnh hưởng là lớn nhất, tiếp đến là nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông (T_{bd}) và mức độ ảnh hưởng nhỏ nhất là nhiệt độ nước làm lạnh (T_n). Tuy nhiên, để đánh giá tính đúng đắn của các mô hình toán học thu được sẽ được trình bày ở phần 3.2.

- Các hàm toán học biểu diễn bởi các phương trình (8)÷(15) cho phép ta dự đoán sơ bộ chế độ nhiệt trong cấu kiện bê tông khối lớn có sử dụng hệ thống ống làm lạnh.

- Sự khác nhau về tính chất dẫn nhiệt của vật liệu ống sẽ dẫn đến quá trình truyền nhiệt năng lượng từ bê tông ra bên ngoài thông qua đường ống cũng khác nhau. Khi đó hình thành chế độ nhiệt trong khối bê tông cũng sẽ 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 rất nhiều so với hệ số đối lưu vật liệu PVC, điều này dẫn đến giá trị chế độ nhiệt trong cấu kiện bê tông khối lớn khi sử dụng ống làm lạnh là vật liệu thép nhỏ hơn so với chế độ nhiệt trong cấu kiện bê tông khối lớn khi sử dụng ống làm mát là vật liệu PVC. Kết quả trên hoàn toàn phù hợp với những



(a) Bước ống 1,5 m × 1,5 m



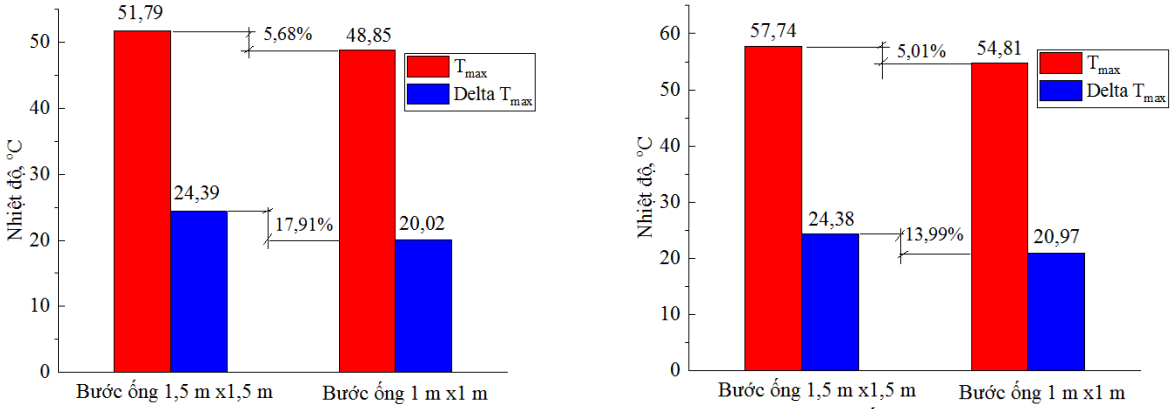
(b) Bước ống 1,0 m × 1,0 m

Hình 3. Sự khác nhau của chế độ nhiệt nhiệt trong kết cấu BTKL khi sử dụng ống làm lạnh với vật liệu ống khác nhau

nghiên cứu trước đó của Adek Tasri và cs. [15] và Zhu Bofang [6] đã công bố trước đó. Sự chênh lệch nhiệt độ giữa việc sử dụng hệ thống ống làm lạnh từ các vật liệu khác nhau được minh họa bởi một trường hợp ở tâm $x_1 = x_2 = x_3 = 0$ thay vào các phương trình (8)÷(15) ta thu được các giá trị và trình bày ở Hình 3.

Hình 3 chỉ ra rằng, giá trị nhiệt độ lớn nhất khi sử dụng ống làm lạnh bằng vật liệu thép có thể giảm 10% so với khi sử dụng ống làm lạnh bằng vật liệu PVC. Bên cạnh đó, chênh lệch nhiệt độ lớn nhất cũng giảm đến 4,5% khi sử dụng ống làm lạnh bằng vật liệu thép.

- Bước đặt ống làm lạnh là tham số quan trọng trong việc giảm chế độ nhiệt trong kết cấu bê tông khối lớn. Xem xét 01 trường hợp ở tâm $x_1 = x_2 = x_3 = 0$ thay vào các phương trình (8)÷(15) ta thu được các giá trị và trình bày ở Hình 4.



(a) Ống thép (b) Ống PVC

Hình 4. Sự khác nhau của chế độ nhiệt nhiệt trong kết cấu BTKL khi bước đặt ống khác nhau

Hình 4 chỉ ra rằng, khi đặt ống làm lạnh với bước nhỏ hơn thì giá trị chế độ nhiệt trong kết cấu BTKL giảm. Giá trị nhiệt độ lớn nhất có thể giảm đến xấp xỉ 6% trong khi chênh lệch nhiệt độ lớn nhất có thể giảm đến 18%. Như chúng ta đã biết, giá trị chênh lệch nhiệt độ là yếu tố quyết định đến sự hình thành vết nứt nhiệt. Điều đó chứng tỏ rằng tính hiệu quả khi đặt ống làm lạnh với bước nhỏ. Tuy nhiên, việc đặt bước của ống làm lạnh cần chú ý đến việc thuận tiện cho thi công và tính kinh tế.

Để sơ bộ kiểm soát sự hình thành vết nứt trong kết cấu bê tông khối lớn có sử dụng hệ thống ống làm lạnh thì điều kiện cần phải khống chế chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt của khối bê tông. Theo tiêu chuẩn TCVN 9341:2012 cũng như nhiều tiêu chuẩn khác trên thế giới, nhiệt độ chênh lệch tối đa không được vượt quá 20 °C [1, 2].

3.2. Ví dụ để kiểm chứng mô hình toán học thu được

Để kiểm chứng tính đúng đắn mô hình toán học thu được ta xem xét 01 trường hợp với các dữ liệu về kích thước hình học, tính chất cơ lý của vật liệu bê tông và nền không thay đổi so với tham số khảo sát bên trên. Hàm lượng xi măng $X = 285$ kg/m^3, nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông $T_{bd} = 25$ °C; nhiệt độ nước làm lạnh $T_n = 15$ °C. Sử dụng vật liệu ống làm lạnh bằng vật liệu thép.

Các giá trị mã hóa được xác định bởi công thức sau:

$$x_i = \frac{X_i - 0{,}5 \times (X_{i\max} + X_{i\min})}{0{,}5 \times (X_{i\max} - X_{i\min})} \tag{16}$$

trong đó: x_i là giá trị mã hóa của yếu tố thứ i; X_i là yếu tố thực của yếu tố thứ i; $X_{i\,\max}$ và $X_{i\,\min}$ tương ứng là giá trị lớn nhất, bé nhất của yếu tố thứ i.

Từ các giá trị thực của hàm lượng xi măng, nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông, nhiệt độ nước làm lạnh ta nhận được các giá trị mã hóa:

$$x_1 = \frac{285 - 0{,}5 \times (400 + 250)}{0{,}5 \times (400 - 250)} = -0{,}53$$

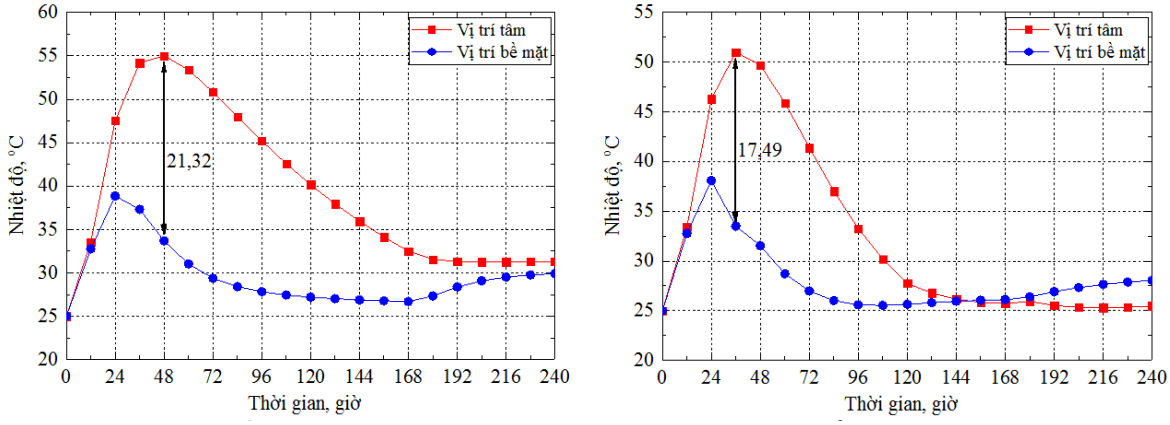
$$x_2 = \frac{25 - 0{,}5 \times (30 + 15)}{0{,}5 \times (30 - 15)} = 0{,}333$$

$$x_3 = \frac{15 - 0{,}5 \times (15 + 8)}{0{,}5 \times (15 - 8)} = 1$$

Khi đặt ống có bước là 1,5 m × 1,5 m. Thay các giá trị $x_1 = -0{,}53$, $x_2 = 0{,}333$ và $x_3 = 1$ vào các hàm toán học (8) và (9) ta thu được nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trong cấu kiện BTKL như sau: $T_{\max} = 53{,}01$ °C và $\Delta T_{\max} = 22{,}75$ °C.

Khi đặt ống có bước là 1,0 m × 1,0 m. Thay các giá trị $x_1 = -0{,}53$, $x_2 = 0{,}333$ và $x_3 = 1$ vào các hàm toán học (10) và (11) ta thu được nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trong cấu kiện BTKL như sau: $T_{\max} = 49{,}06$ °C và $\Delta T_{\max} = 18{,}41$ °C.

Với sự giúp đỡ phần mềm Midas civil ta thu được sự phát triển nhiệt độ ở tâm và bề mặt khối bê tông khi sử dụng ống làm mát có bước đặt ống 1,5 m × 1,5 m, 1,0 m × 1,0 m và được thể hiện trong Hình 5.



(a) Bước ống thép 1,5 m × 1,5 m

(b) Bước ống thép 1,0 m × 1,0 m

Hình 5. Sự phát triển nhiệt độ ở tâm và bề mặt khối bê tông

Từ những kết quả thu được từ mô hình Midas civil so sánh với kết quả tính theo các hàm toán học thu được ta thấy:

Khi bước ống thép 1,5 m × 1,5 m, sai số giữa nhiệt độ lớn nhất là (55,0 − 53,01)/55,0 ≈ 3,62% và sai số giữa chênh lệch nhiệt độ tối đa là (22,75 − 21,32)/22,75 ≈ 6,29%. Với trường hợp bước ống thép đặt 1,0 m × 1,0 m, sai số giữa nhiệt độ lớn nhất là (51,2 − 49,06)/51,2 ≈ 4,2% và sai số giữa chênh lệch nhiệt độ tối đa là (18,41 − 17,49)/18,41 ≈ 4,99%. Những sai số trên cho thấy, mô hình hàm toán học thu được đủ tin cậy và có thể được sử dụng để dự đoán chế độ nhiệt trong cấu kiện BTKL khi sử dụng ống làm lạnh.

4. Kết luận

Dựa vào những kết quả thu được ta có thể đưa ra một số nhận xét sau:

1. Mô hình toán học về chế độ nhiệt trong cấu kiện BTKL có sử dụng hệ thống ống làm lạnh thu được có độ tin cậy và thuận lợi cho người sử dụng tham khảo để sơ bộ tính toán nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trong cấu kiện BTKL.

2. Việc sử dụng vật liệu ống làm lạnh bằng thép cho hiệu quả thoát nhiệt tốt hơn khi sử dụng vật liệu ống làm lạnh bằng vật liệu PVC. Nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông có sử dụng hệ thống ống làm lạnh bằng thép có thể giảm 10% so với nhiệt độ lớn nhất của khối bê tông có sử dụng hệ thống ống làm lạnh bằng vật liệu PVC.

3. Hướng tương lai:

+ Xây dựng mô hình toán học với các điều kiện nhiệt độ không khí khác nhau;

+ Đánh giá tính kinh tế khi sử dụng ống làm lạnh với các vật liệu khác nhau;

+ Thí nghiệm mô hình để kiểm chứng mô hình với một số kích thước khối bê tông khác nhau.

Tài liệu tham khảo

[1] ACI 116R-00 (2000). *Cement and Concrete Terminology*. Reported by ACI Committee 116.

[2] TCVN 9341:2012. *Bê tông khối lớn - Quy phạm thi công và nghiệm thu*. Bộ Xây dựng Việt Nam.

[3] Lee, M. H., Chae, Y. S., Khil, B. S., Yun, H. D. (2014). Influence of casting temperature on the heat of hydration in mass concrete foundation with ternary cements. *Applied Mechanics and Materials*, 525: 478–481.

[4] Khoa, H. N., Công, V. C. (2012). Phân tích trường nhiệt độ và ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn bằng phương pháp phần tử hữu hạn. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 12:17–27.

[5] 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.

[6] Bofang, Z. (2014). *Thermal stresses and temperature control of mass concrete*. Elsevier.

[7] Tang, L. V., Nguyen, C. T., Bulgakov, B., Pham, A. N. (2018). Composition and early-age temperature regime in massive concrete foundation. *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 196:04017.

[8] Aniskin, N., Trong, C. N. (2018). The thermal stress of roller-compacted concrete dams during construction. *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 196:04059.

[9] Japan Concrete Institute (2016). *Guidelines for Control of Cracking of Mass Concrete*. Japan.

[10] Nguyen, T.-C., Huynh, T.-P., Tang, V.-L. (2019). Prevention of crack formation in massive concrete at an early age by cooling pipe system. *Asian Journal of Civil Engineering*, 20(8):1101–1107.

[11] 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.

[12] Glover, R. E. (1949). *Cooling of concrete dams*. Final reports for Boulder canyon project Bureau of Reclamation.

[13] ACI Committee. ACI 122R (2002). *Guide to thermal properties of concrete and masonry systems*. American Concrete Institute.

[14] 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.

[15] Tasri, A., Susilawati, A. (2019). Effect of material of post-cooling pipes on temperature and thermal stress in mass concrete. *Structures*, Elsevier, 20:204–212.

[16] Tang, H., Cai, D. S., Yang, L. (2013). New planning of pipe cooling in temperature control for mass concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 300:1584–1588.

[17] Sun, J. C., Pang, Y. J., Zhao, W. Z. (2014). FEM Analysis of Massive Concrete Pile Using of Cooling Pipe in Shahe Bridge. *Applied Mechanics and Materials*, 501:1359–1363.

[18] Aniskin, N., Chuc, N. T. (2018). Temperature regime of massive concrete dams in the zone of contact with the base. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 365:042083.

[19] Aniskin, N. A., Hoang, N. (2014). Predicting crack formation in solid concrete dams in severe climatic conditions during construction period. *Vestnik MGSU*, (8).

[20] Aniskin, N., Nguyen, T.-C. (2019). Influence factors on the temperature field in a mass concrete. *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 97:05021.

[21] 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.

[22] Nguyen, C. T., Aniskin, N. A. (2019). Temperature regime during the construction massive concrete with pipe cooling. *Magazine of Civil Engineering*, 89(5):156–166.

[23] Zhou, M. R., Shen, Q. F., Zhang, Z. N., Li, H. S., Guo, Z. Y., Li, Z. B. (2013). Based on MIDAS/CIVIL the anchorage of mass concrete temperature field and stress field simulation analysis. *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, 724:1482–1488.