

Quy trình xác định các thông số công nghệ thi công bê tông khối lớn theo phương pháp đổ liên tục kết hợp phân chia lớp đổ tỏa nhiệt khác nhau

Lê Văn Minh¹, Nguyễn Tiến Đắc^{1*}

¹ Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

TỪ KHOÁ

Nứt nhiệt
Bê tông khối lớn
Đổ bê tông liên tục
Chênh lệch nhiệt độ
Bảo dưỡng giữ nhiệt
Thông số công nghệ

TÓM TẮT

Sự phát triển của nhiệt độ trong giai đoạn đầu đông rắn của bê tông, đã được các nhà nghiên cứu công nhận về mức độ nguy hiểm mà nó để lại. Quá trình này làm cho lượng nhiệt tích tụ ở bên trong khối bê tông tạo ra chênh lệch nhiệt độ ở tâm và bề mặt khối bê tông, làm cho khối bê tông xuất hiện các vết nứt nhiệt. Phương pháp đổ bê tông liên tục kết hợp phân chia hai lớp tỏa nhiệt khác nhau là một trong các phương pháp hiệu quả về việc giảm sự chênh lệch nhiệt độ. Bài báo này, xem xét các vấn đề về kiểm soát nứt do nhiệt, khi áp dụng phương pháp đổ bê tông liên tục kết hợp phân chia hai lớp tỏa nhiệt khác nhau của kết cấu bê tông khối lớn ở dạng đài móng cùng với đó là kết hợp phương pháp bảo dưỡng bê tông theo phương pháp giữ nhiệt. Phương pháp nghiên cứu là sử dụng mô phỏng dưới sự hỗ trợ của phần mềm Midas Civil 2022. Từ kết quả phân tích mô hình, có thể xây dựng quy trình và hướng dẫn thực hiện quy trình xác định các thông số công nghệ thi công kết cấu bê tông khối lớn theo phương pháp đổ bê tông liên tục với cấp phối tỏa nhiệt khác nhau.

KEYWORDS

Thermal cracking
Mass concrete
Continuous concrete pouring
Temperature difference
Thermal curing
Technological parameters

ABSTRACT

The development of temperature during the initial curing phase of concrete has been recognized by researchers as a significant danger. This process causes heat to accumulate within the concrete mass, creating a temperature difference between the core and the surface of the concrete, leading to thermal cracking. Continuous pouring combined with a two-layer heat dissipation system is one of the effective methods for reducing this temperature difference. This paper examines the issues of thermal cracking control when applying a continuous pouring method combined with a two-layer heat dissipation system to large-scale concrete structures in the form of foundations, along with a thermal curing method. The research method involves using simulations supported by Midas Civil 2022 software. From the model analysis results, it is possible to develop procedures and guidelines for determining the technological parameters for constructing large-scale concrete structures using the continuous concrete pouring method with different heat-releasing mix designs.

1. Giới thiệu

Khi nền kinh tế ngày càng phát triển thì việc đầu tư và xây dựng các cơ sở hạ tầng đô thị sẽ phát triển theo. Tại Việt Nam ở đầu thế kỷ XXI, đã tăng cường xây dựng các tòa nhà cao tầng, các hệ thống công trình giao thông phức tạp và to lớn. Khi tiến hành xây dựng thì sẽ thường gặp phải một số vấn đề trong việc kiểm soát sự gia tăng nhiệt độ tại các vùng bên trong khối bê tông và cùng với đó là sự thay đổi lớn về thể tích do quá trình nhiệt thủy hóa xi măng [24, 27, 30, 34]. Khi nhiệt lượng tăng quá mức sẽ có thể dẫn đến chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt và trong lòng khối bê tông. Sự chênh lệch nhiệt độ này mà vượt giá trị cho phép thì sẽ gây ra các vấn đề nứt ở trong khối bê tông. Cụ thể, phần bê tông mát hơn ở bề mặt của khối bê tông khi tiếp xúc trực tiếp với không khí môi trường sẽ hạ nhiệt nhanh chóng và có xu hướng co lại nhiều hơn so với phần bên trong của

khối bê tông, vốn có nhiệt độ cao hơn. Vết nứt nhiệt xuất hiện khi lực cản tạo ra ứng suất kéo vượt quá khả năng chịu kéo của bê tông. Nếu các vết nứt này nếu mà không kiểm soát kịp thời sẽ gây ra phá vỡ tính toàn khối, sự ổn định và những nguy hại cho kết cấu công trình [36]. Ở Bảng 1 sẽ thể hiện mức cho phép chênh lệch nhiệt độ $\Delta T_{\max}$ giữa tâm và bề mặt của kết cấu và các giá trị đỉnh nhiệt $T_{\max}$ được dựa trên một số tài liệu nghiên cứu.

Bảng 1. Các thông số nhiệt độ cho phép trong quá trình thi công kết cấu bê tông cốt thép khối lớn đổ tại chỗ [23, 26, 35].

Chỉ số kiểm soát nứt nhiệt	Giá trị giới hạn
$\Delta T_{\max}$	21 °C
$T_{\max}$	85 °C

*Liên hệ tác giả: dacnt@huce.edu.vn

Nhận ngày 08/06/2026, sửa xong ngày 20/06/2026, chấp nhận đăng ngày 22/06/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2026.1411>

Về vấn đề khống chế chênh lệch nhiệt độ trong quá trình đóng rắn kết cấu bê tông khối lớn đã và đang được các nhà nghiên cứu rất là quan tâm. Nhiệt độ được hình thành trong quá trình xây dựng bê tông khối lớn sẽ bị ảnh hưởng bởi một số các yếu tố bên ngoài như: mức tiêu thụ xi măng, nhiệt độ ban đầu khối bê tông, tốc độ thi công, nhiệt độ môi trường, tỷ lệ kích thước của khối bê tông [25, 31]. Và các tác động từ bên ngoài có thể bao gồm nhiệt độ không khí, nhiệt độ mặt đất, bức xạ mặt trời, cũng như sự có mặt và hướng của gió.

Trong giai đoạn thi công, để có thể kiểm soát vấn đề nứt do nhiệt thì có nhiều phương pháp được sử dụng để có thể giảm chênh lệch nhiệt độ ΔT_{max} như: làm mát khối bê tông thông qua việc tưới nước lạnh bên ngoài hoặc sử dụng hệ thống ống làm lạnh bên trong khối bê tông [28, 31], giảm nhiệt độ trên bề mặt khối bê tông thông qua việc sử dụng ván khuôn, có thể sử dụng vật liệu có độ dẫn nhiệt thấp để tăng cường tính chất cách nhiệt. Ngoài ra còn có thể sử dụng thêm biện pháp chia nhỏ khối đổ để có thể giảm đi lượng nhiệt thủy hóa trong từng khối đổ [29], đổ bê tông thành nhiều đợt để có thể giảm đi lượng nhiệt thủy hóa.

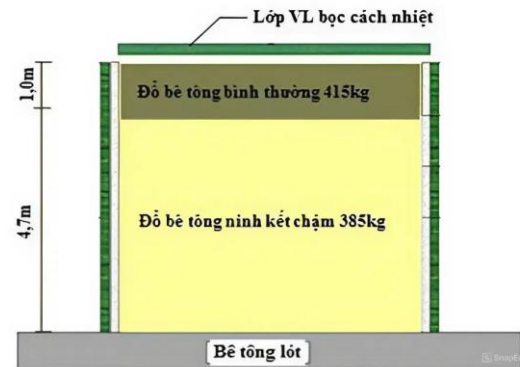
2. Phương pháp đổ bê tông liên tục kết hợp phân chia lớp đổ tỏa nhiệt khác nhau

Do điều kiện khí hậu với nhiệt độ môi trường bên ngoài luôn ở mức cao trong thời gian thi công, nếu quá trình đổ bê tông cho móng bê được thực hiện liên tục trong 53 giờ, sẽ phát sinh sự chênh lệch đáng kể về nhiệt thủy hóa giữa phần trên và phần dưới của kết cấu bê tông móng. Nguyên nhân chính đến từ việc bê tông đổ phần trên đã có đủ thời gian để phát triển cường độ và sinh ra nhiệt do phản ứng thủy hóa, trong khi phần bê tông phần dưới vẫn đang trong giai đoạn thi công và chưa kịp đạt được mức phát triển tương tự

Để khắc phục hiện tượng này và đảm bảo sự đồng nhất về chất lượng cũng như hiệu quả chịu lực của móng, phương pháp đổ bê tông liên tục kết hợp phân chia lớp đổ tỏa nhiệt khác nhau đã được sử dụng khi thi công kết cấu đài móng công trình Lotte Center Hà Nội Hình 1. Đài móng của công trình có kích thước $5,7 \times 5,7 \times 5,7$ (m) được cấu tạo từ 2 lớp bê tông có cấp phối khác nhau. Lớp bê tông ở trên dày 1,2 m có hàm lượng xi măng cao hơn (95 % xi măng, 5 % tro bay). Lớp bê tông dưới dày 4,5 m có hàm xi măng thấp hơn (75 % xi măng, 25 % tro bay) [33]. Có thể thấy ở lớp bê tông phía trên sẽ dễ dàng thoát nhiệt ra ngoài môi trường hơn, trong khi bê tông phía dưới thoát nhiệt chậm hơn. Điều này có thể dễ dàng tạo ra sự chênh lệch nhiệt độ lớn giữa 2 lớp bê tông. Theo tiêu chuẩn ACI 207.R1-96 [24], các vết nứt nhiệt có thể xuất hiện khi chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt và trong lòng khối bê tông vượt quá 20°C đến 25°C . Do đó, khi lớp bê tông tỏa nhiệt nhiều hơn lớp bê tông phía dưới, sự chênh lệch nhiệt độ giữa hai lớp của đài móng có thể được khống chế trong giới hạn cho phép. Như vậy, một phần hàm lượng tro bay được thay thế cho xi măng giúp giảm thiệt hại thủy hóa cũng như co ngót của bê tông. Ngoài việc khống chế chênh lệch nhiệt độ tại tâm với bề mặt thì

phương pháp này còn cho phép thi công một cách liên tục, đảm bảo tính toàn khối, tạo điều kiện cho việc tổ chức thi công cũng như kiểm soát chất lượng bê tông khối đài móng tốt hơn.

Sự áp dụng thành công của phương pháp này trong công trình kết cấu bê tông khối lớn dạng móng ở công trình Lotte Center Hà Nội được đánh giá là một bước tiến quan trọng trong việc tối ưu hóa quy trình thi công bê tông khối lớn, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nóng như tại Vùng A- Miền Bắc Việt Nam.



Hình 1. Phân bố các lớp đổ với bê tông có tính chất tỏa nhiệt khác nhau theo chiều cao đài móng công trình Lotte Center Hanoi.

3. Quy trình xác định các thông số công nghệ

3.1. Các điều kiện kỹ thuật cần thiết

Sử dụng vữa bê tông với cấp phối có xi măng toả nhiệt thấp và bổ sung phụ gia khoáng hoạt tính (tro bay).

Tính toán cấp phối bê tông 2 thành phần để lớp trên có khả năng tỏa nhiệt lớn hơn lớp dưới.

Hạ nhiệt độ thấp nhất có thể cho hỗn hợp vữa bê tông.

Dùng phụ gia siêu dẻo, giảm nước và kéo dài thời gian đông kết (nếu cần thiết) cho lớp dưới.

Sử dụng tấm vật liệu giữ nhiệt và cách ẩm kết hợp với hệ ván khuôn.

Sử dụng phương pháp bảo dưỡng khô giữ nhiệt cho khối bê tông.

Theo dõi nhiệt độ tại các vị trí khác nhau của kết cấu trong suốt quá trình bảo dưỡng.

Việc áp dụng công nghệ này đảm bảo thời gian thi công liên tục, không gián đoạn, không phải tổ chức mạch ngừng và tính toán các giải pháp xử lý mạch ngừng, giúp giảm chênh lệch nhiệt độ giữa các phần khối đổ, tạo ra và duy trì trường nhiệt độ điều hòa, dễ dàng kiểm soát chất lượng và linh hoạt trong sử dụng vật liệu. Công nghệ này rất phù hợp với những kết cấu có chiều dày lớn, yêu cầu cao về tính toàn khối, khả năng chống thấm ví dụ như đài móng khối lớn trong các công trình dân dụng và công nghiệp.

3.2. Sơ đồ khối của quy trình

Trên cơ sở mô hình dự báo đã được kiểm chứng, nghiên cứu xây dựng mô hình thuật toán nhằm xác định các thông số công nghệ phù

hợp như Hình 2. Các điều kiện kiểm soát được thiết lập theo các ràng buộc về T_{max} và ΔT_{max} , đồng thời xét đến các điều kiện thi công thực tế. Quá trình giải bài toán xác định các thông số công nghệ phù hợp được thực hiện bằng môi trường Matlab kết hợp các phương pháp toán học, từ đó xác định bộ thông số công nghệ phù hợp bảo đảm thỏa mãn các điều kiện kiểm soát nứt nhiệt trong bê tông khối lớn.

Sơ đồ khối mô tả một quy trình nghiên cứu và thiết kế có tính hệ thống, nhằm kiểm soát tình trạng nứt do nhiệt thủy hóa của xi măng trong bê tông khối lớn (BTKL). Đầu tiên, dựa trên các tiêu chuẩn, quy định và hướng dẫn kỹ thuật hiện có của dự án, việc xác định các điều kiện kiểm soát nứt sẽ được tiến hành. Điều này bao gồm việc xác định các giá trị giới hạn cho phép như nhiệt độ tối đa T_{max} , chênh lệch nhiệt độ lớn nhất ΔT_{max} và chỉ số nứt I_{crmin} .

Tiếp theo, dựa vào các đặc điểm hình học, kích thước của cấu kiện và điều kiện thi công thực tế, chúng ta sẽ lựa chọn và xác định các thông số công nghệ phù hợp. Quá trình này được thực hiện thông qua việc xây dựng các hàm toán học đặc trưng và triển khai tính toán với sơ đồ thuật toán. Từ đó, sẽ tiến hành kiểm chứng với các mô phỏng số sử dụng bộ thông số công nghệ đã xác định trước, kèm theo thí nghiệm Mockup để điều chỉnh và đánh giá độ tin cậy của mô hình. Qua đó, sẽ xác định được các giá trị T_{max} , ΔT_{max} và I_{crmin} để phù hợp với điều kiện thực tế.

Kết quả thu được từ quá trình này sẽ được so sánh với các giá trị giới hạn cho phép để đánh giá mức độ thỏa mãn yêu cầu kiểm soát nứt do nhiệt. Nếu kết quả không đạt yêu cầu, quy trình sẽ được thực hiện lại với việc điều chỉnh các thông số công nghệ cho đến khi đạt yêu cầu đề ra. Cuối cùng, dựa trên phương án phù hợp đã được kiểm chứng, chúng ta sẽ tiến hành thiết kế hồ sơ biện pháp công nghệ cũng như tổ chức thi công, nhằm kiểm soát hiệu quả tình trạng nứt nhiệt trong bê tông khối lớn, từ đó đảm bảo an toàn và chất lượng cho công trình.

Với mục tiêu là chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa các điểm trong khối bê tông phải đạt giá trị nhỏ nhất và phù hợp với điều kiện thực tế thi công. Hàm mục tiêu ΔT_{max} được xây dựng trong [37] cần được cực tiểu hóa là một hàm phi tuyến, được biểu diễn như sau:

$$y = f(X) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^7 \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^7 \alpha_{ii} X_i^2 + \sum_{\substack{i < u \\ u, i=1}}^7 \alpha_{iu} X_i X_u \quad (1)$$

Hàm mục tiêu trên có dạng phi tuyến bậc hai với nhiều tích chéo giữa các biến, cho thấy tính phi tuyến rõ rệt và sự tương tác giữa các tham số thiết kế.

Ràng buộc phi tuyến

Cám hàm ràng buộc phi tuyến được đưa vào để đảm bảo các điều kiện an toàn hoặc hiệu suất tối thiểu, các ràng buộc về điều kiện của giá trị đỉnh nhiệt trong khối bê tông, điều kiện về giới hạn của chỉ số nứt trong khối bê tông, các hàm về đỉnh nhiệt được xây dựng trong [37] được mô phỏng dưới dạng như sau:

$$y = g(X) = \alpha'_0 + \sum_{i=1}^7 \alpha'_i X_i + \sum_{i=1}^7 \alpha'_{ii} X_i^2 + \sum_{\substack{i < u \\ u, i=1}}^7 \alpha'_{iu} X_i X_u \quad (2)$$

Ràng buộc 1: Hàm mục tiêu chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa

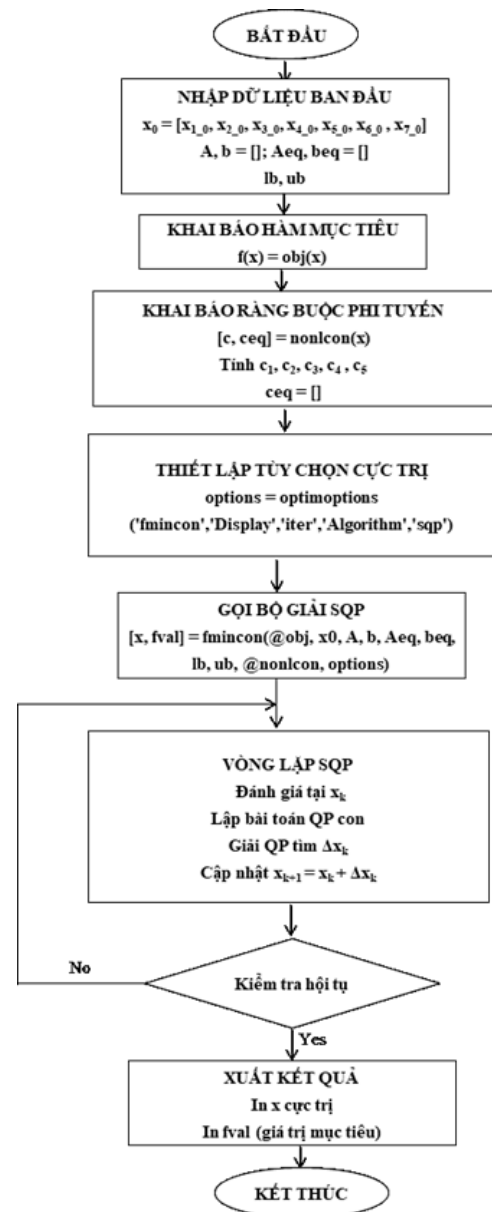
các điểm trong khối bê tông không vượt quá một ngưỡng cho phép:

$$\varepsilon_1 \geq f_1(X) = \Delta T_{max} \geq \delta_1 \quad (3)$$

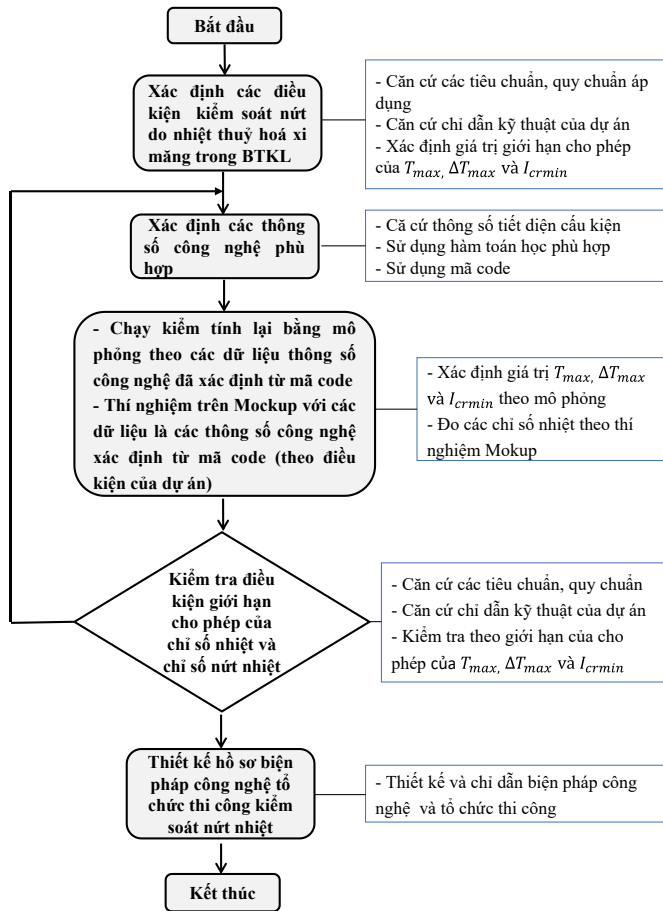
Ràng buộc 2: Ràng buộc về giới hạn của giá trị đỉnh nhiệt trong khối bê tông phải nằm trong giới hạn cho phép:

$$\varepsilon_2 \geq g(X) = T_{max} \geq \delta_2 \quad (4)$$

Trong phần này, một bài toán xác định thông số công nghệ phù hợp đã được xây dựng và giải quyết thành công bằng phương pháp SQP thông qua công cụ fmincon trong MATLAB ở Hình 2. Mô hình bài toán bao gồm bảy biến thiết kế, một hàm mục tiêu phi tuyến và ba ràng buộc phi tuyến phản ánh các giới hạn kỹ thuật và điều kiện thi công thực tế.



Hình 2. Sơ đồ khối giải bài toán xác định các thông số công nghệ phù hợp theo điều kiện kiểm soát nứt do nhiệt.



Hình 3. Quy trình xác định các thông số công nghệ.

3.3. Hướng dẫn kỹ thuật thực hiện quy trình

Các hướng dẫn kỹ thuật tương ứng với từng bước trong quy trình kỹ thuật xác định các công nghệ thi công kết cấu bê tông khối lớn theo phương pháp đổ liên tục với cấp phối toả nhiệt khác nhau Hình 3 được tổng hợp ở Bảng 2. Trong bảng này, các tiêu chuẩn, quy chuẩn và quy phạm đóng vai trò là căn cứ kỹ thuật viện dẫn nhằm kiểm soát chất lượng trong quá trình thi công.

4. Áp dụng quy trình xác định các thông số công nghệ thi công với một ví dụ cụ thể

4.1. Giới thiệu công trình

Đài móng được lấy cho ví dụ nghiên cứu là đài móng có kích thước hình học, với chiều dài 2,1 m, chiều rộng 2,1 m và chiều cao 2,5 m. Bê tông sử dụng có cấp độ bền thiết kế B30, thi công trong điều kiện nhiệt độ môi trường trung bình khoảng 20 °C, thuộc thời kỳ mùa đông – xuân, là điều kiện không được thuận lợi cho việc kiểm soát nhiệt độ thủy hóa nếu không có biện pháp tổ chức thi công và bảo dưỡng hợp lý.

Với chiều cao lớn ($h = 2,5$ m), đài móng thuộc loại bê tông khối lớn, trong đó quá trình sinh nhiệt thủy hóa xi măng diễn ra

mạnh, khả năng thoát nhiệt kém, dễ phát sinh ứng suất kéo do chênh lệch nhiệt độ giữa lõi và bề mặt, dẫn đến nguy cơ nứt nhiệt sớm nếu không được kiểm soát chặt chẽ.

4.2. Vấn đề đặt ra về điều kiện thi công và kiểm soát nứt nhiệt

Đài móng thi công theo phương pháp đổ liên tục, không mạch mưng, sử dụng 2 lớp cấp phối có tính toả nhiệt khác nhau kết hợp với giải pháp ủ nhiệt.

Quá trình thiết kế và thi công đài móng được đặt ra các mục tiêu kiểm soát chính như sau:

- Nhiệt độ cực đại tại lõi bê tông không vượt quá 85 °C;
- Chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa các điểm trong đài móng được khống chế nhỏ hơn 21 °C;
- Kiểm soát về điều kiện không hình thành vết nứt, tức là chỉ số nứt theo lý thuyết phải lớn hơn 1;
- Tốc độ hạ nhiệt của bê tông sau khi đạt đỉnh nhiệt không quá lớn nhằm hạn chế ứng suất kéo do co ngót nhiệt;
- Đảm bảo quá trình đổ bê tông liên tục, không hình thành mạch ngừng lạnh gây bất lợi cho cả khả năng chịu lực và phân bố nhiệt.

Các tiêu chí trên được sử dụng làm cơ sở cho việc lựa chọn cấp phối, xây dựng quy trình và đánh giá độ tin cậy của kết quả tính toán.

4.3. Xác định các thông số công nghệ thi công

a. Công tác thiết kế và tính toán cấp phối, xác định các thông số công nghệ trong thi công

- Lựa chọn biện pháp thi công theo phương pháp đổ liên tục, không mạch mưng, sử dụng 2 lớp cấp phối có tính toả nhiệt khác nhau.
- Sử dụng các tiêu chuẩn về kiểm soát nứt như Bảng 1, xác định cụ thể điều kiện kiểm soát nứt cho đài móng như sau:

$$0 < T_{max} \leq 85\text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$16\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{max} \leq 21\text{ }^{\circ}\text{C}; (\Delta T_{max}) \rightarrow \min$$

- Căn cứ chiều cao khối móng, sử dụng các hàm toán học xác định nhiệt độ lớn nhất, chênh lệch nhiệt độ lớn nhất theo [37].

- Sử dụng thuật toán được mô tả Hình 2 để tính toán các thông số công nghệ chính và lựa chọn giải pháp kỹ thuật phù hợp cho biện pháp thi công như: xác định hàm lượng xi măng lớp trên và lớp dưới, xác định điều kiện nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông, xác định điều kiện cho nhiệt độ bảo dưỡng, xác định chiều dày của từng lớp cấp phối.

Bảng kết quả giải bài toán xác định các thông số công nghệ như sau:

Iter	Func-count	Fval	Feasibility	Step Length	Norm of step	First-order optimality
0	8	1.524705e+01	7.529e-01	1.000e+00	0.000e+00	2.144e+00
1	16	1.600000e+01	2.471e-09	1.000e+00	1.046e+00	1.038e+00
2	24	1.600000e+01	0.000e+00	1.000e+00	3.432e-09	6.816e-10

Local minimum found that satisfies the constraints.

Optimization completed because the objective function is non-decreasing in feasible directions, to within the value of the optimality tolerance, and constraints are satisfied to within the value of the constraint tolerance.

<stopping criteria details>

310.9226 390.8872 42.9617 22.7000 0.2000 2.1000 2.1000

Như vậy theo điều kiện kiểm soát nứt do nhiệt thủy hoá xi măng, khối móng kích thước 2,1x2,1x2,5 m được thi công theo phương pháp đổ liên tục, kết hợp phân chia lớp đổ có cấp phối toả nhiệt khác nhau thì các thông số công nghệ đáp ứng được là: Chiều dày lớp cấp phối phía trên là 0,5 m; Chiều dày lớp cấp phối phía dưới là 2,0 m; Hàm lượng xi măng lớp dưới xấp xỉ là 311 kg/m³; Hàm lượng xi măng lớp trên xấp xỉ là 391 kg/m³; Nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông xấp xỉ là 23 °C; Nhiệt độ bảo dưỡng xấp xỉ là 43 °C.

Giá trị T_{max} và ΔT_{max} tương ứng với các giá trị thông số công nghệ xác định từ quy trình trên là: $T_{max} = 70,0$ °C, $\Delta T_{max} = 17,3$ °C.

b. Đánh giá độ tin cậy kết quả tính toán

So sánh kết quả với mô phỏng:

Căn cứ vào các thông số công nghệ chính được xác định như trên, để tăng độ tin cậy, có thể sử dụng kết quả mô phỏng bằng phần mềm chuyên dụng Midas Civil 2022 có giấy phép để kiểm tra lại sự phù hợp của các thông số công nghệ được xác định nhanh từ mã code và các phương trình toán học xây dựng được như sau:

Đài móng đặt trên nền đất có kích thước 6,3x6,3x2,5 m, chiều cao tổng thể 2,5 m theo Hình 4, đài móng được chia làm hai lớp cấp phối bê tông theo chiều cao: lớp trên dày 0,5 m và lớp dưới dày 2,0 m theo Hình 4. Cấp phối bê tông giữa các lớp, nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp vữa và nhiệt độ bảo dưỡng được lấy từ kết quả tính toán theo quy trình Hình 2. Các thông số khai báo đầu vào như Bảng 3.

Bảng 2. Hướng dẫn kỹ thuật thực hiện quy trình xác định các thông số công nghệ phù hợp trong thi công BTKL đổ liên tục với 2 cấp phối toả nhiệt khác nhau.

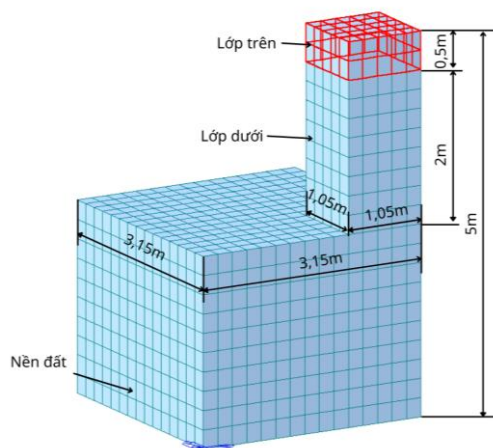
Công tác	Nội dung	Hướng dẫn kỹ thuật, tiêu chuẩn áp dụng
Xác định các điều kiện kiểm soát nứt do nhiệt	- Kiểm tra điều kiện giới hạn về T_{max} , ΔT_{max} , I_{crmin}	- Căn cứ các tiêu chuẩn hiện hành [7,35] kết hợp các tiêu chuẩn, quy chuẩn, tài liệu căn cứ kiểm soát nứt nhiệt liên quan. - Giới hạn ΔT_{max} phụ thuộc vào cấp cường độ chịu nén thiết kế và thời gian đóng rắn của bê tông ($\Delta T_{max} \in [20-25]$ °C – Với bê tông B20 ÷ B70 tại thời gian đóng rắn 1 ÷ 2 ngày đầu; $\Delta T_{max} \in [22-27]$ °C – Với bê tông B20 ÷ B70 tại thời gian đóng rắn 3 ngày đầu; $\Delta T_{max} \in [23-28]$ °C – Với bê tông B20 ÷ B70 tại thời gian đóng rắn 5 ngày đầu; $\Delta T_{max} \in [24-29]$ °C – Với bê tông B20 ÷ B70 tại thời gian đóng rắn sau 7 ngày đầu). - Giới hạn T_{max} phụ thuộc thành phần loại xi măng (loại chất kết dính) ($T_{max} \leq 70$ °C – Đối với pooc lãg theo TCVN 2682-2020[1]; $T_{max} \leq 85$ °C – Đối với xi măng được quy định tại [7,35]). - Giới hạn chỉ số nứt nhiệt $I_{crmin} > 1$
Xác định các thông số công nghệ phù hợp	- Xác định các giá trị phù hợp của hàm lượng xi măng lớp dưới ($W_{c,d}$), hàm lượng xi măng lớp trên ($W_{c,u}$), Tỷ lệ chiều dày lớp trên so với chiều cao móng (r_c); Nhiệt độ hỗn hợp bê tông khi đổ (T_p); Nhiệt độ bảo dưỡng (T_c).	- Căn cứ thông số tiết diện cấu kiện theo hồ sơ thiết kế để lựa chọn sử dụng hàm toán học phù hợp: Căn cứ tỉ số S/V + kết hợp thông số chiều cao để lựa chọn các hàm toán học phù hợp - Căn cứ điều kiện thi công thực tế, năng lực của các nhà cung ứng vật tư, năng lực nhà thầu thi công để xác định các thông số công nghệ cố định (nếu có). - Sử dụng mã code theo Hình 2 để xác định các thông số công nghệ theo điều kiện kiểm soát nứt nhiệt.
Chạy kiểm tính lại bằng mô phỏng	- Xác định các chỉ số nhiệt (T_{max} , ΔT_{max}) và chỉ số nứt nhiệt (I_{crmin})	- Chạy kiểm tính lại bằng mô phỏng theo các dữ liệu thông số công nghệ đã xác định từ mã code để kiểm tra các chỉ số nhiệt và chỉ số nứt nhiệt theo điều kiện kiểm soát nứt. Làm cơ sở để triển khai bước tiếp theo.
Thí nghiệm kiểm chứng trên Mockup	- Đo các chỉ số nhiệt (T_{max} , ΔT_{max}) theo thí nghiệm Mokuip	- Thí nghiệm trên Mockup với các dữ liệu là các thông số công nghệ xác định từ mã code (theo điều kiện của dự án) - Tùy theo yêu cầu của dự án (cần cứu quy mô, tính chất dự án) có thể triển khai thí nghiệm trên Mockup hoặc không cần triển khai bước này.
Thiết kế và hướng dẫn biện pháp công nghệ và tổ chức thi công nhằm kiểm soát nứt do nhiệt thủy hoá xi măng	Công tác ván khuôn, cốt thép	- Lựa chọn chủng loại ván khuôn (kim loại, gỗ, bê tông cốt thép) theo phương án công nghệ thi công. Kiến nghị dùng ván khuôn có tính giữ nhiệt tốt. - Kiểm tra tính toán hệ ván khuôn theo [4]. - Chế tạo ván khuôn tuân thủ [4, 6, 7] và các tiêu chuẩn khác phù hợp.

Công tác	Nội dung	Hướng dẫn kỹ thuật, tiêu chuẩn áp dụng
		- Lắp dựng ván khuôn tuân thủ [8, 16, 17, 19] và các tiêu chuẩn khác phù hợp. - Vận chuyển và lắp dựng cốt thép tuân thủ [16] và các tiêu chuẩn khác phù hợp. - Nối cốt thép (bằng ống ren) đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật theo [4, 5] và các tiêu chuẩn khác phù hợp. Kiến nghị thiết kế sử dụng hàm lượng cốt thép phù hợp.
	Vật liệu cách nhiệt	- Chọn loại tấm giữ nhiệt theo phương án công nghệ thi công (thường dùng tấm xốp polystyrene hoặc polyurethane dày 4-5 cm, có khối lượng thể tích $\geq 20 \text{ kg/m}^3$, độ ẩm $\leq 12 \%$). - Tấm vật liệu giữ nhiệt phải được bọc áp sát mặt ngoài ván khuôn thành trước lúc đổ bê tông. Cần có biện pháp che chắn mặt ngoài để chống ẩm vật liệu cách nhiệt. - Bề mặt thoáng khối đổ cần được bọc vật liệu cách nhiệt ngay sau khi kết thúc công tác đổ và hoàn thiện bề mặt.
	Dụng cụ, thiết bị đo nhiệt độ, ứng suất trong bê tông	- Thiết bị đo tự động với đầu đo chính xác $\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Thiết bị phải được kiểm tra hiệu chuẩn. - Điểm đo, số lượng đầu đo, liên kết đầu đo với cốt thép tuân thủ phương án công nghệ thi công. - Đầu đo phải cố định chắc chắn, được bảo vệ, và cách nhiệt tuyệt đối với cốt thép. - Các đầu đo bề mặt và ở đáy khối bê tông được lắp cách mép ngoài của khối 75 mm. - Kiểm tra để đảm bảo thông mạch và không có đầu đo nào bị hỏng.
	Công tác trộn và vận chuyển hỗn hợp cấp phối bê tông	- Xác nhận PA công nghệ thi công và thiết kế cấp phối (2 cấp phối cho 2 lớp bê tông cùng cường độ, mức độ tỏa nhiệt khác nhau). - Lựa chọn trạm trộn, xác nhận xuất xứ, chủng loại vật liệu, phụ gia. - Chất lượng vữa bê tông đáp ứng [8, 16, 17, 19] và các tiêu chuẩn khác phù hợp. - Nhiệt độ của vữa bê tông trước khi đổ vào kết cấu hạ thấp nhất có thể. - Kiểm tra tính thi công của vữa và cường độ bê tông. - Kiểm tra sự phù hợp kế hoạch vận chuyển và năng suất đổ bê tông tính đến các yếu tố công nghệ: chiều cao lớp đổ, công suất đổ bê tông, thời gian hoàn thành một lớp đổ, thời gian bắt đầu ninh kết của bê tông. - Vận chuyển vữa bê tông tuân thủ [4] và các tiêu chuẩn khác phù hợp. - Kiểm tra độ sụt tuân thủ theo [3] và các tiêu chuẩn khác phù hợp. - Đúc mẫu thí nghiệm tuân thủ theo [2] và các t/c khác phù hợp.
	Bảo dưỡng bê tông khối lớn	- Xác nhận phương án bảo dưỡng bê tông: Đó là phương án bảo dưỡng khô. - Xác nhận chủng loại, chất lượng vật liệu giữ nhiệt, che phủ. - Hoàn thiện bề mặt bê tông ngay sau khi kết thúc công tác đổ bê tông bằng máy xoa mặt bê tông. - Bảo dưỡng giữ nhiệt cho khối bê tông, hạn chế ΔT giữa tâm và bề mặt khối theo [6-8] và các tiêu chuẩn khác phù hợp. - Che bề mặt thoáng của khối bằng các lớp vật liệu kết hợp: lớp 1 (lớp dưới) – lớp vinyl; lớp 2 (lớp giữa) – lớp vật liệu giữ nhiệt; lớp 3 (lớp trên) – lớp vật liệu cách ẩm như màng nilon. - Căn cứ kết quả đo nhiệt độ để điều chỉnh chế độ và quyết định thời gian bảo dưỡng: + Trạng thái phát triển và cân bằng nhiệt (1-10 ngày đầu): kiểm tra nhiệt

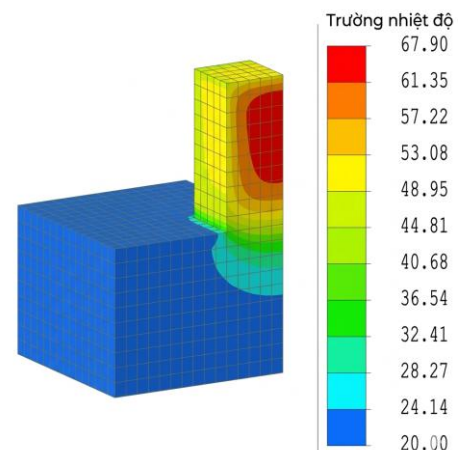
Công tác	Nội dung	Hướng dẫn kỹ thuật, tiêu chuẩn áp dụng
		độ lớn nhất và kiểm soát ΔT giữa tâm và bề mặt khối luôn thấp hơn giá trị cho phép. Điều chỉnh tăng nhiệt độ bảo dưỡng bằng một lớp nilon hoặc giữ nhiệt bổ sung. + Kiểm tra nhiệt độ ở biên và góc khối, nếu nhiệt độ giảm mạnh, bọc bổ sung một lớp nilon hoặc vật liệu giữ nhiệt. + Trạng thái cân bằng và suy giảm nhiệt (7-9 ngày tiếp theo): tiếp tục kiểm tra chặt chẽ nhiệt độ và tính toán chỉ số nứt để điều chỉnh chế độ bảo dưỡng. + Trạng thái suy giảm nhiệt: (1-2 ngày tiếp theo): kiểm soát ΔT giữa tâm và bề mặt khối thấp hơn giá trị cho phép. - Thời gian bảo dưỡng được tính toán căn cứ ở bước chạy kiểm tính lại bằng mô phỏng, căn cứ từ số liệu về nhiệt độ, kết quả tính toán ứng suất và chỉ số nứt của bê tông. Về nguyên tắc, bảo dưỡng đến lúc nhiệt độ suy giảm, chênh lệch nhiệt độ ở mức an toàn không gây nứt cho kết cấu.
	Công tác tháo ván khuôn và vật liệu bảo dưỡng	- Công tác tháo dỡ sau khi kết thúc thời gian bảo dưỡng bê tông. - Kỹ thuật tháo ván khuôn thực hiện theo quy định trong [4]. - Tháo dỡ đảm bảo bề mặt bê tông không bị xung nhiệt do tiếp xúc đột ngột với không khí bên ngoài.

Bảng 3. Các tham số đầu vào được sử dụng cho các cuộc điều tra số.

Các tham số đầu vào	Đơn vị	Bê tông		Đất	
		Giá trị	Tài liệu tham khảo	Giá trị	Tài liệu tham khảo
Nhiệt dung riêng	kcal/kg ⁰ C	0,25	[9, 21, 32]	0,2	[10, 20]
Khối lượng riêng	kg/m ³	2.400	[13, 14]	1.800	[13, 14]
Hệ số dẫn nhiệt	kcal/m.h. ⁰ C	2,3	[13, 14]	1,7	[13, 14]
Hệ số đối lưu bề mặt bê tông	kcal/m ² .h. ⁰ C	12	[12, 13, 15]	12	[12, 13]
Hệ số đối lưu cốp pha thép	kcal/m ² .h. ⁰ C	12	[13, 22]	-	
Nhiệt độ môi trường	°C	20	Giả định	-	
Hệ số giãn nở nhiệt		10 ⁻⁵	[11, 17]	10 ⁻⁵	[12, 17]
Hệ số hàm phát triển cường độ nén	ACI	a = 13,9 b = 0,86	[13, 14]		
Mô đun đàn hồi ở 28 ngày tuổi	kG/cm ²	2,7734 × 10 ⁵	[13, 14]		



Hình 4. Mô hình mặt đứng khối móng.

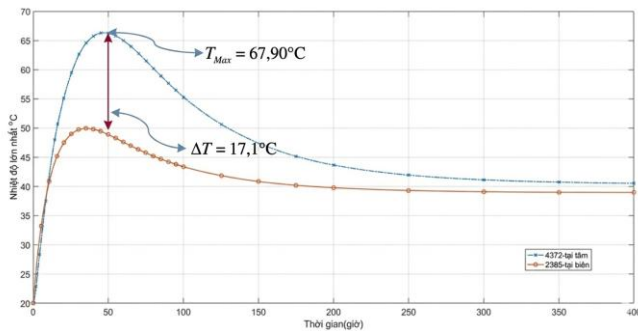


Hình 5. Trường nhiệt độ lớn nhất phân bố trong khối móng.

Dựa vào kết quả thu được từ chương trình phân tích kết cấu Midas Civil 2022, trường nhiệt độ của kết cấu bê tông dài móng được thể hiện trong Hình 5 và biểu đồ chênh lệch nhiệt độ tại tâm và biên khối bê tông ở Hình 6. Kết quả phân tích cho thấy, với nhiệt độ lớn nhất $T_{max} = 67,9^{\circ}\text{C}$ đã phù hợp với điều kiện nhiệt độ lớn nhất trong lòng khối bê tông được khống chế dưới 85°C theo điều kiện kiểm soát nứt đề cập ở Bảng 1, đồng thời sai số so với trị số đỉnh nhiệt xác định theo quy trình là 3,1 %.

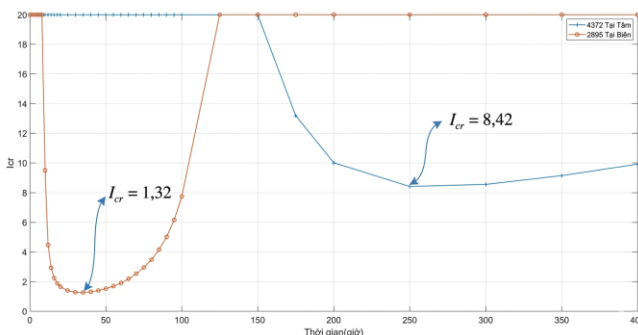
Để so sánh, kiểm chứng trong điều kiện kiểm soát chênh lệch nhiệt độ, ta sẽ xét 2 điểm tại tâm và bề mặt khối bê tông.

Từ kết quả phân tích của biểu đồ ở Hình 6 ta thấy chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt của khối bê tông $\Delta T_{max} = 17,1^{\circ}\text{C}$, giá trị chênh lệch nhiệt độ lớn nhất này thỏa mãn điều kiện kiểm soát nứt đề ra ở Bảng 1, sai số giữa giá trị nhiệt độ lớn nhất xác định từ mô phỏng này so với quy trình là 1,2 %



Hình 6. Chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và biên khối móng.

Đánh giá trên điều kiện chống nứt, từ Hình 7 có thể thấy khối bê tông có $I_{cr\min} = 1,32 > 1$, thỏa mãn theo điều kiện kiểm soát nứt, điều đó thể hiện khối bê tông không bị nứt nhiệt. Điều đó cũng đã được chứng minh qua nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa tâm và bề mặt. Lý giải cho điều này, có thể thấy chính sự giảm chênh lệch nhiệt độ này đã làm giảm đi xu hướng co bên ngoài của khối đổ, từ đó hạn chế ứng suất kéo do nhiệt. Do đó, có thể thấy phương pháp đổ bê tông liên tục với cấp phối tỏa nhiệt khác nhau là một biện pháp hiệu quả trong việc kiểm soát nứt do nhiệt.



Hình 7. Biểu đồ chỉ số nứt của tâm và bề mặt khối bê tông.

Bảng 3. Bảng tổng hợp so sánh kết quả tính toán từ quy trình – mô phỏng – và thực tế thi công.

STT	Thông số	Mô hình đề xuất	Mô phỏng Midas civil	
			Kết quả theo mô phỏng	Đối chứng với mô hình đề xuất
1	T_{max}	$70,0^{\circ}\text{C}$	$67,9^{\circ}\text{C}$	(3,1 %)
2	ΔT_{max}	$17,3^{\circ}\text{C}$	$17,1^{\circ}\text{C}$	(1,2 %)
3	$W_{c,l}$	311 kg	311 kg	
4	h_l	2,0 m	2,0 m	
5	$W_{c,u}$	391 kg	391 kg	
6	h_u	0,5 m	0,5 m	
7	T_p	23°C	23°C	
8	T_c	43°C	43°C	

Kết quả kiểm chứng cho thấy các thông số công nghệ được xác định từ lời giải bài toán là hoàn toàn có tính khả thi và phù hợp với điều kiện thực tế thi công, và thỏa mãn điều kiện kiểm soát nứt do nhiệt thủy hoá xi măng trong bê tông ở giai đoạn đầu đóng rắn.

Từ kết quả tính toán thiết kế trên, làm căn cứ và cơ sở cho các bước triển khai tiếp theo.

5. Kết luận

Quy trình xác định các thông số công nghệ trong thi công Bê tông khối lớn theo phương pháp đổ liên tục kết hợp phân chia 2 lớp cấp phối có tính chất nhiệt khác nhau đã được trình bày dưới dạng sơ đồ khối gồm 5 bước chính, rõ ràng và có thể áp dụng vào thực tế thi công.

Để thực hiện quy trình trong thực tế thi công, một hướng dẫn kỹ thuật chi tiết đã được đưa ra. Những yếu tố kỹ thuật của từng bước quy trình được làm rõ và có thể thực hành khi thiết kế biện pháp thi công Bê tông khối lớn, từ việc xác định các giới hạn của bộ chỉ số kiểm soát nứt nhiệt, đến sử dụng thuật toán đề xuất để xác định các thông số công nghệ phù hợp, sau đó kiểm chứng chứng lại sự đảm bảo bộ chỉ số kiểm soát nứt nhiệt bằng các hàm toán tương ứng.

Thực hiện tốt quy trình trong thi công dài móng Bê tông khối lớn theo phương pháp đổ liên tục kết hợp phân chia lớp đổ tỏa nhiệt khác nhau cho phép kiểm soát nhiệt độ và ứng suất trong lòng khối bê tông một cách hiệu quả, từ đó đảm bảo không bị nứt do ứng suất nhiệt trong quá trình đóng rắn; chủ động điều chỉnh nhiệt độ bảo dưỡng bê tông để giảm chênh lệch nhiệt độ giữa các lớp trung tâm và lớp bề mặt khối bê tông. Việc này được thực hiện thông qua việc thay đổi chất lượng và số lượng các lớp phủ giữ nhiệt. Điều này giúp kết cấu dài móng đảm bảo khả năng chịu lực, tính toàn khối và chống thấm cao.

Về mặt tổ chức xây dựng, một trong những ưu điểm của phương pháp này là sự linh hoạt trong quá trình thi công. Quá trình thi công không bị gián đoạn, không cần thiết lập mạch ngừng theo phương đứng và phương ngang trục dài móng. Nó cho phép chủ động bố trí thiết bị máy móc, nhân lực và vật liệu, từ đó đẩy nhanh tiến độ thi công.

Kết quả áp dụng quy trình đề xuất vào một ví dụ kiểm chứng cho thấy các thông số công nghệ được xác định từ kết quả nghiên cứu so với phân tích FEM là tương đồng, phù hợp và thỏa mãn điều kiện kiểm soát nứt do nhiệt ở giai đoạn đầu đóng rắn của bê tông; với cùng các dữ liệu đầu vào thì sai số của các giá trị mục tiêu đều cho thấy nhỏ hơn 10 %, điều đó cho khẳng định kết quả nghiên cứu có độ tin cậy và có tính ứng dụng trong thực tiễn cao

Tài liệu tham khảo

- [1]. TCVN 2682:2020, Xi măng poóc lăng.
- [2]. TCVN 3105: 1993, Hỗn hợp bê tông nặng và bê tông nặng- Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử, NXB Xây dựng, Hà Nội.
- [3]. TCVN 3106:1993, Hỗn hợp bê tông nặng - Phương pháp thử độ sụt, NXB Xây dựng, Hà Nội.
- [4]. TCVN 4453 : 1995, Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép toàn khối - Quy phạm thi công và nghiệm thu.
- [5]. TCVN 8163:2009, Thép cốt bê tông - Mối nối bằng ống ren.
- [6]. TCVN 305:2004, Bê tông khối lớn - Thi công và nghiệm thu.
- [7]. TCVN 14334:2025, Kết cấu bê tông khối lớn - Thi công và nghiệm thu.
- [8]. TCXDVN 313:2004, Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Hướng dẫn kỹ thuật phòng chống nứt dưới tác động của khí hậu nóng ẩm, NXB Xây dựng, Hà Nội.
- [9]. ACI 207.2R-07, Report on Thermal and Volume Change Effects, Farmington Hills, MI, 2007.
- [10]. Nikolay Aniskin, Chuc Nguyen Trong và Long Hoang Quoc (2018), "Influence of Size and Construction Schedule of Massive Concrete Structures on Its Temperature Regime ", MATEC Web of Conferences 251, 02014 (2018).
- [11]. Z Bofang (2014), "Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete, 1st (Ed.), Elsevier".
- [12]. S. Chen C. Chen (2014), "Study on Temperature Control and Cracking Risk of Mass Concrete Sidewalls with a Cooling-Pipe System", Buildings. 14 (2024).
- [13]. Japan Concrete Institute (2011), "Guideline for control of cracking of mass concrete".
- [14]. H.H Le và các cộng sự. (2020), "A method of controlling thermal crack for mass concrete structures: Modelling and experimental study, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng". 869.
- [15]. Steven H.; WILSON M.L. KOSMATKA (2011), "Design and Control of Concrete Mixtures – The Guide to Applications", Methods and Materials.
- [16]. N Machida và K Uehara, "Nonlinear Thermal Stress Analysis of a Massive Concrete Structure", Comput . Struct ., 26, DOOS 081-191. gg 1987, tr. 287-296.
- [17]. Midas Civil (2020), "Midas Civil Manuals and Tutorials: Advanced Application 4 - Heat of Hydration Analysis by Construction Stages". 2020.
- [18]. Soon Jeon Park, Kwang Ki Kim và Sang Hyun Lee (2018), Application example of hydration heat management of mega foundation and pumpability for high performance concrete used in super highrise building, The international conference on the 55th anniversary of establishment of Vietnam Institute for Building Science and Technology, Ha Noi, Viet Nam.
- [19]. T.S Seo, S.S Kim và C.K Lim (2015), "Experimental Study on hydration Heat Control of Mass Concrete by Vertical Pipe Cooling Method", Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 14 (3), tr. 657-662.
- [20]. V. Tang T. Nguyen, T. Huynh, (2020), "An Early-age Evaluation of Thermal Cracking Index of Heavy Concrete Applying for Airport Pavement", Period. Polytech. Civ. Eng. 64 (2020) 344–352.
- [21]. X.B. Luu T.C. Nguyen (2019), "Reducing temperature difference in mass concrete by surface insulation", Mag. Civ. Eng. 88 (2019) 70–79.
- [22]. M Tran Van, V.N Chau và P.H Nguyen, "Prediction and control of temperature rise of massive reinforced concrete transfer slab with embedded cooling pipe, Case Stud. Constr. Mater". 18(2023), tr. e01817.
- [23]. ACI Committee 207.R1-96 (2005), Mass concrete, American Concrete Institute.
- [24]. ACI Committee (2005), ACI 207.1R-05—Guide to Mass Concrete, American Concrete Institute.
- [25]. N. A. Aniskin, & Trong, C. N, "Mathematical model of temperature regime and thermal stress state of roller-compacted concrete gravity dam", Journal of Physics. 1425(2020), tr. 9p.
- [26]. Z Bofang (2014), "Conduction of Heat in Mass Concrete, Boundary Conditions, and Methods of Solution", Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete. Elsevier, tr. 11-47.
- [27]. A. V. Bushmanova, Videnkov, N. V., Semenov, K. V., Dernakova, A. V., & Korovina, V. K. (2017), "The thermo-stressed state in massive concrete structures", Magazine of Civil Engineering. 3(71), tr. 51-60.
- [28]. S. H. Chen, Su, P., & Shahrour, I. (2011), "Composite element algorithm for the thermal analysis of mass concrete", International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. 21(4), tr. 434-447.
- [29]. D. Couto, Helene, P., & Almeida, L. C. (2016), "Temperature monitoring in large volume spreadfooting foundations: case study "Parque da Cidade" – São Paulo", Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 9(6), tr. 953-968.
- [30]. Korean Concrete Institute (2010), Thermal crack control of mass concrete, concrete practices Manual, Korea.
- [31]. M. H. Lee, Khil, B. S., & Yun, H. D. (2014), "Influence of cement type on heat of hydration and temperature rise of the mass concrete", Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. 8, tr. 536-542.
- [32]. I. Asadi P. Shafigh, N.B. Mahyuddin, (2018), "Concrete as a thermal mass material for building applications", A review, J. Build. Eng. . 19 (2018) 14–25.
- [33]. S. J. Park, Kim, K. K., & Lee, S. H. (2018), "Application example of hydration heat management of mega foundation and pumpability for high performance concrete used in super high rise building", In Proc. Int. Conf. on the 55th Anniversary of Establishment of Vietnam Institute for Building Science and Technology.
- [34]. L.N. Rasskazov, Orekhov, V.G., Aniskin, N.A., Malakhanov, V.V., Bestuzheva, A.S., Sainov, M.P., Soldatov, P.V., Tolstovkov, V.V. (2011), "Hydraulic structures", Moscow.
- [35]. TCVN 14334:2025, Bê tông khối lớn – Thi công và nghiệm thu, Bộ Khoa học và Công nghệ, NXB Giao thông vận tải, Hà Nội.
- [36]. Midas Information Technology (2004), Heat of hydration - Analysis analysis manual version 7.0.1.
- [37]. Van – Minh Le, Chi – Cong Vu & Ngoc – Khoa Ho. (2025). A combined analytical-numerical model for predicting temperature profiles in mass concrete foundations continuously cast with two layers of differing thermal properties. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 12/05/2025, <https://doi.org/10.1080/19648189.2025.2503412>.