



Tạp chí điện tử
Khoa học và Công nghệ Giao thông
Trang website: <https://jstt.vn/index.php/vn>



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2025.vn.5.2.34-43>

***Corresponding author:**

Email address:

thangpb@utt.edu.vn

Received: 10/03/2025

Received in Revised Form:
07/05/2025

Accepted: 09/05/2025

Formulate a mathematical function representing the maximum temperature and the maximum temperature difference in the bridge pier structure during the construction process

Phung Ba Thang^{1,*}, Nguyen Trong Chuc², Nguyen Huu Giang¹

¹University of Transport Technology, Hanoi 100000, Vietnam

²Institute of Techniques for Special Engineering, Le Quy Don Technical University, Hanoi 100000, Vietnam

Abstract: Thermal deformation due to the hydration process of cement in concrete mixtures is one of the main causes of cracking in structures, especially in mass concrete structures in general and bridge piers and abutments in particular. In the early age, thermal cracks commonly occur. Therefore, determining the temperature field and stress distribution during bridge pier construction is crucial for implementing measures to control thermal cracking. This paper presents a mathematical equation for calculating the maximum temperature and the maximum temperature difference between the core and the surface of the bridge pier during construction, taking into account material properties and construction conditions in Vietnam. The research results will propose appropriate solutions to prevent thermal cracking during the construction of bridge piers.

Keywords: Early-age concrete; hydration heat; temperature field; thermal crack; bridge construction.



Thông tin bài viết
Dạng bài viết:
Bài báo nghiên cứu

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2025.vn.5.2.34-43>

*Tác giả liên hệ:
Địa chỉ Email:
thangpb@utt.edu.vn

Ngày nộp bài: 10/03/2025
Ngày nộp bài sửa: 07/05/2025
Ngày chấp nhận: 09/05/2025

Xây dựng hàm toán học biểu thị nhiệt độ cao nhất và chênh lệch nhiệt độ cao nhất ở kết cấu trụ cầu trong quá trình thi công

Phùng Bá Thắng^{1,*}, Nguyễn Trọng Chức², Nguyễn Hữu Giang¹

¹Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, 54 Triều Khúc, Thanh Xuân, Hà Nội 100000, Việt Nam

²Học viện Kỹ thuật Quân sự, 236 Hoàng Quốc Việt, Bắc Từ Liêm, Hà Nội 100000, Việt Nam

Tóm tắt: Biến dạng nhiệt do quá trình thủy hóa của xi măng trong hỗn hợp bê tông là một trong những tác nhân chính gây ra nứt kết cấu ở tuổi sớm, đặc biệt là đối với các kết cấu bê tông khối lớn nói chung và kết cấu mố, trụ cầu nói riêng. Trong giai đoạn đầu, các vết nứt do ảnh hưởng nhiệt độ thường xuất hiện khá phổ biến. Vì vậy, việc xác định trường nhiệt độ và trường ứng suất trong quá trình thi công trụ cầu là cần thiết, giúp đưa ra các biện pháp kiểm soát nứt nhiệt. Bài báo này trình bày phương pháp xây dựng phương trình toán học để xác định nhiệt độ cao nhất và chênh lệch nhiệt độ cao nhất giữa tâm và bề mặt của trụ cầu trong quá trình thi công có xem xét đến các yếu tố vật liệu và điều kiện thi công tại Việt Nam. Từ kết quả nghiên cứu sẽ đề xuất một số giải pháp nhằm ngăn ngừa nứt nhiệt trong quá trình thi công kết cấu trụ cầu.

Từ khóa: Bê tông tuổi sớm; nhiệt thủy hóa; trường nhiệt độ; vết nứt nhiệt; thi công cầu.

1. Giới thiệu

Theo định nghĩa của Viện Bê tông Hoa Kỳ, “bất kỳ khối bê tông nào có kích thước đủ lớn đều cần phải thực hiện các biện pháp kiểm soát sự gia tăng nhiệt do quá trình nhiệt thủy hóa của xi măng và thay đổi thể tích để giảm thiểu vết nứt” [1]. Kết cấu bê tông khối lớn thường được ứng dụng trong các công trình như đập thủy điện, mố, trụ cầu, móng tòa nhà cao tầng, móng nhà máy nhiệt điện, v.v. Kích thước cụ thể của kết cấu công trình bê tông có khối lớn cũng có sự khác biệt tùy theo tiêu chuẩn của mỗi quốc gia. Hiệp hội Bê tông Mỹ khuyến cáo rằng, đối với kết cấu bê tông có kích thước dài theo một chiều lớn hơn 1 mét thì cần có biện pháp ngăn ngừa sự hình thành vết nứt [1-3].

Tại Nga, nhiều nghiên cứu cũng đã chỉ ra rằng sự hình thành vết nứt trong các cấu kiện bê tông khối lớn ở giai đoạn tuổi sớm cần được đánh giá cẩn thận. Các nghiên cứu này khẳng định rằng chênh lệch nhiệt độ cho phép giữa tâm và bề mặt khối bê tông không được vượt quá 20°C [4, 5]. Ở Việt Nam, theo tiêu chuẩn TCVN 9341-2012, kết cấu bê tông hoặc bê tông cốt thép được xem là bê tông khối lớn khi có kích thước đủ lớn để gây ra ứng suất kéo do hiệu ứng nhiệt thủy hóa của xi măng vượt quá giới hạn kéo của bê tông, dẫn đến nứt hoặc vỡ, do đó cần có biện pháp phòng ngừa vết nứt.

Một trong những nguyên nhân chính ảnh hưởng đến trạng thái ứng suất-biến dạng của kết

cấu bê tông khối lớn trong quá trình thi công là do ảnh hưởng của tải nhiệt. Quá trình nhiệt thủy hóa của xi măng trong bê tông khối lớn tạo ra một lượng nhiệt đáng kể, dẫn đến sự thay đổi nhiệt độ trong kết cấu bê tông. Sự chênh lệch nhiệt độ giữa các phần khác nhau của khối bê tông, đặc biệt là giữa lõi và bề mặt, sẽ tạo ra các ứng suất nhiệt. Những ứng suất này có thể dẫn đến hiện tượng nứt, làm giảm độ bền và tính toàn vẹn của kết cấu bê tông. Tải nhiệt không chỉ ảnh hưởng đến các thuộc tính cơ học của bê tông trong giai đoạn thi công mà còn có tác động lâu dài đến sự ổn định của kết cấu sau khi hoàn thành. Đặc biệt, đối với các kết cấu bê tông khối lớn như đập thủy điện, cầu, hay các công trình xây dựng có kích thước lớn, việc kiểm soát tải nhiệt trong quá trình thi công là rất quan trọng để đảm bảo chất lượng và độ bền lâu dài của công trình. Do đó, việc nghiên cứu và áp dụng các phương pháp kiểm soát nhiệt độ, như sử dụng vật liệu có khả năng giảm tải nhiệt, tăng cường thông gió, hoặc điều chỉnh quy trình thi công, là cần thiết để giảm thiểu những tác động tiêu cực từ tải nhiệt lên ứng suất và biến dạng của bê tông [6-8].

Chế độ nhiệt trong khối bê tông mới đổ bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như nhiệt độ không khí, tốc độ gió, bức xạ nhiệt, nhiệt độ nền và đặc biệt là nhiệt từ quá trình hydrat hóa của xi măng. Nền nhiệt độ trong bê tông còn chịu tác động từ tiến độ thi công, kích cỡ cấp phối và chế độ, phương pháp bảo dưỡng. Điều này dẫn đến chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt khối đổ, tạo ra ứng suất kéo. Nếu ứng suất này vượt quá khả năng chịu kéo của bê tông ở giai đoạn tuổi sớm, có thể gây nứt nhiệt. Các khuyến cáo cho rằng chênh lệch nhiệt độ ΔT không nên vượt quá 20°C để tránh nứt nhiệt [4, 5, 7, 8].

Vết nứt do nhiệt ở tuổi sớm ngay có thể nguy hiểm cho kết cấu, vì vậy cần nhận diện và có biện pháp ngăn ngừa kịp thời. Các biện pháp kiểm soát nứt nhiệt bao gồm: giảm hàm lượng xi măng bằng tro bay, chia nhỏ khối đổ, hạ nhiệt độ hỗn hợp bê tông, sử dụng ván khuôn cách nhiệt, hệ thống ống làm mát và giảm tiếp xúc với bức xạ mặt trời [9,

10].

Vấn đề nứt trụ cầu luôn được nghiên cứu kỹ lưỡng từ các chuyên gia. Về yếu tố thi công, có thể kể đến hai nguyên nhân gây nứt trụ cầu là: Thứ nhất, do trụ cầu là bê tông có các kích thước khối lớn, khi thi công, nhiệt từ quá trình hydrat hóa xi măng đã không được kiểm soát, gây chênh lệch nhiệt độ trong khối đổ và giữa các khối đổ, tạo ra ứng suất nhiệt vượt quá khả năng chịu kéo của bê tông. Thứ hai, sự co ngót theo thời gian, kết hợp với thay đổi nhiệt độ, độ ẩm và tải trọng trong quá trình khai thác, đã làm tăng độ mở rộng của vết nứt.

Bài báo này trình bày phương trình hồi quy toán học để xác định mức nhiệt độ cao nhất và gradient nhiệt độ cao nhất khi thi công trụ cầu có xem xét các yếu tố vật liệu và điều kiện thi công tại Việt Nam. Kết quả nghiên cứu sẽ đề xuất những giải pháp phù hợp nhằm ngăn ngừa nứt nhiệt trong quá trình thi công kết cấu trụ cầu.

2. Trường hợp và phương pháp nghiên cứu

2.1. Trường hợp nghiên cứu

Trong bài báo này, trường hợp kết cấu được đưa vào để xây dựng hàm hồi quy nhiệt độ, chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trong quá trình thi công trụ cầu có kích thước như sau: Bệ trụ có kích thước $7\text{m} \times 6\text{m} \times 2,5\text{m}$; thân trụ có kích thước $4\text{m} \times 2\text{m} \times 6\text{m}$, được đặt trên nền đất có kích thước $12\text{m} \times 15\text{m} \times 5\text{m}$. Do tính chất đối xứng hai chiều của khối bê tông và để giảm khối lượng phân tích, trong bài báo này tác giả đã sử dụng $\frac{1}{4}$ mô hình để phân tích kết cấu và sử dụng 2736 nút, 2106 phần tử khối để mô hình hóa. Kích thước khối bê tông được trình bày ở Hình 1. Nhiệt độ môi trường trung bình trong ngày được giả định trong điều kiện thi công là 25°C .

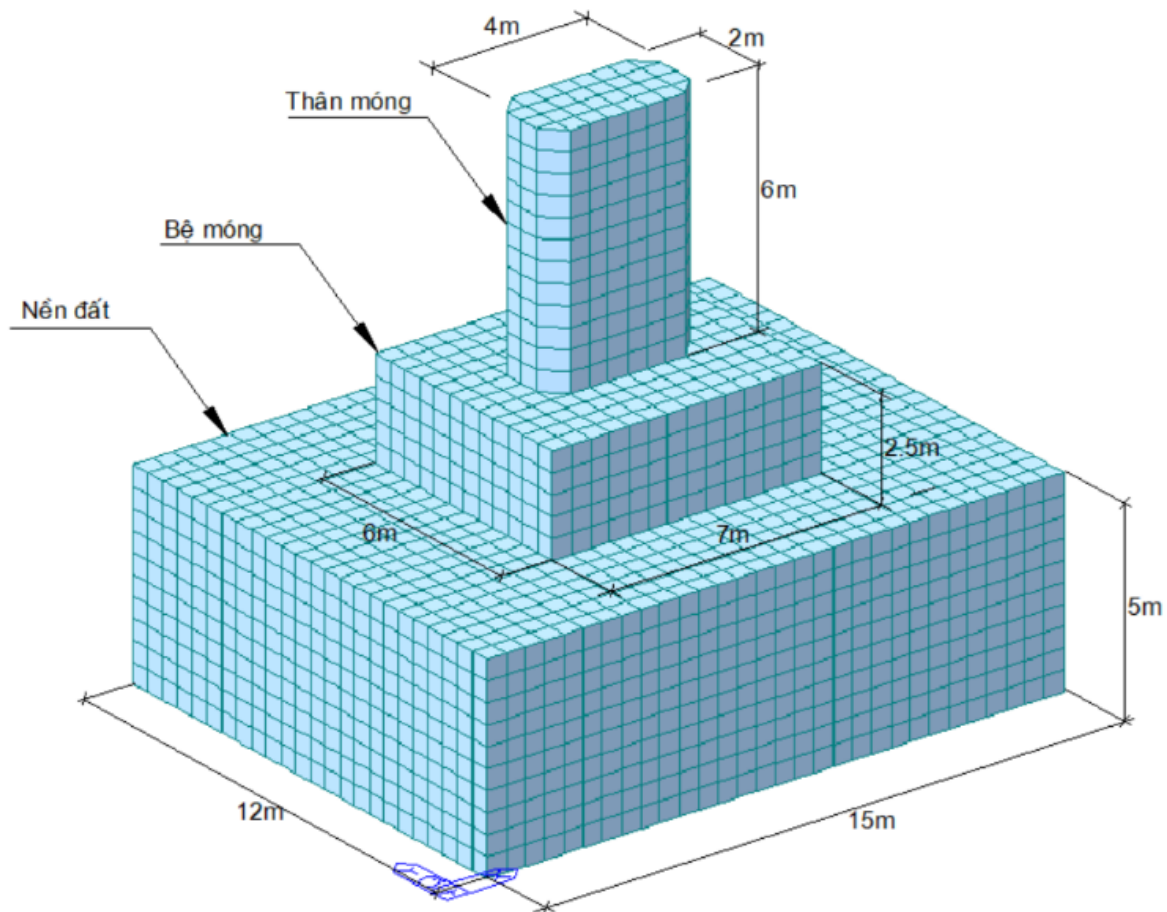
Nguồn nhiệt do thủy hóa xi măng được đưa vào mô hình tính theo công thức thực nghiệm của Viện bê tông Nhật Bản có xét đến các yếu tố hàm lượng xi măng, nhiệt độ môi trường, độ ẩm... và xác định theo phương trình (1) [11]:

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

trong đó: $Q(t) = T_{ad}$ là nhiệt độ tại tâm của khối bê

tông ở tuổi t (ngày), $^{\circ}\text{C}$; t là tuổi bê tông [ngày];
 Q_{∞} là nhiệt độ lớn nhất của bê tông; r_{AT}, s_{AT} : các
thông số biểu thị tốc độ thay đổi nhiệt độ; $t_{0,Q}$: tuổi
bê tông bắt đầu nâng nhiệt, [ngày].

Các đại lượng $Q_{\infty}, r_{AT}, s_{AT}, t_{0,Q}$ là hàm số
của nhiệt độ bê tông khi đổ và hàm lượng xi măng
thay đổi từ $250 \text{ kg/m}^3 \div 400 \text{ kg/m}^3$ được tính theo
Bảng 1 [11].



Hình 1. Mô hình kết cấu trụ cầu BTCT ở trường hợp nghiên cứu

Bảng 1. Các đại lượng cho cấp phối bê tông có lượng dùng xi măng thay đổi từ 250 kg/m^3 đến 400 kg/m^3

Các đại lượng	$250 \text{ kg/m}^3 \leq X \leq 400 \text{ kg/m}^3$	
$Q_{\infty} = a_{AT} + b_{AT} T_{bd}$	$a_{AT} = 17,5 + 0,113X$	$b_{AT} = -0,146 + 3,08 \cdot 10^{-4} X$
$r_{AT} = a_{AT} + b_{AT} T_{bd}$	$a_{AT} = -0,426 + 2,07 \cdot 10^{-3} X$	$b_{AT} = 0,0471 + 1,88 \cdot 10^{-5} X$
$s_{AT} = 1$		
$t_{0,Q} = a_{AT} e^{(-b_{AT} T_{bd})}$	$a_{AT} = 0,832 - 5,31 \cdot 10^{-4} X$	$b_{AT} = 0,0482 + 6,8 \cdot 10^{-5} X$

Bảng 2. Các đại lượng cho cấp phối bê tông có lượng dùng xi măng thay đổi từ 400 kg/m^3 đến 550 kg/m^3

Các hàm số	$400 \text{ kg/m}^3 < X \leq 550 \text{ kg/m}^3$	
$Q_{\infty} = a_{AT} + b_{AT} T_a$	$a_{AT} = 40,0 + 0,057X$	$b_{AT} = -0,146 + 3,08 \cdot 10^{-4} X$
$r_{AT} = a_{AT} + b_{AT} T_a$	$a_{AT} = -0,426 + 2,07 \cdot 10^{-3} X$	$b_{AT} = 0,0471 + 1,88 \cdot 10^{-5} X$
$s_{AT} = 1$		
$t_{0,Q} = a_{AT} e^{(-b_{AT} T_a)}$	$a_{AT} = 0,832 - 5,31 \cdot 10^{-4} X$	$b_{AT} = 0,0482 + 6,8 \cdot 10^{-5} X$

Bảng 3. Các đặc điểm cơ lý của bê tông kết cấu và nền đất

Tham số	Bê tông	Nền đất
Hệ số dẫn nhiệt, [W/(m.°C)]	2,31	3,59
Nhiệt dung riêng, [kJ/(kg.°C)]	0,96	0,85
Khối lượng riêng, [kg/m ³]	2400	1800
Mô đun đàn hồi, [N/m ²]	2,51.10 ¹⁰	-
Hệ số giãn nở nhiệt, [1/°C]	1,0.10 ⁻⁵	1,0.10 ⁻⁵
Hệ số Poatxong	0,2	0,25
Lượng chất kết dính xi măng, [kg/m ³]	250÷550	-
Nhiệt đầu vào của bê tông, °C	10÷30	

Các đại lượng Q_{∞} , r_{AT} , s_{AT} , $t_{0,Q}$ là hàm số của nhiệt độ bê tông khi đổ và hàm lượng xi măng thay đổi từ 400 kg/m³ ÷ 550kg/m³ được tính theo Bảng 2 [11].

Ở trường hợp nghiên cứu, các đặc điểm của bê tông và nền đất được sử dụng trong tính toán được trình bày trong Bảng 3.

Trong kết cấu bê tông khối lớn ở tuổi sớm, có nhiều yếu tố tác động đến chế độ nhiệt như yếu tố vật liệu, giải pháp kết cấu, điều kiện và biện pháp thi công. Tuy nhiên, trong bài báo này, để xây dựng phương trình hồi quy toán học biểu thị chế độ nhiệt thay đổi khi thi công trụ cầu có xét đến yếu tố vật liệu và điều kiện và biện pháp thi công gồm [12]:

x_1 (X) – Hàm lượng xi măng được khảo sát có giá trị trong khoảng [250÷550], kg/m³;

x_2 (T_{bd}) – Nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông sau khi trộn, trước khi đổ vào ván khuôn được khảo sát có giá trị trong khoảng [10÷30], °C;

- Ván khuôn sử dụng: Ván khuôn thép có hệ số đối lưu với môi trường xung quanh 12 kcal/m².h.°C và ván khuôn gỗ có hệ số đối lưu 7 kcal/m².h.°C.

Giả sử rằng hàm nhiệt độ đỉnh thủy hóa, gradient nhiệt độ lớn nhất trong quá trình thi công trụ cầu cần xác định được viết dưới dạng đa thức (2) [13].

$$Y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 \quad (2)$$

Theo lý thuyết quy hoạch thực nghiệm, để xác định các hệ số b_0, b_1, b_2, b_{12} của đa thức thì số thí nghiệm tối thiểu được thực hiện theo biểu thức (3):

$$N = 2^k + 1 \quad (3)$$

với k là số các yếu tố cần khảo sát; "1" là số lần lặp thí nghiệm tại điểm trung tâm; do đó ta có $N = 2^2 + 1 = 4$.

Các hệ số của đa thức trong phương trình hồi quy (2) được xác định theo phương pháp bình phương tối thiểu:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^4 Y_i x_{ij}}{4} \quad (4)$$

Để kiểm tra tính đúng đắn của hàm toán học nhiệt độ đỉnh thủy hóa (cao nhất) và gradient nhiệt độ cao nhất thu được phụ thuộc vào hai yếu tố là lượng dùng xi măng và nhiệt độ hỗn hợp bê tông tại thời điểm đổ (nhiệt độ ban đầu -casting temperature). Tác giả mô hình hóa khối bê tông với các yếu tố đầu vào là tâm của miền khảo sát (lấy trung bình của giá trị max và min của biến khảo sát).

Các thí nghiệm số được thực nghiệm bao gồm: hỗn hợp bê tông có lượng dùng xi măng thay đổi từ 250 kg/m³ đến 400 kg/m³; nhiệt độ đầu vào của hỗn hợp bê tông thay đổi từ 10°C đến 30°C và 2 loại ván khuôn thép, gỗ được thể hiện trong Bảng 4.

Bảng 4. Các thực nghiệm số với các yếu tố khảo sát

Lần thực nghiệm số	x_1	x_2	Các giá trị	
			X, kg/m ³	T_{bd} , °C
1	-1	-1	250	10
2	1	-1	400	10
3	-1	1	250	30
4	1	1	400	30
5*	0	0	325	20

Các thí nghiệm số cần thực nghiệm bao gồm:

hỗn hợp bê tông có lượng chất kết dính xi măng trong hỗn hợp thay đổi từ 400 kg/m³ đến 550 kg/m³; nhiệt độ đầu vào của hỗn hợp bê tông thay đổi từ 10°C đến 30°C và 2 loại ván khuôn thép, gỗ được thể hiện trong Bảng 5.

Bảng 5. Các thực nghiệm số với các yếu tố khảo sát

Lần thực nghiệm số	x ₁	x ₂	Các giá trị	
			X, kg/m ³	T _{bd} , °C
1	-1	-1	400	10
2	1	-1	550	10
3	-1	1	400	30
4	1	1	550	30
5*	0	0	475	20

2.2. Phương pháp phần tử hữu hạn giải bài toán xác định trường nhiệt độ trong kết cấu bê tông

Phương trình mô tả quá trình truyền nhiệt trong kết cấu bê tông được xác định theo (4) [14-16]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad (5)$$

trong đó: ρ là khối lượng thể tích của bê tông, [kg/m³]; C là nhiệt dung riêng của bê tông, [kcal/kg.°C]; $T(x,y,z,t)$ là nhiệt độ tại tọa độ x,y,z tương ứng xác định ở thời điểm t , [°C]; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$

là hệ số dẫn nhiệt của bê tông theo các phương x,y,z tương ứng; q là nhiệt sinh ra trong của đơn vị thể tích bê tông, [kcal/m³].

Các điều kiện ràng buộc ở biên:

Tại biên có nhiệt độ không đổi $T = T_0$;

$$T(x,y,z,t) = T_0 \text{ với } t > 0 \quad (6)$$

Tại biên truyền nhiệt:

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z + q(t) = 0 \quad (7)$$

với $t > 0$

Tại biên đối lưu:

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z + h_c (T - T_\infty) = 0 \quad (8)$$

với $t > 0$

trong đó: n_x, n_y, n_z tương ứng là các hệ số cosin chỉ

phương tương ứng với các phương x, y, z ; $q(t)$ là nhiệt lượng được tạo ra trong một đơn vị thể tích bê tông tại thời điểm bê tông ở tuổi t ngày, [kcal/m³]; h_c là hệ số đối lưu bề mặt, [kcal/m².h.°C]; T_∞ là giá trị nhiệt độ tại bề mặt đối lưu, [°C].

Khi sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, phương trình truyền nhiệt được viết dưới dạng ma trận như sau [17, 18]:

$$[K]\{T\} + [C]\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\} = [Q] \quad (9)$$

trong đó:

$$[C] = \int_V \rho.c.[N]^T.[N]dV \text{ là ma trận nhiệt dung}$$

của từng phần tử;

$[N]$ là ma trận hàm dạng; $[N]^T$ là ma trận nghịch đảo;

Ma trận hệ số dẫn nhiệt $[K]$:

$$[K] = \int_V [B]^T.[D].[B]dV + \int_S h.[N]^T.[N].dS$$

$$[D] = \begin{pmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{pmatrix}$$

$$[B] = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} \end{pmatrix}$$

$$[Q] = \underbrace{\int_V q_v [N]^T dV}_{\text{Nguồn trong}} - \underbrace{\int_S q [N]^T dS}_{\text{Bức xạ}} + \underbrace{\int_S h [N]^T T_K dS}_{\text{Đối lưu}}$$

$$T = \sum N_i T_i = [N].\{T\}$$

- Rời rạc kết cấu: Theo phương pháp Galerkin hoặc phương pháp biến phân

- Rời rạc thời gian: Theo phương pháp Galerkin

Phương pháp biến phân:

$$I(t) = \frac{1}{2} \int_V \left[k_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + k_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - 2q_v T \right] dV$$

$$+ \int_{S_2} q T dS + \int_{S_2} \frac{1}{2} h (T - T_a)^2 dS$$

Thời gian phân tích được chia thành các bước $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ như sau:

$$\left\{ \frac{\Delta T}{\Delta t} \right\} = \frac{1}{\Delta t} [\{T(t_n) - T(t_{n-1})\}] \quad (10)$$

Phương trình (9) có thể viết lại như sau:

$$[K]\{T\} + \frac{[C]}{\Delta t} [\{T(t_n) - T(t_{n-1})\}] = [Q] \quad (11)$$

ở đây: $[Q]$ là ma trận nhiệt lượng sinh ra.

Giải phương trình (11) ta xác định được nhiệt độ trong khối bê tông ở các thời điểm khác nhau.

Để xác định trường nhiệt độ và trường ứng suất trong kết cấu bê tông, người ta có người ta thường sử dụng các phần mềm phân tích kết cấu

bằng phương pháp phần tử hữu hạn như Ansys, Abaqus, Midas Civil, ... Trong bài báo này, tác giả sử dụng phần mềm Midas Civil để phân tích, khảo sát mô hình tính toán [19, 20].

3. Kết quả phân tích số

Ứng dụng phần mềm Midas Civil đã tính toán được nhiệt độ cao nhất $T_{\max}$ và gradient nhiệt độ cao nhất giữa vị trí tâm và bề mặt khối bê tông trụ cầu $\Delta T_{\max}$. Các thí nghiệm số với lượng dùng chất kết dính xi măng thay đổi từ 250 kg/m³ đến 400 kg/m³, nhiệt độ đầu vào hỗn hợp bê tông thay đổi từ 10 đến 30°C và hai loại vật liệu ván khuôn là thép và gỗ có hệ số đối lưu khác nhau. Kết quả thể hiện trong các Bảng 6, Bảng 7.

Bảng 6. Nhiệt độ trong kết cấu bê tông trụ cầu có hàm lượng xi măng thay đổi từ 250 kg/m³ đến 400 kg/m³

Lần thực nghiệm số	x_1	x_2	Hàm lượng xi măng, kg/m ³	$T_{bd}, ^\circ C$	Ván khuôn thép, h = 12 kcal/m ² .h.°C		Ván khuôn gỗ, h = 7 kcal/m ² .h.°C	
					$T_{\max}$	$\Delta T_{\max}$	$T_{\max}$	$\Delta T_{\max}$
1	-1	-1	250	10	56,62	23,80	57,92	20,2
2	1	-1	400	10	77,40	37,94	79,90	34,11
3	-1	1	250	30	76,71	39,17	77,81	34,0
4	1	1	400	30	98,24	54,39	99,06	47,85
5*	0	0	325	20	77,38	39,67	79,24	34,40

Bảng 7. Nhiệt độ trong kết cấu bê tông trụ cầu có hàm lượng xi măng thay đổi từ 400 kg/m³ đến 550 kg/m³

Lần thực nghiệm số	x_1	x_2	Hàm lượng xi măng, kg/m ³	$T_{bd}, ^\circ C$	Ván khuôn thép, h = 12 kcal/m ² .h.°C		Ván khuôn gỗ, h = 7 kcal/m ² .h.°C	
					$T_{\max}$	$\Delta T_{\max}$	$T_{\max}$	$\Delta T_{\max}$
1	-1	-1	400	10	77,49	38,01	80,01	34,18
2	1	-1	550	10	88,67	47,58	92,21	41,68
3	-1	1	400	30	98,36	54,46	99,18	47,92
4	1	1	550	30	110,75	62,83	111,78	55,44
5*	0	0	475	20	93,45	51,74	94,77	44,93

Sử dụng phương pháp bình phương tối thiểu, nhận được các phương trình có dạng đa thức từ kết quả phân tích nhiệt độ đỉnh thủy hóa, gradient nhiệt độ cao nhất trong kết cấu trụ cầu có xét đến các yếu tố vật liệu và điều kiện thi công khác nhau.

Khi lượng dùng xi măng thay đổi từ 250 kg/m³ đến 400 kg/m³ nhiệt độ đỉnh thủy hóa, gradient nhiệt độ cao nhất trong kết cấu trụ cầu được thể hiện bởi các phương trình (12-15)

+ Sử dụng ván khuôn thép:

$$T_{\max} = 77,24 + 10,58x_1 + 10,23x_2 + 0,19x_1x_2 \quad (12)$$

với $R^2 = 0,97$

$$\Delta T_{\max} = 38,83 + 7,34x_1 + 8,00x_2 + 0,27x_1x_2 \quad (13)$$

với $R^2 = 0,96$

+ Sử dụng ván khuôn gỗ:

$$T_{\max} = 78,67 + 10,81x_1 + 9,76x_2 - 0,18x_1x_2 \quad (14)$$

với $R^2 = 0,95$

$$\Delta T_{\max} = 34,04 + 6,94x_1 + 6,89x_2 - 0,02x_1x_2 \quad (15)$$

với $R^2 = 0,94$

Khi lượng dùng xi măng thay đổi từ 400 kg/m³ đến 550 kg/m³ nhiệt độ đỉnh thủy hóa, gradient nhiệt độ cao nhất trong kết cấu trụ cầu được thể hiện bởi các phương trình (16-19):

+ Sử dụng ván khuôn thép:

$$T_{\max} = 93,82 + 5,89x_1 + 10,74x_2 + 0,30x_1x_2 \quad (16)$$

với $R^2 = 0,94$

$$\Delta T_{\max} = 50,72 + 4,49x_1 + 7,93x_2 - 0,30x_1x_2 \quad (17)$$

với $R^2 = 0,92$

+ Sử dụng ván khuôn gỗ:

$$T_{\max} = 95,80 + 6,2x_1 + 9,69x_2 + 0,10x_1x_2 \quad (18)$$

với $R^2 = 0,96$

$$\Delta T_{\max} = 44,81 + 3,76x_1 + 6,88x_2 + 0,01x_1x_2 \quad (19)$$

với $R^2 = 0,95$

Dựa vào các kết quả hàm hồi quy nhiệt độ cao nhất, gradient nhiệt độ cao nhất giữa tâm và bề mặt cấu kiện trụ cầu cho thấy:

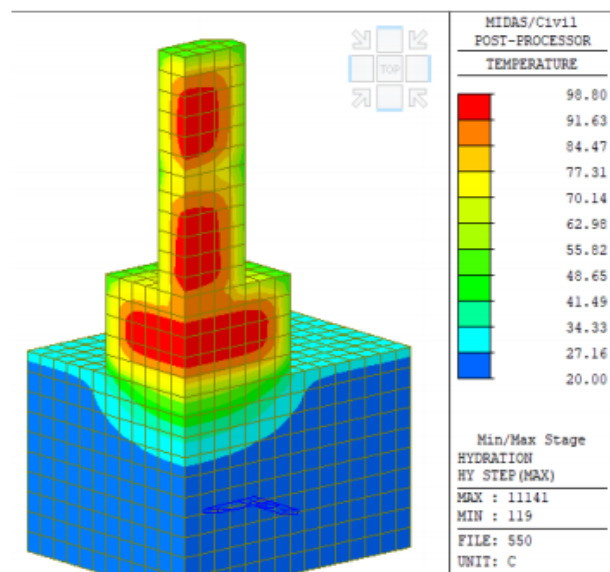
- Tất cả các yếu tố về vật liệu và điều kiện, biện pháp thi công như lượng dùng xi măng (x_1), nhiệt độ đầu vào của hỗn hợp bê tông tươi (T_{bd}) và ván khuôn sử dụng đều có tác động đến giá trị nhiệt độ đỉnh, gradient nhiệt độ cao nhất giữa tâm và bề mặt cấu kiện trụ cầu.

- Các biểu thức toán học được trình bày bởi các phương trình (12-19) có thể cho phép tính toán được nhiệt độ trong kết cấu bê tông trụ cầu với vật liệu và việc sử dụng chủng loại ván khuôn.

- Với hàm lượng xi măng trong hỗn hợp bê tông từ 250 kg/m³ đến 400 kg/m³ thì mức độ ảnh hưởng của hàm lượng xi măng lớn hơn mức độ ảnh hưởng của nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông đến nhiệt độ lớn nhất, chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông. Và khi hàm lượng xi măng có trong hỗn hợp bê tông từ 400 kg/m³ đến 550 kg/m³ thì ngược lại. Mức độ ảnh hưởng chênh lệch của 2 yếu tố trên là không lớn. Do vậy, khi kiểm soát nứt 2 yếu tố hàm lượng xi măng và nhiệt độ ban đầu là các yếu tố quan trọng cần kiểm soát.

- Ván khuôn khác nhau là ván khuôn gỗ và ván khuôn thép khi sử dụng về cơ bản nhiệt độ cao

nhất trong tâm khối đổ khác nhau không đáng kể. Tuy nhiên gradient nhiệt độ giữa tâm và bề mặt có sự khác nhau. Sử dụng ván khuôn gỗ thì gradient nhiệt độ giữa tâm và bề mặt nhỏ hơn khi so sánh với sử dụng ván khuôn thép. Điều đó có thể giải thích là do sự dẫn nhiệt qua ván khuôn gỗ nhỏ hơn sự dẫn nhiệt qua ván khuôn thép. Do vậy, để giảm gradient nhiệt độ giữa tâm và bề mặt của kết cấu trụ cầu nhằm ngăn ngừa vết nứt nhiệt ở tuổi sớm thì sử dụng ván khuôn gỗ cho hiệu quả hơn khi sử dụng ván khuôn thép.



Hình 2. Nhiệt độ phân bố trong kết cấu trụ cầu trong quá trình thi công

Dựa vào phương trình hồi quy (16) và (17) để xác định nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trong quá trình thi công trụ cầu với các tham số đầu vào sử dụng ván khuôn thép, hàm lượng xi măng trong cấp phối bê tông 550 kg/m³ ($x_1 = 1$), nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông 20°C ($x_2 = 0$). Thay các giá trị $x_1 = 1$, $x_2 = 0$ vào phương trình (16) và (17) ta được $T_{\max} = 99,71^\circ\text{C}$ và $\Delta T_{\max} = 55,21^\circ\text{C}$.

Sử dụng PTHH ta xác định được nhiệt độ lớn nhất ở tâm trụ cầu và trình bày ở Hình 2. Kết quả thu được từ mô hình PTHH $T_{\max} = 98,80^\circ\text{C}$. Kết quả giữa mô hình PTHH và hàm hồi quy thu được sai khác 0,91%. Như vậy, có thể dự đoán nhanh chóng được nhiệt độ lớn nhất, chênh lệch nhiệt độ lớn nhất từ hàm hồi quy toán học trong quá trình thi công trụ cầu.

4. Kết luận

Từ các kết quả xây dựng hàm toán học, phân tích, khảo sát, có thể đưa ra một số kết luận sau:

Việc xem xét các yếu tố ảnh hưởng đến nhiệt độ lớn nhất, chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa tâm và bề mặt trong quá trình thi công trụ cầu là cần thiết. Trong nghiên cứu này, đã xem xét ba yếu tố như hàm lượng xi măng, nhiệt độ đầu vào của hỗn hợp bê tông và loại ván khuôn sử dụng ảnh hưởng đến giá trị nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt của từng giai đoạn đổ.

- Đã xây dựng được các hàm toán học biểu thị nhiệt độ lớn nhất $T_{\max}$ và gradient nhiệt độ lớn nhất $\Delta T_{\max}$ giữa tâm và bề mặt của kết cấu bê tông trụ cầu. Những hàm toán học giúp những người kỹ sư nhanh chóng xác định những tham số $T_{\max}$, $\Delta T_{\max}$ từ đó đưa ra những giải pháp ngăn ngừa nứt nhiệt cho kết cấu ở tuổi sớm ngày.

- Sử dụng ván khuôn có ảnh hưởng đáng kể đến nhiệt độ $T_{\max}$ và $\Delta T_{\max}$. Để hạn chế sự chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt của kết cấu trụ cầu, qua đó ngăn ngừa xuất hiện các vết nứt nhiệt ở giai đoạn tuổi sớm thì việc sử dụng ván khuôn gỗ tỏ ra hiệu quả hơn so với ván khuôn thép. Tuy nhiên, biện pháp sử dụng ván khuôn gỗ sẽ không tận dụng được trong quá trình thi công nhiều lần và độ bền kém hơn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải (ĐHCNGTVT) trong đề tài mã số ĐTTĐ2023-03.

Tài liệu tham khảo

- [1]. American Concrete Institute. (2000). ACI 116R-00, Cement and Concrete Terminology. Reported by ACI Committee 116.
- [2]. Bộ Khoa học và Công nghệ. (2012). Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 9341:2012, Bê tông khối lớn - Thi công và nghiệm thu.
- [3]. V.C. Công, L.V. Minh, H.N. Khoa. (2023). Phân tích xác suất nứt do nhiệt của kết cấu trụ cầu trong quá trình nhiệt thủy hóa xi măng bằng mô phỏng số. *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*, 13(01), 82-87.
- [4]. A.K. Bui, T.C. Nguyen, T.T.B. Nguyen. (2024). Using Advanced "Birth and Death" APDL Code to Analyze the Thermal Transient Problem of Mass Concrete during Construction Phases. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(3), 14660-14665.
- [5]. V. Tyurina, A. Chepurnenko, V. Akopyan. (2025). Prediction of thermal cracking during construction of massive monolithic structures. *Applied Sciences*, 15(3), 1499.
- [6]. L.V. Minh, N.A. Duc, H.N. Khoa, L.H. Ha, L.V. Thuc. (2024). Analysis of the effect of construction technology factors on controlling thermal cracking in mass concrete. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, 18(4), 12-29.
- [7]. T.-C. Nguyen, A.K. Bui. (2024). The temperature nomogram to predict the maximum temperature in mass concrete. *Magazine of Civil Engineering*, 17(2), 12605.
- [8]. C. Pang, Y. Mao, z. Liu, C. Zhang, X. Song. (2024). Effect and mechanism of phase change lightweight aggregate on temperature control and crack resistance in high-strength mass concrete. *Journal of Building Engineering*, 97, 110498.
- [9]. Q. Sun. (2025). Temperature control and crack prevention of high RCC dam in cold and drought area. *Structural Engineering International*, 35(2), 265-275.
- [10]. R. Faria, M. Azenha, J.A. Figueiras. (2006). Modelling of concrete at early ages: application to an externally restrained slab. *Cement and Concrete Composites*, 28(6), 572-585.
- [11]. Japan Concrete Institute. (2016). Guidelines for Control of Cracking of Mass Concrete. Japan.
- [12]. N.A. Aniskin, T.C. Nguyen. (2020). The effect of formworks on the temperature regime in the mass concrete. *Magazine of Civil Engineering*, 99(7), 9911.
- [13]. N.T. Chức, H.N. Khoa, T.H. Hải. (2020). 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. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN*, 14(5V), 27-38.
- [14]. X. Liu, C. Zhang, X. Chang, W. Zhou, Y. Cheng, Y. Duan. (2015). Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 78, 449-459.
- [15]. G.W. William, S.N. Shoukry, M.Y. Riad. (2005). Early age cracking of reinforced concrete bridge decks. *Bridge Structures*, 1(4), 379-396.
- [16]. B. Chen, R. Ding, J. Zheng, S. Zhang. (2009). Field test on temperature field and thermal stress for prestressed concrete box-girder bridge. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 3, 158-164.
- [17]. J. Li. (2012). Predicting early-age thermal behavior of mass concrete for bridge foundation. *Graduate Theses and Dissertations, Iowa State University*.
- [18]. H.N. Khoa, V.C. Công. (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*, 14/12, 17-27.
- [19]. C.T.H. Vinh, B.Đ. Vinh, N.M. Nhật, L.V.P. Nhân, N.T. Hải. (2023). Đánh giá nhiệt thủy hóa trong bê tông khối lớn bằng các phương pháp thực nghiệm và mô phỏng số. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN*, 17(1V), 101-114.
- [20]. T.V. Miền, N.H. Phú. (2022). Mô phỏng giải nhiệt cho đầm chuyển bê tông khối lớn bằng hệ thống ống làm mát. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN*, 16(1V), 35-47.