



ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION DUE TO CEMENT HYDRATION HEAT IN EARLY-AGE REINFORCED CONCRETE BRIDGE PIER BY HOMOGENIZATION METHOD

Nguyen Xuan Lam, Le Ba Anh*, Vu Ba Thanh, Nguyen Duy Tien,
Nguyen Ngoc Long

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 2/6/2021

Revised: 20/7/2021

Accepted: 5/8/2021

Published online: 15/8/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.6.6>

* *Corresponding author*

Email: baanh.le@utc.edu.vn

Abstract. Temperature distribution in reinforced concrete (RC) structures at an early age due to the influence of cement hydration is an important issue that needs to be studied, because this phenomenon generates thermal stress and affects directly the stress-strain relationship of RC structures. The thermal stress has a relatively large value and is one of the causes of cracks in concrete structures at the construction stage. Here, we present some points to analyze the causes of the initiation and distribution of this temperature field in RC structures: (i) a homogenization method is applied to determine the equivalent thermal conductivity coefficient and effective thickness of RC layer with respect to the factors of the typical reinforcement diameters, protective concrete thickness and concrete grade; (ii) a calculation program was developed based on the obtained equivalent thermal conductivity coefficient of the RC layer and the heat transfer equations to analyze the temperature fields over time due to cement hydration in an actual bridge pier structure.

Keywords: homogenization method, thermal conductivity, reinforced concrete, temperature distribution.



**PHÂN TÍCH SỰ PHÂN BỐ NHIỆT ĐỘ DO NHIỆT THỦY HÓA
XI MĂNG TRONG TRỤ CẦU BÊ TÔNG CỐT THÉP Ở TUỔI SỚM
BẰNG PHƯƠNG PHÁP ĐỒNG NHẤT HÓA**

**Nguyễn Xuân Lam, Lê Bá Anh*, Vũ Bá Thành, Nguyễn Duy Tiên,
Nguyễn Ngọc Long**

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 2/6/2021

Ngày nhận bài sửa: 20/7/2021

Ngày chấp nhận đăng: 5/8/2021

Ngày xuất bản online: 15/8/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.6.6>

* Tác giả liên hệ

Email: baanh.le@utc.edu.vn

Tóm tắt. Phân bố nhiệt độ trong kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) ở tuổi sớm do ảnh hưởng của nhiệt thủy hóa xi măng là một vấn đề quan trọng cần phải được nghiên cứu, bởi hiện tượng này sinh ra ứng suất nhiệt và có ảnh hưởng trực tiếp đến quan hệ ứng suất-biến dạng của kết cấu BTCT. Ứng suất nhiệt này có giá trị tương đối lớn và là một trong những nguyên nhân gây ra vết nứt trong kết cấu bê tông ở giai đoạn thi công. Trong bài báo này, chúng tôi đưa ra một số vấn đề mới để phân tích nguyên nhân của sự hình thành và phân bố trường nhiệt độ trong kết cấu BTCT: (i) phương pháp đồng nhất hóa được áp dụng để xác định hệ số dẫn nhiệt tương đương và bề dày có hiệu của lớp vật liệu BTCT với các đường kính cốt thép, chiều dày bê tông bảo vệ và cấp bê tông điển hình; (ii) xây dựng chương trình tính toán dựa vào hệ số dẫn nhiệt tương đương đạt được của lớp BTCT và các phương trình truyền nhiệt để phân tích các trường nhiệt độ theo thời gian do thủy hóa xi măng trong một kết cấu trụ cầu thực tế.

Từ khóa: Đồng nhất hóa vật liệu, hệ số dẫn nhiệt, bê tông cốt thép, phân bố nhiệt độ.

© 2021 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong quá trình xây dựng, sự hình thành vết nứt do nhiệt thủy hóa xi măng trong kết cấu BTCT tuổi sớm là một vấn đề cần được quan tâm và giải quyết. Cụ thể, ứng suất kéo do sự kết hợp của chênh lệch nhiệt độ sinh ra do quá trình thủy hóa của xi măng, điều kiện môi trường xung quanh, các biến dạng tự nhiên và điều kiện biên, thường gây ra tác động nội tại

đáng kể lên các kết cấu bê tông. Bất cứ khi nào ứng suất như vậy đạt đến cường độ chịu kéo của bê tông, hiện tượng nứt sẽ xảy ra, dẫn đến giảm khả năng sử dụng và độ bền của kết cấu.

Sự hình thành nguồn nhiệt độ và mức độ thủy hóa trong kết cấu bê tông phụ thuộc vào nhiều yếu tố, trong đó những yếu tố quan trọng là cấp phối bê tông với bê tông cường độ thông thường sử dụng trong công trình cầu [1], bê tông cường độ cao [2], công nghệ xây dựng và đặc biệt là kích thước của khối kết cấu bê tông [3-5]. Nhiều nghiên cứu trước đây đã phân tích ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ như: tốc độ thi công, kích thước khối đổ, hàm lượng xi măng, nhiệt lượng tỏa ra của 1 kg xi măng, nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông, thời điểm xây dựng, vấn đề ván khuôn đến phân bố nhiệt trong khối bê tông cốt thép [6-8]. Trong [9] đã nghiên cứu mức độ thủy hóa dựa vào thí nghiệm đo nhiệt và sự thay đổi chất kết dính trong bê tông. Tuy nhiên, các nghiên cứu này vẫn có hạn chế là kết cấu còn đơn giản chỉ thuần túy là khối bê tông không có cốt thép và cấp phối bê tông thí nghiệm chưa phải là cấp phối bê tông phù hợp với công trình cầu (bê tông từ cấp 25 MPa đến 40 MPa), mà thường là bê tông có cường độ thấp với hàm lượng xi măng thấp dẫn tới nhiệt lượng do thủy hóa của xi măng không cao.

Để khắc phục các nhược điểm trên, bài báo này phân tích trạng thái phân bố nhiệt độ do nhiệt thủy hóa của khối BTCT được sử dụng trong công trình cầu ở tuổi sớm với việc xác định hệ số dẫn nhiệt có hiệu của lớp BTCT dựa vào phương pháp đồng nhất hóa vật liệu, từ đó thiết lập một chương trình tính toán sự phân bố nhiệt độ do nhiệt thủy hóa trong một kết cấu thân trụ cầu thực tế với bê tông có cường độ chịu nén trung bình ở tuổi 28 ngày là 35,86 MPa (tương ứng với cấp bê tông C30 theo tiêu chuẩn thiết kế cầu đường bộ TCVN 11823:2017).

2. LÝ THUYẾT XÁC ĐỊNH SỰ PHÂN BỐ NHIỆT DO THỦY HÓA CỦA XI MĂNG

2.1. Phương trình vi phân truyền nhiệt

Mô hình bài toán truyền nhiệt trong kết cấu hai chiều (2D) có xét đến sự giải phóng nhiệt trong quá trình thủy hóa xi măng theo hai hướng x và y dựa trên phương trình vi phân truyền nhiệt nổi tiếng được đưa ra trong [10-12]:

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

Trong đó: q- Nhiệt sinh ra của một đơn vị thể tích (kJ/m³)

∂T - gia tăng nhiệt độ trong khoảng thời gian ∂t (giờ)

ρ - Khối lượng thể tích của vật liệu (kg/m³)

C- Nhiệt dung riêng của vật liệu (kJ /kg.K)

k_x, k_y - hệ số khuếch tán nhiệt theo mỗi hướng x,y (m²/s)

Để giải phương trình (1), sử dụng hai điều kiện biên cơ bản được trình bày trong [13, 14]:

Tại biên nhiệt độ không đổi: $T(x, y, t) = T_s$ với $\tau=[0, t]$

Tại biên truyền nhiệt $k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + q(t) + h_c (T_s - T_f) = 0$ với $\tau=[0, t]$

Trong đó: n_x, n_y : cosin chỉ phương của mặt truyền nhiệt đang xét. $q(t)$: nhiệt sinh ra trong một đơn vị thể tích tại thời điểm t (kJ/m^3); T_s và T_f là nhiệt độ bề mặt bê tông và nhiệt độ môi trường ($^\circ\text{C}$); h_c là hệ số đối lưu của bề mặt bê tông và môi trường ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$).

2.2. Công thức quá trình truyền nhiệt trong phương pháp phần tử hữu hạn

Trong phương pháp PTHH, nhiệt độ tại một vị trí với thời gian t được xấp xỉ như sau:

$$T(x, y, t) \approx \bar{T} = \sum_{i=1}^n N_i(x, y)T_i(t) = [N]\{T\} \quad (2)$$

Áp dụng tiêu chuẩn Galerkin, cho phương trình (2) và thực hiện các phép biến đổi ta có:

$$\int_{\Omega} N \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] d\Omega \{T\} + \int_{\partial\Omega} h_c N N^T \{T\} d\partial\Omega + \int_{\partial\Omega} q N d\partial\Omega + \int_{\Omega} \rho C N N^T d\Omega \frac{d\{T\}}{dt} - \int_{\Omega} G N \gamma d\Omega = 0 \quad (3)$$

Trong đó, N là ma trận hàm dạng, G là nhiệt sinh ra do thủy hóa xi măng.

Trong phương pháp PTHH khi giải bài toán truyền nhiệt không ổn định có nguồn nhiệt ở bên trong được thể hiện bởi phương trình rút gọn như sau:

$$[C] \frac{d\{T\}}{dt} + [K]\{T\} = \{f(T)\} \quad (4)$$

Với ma trận nhiệt dung riêng $[C] = \int_{\Omega} \rho C N N^T d\Omega$

Và ma trận hệ số dẫn nhiệt $[K] = \int_{\Omega} N \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] d\Omega + \int_{\partial\Omega} h_c N N^T d\partial\Omega$

Tổng nhiệt sinh ra sau khi mất mát do thoát nhiệt tại biên $\{f\}$ được xác định:

$$\{f\} = \int_{\Omega} G N \gamma d\Omega - \int_{\partial\Omega} q N d\partial\Omega \quad (5)$$

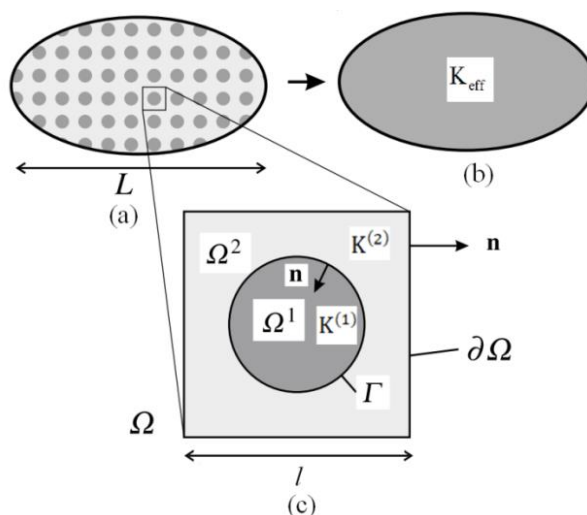
Tiếp tục áp dụng tiêu chuẩn Galerkin trong miền thời gian: $T(t) = T_i(t)N_i + T_j(t)N_j$ cho mỗi phần tử, với $N_i = 1 - t/\Delta t$ và $N_j = t/\Delta t$. Cuối cùng cho mỗi bước thời gian (Δt) phương trình (4) được viết lại ở dạng sau:

$$\left(-\frac{[C]}{2\Delta t} + \frac{[K]}{3} \right) \{T\}_{(n-1)t} + \frac{2}{3}[K]\{T\}_m + \left(\frac{[C]}{2\Delta t} + \frac{[K]}{6} \right) \{T\}_{(n+1)t} = \{f\} \quad (6)$$

2.3. Phương pháp đồng nhất hóa vật liệu để xác định hệ số dẫn nhiệt có hiệu và chiều dày của lớp BTCT sau khi đồng nhất hóa

Phương pháp đồng nhất hóa vật liệu [15] cho phép thay thế một môi trường chứa nhiều vật liệu thành phần bằng một môi trường vật liệu đồng nhất sao cho tính chất và đặc tính của vật liệu thay thế tương đương với vật liệu ban đầu. Phương pháp đồng nhất hóa là một phương pháp tiếp cận đa lớp mà đặc tính của vật liệu sau khi đồng nhất được xác định từ phần

từ thể tích đặc trưng (REV) như Hình 1. Một REV phải có kích thước nhỏ so với kích thước kết cấu tuy nhiên vẫn thể hiện đầy đủ tính chất của kết cấu. Hình 1a thể hiện một kết cấu thực tế với kích thước lớn là L , Hình 1c là một REV có kích thước nhỏ l được lấy từ kết cấu trong Hình 1a, dùng phương pháp đồng nhất hóa để tạo ra một vật liệu đồng nhất như Hình 1b.



Hình 1. Quá trình đồng nhất hóa vật liệu: (a) kết cấu không đồng nhất; (b) kết cấu đồng nhất; (c) REV.

Trong một nghiên cứu gần đây của Nguyễn Xuân Lam và Thẩm Quốc Thắng [16] đã dựa vào lý thuyết đồng nhất hóa vật liệu theo bài toán nhiệt để xác định hệ số dẫn nhiệt tương đương và bề dày có hiệu của lớp BTCT với các phương trình cơ bản dưới đây:

Hệ số dẫn nhiệt $K(\mathbf{x})$ tại từng vị trí \mathbf{x} trong khối BTCT được xác định theo công thức :

$$K(\mathbf{x}) = \chi(\mathbf{x})K^{(1)} + (1 - \chi(\mathbf{x}))K^{(2)} \quad (7)$$

Trong đó, $K^{(1)} = 50\text{W/m.K}$ và $K^{(2)} = 1,6\text{W/m.K}$ là hệ số dẫn nhiệt của thép và bê tông tương ứng. $\chi(\mathbf{x})$ là hàm vị trí, có giá trị bằng 1 nếu \mathbf{x} nằm trong miền cốt thép, và bằng 0 nếu \mathbf{x} nằm trong phần bê tông.

Sau đó, hệ số dẫn nhiệt tương đương K_{eff} của lớp BTCT được xác định như sau:

$$K_{\text{eff}} = \langle K(\mathbf{x})\mathbf{A}(\mathbf{x}) \rangle \quad (8)$$

Trong đó, $\mathbf{A}(\mathbf{x})$ là ten-xơ định vị thể hiện mối liên quan giữa gradient nhiệt trung bình và gradient nhiệt tại từng vị trí \mathbf{x} bên trong miền tính toán [16].

Sử dụng các đường kính cốt thép dọc chủ là 16, 18, 20, 25, 32mm, cốt thép đai là 12, 14, 16, 18, 20, 25, 32mm, bề dày lớp bê tông bảo vệ là 50mm và 70mm. Sau khi tính toán bằng phương pháp đồng nhất hóa [16], chúng ta xác định được hệ số dẫn nhiệt tương đương của khối BTCT là K_{eff} theo như kết quả trình bày ở Bảng 1, chiều dày của lớp BTCT sau khi đồng nhất được đưa ra trong Bảng 2, chiều dày này được tính từ mép ngoài kết cấu tới ranh giới của khu vực mà trường nhiệt độ bằng nhau tại tất cả các điểm theo phương thẳng đứng của kết cấu mô phỏng như được trình bày trong [16]. Từ Bảng 1, ta thấy rằng đường kính cốt thép càng lớn, hệ số dẫn nhiệt tương đương K_{eff} càng cao do hệ số dẫn nhiệt của cốt thép lớn hơn hệ số dẫn nhiệt của bê tông.

Bảng 1 . Hệ số dẫn nhiệt tương đương (W/mK) của BTCT cho một số loại đường kính cốt thép.

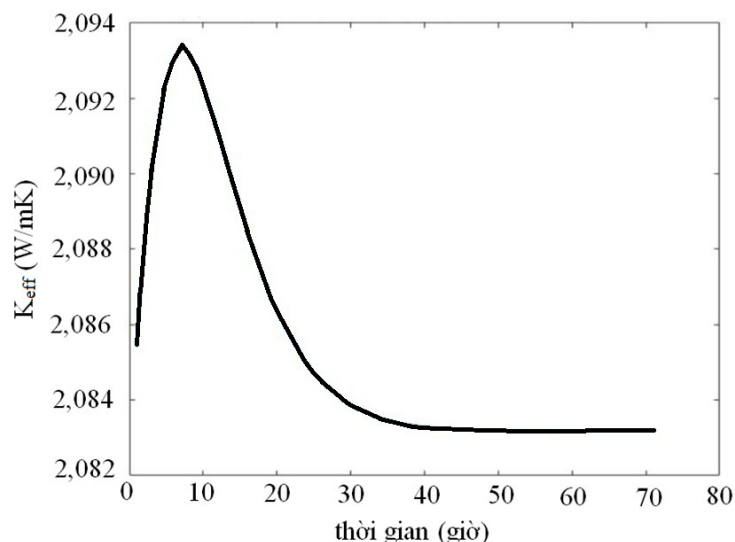
Đường kính cốt thép đai (mm)	Đường kính cốt thép chủ (mm)				
	16	18	20	25	32
12	1,771	1,779	1,790	1,820	1,874
14	1,797	1,806	1,816	1,848	1,904
16	1,824	1,833	1,844	1,876	1,934
18	1,850	1,860	1,872	1,905	1,966
20	1,878	1,889	1,901	1,935	1,998
25	1,953	1,964	1,975	2,014	2,083
32	2,067	2,078	2,093	2,137	2,216

Bảng 2 . Chiều dày của lớp BTCT (mm) sau đồng nhất cho một số loại đường kính cốt thép.

Đường kính cốt thép đai (mm)	Đường kính cốt thép chủ (mm)				
	16	18	20	25	32
12	91	96	102	114	128
14	93	99	104	116	130
16	95	101	106	118	132
18	97	103	108	121	135
20	100	105	111	123	137
25	105	111	116	128	142
32	112	118	123	136	150

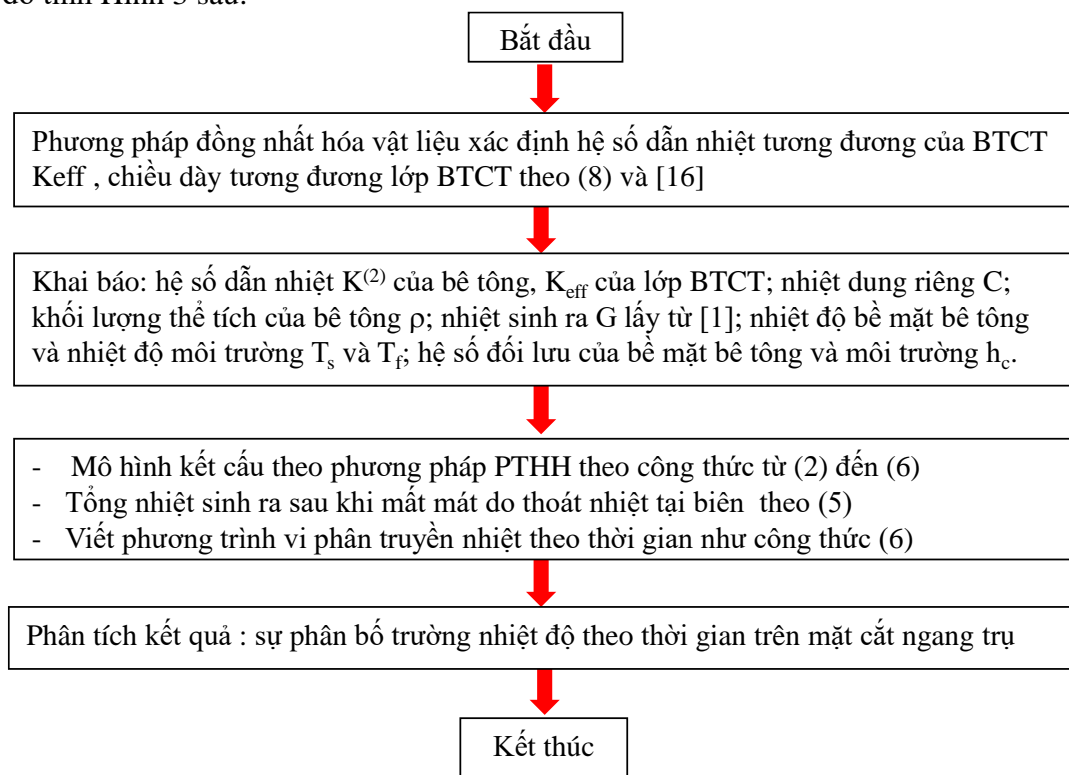
Hình 2 là kết quả tính toán xác định hệ số dẫn nhiệt tương đương K_{eff} của vật liệu BTCT cho trường hợp cốt chủ có đường kính D32 và cốt thép đai D25 khi xét tới yếu tố thời gian, trong đó nhiệt độ BTCT trong giai đoạn đầu thay đổi do nhiệt độ trong khối BTCT chưa ổn định. Có thể thấy rằng: giá trị hệ số dẫn nhiệt tương đương K_{eff} gần như không thay đổi theo thời gian (cao nhất ở thời điểm 10 giờ sau khi đổ bê tông và có giá trị bằng 2,093 W/mK trong khi thấp nhất bằng 2,083W/mK, tương đương chênh lệch 0,47%). Kết quả này cho thấy việc

xác định một số hệ số dẫn nhiệt có hiệu cho vật liệu BTCT theo lý thuyết đồng nhất hóa là khả thi.



Hình 2. Hệ số truyền nhiệt tương đương theo thời gian với trường hợp đường kính cốt thép chủ D32mm và cốt thép đai D25mm.

Nội dung của chương trình tính toán sự phân bố nhiệt độ do nhiệt thủy hóa được tóm lược qua sơ đồ tính Hình 3 sau:



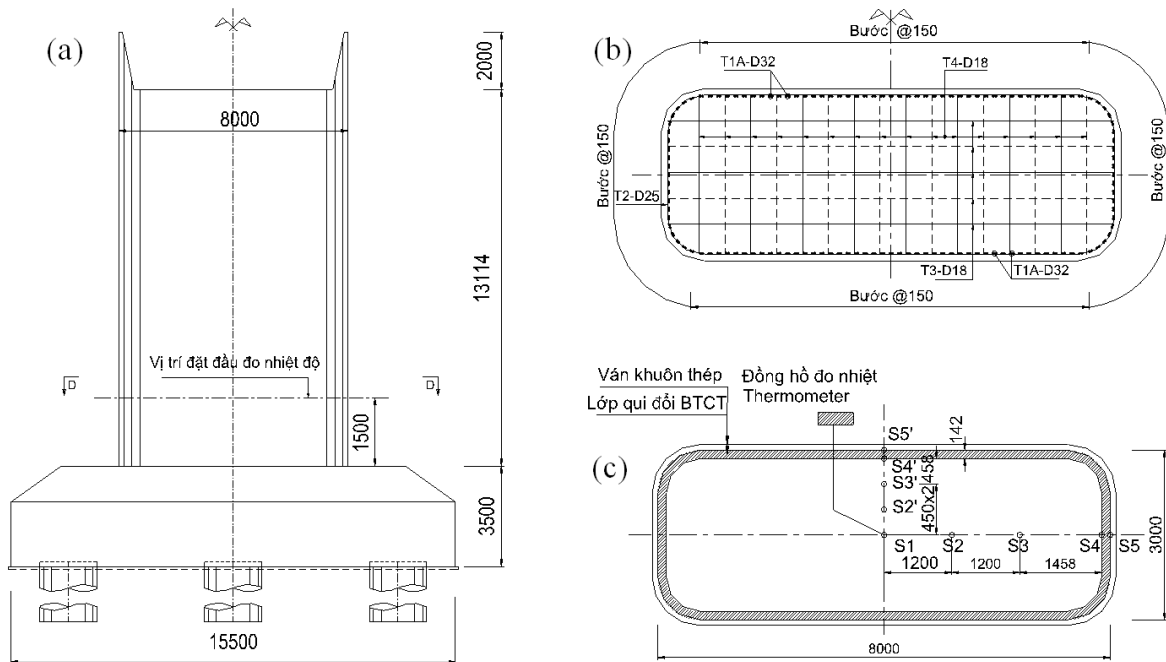
Hình 3. Sơ đồ chương trình tính toán sự phân bố nhiệt độ do nhiệt thủy hóa.

3. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

3.1. Thiết lập quá trình đo nhiệt thủy hóa của xi măng của thân trụ BTCT ngoài hiện trường

Khảo sát với thân trụ cầu T06HB (trụ cầu số 06, cầu đúc hẫng Hòa Bình, tỉnh Hòa Bình) có kích thước: $L \times B \times H = 8\text{m} \times 3\text{m} \times 13,114\text{m}$ như Hình 4a. Thân trụ cao 13,114 m được chia thành các khối đổ với khối đổ cao nhất là 3m. Trụ cầu sử dụng bê tông với cấp C30. Hỗn hợp bê tông sử dụng loại xi măng portland thông thường PC40. Trụ cầu có cốt chủ kẹp đôi với đường kính D32 bước cốt thép 150 mm và cốt đai là D25 như Hình 4b.

Khảo sát ngoài hiện trường sự tăng nhiệt độ do nhiệt thủy hóa của xi măng theo thời gian, sự chênh lệch nhiệt độ giữa lõi của khối bê tông và bề mặt bê tông của thân trụ T06HB bằng thiết bị đo Thermometer như Hình 5 và các đầu đo nhiệt độ được gắn vào các vị trí của mặt cắt ngang thân trụ như Hình 4c. Sử dụng hệ số dẫn nhiệt tương đương của lớp vỏ BTCT như Bảng 1 và hệ số dẫn nhiệt của bê tông với $K_2 = 1,6\text{W/mK}$ kết hợp với các công thức (3) và (6) để thiết lập một chương trình tính toán để phân tích trạng thái phân bố nhiệt độ do thủy hóa xi măng trong kết cấu thân trụ cầu BTCT.



Hình 4. Thân trụ dùng để thực nghiệm: (a) kích thước thân trụ; (b) Bố trí cốt thép mặt cắt ngang; (c) Bố trí các đầu đo nhiệt độ trên mặt cắt ngang.

Mặt cắt bố trí các đầu đo nhiệt cách mặt bề trụ 1,5 m tại chính giữa chiều cao của khối đổ đầu tiên của thân trụ (Hình 4a) với chiều dày bê tông bảo vệ là 60 mm. Trên mặt cắt ngang thân trụ ta bố trí mỗi chiều đo 5 đầu đo: theo phương ngang cầu là các đầu đo S1, S2, S3, S4, S5 và theo phương dọc cầu là S1, S2', S3', S4', S5' (Hình 4c) với S1 được bố trí chính tâm mặt cắt ngang, S4 và S4' bố trí cách bề mặt thân trụ là 142 mm tại vị trí ranh giới giữa hai loại vật liệu (xem Bảng 2) và S5, S5' được bố trí tại bề mặt của bê tông nơi tiếp giáp với ván khuôn thép. Tiến hành đo nhiệt độ của bê tông tại các thời điểm: lúc bắt đầu đổ bê tông (ngày 0), 1 ngày, 2 ngày, 3 ngày, 4 ngày, 5 ngày và 6 ngày tuổi với các bước tiến hành như sau:

- Đổ bê tông vào khuôn tới chiều cao 1,5 m, nhanh chóng lắp đặt các đầu đo nhiệt trên mặt cắt ngang như Hình 4c, tiếp tục đổ bê tông tới chiều cao khối đổ là 3 m.

- Nhiệt độ ván khuôn coi như bằng với nhiệt độ môi trường.

- Đo liên tục trong khoảng thời gian từ lúc bắt đầu đổ bê tông tới ngày thứ 6 tùy thuộc vào quá trình diễn biến nhiệt (nếu nhiệt không tăng trong khoảng thời gian 12 giờ thì có thể dừng đo). Kiểm tra thường xuyên xem có dấu hiệu bất thường nào không để điều chỉnh.

- Kết thúc đo.

Nhiệt độ của ngày thứ 5 và ngày thứ 6 được ghi nhận là không tăng thêm, do đó ta dừng đo tại ngày thứ 6. Kết quả đo được tại các vị trí đầu đo tại ngày thứ 5 và ngày thứ 6 với nhiệt độ tại S1 cao nhất là 64,9 °C và nhiệt độ tại S5 và S5' là 28,6 °C. Sự chênh lệch nhiệt độ cao nhất trong khối bê tông thu được là 36,3 °C.



Đầu đo S1



Đầu đo S2

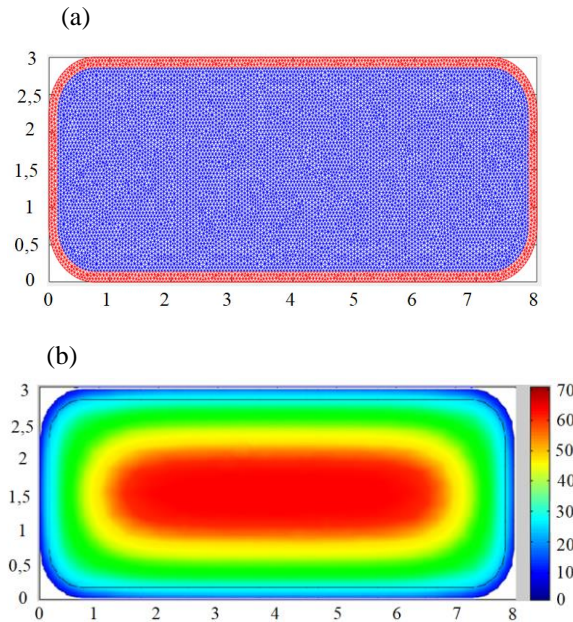


Đầu đo S5

Hình 5. Nhiệt độ đo được tại các đầu đo bằng Thermometer ngoài hiện trường tại ngày thứ 6.

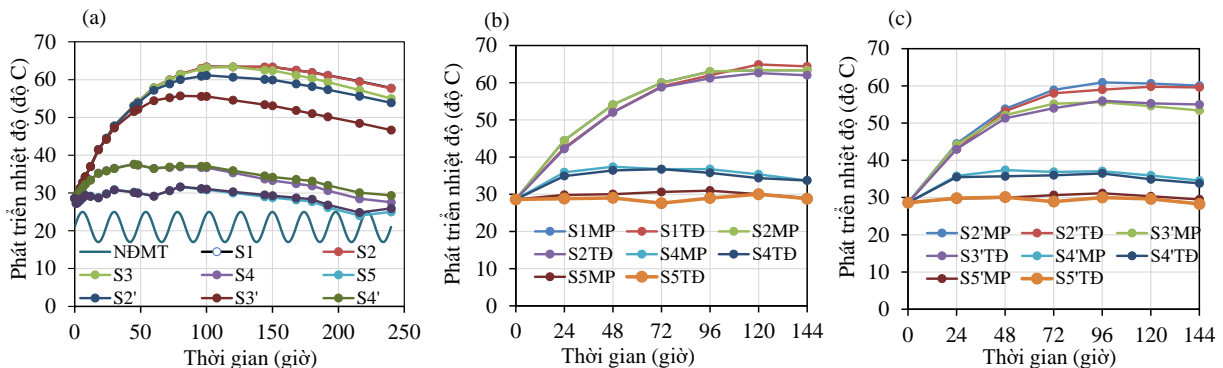
3.2. Mô phỏng sự thay đổi nhiệt độ theo thời gian và sự phân bố nhiệt độ do nhiệt thủy hóa của thân trụ cầu BTCT thực tế

Chương trình tính toán được viết trong Matlab để phân tích trạng thái phân bố nhiệt độ trong thân trụ BTCT ở trên. Với đường kính cốt chủ D32 và đường kính cốt đai D25, ta có hệ số dẫn nhiệt $K_{\text{eff}}=2,083 \text{ W/mK}$ của lớp vỏ BTCT với bề dày là 142 mm và hệ số dẫn nhiệt $K^{(2)}=1,6 \text{ W/mK}$ của vật liệu bê tông. Nhiệt dung riêng của vật liệu $C = 1000 \text{ J/kgK}$, khối lượng thể tích của bê tông 2400 kg/m^3 . Nhiệt độ của khối bê tông tại thời điểm bắt đầu đổ 28,6 °C. Hệ số đối lưu với môi trường $h_c= 13,953 \text{ W/m}^2\text{K}$. Nhiệt độ môi trường thay đổi từ 17 °C đến 25 °C vào thời điểm thí nghiệm. Hàm nhiệt thủy hóa được tham khảo từ nghiên cứu của Đỗ Anh Tú và công sự [1] cho cấp phối bê tông tương tự. Trong chương trình tính toán này, mặt cắt ngang được chia lưới tam giác thành hai vùng vật liệu với màu xanh là vật liệu bê tông và màu đỏ là lớp vật liệu BTCT quy đổi như Hình 6a. Theo kết quả phân tích nhiệt độ trong khối bê tông đạt giá trị lớn nhất ở tuổi 120 giờ sau khi đổ như Hình 6b. Trong quá trình mô phỏng, ta thấy rằng khi bê tông bắt đầu đóng rắn, nhiệt lượng sinh ra từ phản ứng thủy hóa xi măng bị tích tụ trong lòng khối và làm nhiệt độ vùng xung quanh tâm tăng rất cao, với vị trí tâm trụ là nơi có nhiệt độ cao nhất là 63,4 °C, trong khi đó nhiệt độ cao nhất đo được ngoài hiện trường là 64,9 °C, sai số đạt được là 2,3%. Do đó kết quả đo và mô phỏng rất đáng tin cậy.



Hình 6. Mô phỏng phân bố nhiệt trên mặt cắt ngang: (a). Chia lưới hai lớp vật liệu theo mô hình PTHH; (b). Phân bố nhiệt tại thời điểm 120 giờ.

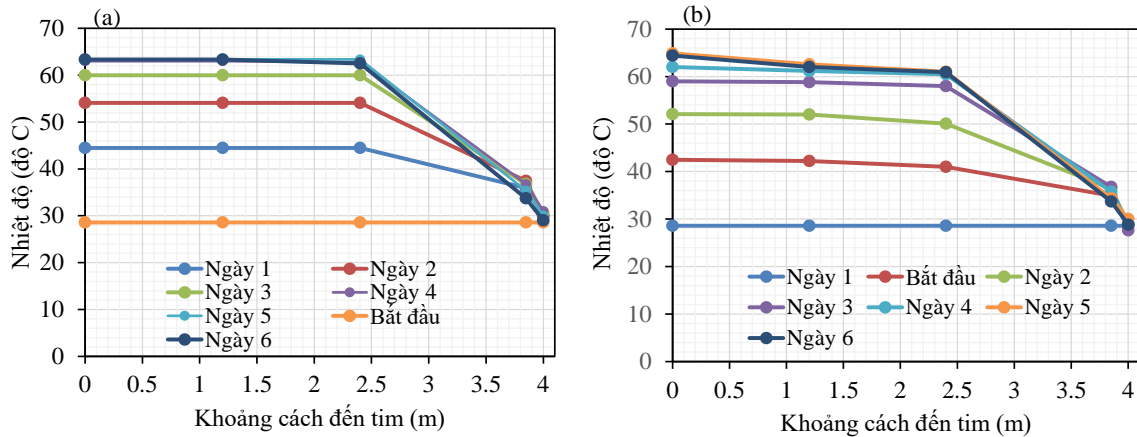
Trên Hình 7 thể hiện sự thay đổi nhiệt độ theo thời gian của mô phỏng và thực đo do nhiệt thủy hóa xi măng tại các vị trí đầu đo. Trong quá trình mô phỏng, nhiệt độ môi trường được thể hiện thay đổi theo giờ như Hình 7a, với 17 °C vào ban đêm và 25 °C vào ban ngày nên các đầu đo S4, S4' (gần mặt bê tông) và đầu đo S5, S5' (tại mặt bê tông) nhiệt độ sinh ra do nhiệt thủy hóa xi măng sẽ thay đổi theo đường gãy khúc như trình bày ở Hình 7a, trong khi các đầu đo S1, S2, S2', S3, S3' trong khối bê tông sẽ không bị ảnh hưởng nhiều bởi sự thay đổi nhiệt độ môi trường. Ta thấy rằng nhiệt độ tại các đầu đo gần tâm lõi tăng lên theo thời gian với biên độ lớn, trong khi nhiệt độ tại các đầu đo gần bề mặt bê tông tăng không nhiều. Điều này chứng tỏ chiều dày của khối bê tông ảnh hưởng nhiều tới sự tăng nhiệt độ tại các điểm đo. Kết quả giữa mô phỏng và thực đo được so sánh tại thời điểm ban đầu (0 giờ), 1 ngày (24 giờ), 2 ngày (48 giờ), 3 ngày (72 giờ), 4 ngày (96 giờ), 5 ngày (120 giờ), 6 ngày (144 giờ) là khá giống nhau như được trình bày trong Hình 7b và Hình 7c.



Hình 7. So sánh nhiệt độ thay đổi theo thời gian tại các vị trí điểm đo: (a). Mô phỏng nhiệt độ thay đổi theo giờ. (b). So sánh nhiệt độ trên cạnh dài. (c). So sánh nhiệt độ trên cạnh ngắn.

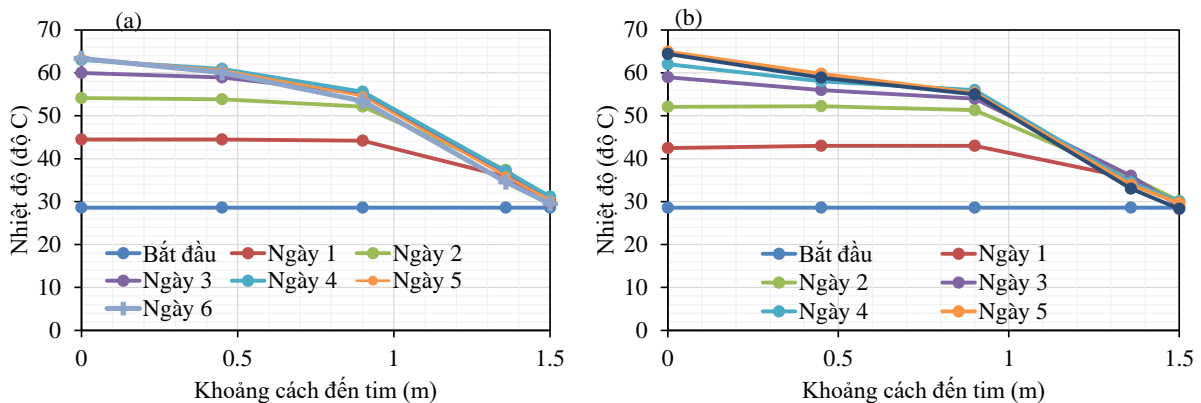
Trên Hình 8 và Hình 9 thể hiện nhiệt độ tại các đầu đo phụ thuộc khoảng cách tới tâm trụ theo cạnh dài và cạnh ngắn của thân trụ của mô phỏng và thực đo. Hình 8 cho thấy khoảng cách tính tới tâm trụ nhỏ hơn 2,5 m thì nhiệt độ tăng tương đối giống nhau theo thời gian và

bắt đầu giảm dần với khoảng cách từ 2,5 m tới mép bê tông thân trụ vì các đầu đo tại các khu vực nhỏ hơn 2,5 m này nằm hoàn toàn trong lớp bê tông, cách xa bề mặt bê tông, điều này chứng tỏ trên mặt cát ngang trụ có ranh giới sao cho trong khu vực đó nhiệt độ sinh ra do nhiệt thủy hóa không đổi. Tương tự, trên Hình 9, nhiệt độ tăng theo thời gian giống nhau khi khoảng cách tính tới tâm trụ nhỏ hơn 0,5 m và bắt đầu giảm dần với khoảng cách tới tâm trụ lớn hơn 0,5 m. Điều này cũng được thể hiện rõ trong hình thái phân bố nhiệt độ trên mặt cát ngang thân trụ theo Hình 6b.

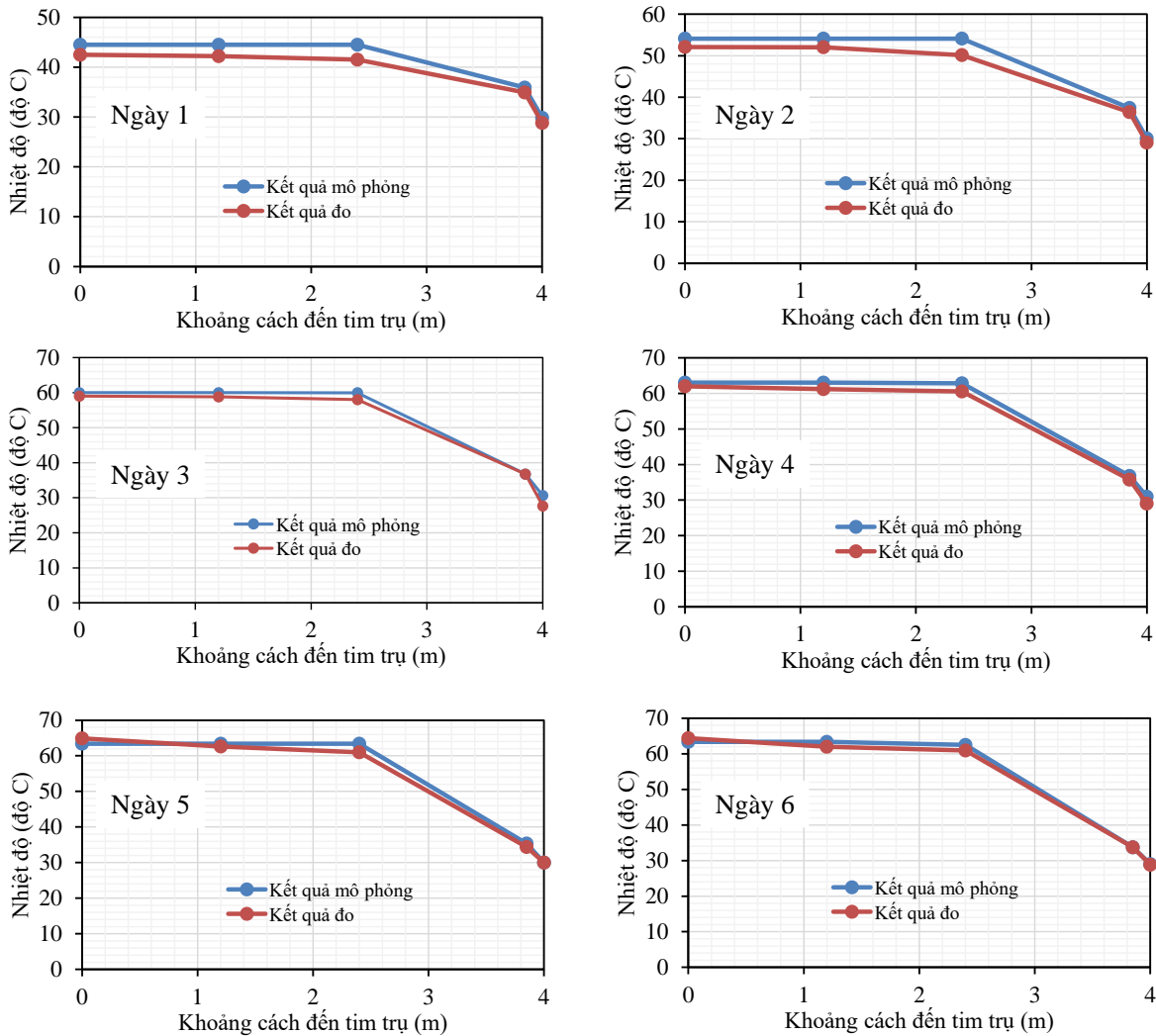


Hình 8. Nhiệt độ tại các vị trí đầu đo phụ thuộc khoảng cách tới tâm trụ theo cạnh dài thân trụ: (a). Mô phỏng, (b)Thực đo.

Trên Hình 10 và Hình 11 thể hiện sự so sánh nhiệt độ thay đổi theo thời gian tại các vị trí đầu đo phụ thuộc khoảng cách tới tâm trụ theo cạnh dài và cạnh ngắn thân trụ của mô phỏng và thực đo. Từ các kết quả đạt được ta sai số lớn nhất giữa mô phỏng và thực đo là 7% ứng với điểm đo S3 trên cạnh dài tại ngày thứ 2 và sai số lớn nhất giữa hai phương pháp trên là 4,8% ứng với đầu đo S2' trên cạnh ngắn tại ngày thứ 4. Trên các hình này nhiệt độ tại các đầu đo còn lại giữa thực đo và mô phỏng rất giống nhau. Điều này chứng tỏ chương trình tính toán và số liệu thực đo rất đáng tin cậy để xác định sự tăng nhiệt độ và phân bố nhiệt độ do thủy hóa xi măng trong bê tông được sử dụng, mà ở đây với bê tông cấp C30 thường dùng để xây dựng kết cấu phần dưới trong công trình cầu.

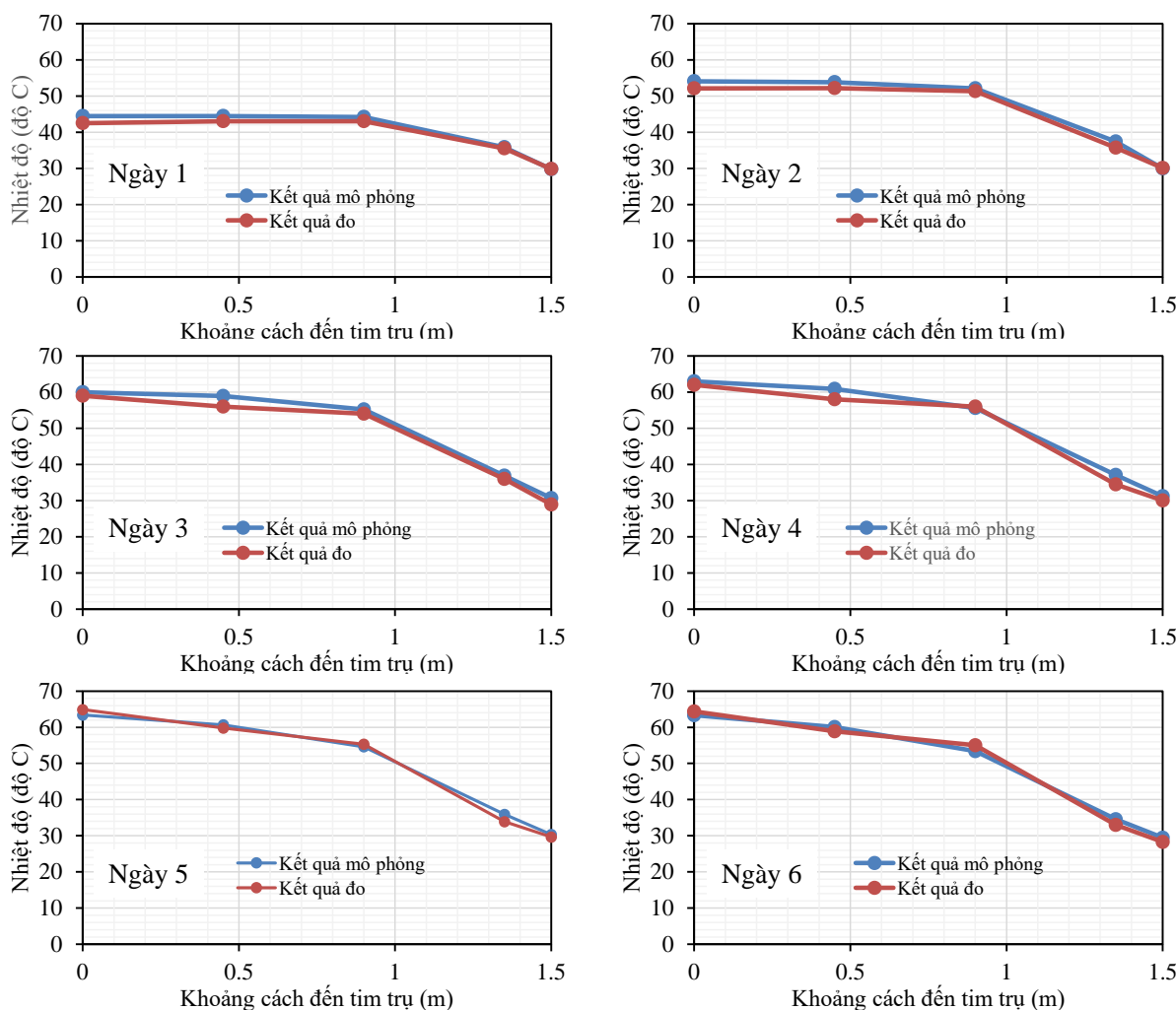


Hình 9. Nhiệt độ tại các vị trí đầu đo phụ thuộc khoảng cách tới tâm trụ theo cạnh ngắn thân trụ: (a). Mô phỏng. (b)Thực đo.



Hình 10. So sánh nhiệt độ thay đổi theo thời gian tại các vị trí đầu đo phụ thuộc khoảng cách tới tâm trụ theo cạnh dài thân trụ của mô phỏng và thực đo.

Trên Hình 12, dùng chương trình tính toán để mô phỏng hai loại thân trụ: Loại thứ nhất, với hai vật liệu gồm bê tông + lớp vỏ BTCT sau khi đồng nhất hóa và loại thứ hai là thân trụ thuần vật liệu bê tông để thấy được sự chênh lệch nhiệt độ giữa hai loại thân trụ này. Ở đây, chúng tôi so sánh nhiệt độ tại các điểm đầu đo S3, S3' với vị trí mà hai loại thân trụ là thuần bê tông, điểm S4, S4' tại vị trí tiếp giáp giữa hai vật liệu trong loại thân trụ thứ nhất và điểm S5, S5' tại mặt ngoài thân trụ. Ta thấy rằng tại vị trí S3 và S3', S5 và S5' kết quả là giống nhau, trong khi tại điểm tiếp giáp S4 và S4' có sự chênh lệch giữa loại thân trụ thứ nhất và loại thứ hai là 5,4%. Ta thấy rằng với thân trụ hai vật liệu có nhiệt độ thấp hơn so với loại thân trụ thuần vật liệu bê tông tại điểm S4 và S4' dựa vào kết quả mô phỏng. Điều này cho thấy việc xác định hệ số dẫn nhiệt tương đương của vật liệu BTCT bằng phương pháp đồng nhất hóa cho phép dự đoán chính xác hơn khả năng phân bố và thay đổi nhiệt độ do nhiệt thủy hóa xi măng so với loại thân trụ chỉ coi là thuần vật liệu bê tông để đơn giản hóa quá trình tính toán như hiện nay.



Hình 11. So sánh nhiệt độ thay đổi theo thời gian tại các vị trí đầu đo phụ thuộc khoảng cách tới tâm trụ theo cạnh ngắn thân trụ của mô phỏng và thực đo.

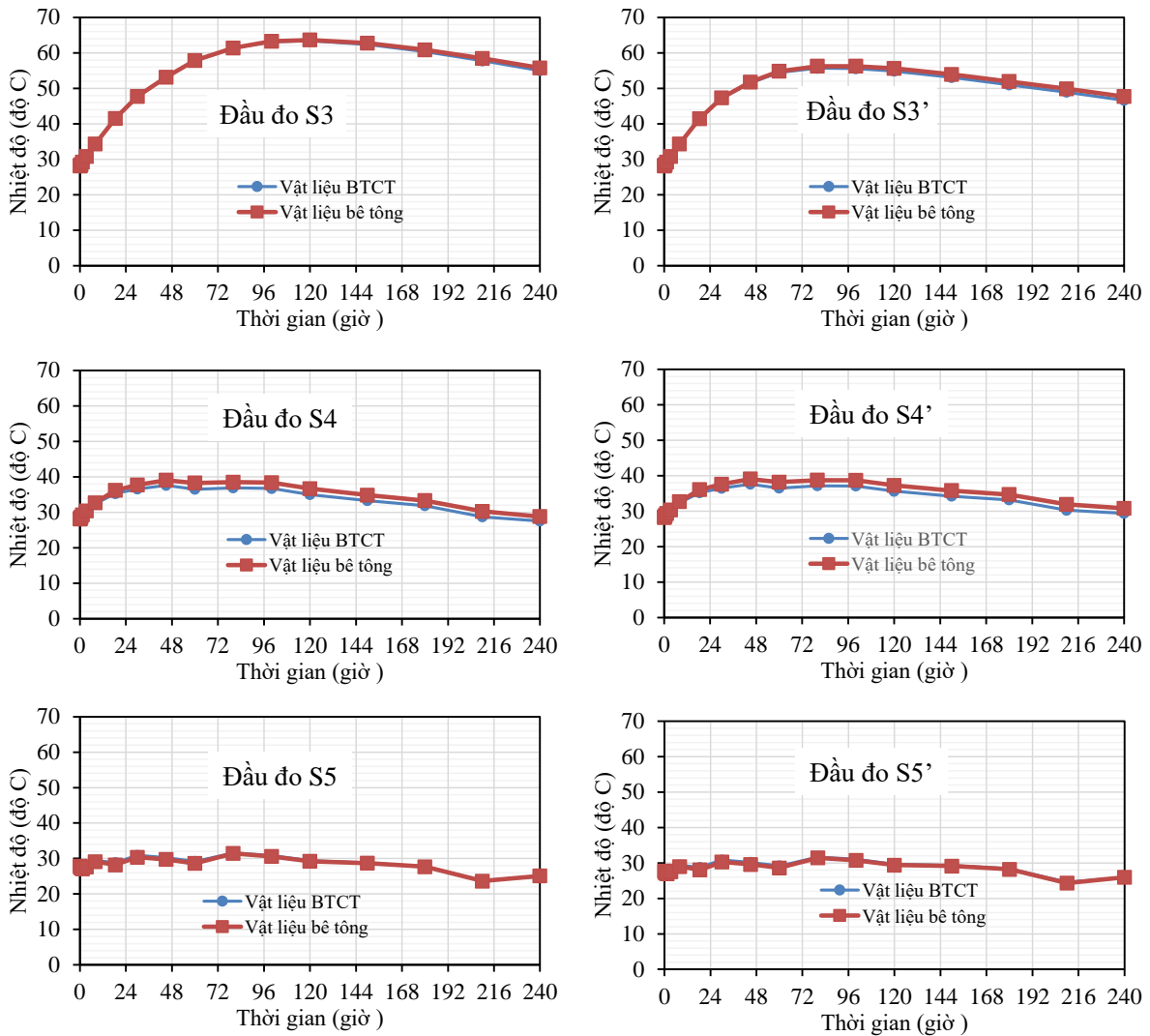
4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết quả phân tích sự phân bố nhiệt độ do nhiệt thủy hóa xi măng trên thân trụ cầu T06HB bằng chương trình tính toán đã mô tả được qui luật thay đổi và xác định được sự phân bố nhiệt độ của chúng tại các vị trí và thời điểm khác nhau của bê tông non tuổi. Kết quả phân tích bằng chương trình mô phỏng cơ bản tương đồng với kết quả đo thực tế bằng phương pháp thí nghiệm hiện trường. Cụ thể:

Kết quả mô hình hóa cho vật liệu thuần bê tông và vật liệu BTCT (với hệ số dẫn nhiệt có hiệu) thể hiện ở Hình 12 cho thấy sự chênh lệch về nhiệt độ ở các vị trí đặt đầu đo S4 và S4'. Đây là những vị trí sát bề mặt của khối bê tông (cách bề mặt bằng chiều dày lớp vỏ BTCT quy đổi là 142 mm). Đây cũng chính là những vị trí mà sự thay đổi về nhiệt độ gây ảnh hưởng lớn nhất đến ứng suất trong bê tông và có khả năng xảy ra vết nứt.

Kết quả đo nhiệt độ thực nghiệm trên một thân trụ cầu thực tế với cấp bê tông C30 và kết quả mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng các giá trị nhiệt lượng phát sinh được thí nghiệm trong phòng trong một nghiên cứu trước của nhóm tác giả [1] và giá trị hệ số dẫn nhiệt tương đương của vật liệu BTCT bằng phương pháp đồng nhất hóa vật liệu như trong

Bảng 1 cho thấy được sự tương đồng về kết quả mô phỏng với kết quả đo đạc thực tế. Chênh lệch giữa kết quả thực nghiệm và kết quả mô phỏng dưới 7% đã cơ bản chứng minh được hiệu quả của việc sử dụng hệ số dẫn nhiệt tương đương. Kết quả cho thấy việc sử dụng hệ số dẫn nhiệt tương đương cho vật liệu BTCT cho kết quả chính xác hơn việc sử dụng hệ số dẫn nhiệt của riêng vật liệu bê tông cho vùng vật liệu có cả bê tông và cốt thép.



Hình 12. So sánh nhiệt độ thay đổi theo thời gian tại các vị trí đầu đo theo mô phỏng của vật liệu BTCT và vật liệu thuần bê tông.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Đỗ Anh Tú, Nguyễn Xuân Lam, Thẩm Quốc Thắng, Hoàng Thị Tuyết, Nguyễn Văn Trường, Thực nghiệm xác định nhiệt độ đoạn nhiệt từ quá trình thủy hóa cầu xi măng cho bê tông thông thường dùng trong công trình cầu, Tạp chí Cầu đường Việt Nam, 12 (2019) 54-58.
- [2]. T. A. Do, T. T. Hoang, T. T. Bui, H. V. Hoang, T. D. Do, P. A. Nguyen, Evaluation of heat of hydration, temperature evolution and thermal cracking risk in high-strength concrete at early ages, Case Studies in Thermal Engineering, 21 (2020) 100658. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100658>

- [3]. M. Tia, A. Lawrence, T. A. Do, D. Verdugo, S. Han, M. Almarshoud, B. Ferrante, A. Markandeya, Maximum heat of mass concrete-phase 2, FDOT Project, University of Florida, USA, 2016. <https://trid.trb.org/view/1437077>
- [4]. H.-L.R. Chen, S. Mardmomen, G. Leon, On-site measurement of heat of hydration of delivered mass concrete, *Construction and Building Materials*, 269 (2021) 121246.
- [5]. C.T. Nguyen, T.A. Do, T.T. Hoang, T.D. Tran, Evaluation of early-age cracking risk in mass concrete footings under different placement conditions, *Revista Ingeniería de Construcción*, 36 (2021) 05-13.
- [6]. N. Aniskin, N.T. Chuc, Temperature regime of massive concrete dams in the zone of contact with the base, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 365 (2018) 042083. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/4/042083>
- [7]. T.C. Nguyen, T.P. Huynh, V.L. Tang, Prevention of crack formation in massive concrete at an early age by cooling pipe system, *Asian Journal Civil Engineering*, 20 (2019) 1101-1107. <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00175-5>
- [8]. Đỗ Thị Mỹ Dung, Nguyễn Trọng Chúc, Lâm Thanh Quang Khải, Ảnh hưởng của kích thước bê tông khối lớn đến sự hình thành trường nhiệt độ và vết nứt ở tuổi sớm ngày, *Tap chí xây dựng Việt Nam*, 1 (2020) 11-14.
- [9]. Đỗ Anh Tú, Vũ Xuân Thành, Hoàng Việt Hải, Hoàng Thị Tuyết, Nguyễn Hoài Nam, Mức độ thủy hóa và sự phát triển cường độ trong bê tông cường độ cao, *Tap chí khoa học Giao thông vận tải*, 70 (2019) 85-94.
- [10]. M.H. Lee, B.S. Khil, H.D. Yun, Influence of cement type on heat of hydration and temperature rise of the mass concrete, *Indian Journal of Engineering And Materials Sciences*, 8 (2014) 536 - 542.
- [11]. P. Havlasek, V. Smilauer, K. Hajkova, L. Baquerizo, Thermo-mechanical simulations of early-age concrete cracking with durability predictions, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 236 (2017) 012052. <https://doi:10.1088/1757-899X/236/1/012052>
- [12]. A. Rahimi, J. Noorzaei, Thermal and structural analysis of roller compacted concrete (r.c.c) dams by finite element code, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 12 (2011) 2761-2767.
- [13]. M. Larson, Thermal crack estimation in early age concrete-models and methods for practical application, Doctoral thesis, Lulea University of Technology, Sweden, 2003.
- [14]. S.G. Kim, Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement, Doctoral thesis, Iowa State University, USA, 2010.
- [15]. J. Yvonnet, Computational Homogenization of Heterogeneous Materials with Finite Elements, 1st edition, Springer, Switzerland, 2019.
- [16]. Nguyễn Xuân Lam, Thẩm Quốc Thắng, Phân tích ảnh hưởng của cốt thép đến hệ số dẫn nhiệt của bê tông khối lớn bằng phương pháp đồng nhất hóa số, *Tap chí Giao thông Vận tải*, 6 (2018) 38-40.