

Nghiên cứu ứng xử của kết cấu hầm bê tông do nhiệt thủy hóa xi măng theo phương pháp phần tử hữu hạn

Lê Văn Minh¹, Vũ Chí Công^{1*} Lê Hồng Hà¹, Vũ Anh Tuấn¹

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

TỪ KHOÁ

Nhiệt thủy hoá xi măng
Bê tông
Trường nhiệt độ
Ứng suất nhiệt
Kết cấu hầm
Phần tử hữu hạn
Ủ nhiệt
Kiểm soát nứt

TÓM TẮT

Hiện tượng nứt do nhiệt thủy hoá xi măng trong kết cấu bê tông là một trong những vấn đề chính ảnh hưởng đến tính khả thi và độ bền của các dự án hầm xuyên núi hoặc ngầm đô thị. Trước nhu cầu phát triển mạnh mẽ của công trình giao thông ngầm tại các đô thị lớn ở Việt Nam, việc nghiên cứu ứng xử của kết cấu hầm bê tông do nhiệt thủy hóa xi măng thông qua phân tích trường nhiệt độ, trường ứng suất nhiệt hay trường chỉ số nứt do nhiệt để từ đó có giải pháp phù hợp nhằm ngăn chặn và kiểm soát nguy cơ nứt là trở nên cấp thiết. Bài báo này trình bày kết quả phân tích ứng xử do nhiệt thủy hóa xi măng trong kết cấu hầm bê tông bằng mô phỏng số theo phương pháp phần tử hữu hạn dưới sự hỗ trợ của phần mềm Midas Civil 2022 thông qua việc sử dụng biện pháp ủ nhiệt tại bề mặt kết hợp với giải pháp thi công theo phân đoạn. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc kiểm soát nứt do nhiệt thủy hóa xi măng, góp phần nâng cao hiệu quả thiết kế và thi công các công trình hạ tầng nói chung và kết cấu hầm bê tông nói riêng.

KEYWORDS

Heat of cement hydration
Concrete
Temperature field
Thermal stress
Tunnel structure
Finite element
Annealing
Phase construction
Controlling cracking

ABSTRACT

The phenomenon of cracking due to heat of cement hydration in concrete structures is one of the main problems affecting the feasibility and durability of mountain tunnel or urban underground projects. Given the strong development needs of underground traffic works in large cities in Vietnam, it is urgent to study the behavior of concrete tunnel structures due to heat of cement hydration through analysis of temperature fields, thermal stress fields or thermal cracking index fields to find appropriate solutions to prevent and control the risk of cracking. This paper presents the results of analyzing the behavior due to heat of cement hydration in concrete tunnel structures by numerical simulation using the finite element method with the support of Midas Civil 2022 software through the use of surface annealing combined with phase construction. The research results provide a scientific basis for controlling cracking due to heat of cement hydration, contributing to improving the efficiency of design and construction of infrastructure works in general and concrete tunnel structures in particular.

1. Giới thiệu

Quá trình đô thị hóa ngày càng gia tăng mạnh mẽ ở trên toàn thế giới cũng như tại Việt Nam. Điều này dẫn tới số lượng các công trình giao thông phải được xây dựng với số lượng lớn để có thể đáp ứng kịp thời với nhịp độ phát triển đô thị hóa. Việc sử dụng công trình hầm đã trở thành một trong những giải pháp được ưa chuộng cho các hệ thống giao thông. Trong những năm gần đây tại các thành phố lớn ở Việt Nam đang triển khai nhiều dự án xây dựng các tuyến đường hầm metro để có thể đáp ứng nhu cầu giao thông công cộng của thành phố. Trong thời gian thi công các đường hầm còn tồn tại và xảy ra nhiều vấn đề khác nhau, chẳng hạn như: Rò rỉ lớp thép bê tông móng, nứt bê tông do nhiệt thủy hóa gây ra, mảnh vỡ rơi xuống,... Trong số đó vấn đề nứt bê tông do nhiệt thủy hóa gây ra là vấn đề phổ biến nhất. Thông thường, kết cấu bê tông nói chung và bê tông khối lớn nói riêng sẽ tạo ra nhiệt đáng kể trong quá trình thi công, làm cho nhiệt độ ở bên trong các kết

cấu bê tông tăng nhanh ở giai đoạn đầu nhiệt thủy hóa [1, 2]. Điều đó dẫn đến sự chênh lệch nhiệt độ đáng kể giữa bề mặt với bên trong kết cấu bê tông [3]. Sự chênh lệch nhiệt độ này gây ra sự giãn nở không đồng đều của bê tông, dẫn đến ứng suất kéo tích tụ nhanh ở bên trong khối bê tông [4, 5]. Khi ứng suất kéo vượt quá giới hạn chịu kéo của bê tông, hiện tượng nứt nhiệt sẽ xuất hiện. Những vết nứt này không chỉ tác động đến tuổi thọ của kết cấu mà còn ảnh hưởng đến quá trình sử dụng sau này [4, 6-8]. Ở Bảng 1 sẽ thể hiện mức cho phép chênh lệch nhiệt độ ΔT giữa tâm và bề mặt của kết cấu và các giá trị gradien nhiệt độ $\Delta T/h$ được xác định thông qua ε - là cường độ chịu kéo giới hạn của bê tông ở tuổi sớm và α - là hệ số giãn nở nhiệt của bê tông, cũng như trị số của chỉ số nứt I_{cr} được dựa trên một số tài liệu nghiên cứu.

Ở Nhật Bản, việc đánh giá sự hình thành vết nứt trong bê tông khối lớn được thực hiện bằng chỉ số nứt nhiệt và được định nghĩa như sau công thức (7). Về lý thuyết thì điều kiện cần để cho kết cấu bê tông không bị nứt do nhiệt là chỉ số nứt $I_{cr} > 1$. Xu hướng nứt được ước

*Liên hệ tác giả: congvc@huce.edu.vn

Nhận ngày 10/09/2025, sửa xong ngày 13/10/2025, chấp nhận đăng ngày 14/10/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2025.1147>

tính bằng giá trị của chỉ số nứt nhiệt dựa trên các giá trị tiêu chí được trình bày ở Bảng 1.

Hai nguyên nhân phổ biến chính gây ra hiện tượng nứt của kết cấu bê tông khối lớn trong giai đoạn đầu nhiệt thủy hóa là: Sự hình thành quá trình ettringite chậm (DEF) và nứt nhiệt ở giai đoạn nhiệt thủy hóa do sự chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt và trong lòng bê tông. Quá trình DEF là do sự chậm trễ trong quá trình hình thành ettringite do tiếp xúc với nhiệt độ cao ở giai đoạn đầu quá quá trình nhiệt thủy hóa. Khi xi măng tiếp xúc với nhiệt độ cao ở đây là thường trên 70 °C [15, 16], ettringite không được hình thành trong quá trình đóng rắn và mono-sunfat thay thế ettringite [17]. Quá trình đóng rắn sau đó ở nhiệt độ môi trường xung quanh khiến mono-sunfat chuyển thành ettringite. Sự chuyển đổi mono-sunfat thành ettringite này được giải thích cho sự giãn nở và hình thành vết nứt được quan sát thấy của hồ xi măng [18, 19]. Về bản chất ettringite sẽ không ổn định trong hồ xi măng ở nhiệt độ trên khoảng 70 °C. Tuy nhiên, khi có đủ sunfat, nó có thể tồn tại trong hồ xi măng ở nhiệt độ ít nhất lên tới 90 °C [20].

Một số biện pháp được áp dụng để có thể giảm thiểu rủi ro nứt do nhiệt thủy hóa ở giai đoạn đầu và quá trình DEF bao gồm [21, 22]: Sử dụng biện pháp tối ưu hóa thiết kế hỗn hợp để có thể giảm quá trình sinh nhiệt bên trong kết cấu bê tông mà không ảnh hưởng đến hiệu suất cơ học của nó. Để đạt được điều này, hỗn hợp bê tông được thiết kế để giảm tổng hàm lượng chất kết dính hoặc tăng hàm lượng vật liệu xi măng bổ sung hay sử dụng một ít tro bay; Làm hạ nhiệt sinh ra bằng cách làm mát các thành phần hỗn hợp bằng nước lạnh hoặc nitor lỏng trộn với cốt liệu trước khi đổ bê tông hoặc sử dụng ống làm mát trong bê tông. Làm mát ván khuôn bằng cách phun nước lạnh trước khi đổ bê tông và đổ bê tông vào cuối buổi chiều; Hạn chế nhiệt độ đỉnh điểm hơn 70 °C và chênh lệch nhiệt độ lớn hơn 20 °C bằng cách sử dụng chất làm chậm hoặc chia đợt đổ bê tông. Những biện pháp này đã được trình bày và phân tích trong nhiều tài liệu nghiên cứu khác nhau và được công bố trong các tài liệu khoa học uy tín trong và ngoài nước chẳng hạn như: Bamforth, P. B. [23] đã chỉ rõ việc giảm mức độ hạn chế là một trong những phương pháp hữu ích nhất để có thể giảm được các vết nứt nhiệt ở giai đoạn đầu nhiệt thủy hóa, thông qua việc lập kế hoạch trình tự và thời gian đổ bê tông bằng cách chia một đợt đổ thành nhiều đợt đổ nhỏ hơn; Castilho, E. và cộng sự [24] cũng đã sử dụng phương pháp số nhằm phân tích nhiệt độ thủy hóa của kết cấu bê tông khối lớn dạng đập. Họ chỉ ra rằng các yếu tố như: khí hậu, vật liệu bê tông và phương pháp thi công sẽ ảnh hưởng lớn đến nhiệt thủy hóa của kết cấu bê tông đập. Cùng với đó De Rojas, M. S. và cộng sự [25] cũng đã trình bày sử dụng phương pháp Langavant Calorimeter trên xi măng portland và các vật liệu bổ sung khác nhau để nghiên cứu tác động của chúng lên nhiệt thủy hóa đối với xi măng; Zheng, J. L. và cộng sự [26] đã nghiên cứu và phân tích sự ảnh hưởng của hàm lượng tro bay đến hiện tượng nứt ở giai đoạn đầu của bê tông chày. Họ phát hiện hiệu suất nứt của bê tông chày được cải thiện khi mà tăng hàm lượng tro bay, với điều kiện liều lượng thấp hơn mức tối ưu; Groth, P., và Hedlund, H. [27] đã nghiên cứu và phát triển một phương pháp thử

nghiệm để sử dụng để thiết lập mối quan hệ giữa hệ số truyền nhiệt và dòng chảy trong các đường ống của hệ thống ống thoát nhiệt.

Tại Việt Nam cũng đã có nhiều tài liệu nghiên cứu về vấn đề nhiệt thủy hóa trong kết cấu bê tông khối lớn cũng như biện pháp để kiểm soát vấn đề này chẳng hạn như: Minh, L. V., và Mạnh, L. Đình [28] cũng đã nghiên cứu sự ảnh hưởng của các thông số của hệ thống ống thoát nhiệt đến trường nhiệt độ và chỉ số nứt của kết cấu bê tông khối lớn bằng phần tử hữu hạn Midas Civil 2022. Hà, L.H và cộng sự [29] đã nghiên cứu quy luật về cấp phối và bề dày của mỗi lớp cấp phối nhằm mục tiêu kiểm soát chênh lệch nhiệt độ cho kết cấu bê tông khối lớn, thông qua mô phỏng sử dụng công cụ phân tích Midas Civil; Biện pháp đổ bê tông liên tục và sử dụng hai lớp cấp phối bê tông tỏa nhiệt khác nhau lần đầu tiên được triển khai tại Việt Nam trong quá trình xây dựng đài móng của Lotte Center Hà Nội. Bên cạnh việc sử dụng hai lớp cấp phối có mức độ tỏa nhiệt khác nhau nhằm kiểm soát sự chênh lệch nhiệt độ giữa trung tâm và bề mặt của khối bê tông, biện pháp bảo dưỡng cũng đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát nhiệt độ khi thi công theo công nghệ này. Cụ thể, phương pháp bảo dưỡng được áp dụng là giữ nhiệt cho bê tông. Bề mặt bê tông được phủ bằng các vật liệu cách nhiệt. Đây là một hình thức bảo dưỡng khô, không yêu cầu sử dụng nước; Công, V. C. [30] đã giải quyết bài toán kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn được thi công bằng phương pháp đổ liên tục kết hợp phân chia lớp đổ với cấp phối tỏa nhiệt khác nhau gồm lớp cấp dưới có bê tông tỏa nhiệt thấp còn lớp trên có cấp phối tỏa nhiệt nhiều; Thực, L. V., và Hùng, N. M. sử dụng hệ thống ống làm lạnh để mô phỏng đánh giá hiệu quả của ống làm lạnh trong khối bê tông và còn sử dụng 4 mô hình với thời gian tuần hoàn nước lạnh khác nhau đã được phân tích để lựa chọn thời gian làm lạnh tối ưu.

Các nghiên cứu trước đây tập trung phân tích chủ yếu là đài móng tòa nhà cao tầng, đập bê tông và khối bê tông đầm chuyển để phân tích nhiệt thủy hóa giai đoạn đầu. Và các dự án như vậy thường sẽ được thi công ngoài trời. Tuy nhiên, đối với các công trình hầm bê tông dưới lòng đất, điều kiện biên lại hoàn toàn khác biệt: Toàn bộ kết cấu hầm được bao bọc bởi khối đất đá, một môi trường có khả năng cách nhiệt và tích tụ nhiệt rất cao. Trong khi một mặt của kết cấu có thể tiếp xúc với ván khuôn thép (tản nhiệt nhanh), mặt đối diện lại truyền nhiệt vào khối đất xung quanh – vốn có hệ số dẫn nhiệt thấp và ổn định nhiệt lâu dài. Ngoài ra, trong quá trình thi công hầm, điều kiện về áp lực nước ngầm, thông gió, cũng như không gian hạn chế sẽ làm tăng thêm khó khăn trong việc kiểm soát nhiệt độ và ứng suất nhiệt. Với những đặc điểm này cho thấy cần phải có những nghiên cứu riêng cho hầm bê tông – thay vì chỉ kế thừa các kết quả nghiên cứu từ đập, đầm chuyển hoặc kết cấu đài móng. Ngoài ra, các hầm nông như hầm metro cũng có thể được tận dụng hiệu quả để sản xuất nhiệt địa nhiệt. Trên thế giới, đã có một số nghiên cứu đã bắt đầu đề cập vấn đề đến tính đặc thù của ứng xử nhiệt trong hầm. Chẳng hạn Adam và Markiewicz [31] đã ứng dụng đầu tiên ở hầm Lainzer (Áo), Unterberge và cộng sự [32] đã phân biệt phương pháp thi công đào hở và đào ngầm cho việc lắp đặt bộ hấp thụ nhiệt. Các giải pháp mới như khi thi công hầm bằng máy đào TBM (Tunnel Boring Machine), các vỏ hầm bê tông lắp ghép (segmental lining) được tối ưu hóa cho trao đổi

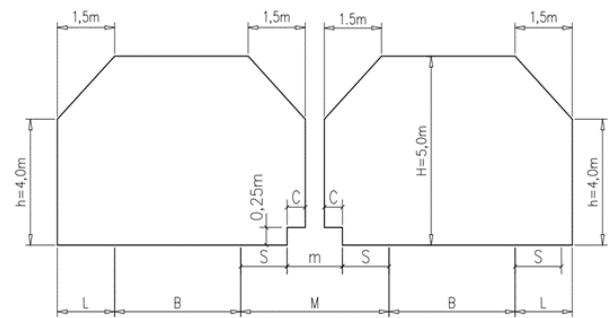
hiệt sẽ được đúc sẵn tại nhà máy rồi lắp đặt tại hiện trường [33, 34]. Hệ thống này cũng có thể cho phép làm mát hầm bằng cách sử dụng lượng nhiệt sinh ra bên trong do tàu hoặc xe di chuyển tốc độ cao. Bên cạnh đó, Barla & Di Donna [35] đã gợi ý tận dụng nhiệt từ tàu di chuyển và phân phối nhiệt qua giếng thông gió hoặc cửa hầm, trong khi Barla và cộng sự [36] đã ứng dụng hệ thống ống thoát nhiệt trong khối bê tông với các ống dẫn được thiết kế để chịu áp suất và nhiệt độ cao, chống ăn mòn và đảm bảo độ bền lâu dài. Nhờ đó, với dòng chảy nước ngầm vuông góc trục hầm, có thể giảm tổn thất cột nước 20–30 %; Barla, Di Donna và Insana [37] đã triển khai nghiên cứu kiểm chứng kết quả mô phỏng và cung cấp dữ liệu định lượng cho các ứng dụng tương lai về trao đổi nhiệt, các hầm nhiệt hoạt động có thể đạt khoảng 10–20 W/m² khi không có dòng ngầm, và 50–60 W/m² khi có dòng ngầm mạnh. Ngoài ra, Di Donna và cộng sự [38] nhấn mạnh rằng hầm thường nằm trong đất bão hòa với lớp phủ lớn nên ít chịu ảnh hưởng nhiệt độ khí quyển, giúp nâng cao tiềm năng trao đổi nhiệt; Một khía cạnh khác cần đặc biệt lưu ý với hầm là ảnh hưởng của nhiệt độ và tốc độ không khí bên trong hầm hoặc không gian ngầm. Các kết cấu này sẽ trao đổi nhiệt không chỉ với đất mà còn với không khí bên trong. Trong trường hợp hầm nóng, đây có thể là nguồn nhiệt bổ sung vào mùa đông, nhưng lại là gánh nặng nhiệt vào mùa hè. Nguyễn Trọng Chức [39] đã mô hình được sử dụng để mô phỏng sự phân bố nhiệt độ và ứng suất nhiệt trong vỏ hầm bê tông, đồng thời thực hiện nghiên cứu tham số. Kết quả trường nhiệt độ và ứng suất được dự báo trong điều kiện thi công tại Việt Nam. Những kết quả này giúp các kỹ sư có thể đưa ra các biện pháp phù hợp để kiểm soát sự hình thành vết nứt ở tuổi sớm trước khi thi công.

Chính trong bối cảnh đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm mục tiêu làm sáng tỏ ứng xử nhiệt cụ thể của kết cấu hầm bê tông. Thông qua mô phỏng số bằng phần mềm Midas Civil 2022, bài báo sẽ phân tích chi tiết sự hình thành và phát triển của trường nhiệt độ, trường ứng suất và trường chỉ số nứt trong điều kiện biên mô phỏng chân thực môi trường đất đá bao quanh. Đặc biệt, nghiên cứu sẽ đánh giá hiệu quả của biện pháp kiểm soát nhiệt bằng lớp phủ polystyrene – một giải pháp khả thi trong không gian hạn chế của hầm. Bằng cách tập trung trực tiếp vào đối tượng kết cấu hầm và các vấn đề nhiệt đặc thù của nó. Những kết quả nghiên cứu này đóng vai trò là tài liệu tham khảo có giá trị trong việc kiểm soát nhiệt độ thủy hóa của kết cấu hầm bê tông tại Việt Nam.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Trong nghiên cứu này nhóm tác giả nghiên cứu ứng xử của kết cấu hầm bê tông dưới đất do nhiệt thủy hoá xi măng trong giai đoạn đầu đông rắn, cụ thể hoá là phân tích trường nhiệt độ, trường ứng suất và trường chỉ số nứt ở giai đoạn đầu đông rắn của kết cấu hầm bê tông cốt thép dưới đất được thi công theo phân đoạn và sử dụng giải pháp ủ nhiệt bề mặt. Kích thước khối bê tông hầm sẽ dựa vào tiêu chuẩn TCVN 5729:2012 [40] giả sử đây là đường hầm cao tốc và lưu lượng xe đi với vận tốc 80km/h. Kích thước khối hầm như Hình 1 cùng với các thông số khối hầm như Bảng 2. Kích thước khối bê tông hầm được mô phỏng bằng phần tử hữu hạn được thể hiện ở Hình 2a và Hình 2b.



Hình 1. Giới hạn tính không phía trên đường cao tốc.

Từ các thông số mặt cắt ngang khối hầm ở Bảng 2, sử dụng thiết kế hầm có đường kính là 11,4m, chiều dài hầm là 50m như Hình 2 và với các tiện ích được thiết kế trong hầm như Hình 3.

Sử dụng giải pháp thi công theo phân đợt kết hợp với biện pháp ủ nhiệt bề mặt, chiều dài hầm với mỗi đợt thi công được chia thành các modul 5 m như Hình 4a và Hình 4b. Điều kiện biên sử dụng trong phân tích mô hình được thể hiện như Hình 4c.

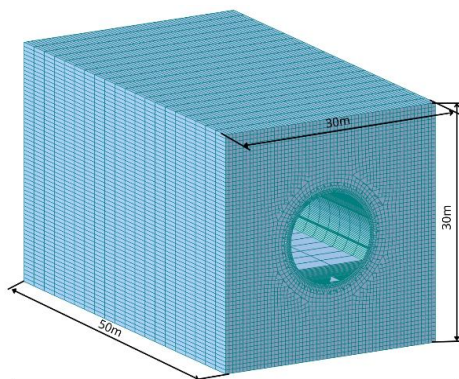
Giả sử trong quá trình xây dựng nhiệt độ nền đất giả định là 25 °C, nhiệt độ hỗn hợp bê tông ban đầu là 25 °C. Các tính chất của nền đất và bê tông được trình bày trong Bảng 3. Cấp phối bê tông dùng cho mẫu phân tích như Bảng 2.

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 [9-14].

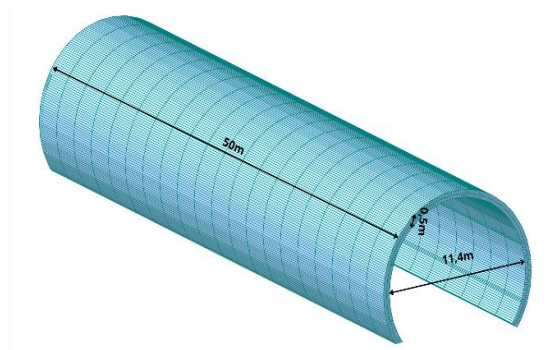
Chỉ số	Giá trị
ΔT	$< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
ΔT	$\Delta T < \frac{3,7\varepsilon}{\alpha}$
$\Delta T/h$	$< 50\text{ }^{\circ}\text{C/m}$
Các yêu cầu về kiểm soát nứt do nhiệt	Chỉ số nứt nhiệt độ(I_{cr})
Không xuất hiện mọi vết nứt do nhiệt	$I_{cr} \geq 1,5$
Có thể hạn chế vết nứt do nhiệt	$1,2 \leq I_{cr} \leq 1,5$
Có khả năng xuất hiện các vết nứt nguy hiểm do nhiệt	$I_{cr} \leq 1,2$

Bảng 2. Bảng thông số mặt cắt ngang giới hạn tính không phía trên đường cao tốc.

Cấu tạo dải phân cách	Lề		(B) Mặt đường (phần xe chạy) (m)	(C) Bó vỉa (m)
	(L) Dải Trồng cỏ (m)	(S) Dải an toàn (lề gia cố) (m)		
Có lớp phủ, có bố trí trụ công trình	0,75	2,5	7	0,3

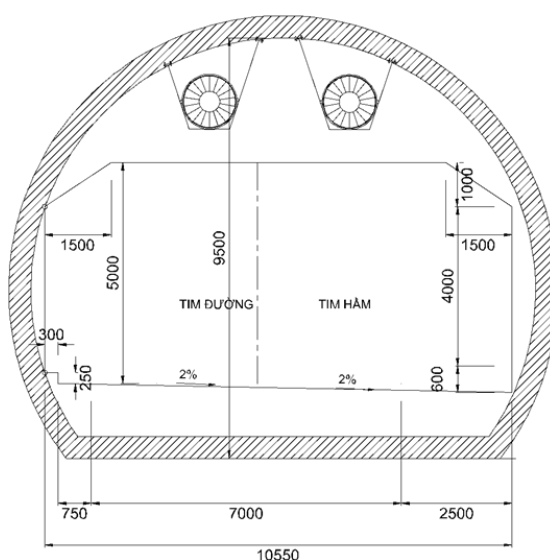


(a) Mô hình tổng thể kết cấu hầm dưới đất

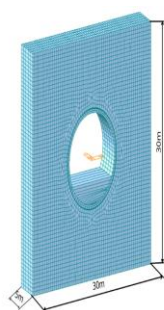


(b) Mô hình tổng thể kết cấu hầm

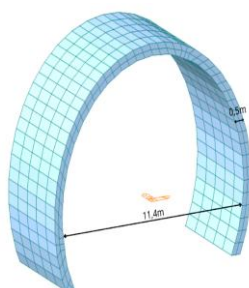
Hình 2. Mô hình nghiên cứu đối tượng kết cấu hầm dưới đất.



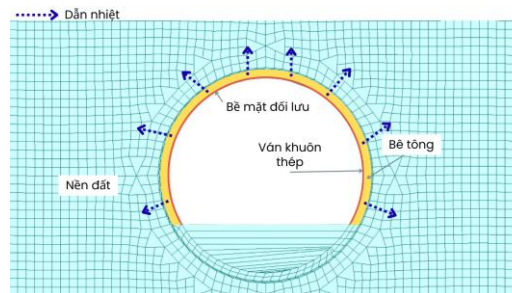
Hình 3. Mặt cắt ngang kết cấu hầm.



(a) Mô hình hóa kết cấu hầm dưới đất



(b) Mô hình kết cấu hầm mô phỏng bằng
Midas Civil



(c) Điều kiện biên sử dụng trong phân tích mô hình

Hình 4. Mô hình đối tượng phân tích trong tính toán theo phân đoạn thi công.

Bảng 2. Bảng cấp phối Bê tông B35.

Vật liệu	Giá trị	Đơn vị
Cát	765	kg
Đá	1.100	kg
Nước	101	lít
Bột	420	kg/m ³
Xi măng	308	kg
Tro bay	112	kg
Phụ gia siêu dẻo	5,13	(lít)

Bảng 3. Thông số đầu vào của kết cấu hầm [41, 42].

Đặc điểm	Bê tông	Lớp đất
Nhiệt dung riêng, (kcal/kg.°C)	0,25	0,22
Khối lượng riêng, (kgf/m ³)	2.500	1.800
Hệ số dẫn nhiệt, (kcal/m.h.°C)	2,3	1,7
Hệ số trao đổi nhiệt, (kcal/m ² .h.°C)	Khi tiếp xúc với môi trường	12
	Khi tiếp xúc với ván khuôn thép	14
Nhiệt độ bảo dưỡng – nhiệt độ ủ nhiệt, (°C)	27	
Cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi, (kgf/m ²)	4.000.000	
Hệ số tăng cường độ nén	$a = 13$ $b = 0,8$	
Môđun đàn hồi ở 28 ngày tuổi, (kgf/m ²)	$3,5894 \times 10^9$	$1,0 \times 10^4$
Hệ số giãn nở nhiệt	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5}$
Hệ số poisson's	0,2	0,2

2.2. Lý thuyết xác định sự phân bố nhiệt độ thủy hóa của xi măng

Phương pháp phần tử hữu hạn của trường nhiệt độ: Theo các nghiên cứu của Bofang, Z. [4] Mô hình số của bài toán không cố định nhiệt độ khi có tính đến sự giải phóng nhiệt trong quá trình thủy hóa xi măng dựa trên nghiệm của phương trình (1) lý thuyết dẫn nhiệt:

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

trong đó T là nhiệt độ vật liệu (°C); k_x, k_y, k_z là hệ số dẫn nhiệt của vật liệu theo các hướng x, y và z tương ứng; $q(t)$ là tốc độ sinh nhiệt trên một đơn vị thể tích (kcal/m³); c là nhiệt dung riêng (kcal/kg. °C); ρ là khối lượng thể tích vật liệu (kg/m³); t là thời gian (ngày).

$q(t)$ là nhiệt độ đoạn nhiệt tăng lên trong bê tông do quá trình hydrat hóa xi măng, $q(t)$ được biểu thị thông qua hàm số mũ của thời gian (hoặc tuổi của bê tông), t , như trong phương trình (2) sau [4]:

$$q(t) = q_{\infty} (1 - e^{-r \cdot t}) \quad (2)$$

trong đó q_{∞} đề cập đến mức tăng nhiệt độ cuối cùng trong bê tông và r là hằng số thực nghiệm.

Trong bài toán truyền nhiệt điều kiện biên sẽ được xem xét như các phương trình (3), (4) và (5) [4]:

Tại mặt tiếp xúc của khối bê tông với nền đất:

$$T(x, y, z, t) = T_0 \quad (3)$$

Tại mặt thoát của khối bê tông:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l + k_y \frac{\partial T}{\partial y} m + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n + q = 0 \quad (4)$$

Tại mặt tiếp xúc với ván khuôn:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l + k_y \frac{\partial T}{\partial y} m + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n + h(T - T_{\infty}) = 0 \quad (5)$$

trong đó: h : Là hệ số đối lưu (W/m²K); T_{∞} : Là nhiệt độ bão hòa (môi trường xung quanh)°C; l, m, n là cosin chỉ hướng của các mặt truyền nhiệt đang xét; q : Lưu lượng dòng nhiệt (W/m³).

Trong nghiên cứu giải bài toán nhiệt thủy hóa của kết cấu hầm, phương pháp số giải phương trình vi phân được sử dụng là phương pháp phần tử hữu hạn. Và tất cả nhiệm vụ trong công việc này đã được phần mềm Midas Civil 2022 trợ giúp để đưa ra kết quả về trường nhiệt độ, chênh lệch nhiệt độ, trường ứng suất và chỉ số nứt của kết cấu bê tông hầm dưới đất.

2.3. Mối quan hệ của ứng suất nhiệt với trường nhiệt độ trong khối bê tông

Khi chênh lệch nhiệt độ ΔT giữa các phần trong khối bê tông tăng lên sẽ dẫn tới sự gia tăng tương ứng của ứng suất nhiệt trong khối bê tông. Mối quan hệ giữa ứng suất nhiệt trong khối bê tông và chênh lệch nhiệt độ có thể được mô tả theo phương trình (6) như sau [43]:

$$\sigma = E \times \beta \times R \times \Delta T \quad (6)$$

trong đó: σ là vectơ ứng suất tại điểm khảo sát (Kg/m²); R là ký hiệu cho ma trận khả năng chống biến dạng của bê tông, ma trận này mô tả việc bê tông chống lại biến dạng dưới ứng suất và điều kiện biên

khác nhau; E là mô đun đàn hồi (Kg/m^2); β là hệ số giãn nở nhiệt của bê tông.

2.4. Chỉ số nứt của kết cấu bê tông khối

Chỉ số nứt I_{cr} của bê tông được xác định theo phương trình (7) [24]:

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

trong đó $f_t(t_e)$: Là giá trị cường độ kéo của bê tông tại thời điểm t_e (kgf/m^2) xác định theo phương trình (8); $\sigma_t(t_e)$: Ứng suất kéo trong kết cấu bê tông tại thời điểm t_e (kgf/m^2). Về lý thuyết thì khi giá trị của $I_{cr} < 1$ thì cấu kiện sẽ xuất hiện các vết nứt.

$$f_t(t_e) = C_1 \cdot f_c'(t_e)^{C_2} \quad (8)$$

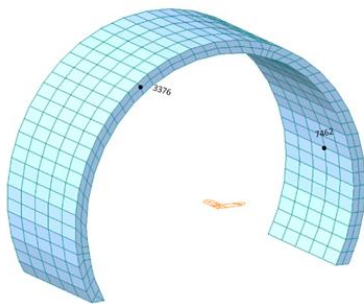
trong đó: $f_c'(t_e)$: Là giá trị cường độ nén của bê tông tại thời điểm t_e (kgf/m^2) xác định theo phương trình (9); C_1, C_2 : Là hằng số phụ thuộc vào loại bê tông

$$f_c'(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b(t_e - S_f)} f_c'(t_n) \quad (9)$$

trong đó: t_e : Là tuổi chỉnh nhiệt độ (ngày); t_n : Là tuổi kiểm soát cường độ của bê tông dưỡng hộ dưới nước 20°C (ngày); a, b : Các thông số thể hiện phát triển cường độ, phụ thuộc loại xi măng (ngày); $f_c'(t_n)$: Cường độ nén của bê tông tại t_n (kgf/m^2).

3. Kết quả và thảo luận

Để có thể quan sát ứng xử nhiệt của kết cấu hầm dưới đất, cần theo dõi sự phát triển của trường nhiệt độ, chênh lệch nhiệt độ, trường ứng suất, trường chỉ số nứt trong khối bê tông. Việc nghiên cứu 2 điểm trong khối bê tông tâm lẫn lượt đặt ở tâm (7462) và bề mặt (3376) như Hình 5 sẽ tạo điều kiện cho việc xây dựng các biểu đồ. Những biểu đồ này sẽ giúp ta theo dõi được ứng xử của kết cấu hầm bê tông dưới đất được thi công theo từng phân đoạn và xử dụng giải pháp ủ nhiệt – duy trì nhiệt độ bảo dưỡng bề mặt.

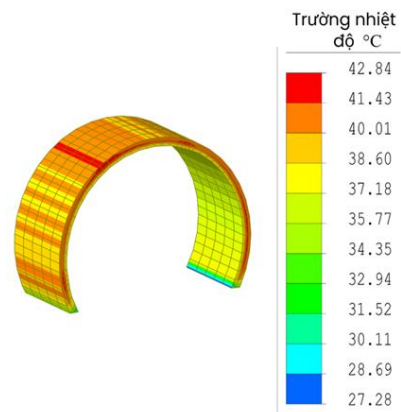


Hình 5. Các điểm khảo sát của kết cấu bê tông hầm.

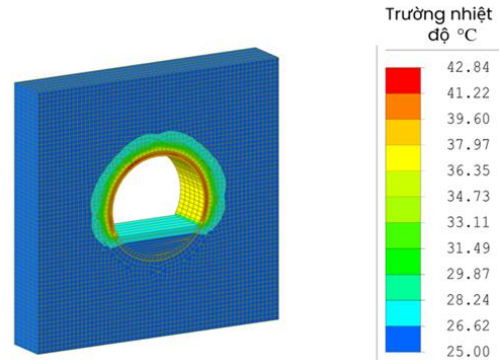
3.1. Nhiệt độ lớn nhất, chênh lệch nhiệt độ và ứng suất trong kết cấu bê tông hầm

Dựa vào kết quả thu được từ phần mềm mô phỏng phân tích kết cấu Midas Civil 2022. Từ Hình 6 và Hình 7 ta có thể thấy nhiệt độ cao nhất tại vị trí tâm của kết cấu hầm là $T_{max} = 42,84^\circ\text{C}$ và xuất hiện tại

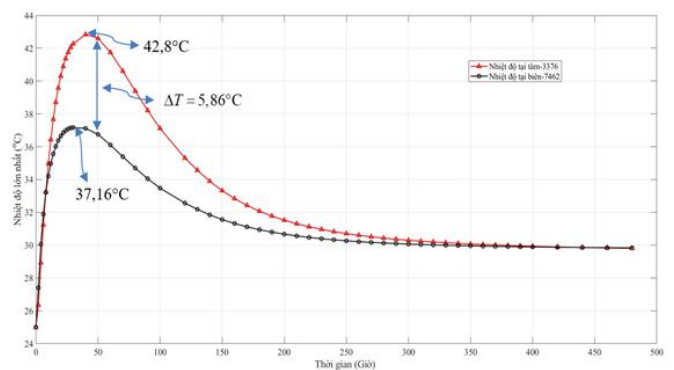
thời điểm 40 giờ sau khi đổ bê tông. Tại vị trí biên kết cấu có nhiệt độ lớn nhất là $37,16^\circ\text{C}$ xuất hiện tại thời điểm 30 giờ sau khi đổ. Sau thời điểm trên nhiệt độ sẽ giảm dần như Hình 8. Nhiệt độ tại bề mặt và tâm kết cấu phù hợp với điều kiện giới hạn nhiệt độ tối đa của kết cấu là $< 70^\circ\text{C}$ của kết cấu khối bê tông. Bên cạnh đó, chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa tâm và bề mặt khối bê tông hầm với kết quả $\Delta T = 5,86^\circ\text{C}$. Theo đó, giá trị chênh lệch nhiệt độ này nằm trong ngưỡng khuyến cáo của tiêu chuẩn TCVN 9341:2012 [10]. Dựa trên việc phân tích sự phân bố nhiệt độ từ kết cấu bê tông hầm, ở Hình 7 có thể nhận thấy rằng nhiệt độ lớn nhất của bê tông hầm đã làm ảnh hưởng đến nhiệt độ nền đất xung quanh. Cụ thể, nhiệt độ nền đất đang từ 25°C tăng lên khoảng $31,7^\circ\text{C}$.



Hình 6. Phân bố trường nhiệt của kết cấu bê tông hầm.



Hình 7. Phân bố trường nhiệt của kết cấu bê tông hầm trong lòng đất.

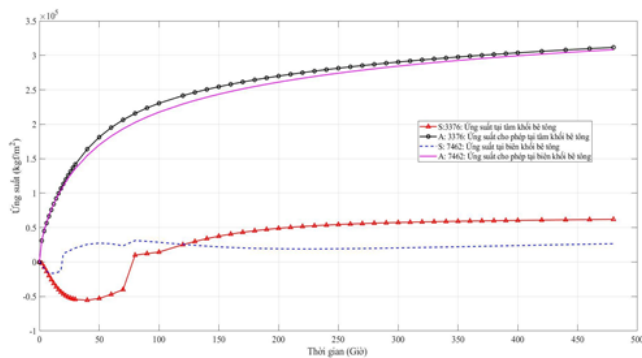


Hình 8. Biểu đồ nhiệt độ lớn nhất và chênh lệch nhiệt độ tại hai điểm khảo sát tâm và lớp bề mặt biên của kết cấu bê tông hầm.

Kết quả phân tích cho thấy ứng suất tại tâm khối bê tông hầm (S:N3376) và tại biên khối bê tông hầm (S:N7462) như Hình 9 có xu hướng biến thiên rõ rệt trong giai đoạn đầu, sau đó tiến tới trạng thái ổn định. Trong 50 giờ đầu, ứng suất tại tâm khối bê tông hầm giảm nhanh từ giá trị nén ban đầu xuống kéo cực đại khoảng $-5,54 \times 10^4$ (kgf/m²) (tại 40 giờ), sau đó đảo chiều và tăng dần, chuyển sang trạng thái nén. Đến khoảng 90 giờ, giá trị ứng suất đạt $\sim 1,23 \times 10^4$ (kgf/m²) và tiếp tục tăng chậm cho đến khi ổn định quanh $6,2 \times 10^4$ (kgf/m²) ở cuối chu kỳ (480 giờ).

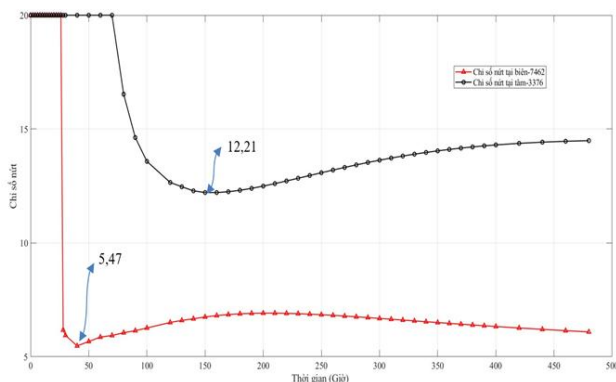
Tại biên khối bê tông hầm, ứng suất ban đầu ở trạng thái kéo nhẹ, sau đó tăng nhanh và duy trì ở mức nén từ sớm. Từ 20 giờ trở đi, giá trị ứng suất đã dương $\sim 1,23 \times 10^4$ (kgf/m²) và tiếp tục tăng ổn định, đạt khoảng $2,66 \times 10^4$ (kgf/m²) tại 480 giờ.

So sánh với ứng suất cho phép tại tâm (A:N3376) và tại biên (A:N7462) cho thấy trong toàn bộ quá trình, giá trị thực tế luôn thấp hơn đáng kể so với giới hạn cho phép. Điều này chứng tỏ kết cấu làm việc an toàn về mặt ứng suất, không xuất hiện nguy cơ phá hoại do vượt quá khả năng chịu lực. Tuy nhiên, giai đoạn đầu xuất hiện ứng suất kéo tại tâm có thể tiềm ẩn nguy cơ nứt nhiệt hoặc nứt co ngót sớm, đòi hỏi cần có biện pháp kiểm soát nhiệt thủy hóa và bảo dưỡng bê tông hợp lý.



Hình 9. Biểu đồ ứng suất tại hai điểm khảo sát tâm và lớp bề mặt biên của kết cấu bê tông hầm.

3.2. Chỉ số nứt của kết cấu bê tông hầm



Hình 10. Biểu đồ chỉ số nứt tại hai điểm khảo sát tâm và lớp bề mặt biên của kết cấu bê tông hầm.

Kết quả tính toán chỉ số nứt của hai điểm (phần tử) ở một thời điểm nhất định của kết cấu như Hình 10. Ta đánh giá trên khía cạnh chỉ số nứt, nếu khối bê tông hầm có $I_{cr} < 1$ thì sẽ bắt đầu có hiện tượng nứt xảy ra trong kết cấu bê tông. Do đó, ta có thể nhận thấy rằng chỉ số nứt của kết cấu bê tông hầm với cả 2 điểm khảo sát ở mặt tâm và biên khối bê tông luôn lớn hơn 1. Tại điểm khảo sát ở tâm khối bê tông hầm cho kết quả $I_{cr} = 12,21$, còn ở biên khối bê tông hầm thì chỉ số nứt nhỏ nhất là $I_{cr} = 5,47$. Đối chiếu với các điều kiện kiểm soát nứt ở tuổi đầu bê tông thì khối bê tông hầm đáp ứng yêu cầu về hạn chế nứt do nhiệt trong giai đoạn nhiệt thủy hóa.

Từ kết quả mô phỏng tính toán bằng phần mềm Midas Civil 2022 của phương pháp sử dụng ủ nhiệt tại mặt biên của khối bê tông hầm cho ta thấy rằng, với bê tông hầm thì nhiệt độ sẽ tăng liên tục 25 giờ đầu đổ bê tông ở cả bề mặt biên và tâm khối bê tông. Với giải pháp thi công phân thành các đợt nhỏ và kết hợp với ủ nhiệt bề mặt, do đó, ta thấy rằng chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt của khối bê tông hầm là tương đối nhỏ. Giá trị chỉ số nứt nhiệt tại tâm và lớp bề mặt biên của kết cấu khối bê tông đều nằm trong ngưỡng cho phép theo điều kiện kiểm soát nứt, kết cấu hầm dưới đất không bị xuất hiện các vết nứt do nhiệt. Tuy nhiên cần lưu ý rằng trong giai đoạn nhiệt thủy hóa, chỉ số nứt của các lớp bê tông tại tâm giảm dần và đạt giá trị nhỏ nhất ở thời điểm mà nhiệt độ tại tâm đạt cực đại. Đây là thời điểm khiến bê tông sẽ có nguy cơ nứt cao nhất.

Mặc dù chiều dày vỏ hầm chỉ 0,5 m, nhỏ hơn nhiều so với các kết cấu bê tông khối lớn truyền thống (đập, bể trụ cầu...), nhưng nguy cơ nứt nhiệt vẫn xuất hiện khi tiến hành thi công liên tục trên chiều dài lớn. Nhiệt lượng sinh ra không chỉ phụ thuộc chiều dày, mà còn phụ thuộc vào khối lượng bê tông thủy hóa cùng lúc, khiến khả năng tản nhiệt bị hạn chế. Bên cạnh đấy, điều kiện biên đặc thù của hầm: một mặt kết cấu tiếp xúc với đất đá xung quanh có khả năng giữ nhiệt, mặt còn lại tiếp xúc với ván khuôn thép và lớp cách nhiệt, dẫn đến quá trình truyền nhiệt không đồng đều. Điều này dễ tạo ra gradient nhiệt giữa tâm và bề mặt, gây ứng suất kéo nội bộ. Và việc thi công công trình ngầm thường là ở trong không gian kín, thông gió tự nhiên kém khiến nhiệt tỏa ra từ bê tông bị giữ lại trong không gian hầm, làm gia tăng nhiệt độ môi trường xung quanh và giảm hiệu quả tản nhiệt. Mặt khác, ở giai đoạn đầu, cường độ chịu kéo của bê tông rất thấp. Chỉ cần chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt vượt quá giới hạn cho phép là có thể xuất hiện vết nứt. Do đó, việc thi công kết cấu hầm có khối tích lớn theo chiều dài trong điều kiện ngầm cũng cần phải có giải pháp phù hợp để kiểm soát hiện tượng nứt do nhiệt thủy hoá xi măng.

4. Kết luận

Với việc sử dụng biện pháp ủ nhiệt tại mặt biên kết hợp với biện pháp thi công theo phân đoạn cho kết cấu bê tông hầm ở dưới lòng đất có thể làm giảm đi nhiệt độ cực đại tại tâm và chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt của kết cấu bê tông đồng thời làm tăng chỉ số nứt. Đối chiếu với các điều kiện kiểm soát nứt do nhiệt thủy hoá xi măng thì

thấy rằng sẽ không có hiện tượng xảy ra nứt ở bề mặt khối bê tông cũng như tại tâm khối bê tông kết cấu hầm.

Phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng bằng mô phỏng mô hình Midas Civil 2022 cho phép chúng ta xác định được các biểu đồ nhiệt độ, ứng suất và giá trị chỉ số nứt của kết cấu bê tông hầm dưới đất ở các thời điểm, vị trí khác nhau trong giai đoạn đầu nhiệt thủy hóa. Kết quả phân tích với phân đoạn đổ bê tông hầm có chiều dài 5m kết hợp với giải pháp ủ nhiệt thì ứng xử nhiệt trong kết cấu hầm cho thấy các trị số nhiệt độ lớn nhất là T_{max} , chênh lệch nhiệt độ lớn nhất giữa các điểm là $\Delta T = 5,86^{\circ}\text{C}$ và chỉ số nứt nhỏ nhất là $I_{cr} = 5,47$ đều nằm trong giới hạn của điều kiện kiểm soát nứt do nhiệt, kết quả ứng xử nhiệt cho thấy kết cấu hầm không bị nứt.

Các nghiên cứu tiếp theo cần mở rộng phân tích ứng xử của kết cấu hầm dưới đất do nhiệt thủy hoá xi măng với nhiều cấp phối, chiều dày vỏ hầm và điều kiện địa chất khác nhau, đồng thời đánh giá hiệu quả kinh tế – kỹ thuật của các giải pháp kết hợp như ủ nhiệt và làm mát bằng nước tuần hoàn, từ đó xây dựng bộ dữ liệu tham khảo phục vụ thiết kế và thi công hầm dưới đất an toàn, bền vững.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Korda, E., De Schutter, G., & Aggelis, D. G. (2024). Acoustic signatures of hydration and microcracking in early-age concrete. *Developments in the Built Environment*, 17.
- [2]. Qin, C., Gong, J., Xie, G., He, J., Liu, L., Yang, H., & Deng, C. (2023). Non-hypothetical projection pursuit regression for the prediction of hydration heat of Portland-cement-based cementitious system. *Heliyon*, 9(9).
- [3]. 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, ĐHXD*, 14(12).
- [4]. Bofang, Z. (2014). *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-06038-3>.
- [5]. Schackow, A., Effting, C., Gomes, I. R., Patruni, I. Z., Vicenzi, F., & Kramel, C. (2016). Temperature variation in concrete samples due to cement hydration. *Applied thermal engineering*, 103: 1362-1369.
- [6]. Do, T. A., Hoang, T. T., Bui-Tien, T., Hoang, H. V., Do, T. D., & Nguyen, P. A. (2020). Evaluation of heat of hydration, temperature evolution and thermal cracking risk in high-strength concrete at early ages. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21: 100658.
- [7]. 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.
- [8]. Tang, L. V., Nguyen, C. T., Bulgakov, B., Pham, A. N. (2018). Composition and early-age temperature regime in massive concrete foundation. *In MATEC Web of Conferences*, 196: 04017.
- [9]. Rahimi, A. and Noorzaei, J. (2011). Thermal and structural analysis of roller compacted concrete (R.C.C) dams by finite element code. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(12): 2761–2767.
- [10]. TCVN 9341:2012. *Bê tông khối lớn – Thi công và nghiệm thu*. Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [11]. Liu, X., Yuan, Y., & Su, Q. (2014). Sensitivity analysis of the early-age cracking risk in an immersed tunnel. *Structural Concrete*, 15(2): 179–190. <https://doi.org/10.1002/suco.201300064>.
- [12]. Chen, Y. Y., Chen, S. Y., Yang, C. J., & Chen, H. T. (2017). Effects of insulation materials on mass concrete with pozzolans. *Construction and Building Materials*, 137: 261-271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.059>.
- [13]. Zhang, X. F., Li, S. Y., Li, Y. L., Ge, Y., & Li, H. (2011). Effect of superficial insulation on roller-compacted concrete dams in cold regions. *Advances in Engineering Software*, 42(11): 939-943. 10.1016/j.advengsoft.2011.06.004
- [14]. Tong, Z. (2015, July). Cause and Influence of Mass Concrete Crack. *International Conference on Chemical, Material and Food Engineering*: 497-499.
- [15]. Lawrence, C. D. (1995). Mortar expansions due to delayed ettringite formation. Effects of curing period and temperature. *Cement and Concrete Research*, 25(4): 903-914.
- [16]. Taylor, H. F. W., Famy, C., & Scrivener, K. L. (2001). Delayed ettringite formation. *Cement and concrete research*, 31(5): 683-693.
- [17]. Odler, I., & Chen, Y. (1995). Effect of cement composition on the expansion of heat-cured cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 25(4): 853-862.
- [18]. Burgher, B., Thibonnier, A., Folliard, K. J., Ley, T., & Thomas, M. (2008). *Investigation of the internal stresses caused by delayed ettringite formation in concrete*. University of Texas at Austin. Center for Transportation Research.
- [19]. Pavoiné, A., Brunetaud, X., & Divet, L. (2012). The impact of cement parameters on Delayed Ettringite Formation. *Cement and Concrete Composites*, 34(4): 521-528.
- [20]. Heinz, D., & Ludwig, U. (1986). Mechanism of subsequent ettringite formation in mortars and concretes after heat treatment. *In Proceeding of the 8th Int. Congr. on the Chem. of Cem.*
- [21]. Fairbairn, E. M., Silvos, M. M., Toledo Filho, R. D., Alves, J. L., & Ebecken, N. F. (2004). Optimization of mass concrete construction using genetic algorithms. *Computers & structures*, 82(2-3).
- [22]. Rita, M., Fairbairn, E., Ribeiro, F., Andrade, H., & Barbosa, H. (2018). Optimization of mass concrete construction using a twofold parallel genetic algorithm. *Applied Sciences*, 8(3).
- [23]. Bamforth, P. B. (2007). *Early-age thermal crack control in concrete*. London, UK: Construction Industry Research and Information Association (CIRIA).
- [24]. Castilho, E., Schlar, N., Tiago, C., & Farinha, M. L. B. (2018). FEA model for the simulation of the hydration process and temperature evolution during the concreting of an arch dam. *Engineering Structures*, 174: 165-177.
- [25]. De Rojas, M. S., Luxán, M. P. D., Frías, M., & Garcia, N. (1993). The influence of different additions on portland cement hydration heat. *Cement and Concrete Research*, 23(1): 46-54.
- [26]. Zheng, J. L., & Wang, X. F. (2009). Influence of fly ash on early-age cracking behavior of high-flowing concrete. *Journal of Central South University of Technology*, 16(2): 312-319.
- [27]. Groth, P., & Hedlund, H. (1998). Air cooling of concrete by means of embedded cooling pipes—Part II: Application in design. *Materials and Structures*, 31: 387-392.
- [28]. Minh, L. V., & Mạnh, L. Đình. (2024). Phân tích sự ảnh hưởng của các thông số ống thoát nhiệt đến trường nhiệt độ và trường chỉ số nứt của kết cấu bê tông khối lớn trong giai đoạn nhiệt thủy hóa. *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (TCKHCN XD) - ĐHXDHN*, 18(4V): 160-175.
- [29]. Hà, L. H., & Khoa, H. N., & Thực, L. V., & Công, V. C. (2022). Nghiên cứu cấp phối và phân chia lớp đổ khi thi công kết cấu bê tông khối lớn theo phương pháp đổ bê tông liên tục với cấp phối tỏa nhiệt khác nhau. *Tạp chí Kết cấu & Công nghệ Xây dựng*, 30.
- [30]. Công, V. C. (2023). Nghiên cứu xác định vị trí phân chia các lớp đổ tối ưu của kết cấu bê tông khối lớn thi công bằng phương pháp đổ liên tục kết hợp

- phân chia lớp đồ tỏa nhiệt khác nhau. *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng-Bộ Xây dựng*, 13(04).
- [31]. Adam, D., & Markiewicz, R. (2009). Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Geotechnique*, 59(3): 229-236. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.229>
- [32]. Unterberger, W., Hofinger, H., Grünstäudl, T., Adam, D., & Markiewicz, R. (2004). Utilization of Tunnels as Sources of Ground Heat and Cooling - Practical Applications in Austria. *Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS, Kyoto*: 421-426.
- [33]. Franzius, J. N., & Pralle, N. (2011). Turning segmental tunnels into sources of renewable energy. *Proceedings of the institution of civil engineers-civil engineering*, 164(1): 35-40. <https://doi.org/10.1680/cien.2011.164.1.35>
- [34]. Barla, M., & Perino, A. (2014). Geothermal heat from the Turin metro south extension tunnels. *Proceedings of the Worl tunnel Congress 2014:Tunnels for a better life*.
- [35]. Barla, M., & Di Donna, A. (2018). Energy tunnels: concept and design aspects. *Underground Space*, 3(4): 268-276. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.03.003>
- [36]. Barla, M., Di Donna, A., & Perino, A. (2016). Application of energy tunnels to an urban environment. *Geothermics*, 61(104-113). <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.01.014>
- [37]. Barla, M., DI DONNA, A., & Insana, A. (2017). Energy tunnel experimental site in Turin metro. *15th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (15th IACMAG)*: 1-10.
- [38]. Di Donna, A., Barla, M., & Amis, T. (2017). Energy Geostructures: Analysis from research and systems installed around the World. *DFI 2017: 42nd Annual Conference on Deep Foundations*: 1-11.
- [39]. Nguyen, T. C., Sofi, M., & Hoang, Q. L. (2024). Thermal stress evolution of tunnel wall during construction evolucija termičkih napona u zidu tunela u izgradnji. *structural integrity and life*, 24(3): 373-379. <https://doi.org/10.69644/ivk-2024-03-0372>
- [40]. Tiêu chuẩn Việt Nam, TCVN 5729:2012. *Đường ô tô cao tốc - Yêu cầu thiết kế*. Hà Nội 2012.
- [41]. Institute, Japan Concrete (2016). *Guidelines for Control of Cracking of Mass Concrete*. Japan.
- [42]. Technology, Midas Information (2004). *Heat of hydration - Analysis analysis manual version 7.0.1*.
- [43]. JCI (2008). *Guidelines for control of cracking of mass concrete*.