

NGHIÊN CỨU KIỂM SOÁT NỨT DO NHIỆT TRONG BÊ TÔNG KHỐI LỚN BẰNG CƠ CHẾ SỬ DỤNG ỐNG LÀM LẠNH

Lưu Văn Thực^{a,*}, Lê Quang Trung^a, Nguyễn Mạnh Hùng^b

^a*Khoa Xây dựng dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng, 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

^b*Khoa Xây Dựng, Trường Đại học Vinh, 182 đường Lê Duẩn, Thành phố Vinh, Nghệ An, Việt Nam*

Nhận ngày 18/06/2019, Sửa xong 08/07/2019, Chấp nhận đăng 24/07/2019

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu kiểm soát nhiệt trong bê tông khối lớn bằng cơ chế sử dụng ống làm lạnh. Các mô phỏng số được thực hiện trên khối bê tông có kích thước $5,0 \times 10,0 \times 5,0$ m sử dụng công cụ phân tích nhiệt dạng dòng của chương trình Midas/Civil. Hai mô hình có sử dụng và không sử dụng ống làm lạnh được mô phỏng để đánh giá hiệu quả của ống làm lạnh trong việc kiểm soát nhiệt trong khối bê tông. Bốn mô hình với thời gian tuần hoàn nước lạnh khác nhau đã được phân tích để lựa chọn thời gian làm lạnh tối ưu. Kết quả nghiên cứu cho thấy, hệ thống ống làm lạnh đã làm giảm được $21,8^{\circ}\text{C}$ nhiệt độ ở tâm khối, theo đó làm giảm chênh lệch nhiệt độ ΔT từ $49,4^{\circ}\text{C}$ xuống còn $20,6^{\circ}\text{C}$. Đồng thời, quá trình tuần hoàn nước lạnh phải đảm bảo có thời gian ít nhất đến thời điểm nhiệt ở tâm khối bê tông đạt cực đại. Từ đó, bài báo đưa ra các kết luận về hiệu quả của ống làm lạnh trong việc kiểm soát nhiệt trong bê tông khối lớn.

Từ khoá: bê tông khối lớn; chỉ số nứt nhiệt; nhiệt thủy hóa; ống làm lạnh.

RESEARCH ON THERMAL CRACKING CONTROL IN MASS CONCRETE BY USING COOLING PILE SYSTEM

Abstract

This paper presents the research results of thermal cracking control in mass concrete by using cooling pile systems. Numerical analyses are performed for a mat foundation with the dimensions of $5.0 \times 10.0 \times 5.0$ m, using the flow analysis tool of Midas/Civil Finite Element Software. Two models which use cooling pile system and do not use cooling pile system are analyzed to estimate the effects of cooling pile system on controlling temperature in mass concrete. Besides, four models, which use cooling pile system with different circulation time of cool water, are analyzed to choose optimal time. The results show that the temperature at the center of the mat foundation can be reduced by 21.8°C in case of using the pipe cooling systems. Hence, the difference in temperature between the center and surface of the mat is reduced from 49.4°C to 20.6°C . Besides, the circulation of cool water must be carried out until the temperature at the center of the mat reaches to its peak value. As a result, the paper draws conclusions about the effect of using cooling pile systems on controlling thermal cracking of mass concrete.

Keywords: mass concrete; thermal cracking index; heat of hydration; cooling pile.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(3V\)-11](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(3V)-11) © 2019 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Tổng quan

Thi công bê tông khối lớn thường gặp phải những thách thức và yêu cầu trong việc kiểm soát sự gia tăng nhiệt độ do quá trình thủy hóa xi măng. Nhiệt lượng tăng quá mức sẽ dẫn tới sự chênh lệch

*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: thuclv@nuce.edu.vn (Thực, L. V.)

hiệt độ giữa bề mặt và trong lòng khối bê tông, gây ra các vết nứt khi ứng suất kéo do nhiệt vượt quá ứng suất kéo cho phép [1, 2]. Các vết nứt do nhiệt sẽ phá vỡ tính toàn khối, sự ổn định và dẫn tới những nguy hại cho kết cấu [3].

Hai vấn đề lớn nhất xảy ra khi nhiệt thủy hóa trong bê tông không được kiểm soát: 1) Khi nhiệt độ trong khối bê tông vượt quá 70°C, một khoáng bền sulfate ($-SO_4$) được tạo ra trong số các sản phẩm thủy hóa ở giai đoạn sớm, từ đó dẫn tới hiện tượng hình thành entringite muộn (DEF). Ảnh hưởng lớn nhất của hiện tượng DEF là gây ra giãn nở dẫn tới các vết nứt trong khối bê tông ở giai đoạn muộn. Từ đó, nó làm giảm cường độ và độ bền cơ học của kết cấu bê tông. Hiện tượng này có thể ngăn ngừa được khi nhiệt độ trong lòng khối bê tông không chế được dưới 70°C trong giai đoạn sớm xi măng thủy hóa. Tiêu chuẩn ACI 301-10 [4] về bê tông khối lớn cũng đề cập đến giới hạn nhiệt độ lớn nhất trong khối bê tông là 70°C để tránh các vết nứt nhiệt này. 2) Hiện tượng chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt và trong lòng khối bê tông. Tiêu chuẩn ACI 207.R1-96 [5] gợi ý 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. Nhiệt được tạo ra từ quá trình thủy hóa cùng với tốc độ thoát nhiệt chậm trong hỗn hợp bê tông là nguyên nhân chính dẫn tới sự tăng nhiệt độ của toàn khối. Bê tông trong lòng khối với nhiệt lượng lớn có xu hướng nở ra trong khi tại bề mặt bên ngoài nhiệt độ thấp, bê tông lại có xu hướng co lại. Từ đó, nó cản trở sự nở của bê tông phía trong, gây ra ứng suất kéo cho bê tông bề mặt và gây nứt khi ứng suất kéo do nhiệt vượt quá ứng suất kéo cho phép [2, 6]. Vì vậy, các công nghệ kiểm soát nứt do nhiệt bê tông khối lớn đều nhắm tới việc giải quyết hai hiện tượng chính nêu trên.

Cùng với sự phát triển của các công trình nhà siêu cao tầng ở Việt Nam, các kết cấu bê tông cốt thép ngày càng có kích thước lớn hơn, khối tích có thể lên tới 17000 m³ (công trình Lotte Center, tháp Landmark 81). Tiêu chuẩn 304:2005 về bê tông khối lớn [7] chỉ dẫn hai biện pháp kỹ thuật chính để kiểm soát hai vấn đề do nhiệt ở trên: 1) Hạn chế tốc độ phát triển nhiệt thủy hóa xi măng trong bê tông bằng cách: hạn chế hàm lượng xi măng, sử dụng xi măng nhiệt thấp, hạ nhiệt độ hỗn hợp bê tông, sử dụng nước đá. 2) Hạn chế chênh lệch nhiệt độ khối bê tông bằng cách: đưa nhiệt từ trong khối bê tông ra ngoài bằng cơ chế sử dụng ống làm lạnh, phân chia lớp đổ, chống xung nhiệt khi tháo ván khuôn, chống mất nhiệt nhanh ở các gờ và góc kết cấu hoặc bọc vật liệu cách nhiệt để giữ nhiệt độ khối đổ. Tiêu chuẩn 304:2005 [7] có các điều khoản chỉ dẫn cho việc áp dụng phương pháp này. Tuy nhiên, tiêu chuẩn chỉ đưa ra các hướng dẫn mang tính định tính, các khung hướng dẫn chung, các quy định cụ thể về việc đặt dàn ống: hiệu quả của dàn ống, thời gian tuần hoàn nước lạnh, khả năng giảm nhiệt... thì chưa được đề cập. Đã có một số nghiên cứu về việc mô phỏng trường nhiệt độ trong bê tông khối lớn. Nghiên cứu [8] mô phỏng ảnh hưởng phương pháp phân chia lớp đổ đến việc kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn đã chỉ ra rằng không chỉ thời điểm đổ bê tông mà cả vị trí bố trí các lớp đổ sẽ đồng thời quyết định sự hình thành và phát triển vết nứt và một lựa chọn phù hợp để kiểm soát vết nứt phải kết hợp đồng thời thời điểm đổ và vị trí giữa các lớp đổ. Nghiên cứu [9] mô phỏng trường nhiệt độ và ứng suất trong quá trình thủy hóa xi măng của kết cấu bê tông khối lớn và so sánh với thực nghiệm. Nghiên cứu đã mô tả được qui luật thay đổi và xác định được giá trị của chúng tại các vị trí và thời điểm đóng rắn khác nhau của bê tông. Tuy nhiên, gần như chưa có một bài báo cụ thể nào về mô phỏng ảnh hưởng của ống làm lạnh đến việc kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn. Do đó, nghiên cứu này là cần thiết, có giá trị cả về khoa học và thực tiễn.

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của phương pháp sử dụng ống làm lạnh đến chỉ số nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn. Việc phân tích trường ứng suất - nhiệt độ được thực hiện bởi công cụ phân tích nhiệt dạng dòng của phần mềm Midas/Civil. Hai mô hình có và không có ống làm lạnh được mô phỏng để đánh giá hiệu quả của việc sử dụng ống làm lạnh. Bốn mô hình với thời gian tuần hoàn nước lạnh khác nhau đã được phân tích để lựa chọn thời gian làm lạnh tối ưu. Từ đó, nhóm nghiên cứu đưa

ra kết luận về hiệu quả của việc sử dụng ống làm lạnh đến việc kiểm soát nhiệt trong bê tông khối lớn.

2. Lý thuyết về quá trình truyền nhiệt

2.1. Nguồn nhiệt

Bê tông là vật liệu có tính dẫn nhiệt thấp, nên lượng nhiệt thủy hóa của xi măng không kịp thoát ra ngoài và tích tụ trong lòng khối bê tông. Tốc độ tỏa nhiệt tỷ lệ thuận với tỷ số diện tích bề mặt thoát nhiệt trên khối tích bê tông, do đó đối với bê tông khối lớn tốc độ thoát nhiệt là chậm hơn rất nhiều so với các kết cấu bê tông thông thường. Theo [1, 3] lượng nhiệt sinh ra trong quá trình thủy hóa trong một đơn vị thể tích bê tông và nhiệt độ của bê tông tại một thời điểm trong quá trình đoạn nhiệt được xác định theo công thức (1) và (2):

$$q = \frac{1}{24} \rho C K e^{-\alpha t} \quad (1)$$

$$T_{ad} = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (2)$$

trong đó q là nhiệt sinh ra trong một đơn vị thể tích, (kcal/m³); ρ là khối lượng thể tích của bê tông, (kg/m³); C là tỷ nhiệt của bê tông, (kcal/kg.°C); t là thời gian, (ngày); α là hệ số thể hiện mức độ thủy hóa; K là nhiệt độ tối đa của bê tông trong điều kiện đoạn nhiệt, (°C); T_{ad} là nhiệt độ của bê tông trong điều kiện đoạn nhiệt ở tuổi t (ngày), (°C).

Nhiệt độ tại tâm khối bê tông trong điều kiện đoạn nhiệt được xác định bằng phương pháp thực nghiệm theo công thức (3) [1]:

$$Q(t) = Q_{\infty} \left[1 - e^{-r_{AT}(t-t_{0,Q})^{s_{AT}}} \right] \quad (3)$$

trong đó t là tuổi bê tông (ngày); $Q(t) \equiv T_{ad}$ là nhiệt độ đoạn nhiệt của bê tông ở tuổi t (ngày), (°C); Q_{∞} là nhiệt độ tối đa của bê tông trong điều kiện đoạn nhiệt, (°C); r_{AT}, s_{AT} là các thông số thể hiện tốc độ thay đổi nhiệt độ; $t_{0,Q}$ là 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, hàm lượng và loại xi măng sử dụng.

2.2. Cơ chế truyền nhiệt của ống làm lạnh

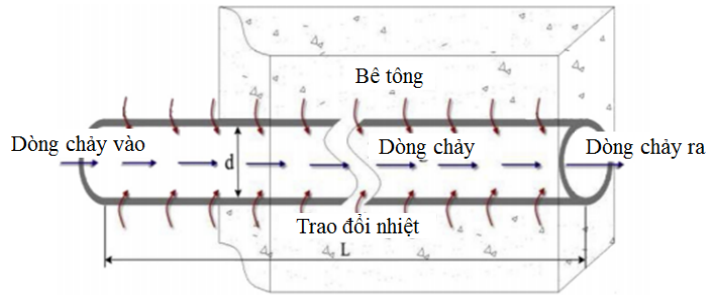
Do nhiệt độ ở tâm khối đổ thường lớn hơn nhiều so với nhiệt độ vùng xung quanh nên việc đưa nhiệt từ vùng tâm khối đổ thoát ra ngoài sẽ làm giảm chênh lệch nhiệt độ ΔT giữa lớp bê tông trong và ngoài khối, đây cũng là mục đích lớn nhất của việc đưa hệ dàn ống làm lạnh vào trong khối bê tông. Nước lạnh chạy qua dàn ống sẽ trao đổi nhiệt và đưa nhiệt từ trong lòng khối ra (Hình 1), theo đó làm giảm nhiệt độ tâm khối [7].

Theo [3], quá trình trao đổi nhiệt giữa ống và bê tông giảm theo sự tăng nhiệt thủy hóa bê tông và tăng theo nhiệt độ của dòng chảy. Quá trình trao đổi nhiệt là sự đối lưu giữa dòng chảy và bề mặt ống. Giá trị nhiệt đối lưu được xác định theo công thức (4):

$$q_{conv} = h_p A_s (T_s - T_m) = h_p A_s \left(\frac{T_{s,i} + T_{s,o}}{2} - \frac{T_{m,i} + T_{m,o}}{2} \right) \quad (4)$$

trong đó h_p là hệ số đối lưu của dòng chảy trong ống, (kcal/m².h.°C); A_s là diện tích bề mặt ống (m²); T_s, T_m là nhiệt độ của bề mặt và chất lỏng trong ống (i là đầu vào; o là đầu ra).

Về mặt công nghệ thi công, sau khi kết thúc quá trình thoát nhiệt khối bê tông, dàn ống được bơm rửa sạch trong lòng khối, đưa hết nước ra khỏi dàn ống và bơm ép vữa xi măng cát lấp đầy tất cả các



Hình 1. Cơ chế truyền nhiệt trong ống làm lạnh [10]

ống dần. Dàn ống phải được thiết kế sao cho việc bơm vữa sau này được thực hiện dễ dàng và không bị tắc [7].

Theo hội kỹ sư bê tông Nhật Bản, hệ số đối lưu của nước được xác định như một hàm của vận tốc dòng chảy. Khi vận tốc dòng chảy trong khoảng 20-60 cm/s, hệ số đối lưu của nước được xác định theo (5):

$$h_p = 4,75u + 43,0 \quad (5)$$

trong đó u là vận tốc dòng chảy lạnh trong ống (cm/s); h_p là hệ số đối lưu.

2.3. Chỉ số nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn

Theo [1-3, 5], khi chênh lệch nhiệt độ ΔT càng lớn thì ứng suất nhiệt trong khối bê tông càng lớn, mối quan hệ giữa ứng suất nhiệt và nhiệt độ trong khối bê tông thể hiện trong công thức (1):

$$\{\sigma\} = [R] E \beta \{\Delta T\} \quad (6)$$

trong đó $\{\sigma\}$ là vectơ ứng suất tại điểm khảo sát, (Kgf/m²); $[R]$ là ma trận cản biến dạng của bê tông; E là môđun đàn hồi của bê tông, (Kgf/m²); $\{\Delta T\}$ là véc tơ gradient nhiệt độ; β là hệ số giãn nở nhiệt của bê tông.

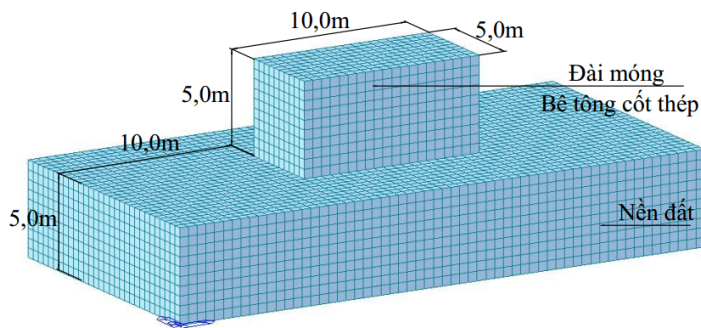
Theo [1], chỉ số nứt của kết cấu bê tông được định nghĩa như là tỉ số của cường độ kéo tách chia cho ứng suất kéo do nhiệt được tính trong toàn bộ quá trình diễn biến của nhiệt độ, xác định theo công thức (2). Khi giá trị $I_{cr} < 1$ kết cấu bê tông bắt đầu nứt.

$$I_{cr} = \frac{f_t(t_e)}{\sigma_t(t_e)} \quad (7)$$

$$f_t(t_e) = C_1 x f'_c(t_e)^{C_2} \quad (8)$$

3. Mô hình phân tích

Đối tượng khảo sát là một kết cấu đài móng phổ biến, bao gồm khối đất nền và khối bê tông đài móng với kích thước 5,0 × 10,0 × 5,0 m (Hình 2). Vật liệu bê tông, ống làm lạnh và các điều kiện biên phân tích được sử dụng như Bảng 1-3. Sơ đồ hệ dàn ống làm lạnh được thể hiện như Hình 3, khoảng cách giữa các ống là 1,0 m, tham khảo theo tài liệu [11].



Hình 2. Mô hình tổng thể khối móng

Bảng 1. Thông số vật liệu sử dụng trong phân tích [3]

Đặc điểm	Đơn vị	Bê tông	Lớp đất dưới
Nhiệt dung riêng	kcal/kg°C	0,25	0,2
Khối lượng riêng	kgf/m ³	2400	1800
Hệ số dẫn nhiệt	kcal/m.h.°C	2,3	1,7
Hệ số trao đổi nhiệt khi tiếp xúc môi trường	kcal/m ² .h.°C	12	12
Hệ số trao đổi nhiệt khi tiếp xúc ván khuôn gỗ	kcal/m ² .h.°C	8	-
Nhiệt độ môi trường	°C	25	-
Nhiệt độ bê tông khi đổ	°C	30	-
Cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi	kG/m ²	400	-
Hệ số hàm phát triển cường độ nén	ACI	$a = 13,9; b = 0,86$	-
Môđun đàn hồi	kG/cm ²	$2,7734 \times 10^5$	$1,0 \times 10^4$
Hệ số giãn nở nhiệt		$1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5}$
Hệ số poisson's		0,18	0,2
Loại xi măng		PCB40	-
Hàm lượng xi măng	kg/m ³	385	-

Bảng 2. Thành phần cấp phối bê tông sử dụng trong phân tích

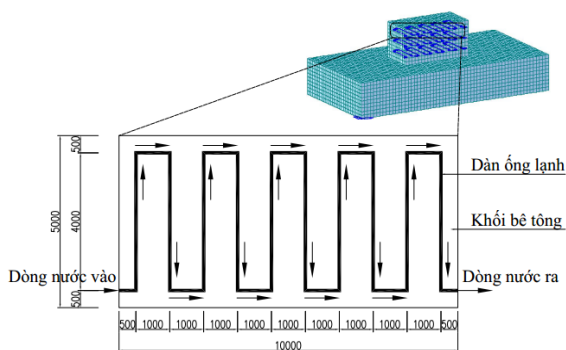
Cát (kg)	Đá (kg)	Nước (l)	Bột (kg/m ³)	Xi măng (%)	Tro bay (%)	Phụ gia giảm nước (% Bột)
880	951	160	385	100	0	1,35

4. Kết quả phân tích và thảo luận

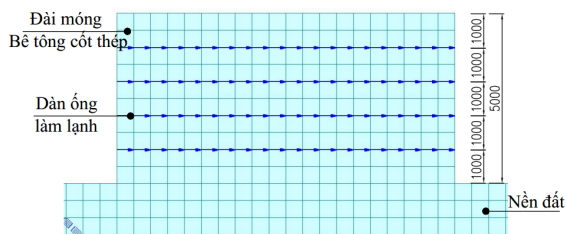
Việc đánh giá ảnh hưởng của hệ ống làm lạnh đến hiệu quả kiểm soát nứt do nhiệt được thực hiện trên 2 tiêu chí: 1) Nhiệt độ, khảo sát ở tâm và biên khối. 2) Chỉ số nứt do nhiệt, khảo sát ở điểm biên, nơi có ứng suất kéo lớn nhất. Chỉ số này được sử dụng như một chỉ số đánh giá chính. Khi chỉ số nứt $I_{cr} < 1$, kết cấu bê tông bắt đầu nứt. Hai trường hợp nghiên cứu được khảo sát: 1) hiệu quả của việc sử dụng ống làm lạnh; 2) tối ưu thời gian làm lạnh.

Bảng 3. Thông số ống lạnh sử dụng trong phân tích

Đặc điểm	Đơn vị	Nước lạnh	Hệ ống dẫn
Chất liệu		-	Thép
Nhiệt dung riêng	kcal/kg°C	1,0	-
Khối lượng riêng	kgf/m ³	1000	7850
Hệ số đối lưu	kcal/m ² .h.°C	-	320
Nhiệt độ dòng nước	°C	5	-
Tốc độ chảy	m ³ /h	1,2	-
Đường kính ống	m	-	0,027



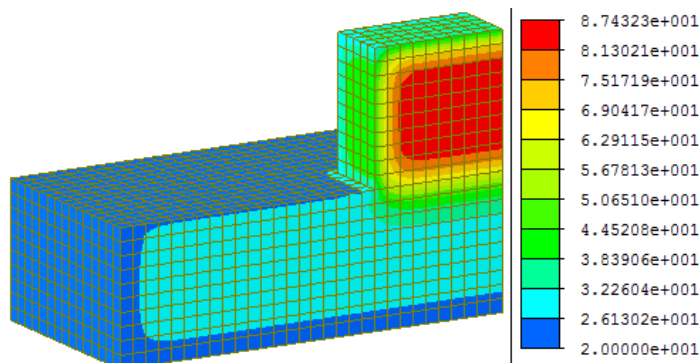
Hình 3. Mặt bằng bố trí hệ thống ống làm lạnh trong phân tích



Hình 4. Bố trí khoảng cách giữa các ống làm lạnh theo phương đứng trong phân tích

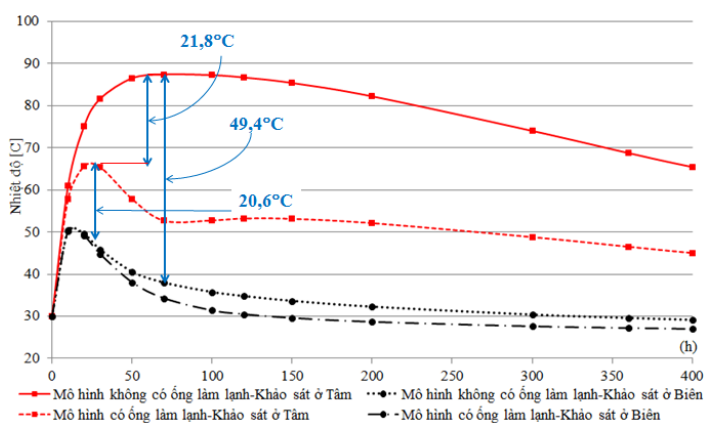
4.1. Hiệu quả của việc sử dụng hệ ống làm lạnh

Để đánh giá hiệu quả của hệ thống ống làm lạnh trong việc kiểm soát nhiệt trong bê tông khối lớn, bài báo tiến hành phân tích 2 mô hình: 1) không sử dụng dàn ống làm lạnh; 2) sử dụng dàn ống làm lạnh. Với số liệu đầu vào như Bảng 1, thành phần cấp phối như Bảng 2, thuộc tính ống làm lạnh như Bảng 3, kích thước mô hình phân tích như Hình 2, mặt bằng bố trí dàn ống như Hình 3, sử dụng 4 lớp dàn ống như Hình 4, và thời gian tuần hoàn nước lạnh là 50 giờ sau khi kết thúc quá trình đổ bê tông, giá trị 50 giờ được xác định dựa vào kết quả tối ưu thời gian làm lạnh như trình bày ở mục 4.2.



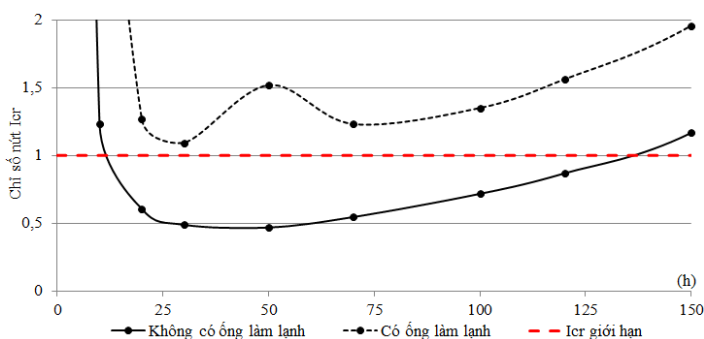
Hình 5. Trường nhiệt trong khối móng không sử dụng ống làm lạnh tại thời điểm 70 giờ sau khi đổ

Kết quả phân tích cho thấy, hệ thống ống làm lạnh đã làm giảm được 21,8°C nhiệt độ ở tâm khối. Mẫu không sử dụng ống làm lạnh có nhiệt độ tâm $T_{max} = 87,4^{\circ}\text{C}$ (Hình 5 và 6) (đường màu đỏ, nét liền), trong khi khối bê tông sử dụng ống làm lạnh có $T_{max} = 65,6^{\circ}\text{C}$ (đường nét đứt màu đỏ) (Hình 6). Theo đó, chênh lệch nhiệt độ ΔT giữa tâm và bề mặt của khối sử dụng ống làm lạnh chỉ còn 20,6°C, giá trị này nằm trong ngưỡng khuyến cáo của tiêu chuẩn ACI 207.R1-96 [5]. Trong khi, nếu không sử dụng ống làm lạnh, chênh lệch nhiệt độ ΔT giữa tâm và bề mặt của khối bê tông là 49,4°C, vượt rất nhiều ngưỡng khuyến cáo của tiêu chuẩn [5].



Hình 6. Chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt khối bê tông trường hợp có và không sử dụng ống làm lạnh

Đánh giá trên khía cạnh chỉ số nứt, khối bê tông có sử dụng hệ ống làm lạnh có $I_{cr} = 1,09 > 1,00$ tức là khối bê tông không bị nứt nhiệt. Trong khi khối bê tông không sử dụng ống làm lạnh có $I_{cr} = 0,46 < 1,00$ (Hình 7), đồng nghĩa với việc khối bê tông sẽ bị nứt do nhiệt. Luận giải điều này, rõ ràng chênh lệch nhiệt độ giữa điểm ở tâm và bề mặt khối khi sử dụng ống làm lạnh giảm rất nhiều. Chính sự giảm chênh lệch nhiệt độ này đã làm giảm xu hướng co bên ngoài bề mặt khối đổ, từ đó hạn chế ứng suất kéo do nhiệt. Qua đó, có thể thấy sử dụng hệ dàn làm lạnh là một biện pháp hiệu quả trong việc kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn.



Hình 7. Chỉ số nứt nhiệt bề mặt khối trường hợp có và không sử dụng ống làm lạnh

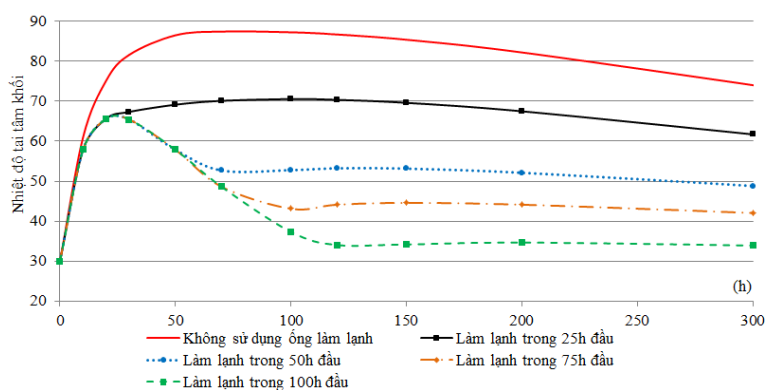
4.2. Khảo sát ảnh hưởng thời gian làm lạnh đến hiệu quả giảm nhiệt

Để tìm ra thời gian tuần hoàn nước lạnh tối ưu, bài báo tiến hành khảo sát 4 mô hình với thời gian tuần hoàn nước lạnh khác nhau: tuần hoàn 25 giờ, 50 giờ, 75 giờ và 100 giờ từ sau khi kết thúc quá

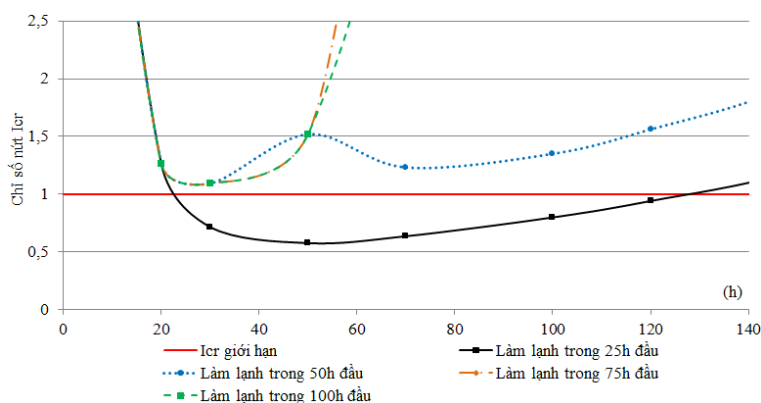
trình đổ bê tông. Với số liệu đầu vào như Bảng 1, thành phần cấp phối như Bảng 2, thuộc tính ống làm lạnh như Bảng 3, kích thước mô hình phân tích như Hình 2, mặt bằng bố trí dàn ống như Hình 3, sử dụng 4 lớp dàn ống như Hình 4.

Kết quả phân tích cho thấy, trường hợp tuần hoàn nước lạnh trong 25 giờ đầu có nhiệt độ lớn nhất ở tâm $T_{max} = 70,5^{\circ}\text{C}$ tại thời điểm 100h sau đổ (đường màu đen nét liền) trong khi trường hợp tuần hoàn nước từ 50 giờ trở đi có nhiệt độ lớn nhất ở tâm như nhau, $T_{max} = 65,6^{\circ}\text{C}$ (đường màu xanh da trời nét đứt) (Hình 8). Điều này cho thấy, với đầu vào của mô hình như trên, khối bê tông chỉ cần tuần hoàn nước lạnh 50 giờ sau đổ. Luận giải điều này, có thể thấy thời điểm 50 giờ là thời điểm khối móng đạt nhiệt độ cực đại ở tâm, theo đó cần làm lạnh. Sau thời điểm 50 giờ, khối bê tông bắt đầu đi vào giai đoạn giãn nhiệt nên không cần tiếp tục làm lạnh.

Đánh giá trên khía cạnh chỉ số nứt, khối bê tông tuần hoàn nước lạnh trong 25 giờ đầu có $I_{cr} = 0,57 < 1,00$ (đường màu đen nét liền), tức là khối bê tông bị nứt nhiệt. Trong khi trường hợp tuần hoàn nước từ 50 giờ trở đi có $I_{cr} = 1,09 > 1,00$ (đường màu xanh da trời nét đứt) (Hình 9), đồng nghĩa với việc khối bê tông không bị nứt do nhiệt. Như vậy, có thể kết luận thời gian làm lạnh phụ thuộc vào thời gian nhiệt trong khối bê tông đạt cực đại. Quá trình tuần hoàn nước lạnh phải đảm bảo có thời gian ít nhất đến thời điểm nhiệt tâm khối đạt cực đại. Việc tiếp tục tuần hoàn nước lạnh sau đó không còn nhiều ý nghĩa trong việc thoát nhiệt ở tâm.



Hình 8. Nhiệt độ tâm khối bê tông với thời gian làm lạnh khác nhau



Hình 9. Chỉ số nứt nhiệt bề mặt khối với thời gian làm lạnh khác nhau

5. Kết luận

Từ kết quả nghiên cứu, có thể đưa ra một số kết luận về việc kiểm soát nhiệt trong bê tông khối lớn bằng cơ chế sử dụng ống làm lạnh:

- Tốc độ tỏa nhiệt tỷ lệ thuận với tỷ số diện tích bề mặt thoát nhiệt trên khối tích bê tông, do đó đối với bê tông khối lớn tốc độ thoát nhiệt là chậm hơn rất nhiều so với các kết cấu bê tông thông thường.

- Nước lạnh chạy qua hệ dàn ống làm lạnh sẽ trao đổi nhiệt với bê tông và đưa nhiệt từ trong lòng khối thoát ra ngoài. Từ đó sẽ làm giảm chênh lệch nhiệt độ ΔT giữa lớp bê tông ở tâm và bề mặt. Đồng thời, sau khi kết thúc quá trình thoát nhiệt, hệ dàn được bơm rửa sạch, đưa hết nước ra khỏi dàn ống và bơm ép vữa xi măng cát để lấp đầy.

- Sử dụng ống làm lạnh là một biện pháp rất hiệu quả trong việc kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn. Với mẫu bê tông kích thước $5,0 \times 10,0 \times 5,0$ m, và điều kiện biên như mô tả ở mục 3 và 4, hệ thống ống làm lạnh đã làm giảm được $21,8^\circ\text{C}$ nhiệt độ ở tâm khối, theo đó làm giảm chênh lệch nhiệt độ ΔT từ $49,4^\circ\text{C}$ xuống còn $20,6^\circ\text{C}$. Chính sự giảm chênh lệch nhiệt độ này đã làm giảm xu hướng co bên ngoài bề mặt khối đổ, từ đó hạn chế ứng suất kéo do nhiệt, làm chỉ số nứt I_{cr} tăng từ 0,46 lên 1,09, tức khối bê tông dùng hệ thống ống làm lạnh sẽ không bị nứt trong khi nếu không sử dụng hệ dàn làm lạnh này khối bê tông sẽ nứt.

- Thời gian làm lạnh phụ thuộc vào thời gian nhiệt trong khối bê tông đạt cực đại. Quá trình tuần hoàn nước lạnh phải đảm bảo có thời gian ít nhất đến thời điểm nhiệt tâm khối đạt cực đại. Việc tiếp tục tuần hoàn nước lạnh sau đó không còn nhiều ý nghĩa trong việc thoát nhiệt ở tâm.

Tài liệu tham khảo

- [1] Japan Concrete Institute (2011). *Guideline for control of cracking of mass concrete*.
- [2] Khalifah, H. A., Rahman, M. K., Al-Helal, Z., Al-Ghamdi, S. (2016). Stress generation in mass concrete blocks with fly ash and silica fume—an experimental and numerical study. In *Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7–11.
- [3] Midas Information Technology (2004). *Heat of hydration - Analysis analysis manual version 7.0.1*.
- [4] ACI Committee 301-10 (2010). *Specifications for structural concrete*. American Concrete Institute.
- [5] ACI Committee 207.R1-96 (2005). *Mass concrete*. American Concrete Institute.
- [6] Taylor, H. F. W., Famy, C., Scrivener, K. L. (2001). [Delayed ettringite formation](#). *Cement and Concrete Research*, 31(5):683–693.
- [7] TCXDVN 305:2004. *Bê tông khối lớn - Quy phạm thi công và nghiệm thu*.
- [8] Hai, T. H., Thuc, L. V. (2017). [The effect of splitting concrete placement on controlling thermal cracking in mass concrete](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 11(6):22–28.
- [9] Khoa, H. N., Công, V. C. (2012). [Phân tích trường nhiệt độ và ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn bằng phương pháp phần tử hữu hạn](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 6(4):17–27.
- [10] Liu, X., Zhang, C., Chang, X., Zhou, W., Cheng, Y., Duan, Y. (2015). [Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system](#). *Applied Thermal Engineering*, 78: 449–459.
- [11] Engineering Monograph (1981). *Control of cracking in mass concrete structures*. United States Government Printing Office, 82.