

Sự thay đổi nhiệt độ trong khối bê tông do nhiệt Hydrat: Nghiên cứu thí nghiệm và mô hình

Temperature variation in concrete blocks due to heat of Hydration: Experimental and modelling studies

Ngày nhận bài: 11/04/2018

Ngày sửa bài: 7/05/2018

Ngày chấp nhận đăng: 12/06/2018

**Nguyễn Văn Hường, Dương Minh Quang,
Nguyễn Quang Huy**

TÓM TẮT

Việc sử dụng bê tông khối lớn ngày nhiều trong các công trình xây dựng. Đặc trưng cơ bản nhất của bê tông khối lớn là ứng xử do nhiệt. Ứng xử này có thể dẫn đến sự giảm tuổi thọ và chất lượng, thậm chí phá hoại công trình. Vì vậy, việc ước lượng nhiệt hydrat, ứng suất nhiệt và vết nứt nhiệt trong kết cấu bê tông khối lớn là cần thiết. Yêu cầu kỹ thuật đối với bê tông khối lớn là sự chênh lệch nhiệt độ không vượt quá 20°C và nhiệt độ lớn nhất trong khối đổ không vượt quá 70°C nhằm tránh hiện tượng hình thành ettringite gián đoạn. Bài báo này, chúng tôi dùng phần mềm phân tử hữu hạn Ansys kết hợp với thí nghiệm để ước lượng sự phát triển nhiệt độ của khối đổ cho cấp phối bê tông thiết kế trụ pin đập tràn của dự án hồ chứa nước Tân Mỹ. Do vậy, nguy cơ nứt do nhiệt có thể tránh được bằng việc chọn kích thước khối đổ và tiến độ thi công hợp lý.

Từ khóa: Bê tông khối lớn, nhiệt hydrat, ứng suất nhiệt, phân bố nhiệt; Tân Mỹ.

ABSTRACT

The application of mass concrete increases with the increasing construction of buildings. The most important characteristic of mass concrete is thermal behavior. This behavior may lead to the degradation of structural serviceability and quality even damage of structures. Therefore, estimating the hydration heat, thermal stresses and the thermal cracks in massive concrete structures is vital. Most of the mass concrete specifications limit the maximum temperature differential to 20°C with an allowable maximum in place temperature to about 70°C in order to prevent the phenomenon of delayed ettringite formation. In this paper, authors used the finite element software ANSYS combined with practical engineering to estimate the in-place temperature development for design mixture spillway Piers of Tan My reservoir project. Thus, the risk of thermal cracking can be avoided by choosing reasonable pour size and construction progress.

Key words: Mass Concrete; Hydration heat; Temperature Tensile; Temperature range; Tân Mỹ.

Nguyễn Văn Hường

Giảng viên, Khoa Xây Dựng Thủy Lợi - Thủy Điện, Trường Đại Học Bách Khoa – Đại Học Đà Nẵng

Dương Minh Quang

Tổng giám đốc Công ty Cổ phần Xây dựng 47.

Nguyễn Quang Huy

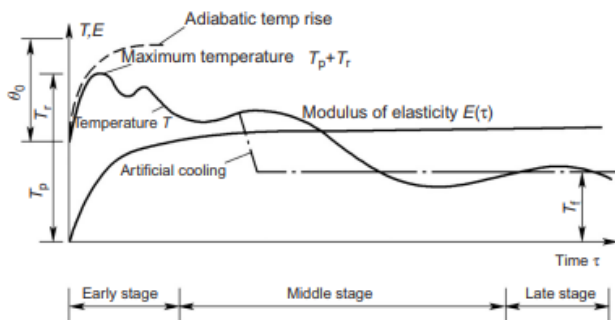
Khoa Xây Dựng Thủy Lợi - Thủy Điện, Trường Đại Học Bách Khoa – Đại Học Đà Nẵng.

1. Đặt vấn đề

Nhiệt do hydrat đã trở thành một chủ đề lớn sau những năm 1930 khi các đập bê tông lớn đã được xây trước đó bị phá hoại bởi nứt do nhiệt. Năm 1988 Hội đập lớn quốc tế (ICOLD) đã công bố báo cáo về tình trạng các đập bê tông lớn cho thấy: phần lớn các đập bê tông đã được xây dựng trên thế giới ít nhiều có biểu hiện các vết nứt do nhiệt và đã có 30 trên 243 đập bê tông bị hư hỏng nặng liên quan đến nhiệt độ [1]. Cho đến nay, các công trình xây dựng sử dụng bê tông khối lớn

ngày càng nhiều, có thể kể ra như: đập bê tông trọng lực, tràn xả lũ, buồng xoắn tuabin thủy điện, móng các trụ tháp, mố trụ cầu, móng nhà cao tầng,... Theo ACI [2] thì bê tông khối lớn được định nghĩa: "Kết cấu bê tông hoặc bê tông cốt thép được coi là khối lớn khi có kích thước đủ để gây ra ứng suất kéo, phát sinh do hiệu ứng nhiệt thủy hóa của xi măng, vượt quá giới hạn kéo của bê tông, làm nứt bê tông, và do đó cần có biện pháp để phòng ngừa vết nứt". Định nghĩa này cũng phù hợp TCXDVN 305:2004 [3].

Khi xi măng được trộn với nước, nhiệt sẽ được sinh ra từ phản ứng hóa học tỏa nhiệt giữa nước với xi măng và được gọi là nhiệt hydrat. Sự phát triển nhiệt độ và phân bố nhiệt trong bê tông khối lớn tùy thuộc vào cấp phối bê tông, hình dạng và kích thước khối đổ, loại ván khuôn, điều kiện môi trường [4]. Sự phát triển nhiệt độ do quá trình hydrat có thể gây ra hư hại cho bê tông khối lớn do nứt nhiệt (thermal cracking) và/ hay hình thành ettringite gián đoạn (delayed ettringite formation (DEF)). Thông thường bê tông khối lớn bị hư hỏng do DEF khi nhiệt độ trong khối đổ vượt quá 70°C, ettringite gián đoạn hình thành gây giãn nở hồ xi măng có thể dẫn đến nứt bê tông [5]. Nứt nhiệt trong bê tông khối lớn sinh ra khi có sự chênh lệch nhiệt độ trong khối bê tông vượt quá giới hạn (theo ACI 301-16 giới hạn chênh lệch nhiệt độ là 19°C [6]), sự chênh lệch nhiệt độ này gây ra ứng suất nhiệt và có thể dẫn đến nứt kết cấu [2, 6, 7].



Hình 1. Quá trình thay đổi nhiệt độ và mô đun đàn hồi theo thời gian [7]

Do có kích thước lớn nên quá trình thay đổi nhiệt độ và mô đun đàn hồi của bê tông khối lớn được biểu diễn như ở Hình 1 [7]: Ngay sau khi đổ, bê tông có nhiệt độ là T_p , nếu hoàn toàn không bị thất thoát nhiệt thì nhiệt độ của khối đổ sẽ phát triển theo quá trình đoạn nhiệt (Adiabatic temp rise) được thể hiện bằng đường nét đứt; tuy nhiên, trong thực tế thì nhiệt lượng có thể thất thoát qua các mặt của khối hoặc lớp đổ do đó nhiệt độ được biểu bị như đường nét liền (Temperature T), nhiệt độ lớn nhất đạt được là T_p+T_r (T_r là gia tăng nhiệt độ do hydrat của xi măng) sau đó giảm dần đến giá trị nhiệt độ gần ổn định T_r (quasi-steady temperature). Nhìn chung quá trình thay đổi nhiệt độ và mô đun đàn hồi có thể phân làm ba giai đoạn: (1). Giai đoạn đầu (Early stage): kể từ lúc đổ bê tông đến gần như kết thúc quá trình nhiệt thủy hóa xi măng. Giai đoạn này nhiệt độ khối đổ và mô đun đàn hồi phát triển nhanh theo thời gian; (2). Giai đoạn giữa (Middle stage): kể từ cuối giai đoạn đầu đến thời điểm nhiệt độ của khối bê tông đạt giá trị ổn định T_r . Trong giai đoạn này mô đun đàn hồi tăng nhẹ theo thời gian; (3).Giai đoạn sau (late stage): sau khi bê tông hoàn toàn nguội bằng nhiệt độ môi trường, ứng suất nhiệt chủ yếu là do sự thay đổi nhiệt độ môi trường xung quanh.

Việc kiểm soát sự phân bố nhiệt trong kết cấu bê tông khối lớn có nghĩa rất quan trọng vì nó liên quan trực tiếp đến chất lượng và độ bền công trình, tổ chức thi công (kích thước khối đổ, trình tự và thời gian cách quãng của các khối đổ,...) và hiệu quả kinh tế. Cho đến nay, để kiểm soát được phân bố nhiệt độ trong khối đổ có thể dùng cảm biến nhiệt để giám sát nhiệt độ ngoài hiện trường hoặc trong phòng thí nghiệm, dùng các mô hình toán để mô phỏng hoặc kết hợp giữa hai phương pháp này. Hiện nay, có một số phần mềm dùng để mô phỏng sự phân bố nhiệt do nhiệt hydrat của xi măng như: Ansys (Hoa Kỳ), Adina (Hoa Kỳ), Diana (Hà Lan), 4C-Temp&Stress (Đan Mạch), Midas (Hàn quốc),...

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn Ansys kết hợp với thí nghiệm để ước lượng sự phát triển nhiệt độ khối đổ cho cấp phối bê tông thiết kế trụ pin đập tràn của dự án hồ chứa nước Tân Mỹ - tỉnh Ninh Thuận. Kết quả đạt được bằng mô hình khá phù hợp với số liệu thực đo.

2. Nghiên cứu thực nghiệm

Để xác định một số thông số đầu vào cho phân tích nhiệt độ trong khối đổ bằng mô hình cũng như xác nhận sự phù hợp của kết quả mô phỏng so với thực nghiệm, nhóm tác giả đã tiến hành quan trắc sự phát triển cũng như phân bố nhiệt độ trong khối đổ mẫu.

- Cấp phối thí nghiệm: cấp phối được thiết kế trên cơ sở để áp dụng thi công cho hạng mục trụ pin đập tràn của dự án tràn xả lũ của hồ chứa nước Tân Mỹ với yêu cầu:

+ Mác bê tông thủy công M30(28), độ sụt $SN=6\pm 8$ cm;

+ Đá và cát nghiền từ mỏ Đ2 (nằm bên bờ phải Sông Cái, cách tuyến đập chính khoảng 2.5-3.0 km về phía hạ lưu thuộc xã Phước Hòa). Theo kết quả khảo sát, đá của mỏ Đ2 là loại đá granit hạt nhỏ đến hạt thô, cấu tạo khối, đá cứng chắc, cường độ chịu nén cao, độ nén dập trong xi lanh trung bình từ 8.6÷9.7%, độ mài mòn 19.7÷21.2%, không có khả năng gây phản ứng kiềm với các loại xi măng, đáp ứng được với yêu cầu về chất lượng đá dùng trong xây dựng.

+ Dự kiến sử dụng xi măng PCB40 của nhà máy xi măng Kim Định tỉnh Ninh Thuận;

+ Sử dụng tro bay từ nhà máy nhiệt điện Vĩnh Tân 2 (Ninh Thuận);

+ Phụ gia giảm nước và hóa dẻo cao cấp Lotus R301M.

Với yêu cầu kỹ thuật và nguồn vật liệu dự kiến sử dụng nêu trên, chúng tôi đã tiến hành thiết kế hai cấp phối CP1 (không dùng tro bay) và CP2 (có dùng tro bay) như ở Bảng 1. Cả hai cấp phối này đều thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật về độ sụt và cường độ (quá trình phát triển cường độ như ở Bảng 2).

Bảng 1. Cấp phối bê tông

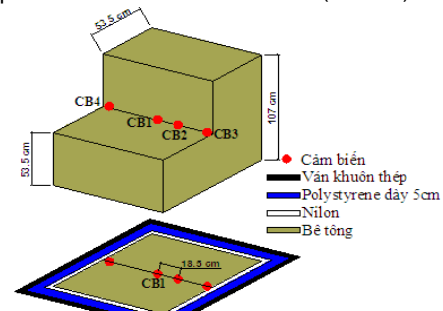
Cấp phối	XM (kg)	Tro bay (kg)	Cát nghiền (kg)	Đá (kg)	Nước (kg)	Phụ gia (kg)
CP1	330	0	748	1180	168	3.3
CP2	270	80	740	1150	177	3.0

Bảng 2. Phát triển cường độ nén của các mẫu

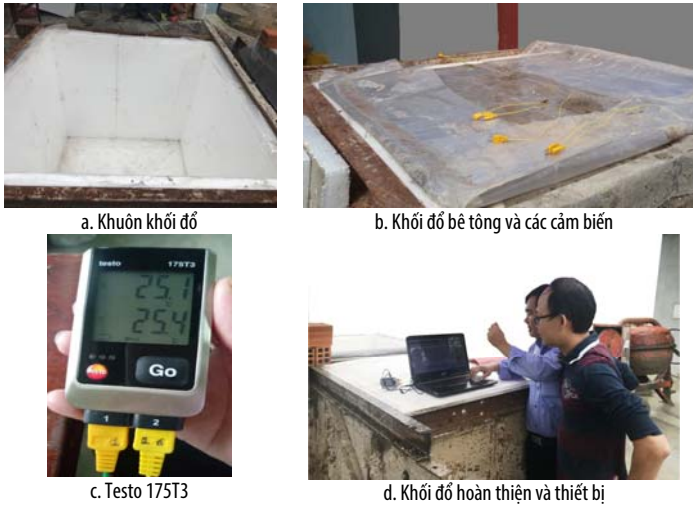
Cấp phối	Cường độ chịu nén ở các tuổi (Mpa)			
	3 ngày	7 ngày	14 ngày	28 ngày
CP1	21.0	26.0	30.6	34.5
CP2	18.4	23.2	29.1	38.8

- Hình dạng, kích thước và cấu tạo khối đổ: khối đổ hình lập phương có kích thước (107x107x107) cm, bao quanh khối bê tông được cấu tạo thành ba lớp theo thứ tự từ trong ra ngoài gồm: lớp nilon, tấm xốp polystyrene dày 5cm và ván khuôn thép (chi tiết như ở Hình 2). Theo các nghiên cứu của Lawrence et al. [8], John và Martha [9] và Abeka et al. [10] thì khối đổ này được xem là bê tông khối lớn.

- Thiết bị thu thập số liệu: để xác định nhiệt độ phân bố trong mẫu chúng tôi đã dùng cảm biến đo nhiệt độ loại K (các cảm biến được ký hiệu là CB1, CB2, CB3 và CB4; vị trí các cảm biến được bố trí trong khối đổ như ở Hình 2 và Hình 3b) kết nối với máy tính qua bộ ghi dữ liệu Testo 175T3 (Hình 3c) và điều khiển việc thu thập số liệu thông qua phần mềm testo-ComSoft-Basic-5 (Hình 3d).



Hình 2. Thiết kế khối đổ thí nghiệm

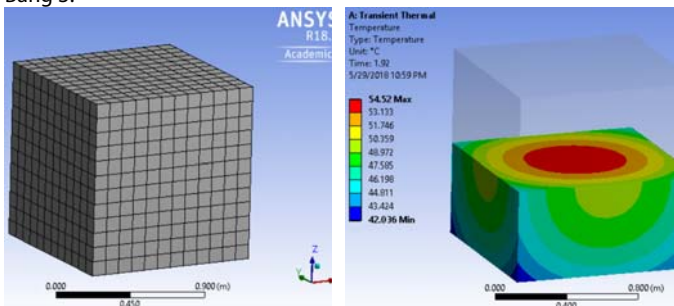


Hình 3. Triển khai thí nghiệm thực tế

3. Mô phỏng bằng mô hình toán

Chúng tôi đã sử dụng phần mềm ANSYS V18.2 để mô phỏng sự phát triển theo thời gian và phân bố nhiệt theo không gian của khối đổ như đã thí nghiệm cho cả hai cấp phối CP1 và CP2. Mô hình rời rạc của các phần tử của khối đổ (1728 phần tử và 8281 nút) được hiển thị như ở Hình 4.

Dữ liệu đầu vào cho phân tích nhiệt trong khối đổ (nhiệt dung riêng, độ dẫn nhiệt, đối lưu nhiệt, thời gian phân tích) và các số liệu về điều kiện môi trường (nhiệt độ môi trường thực tế thay đổi theo thời gian, tuy nhiên do khối đổ thí nghiệm được thiết kế như ở Hình 2 phù hợp với điều kiện bán đoạn nhiệt (semi-adiabatic) và khối đổ được thực hiện trong phòng thí nghiệm nên chọn nhiệt độ môi trường trong suốt quá trình phân tích là 20°C), nhiệt độ bê tông tươi khi đổ, nhiệt độ lớn nhất xác định thông qua thí nghiệm được thể hiện như ở Bảng 3.



Hình 4. Mô hình phần tử phân tích nhiệt
Bảng 3. Các tham số cho phân tích nhiệt

Tham số	Đơn vị	Giá trị
Nhiệt dung riêng (specific heat)	kJ/kg°C	0.96
Độ dẫn nhiệt (thermal conductivity)	kJ/mh°C	9
Đối lưu nhiệt (convection)	kJ/m²h°C	21.3
Nhiệt độ bê tông khi đổ	°C	22
Nhiệt độ môi trường	°C	20
Nhiệt độ lớn nhất của cấp phối CP1	°C	2400
Nhiệt độ lớn nhất của cấp phối CP2	°C	54.2
Khối lượng riêng	kg/m³	56.4
Thời gian phân tích	h	264

4. Kết quả và thảo luận

Kết quả thí nghiệm đo nhiệt độ khối đổ cho các cấp phối CP1 và CP2 tại các vị trí cảm biến CB1, CB2 và CB3 trong thời gian 11 ngày

được thể hiện như ở Hình 6 (do nhiệt độ đo được tại vị trí CB3 và CB4 tương tự nhau nên bài báo chỉ biểu diễn và phân tích kết quả cho vị trí CB3).

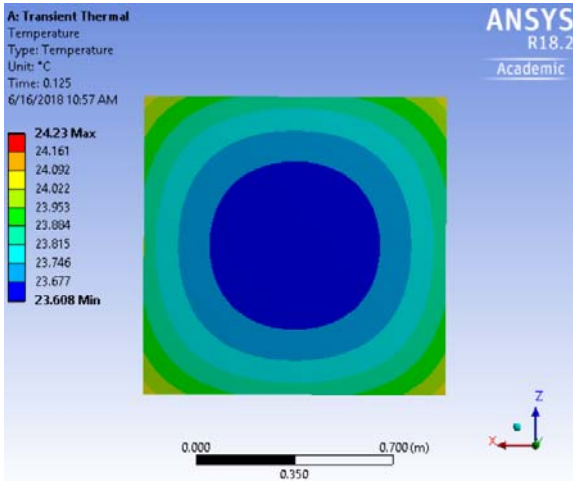
Kết quả phân tích nhiệt độ của khối đổ bằng mô hình ANSYS theo chế độ nhiệt không ổn định (transient thermal) cho 11 ngày được trích xuất trong 264 bước thời gian với độ dài mỗi bước thời gian 1 giờ. Kết quả phân bố nhiệt độ tại mặt cắt ngang trung tâm (Hình 4b) ở một số bước thời gian cho cả hai cấp phối CP1 và CP2 được thể hiện như ở Hình 5. Ngoài ra, để kiểm định kết quả phân tích nhiệt bằng mô hình ANSYS chúng tôi đã biểu diễn kết quả quá trình phát triển nhiệt độ tại các vị trí CB1, CB2 và CB3 theo thí nghiệm và mô hình như ở Hình 6. Kết quả ở Hình 5 và Hình 6 cho thấy:

- Nhiệt độ của khối đổ tăng nhanh từ nhiệt độ ban đầu (22°C) và đạt giá trị lớn nhất trong khoảng hai ngày đầu tiên, cụ thể: cấp phối CP1 đạt giá trị lớn nhất 56.72°C tại tâm (vị trí CB1) sau 42 giờ (Hình 5c và Hình 6a); cấp phối CP2 đạt giá trị lớn nhất 54.52°C tại tâm (vị trí CB1) sau 46 giờ (Hình 5c' và Hình 6a'). Sau thời điểm đạt trị số lớn nhất thì nhiệt độ trong toàn khối đổ thể hiện một sự giảm dần và sau 11 ngày thì nhiệt độ gần biên khối đổ (CB3) tiệm cận với nhiệt độ môi trường, điều này là do lượng nhiệt thất thoát lớn hơn lượng nhiệt sinh ra do thủy hóa của chất kết dính. Ở tất cả các bước thời gian phân tích đều thể hiện sự giảm dần nhiệt độ từ tâm khối đổ ra ngoài biên (Hình 5), kết quả này là do có sự truyền nhiệt từ bề mặt khối bê tông ra môi trường;

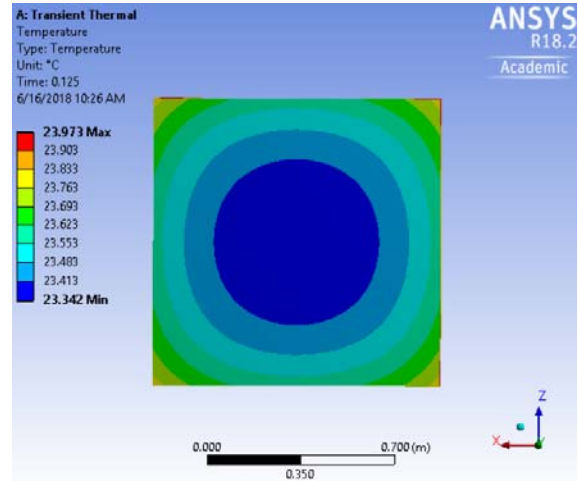
- So với cấp phối không dùng tro bay (CP1) thì cấp phối có dung tro bay (CP2) đạt được giá trị nhiệt độ lớn nhất thấp hơn (54.52°C so với 56.72°C), kết quả này là do cấp phối CP2 có lượng dung xi măng ít hơn cấp phối CP1 (Bảng 2); và do hiệu quả của phản ứng pu-zơ-lan-níc (phản ứng giữa SiO₂ hoạt tính của tro bay với sản phẩm hydrat Ca(OH)₂ của xi măng) đã làm cho thời điểm đạt được nhiệt độ lớn nhất xảy ra chậm hơn (46 giờ so với 42 giờ);

- Nhiệt độ gia tăng lớn nhất do nhiệt hydrat do quá trình thủy hóa so với nhiệt độ môi trường là 36.72°C và 34.52°C tương ứng đối với cấp phối CP1 và CP2. Nhiệt độ lớn nhất sinh ra trong khối đổ của cả hai cấp phối này đều nhỏ hơn 70°C, do đó cả hai cấp phối không có nguy cơ bị tấn công nội sun phát do sự hình thành ettringite gián đoạn. Tuy nhiên, trong quá trình triển khai thi công thực tế cho hạng mục trụ pin của tràn xả lũ của dự án hồ chứa nước Tân Mỹ cần phải xem xét lại cho phù hợp với nhiệt độ môi trường vào thời điểm thi công;

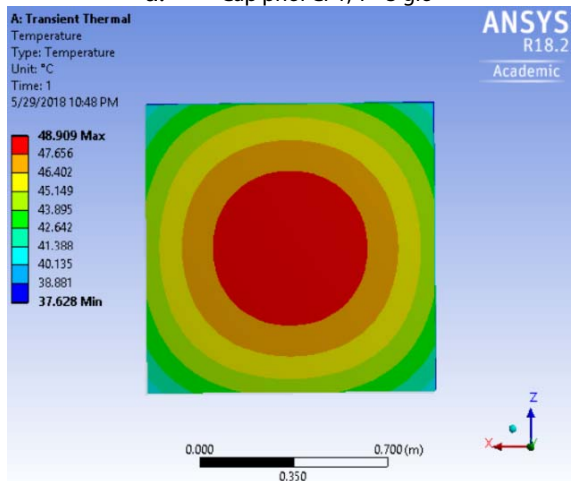
- Sự phát triển nhiệt độ tại các vị trí (CB1, CB2 và CB3) cho cả hai cấp phối CP1 và CP2 ở Hình 6 cho thấy kết quả phân tích nhiệt bằng mô hình ANSYS khá phù hợp với kết quả thực đo. Sự phù hợp này là do khối đổ thí nghiệm đã cung cấp một số thông số đầu vào tin cậy cho mô phỏng bằng mô hình ANSYS.



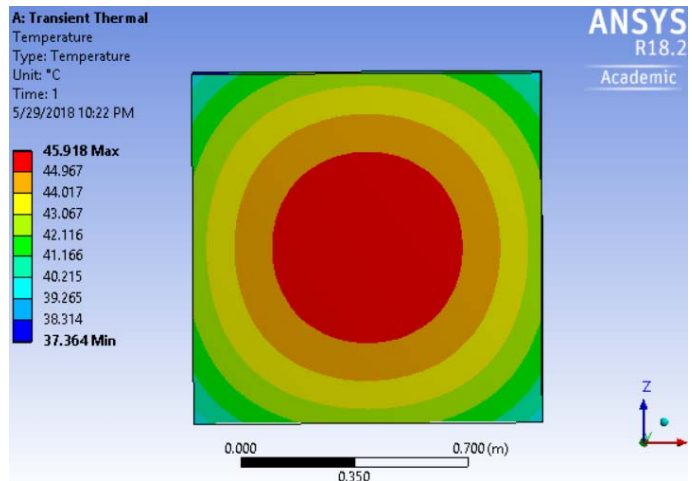
a. Cấp phối CP1, T= 3 giờ



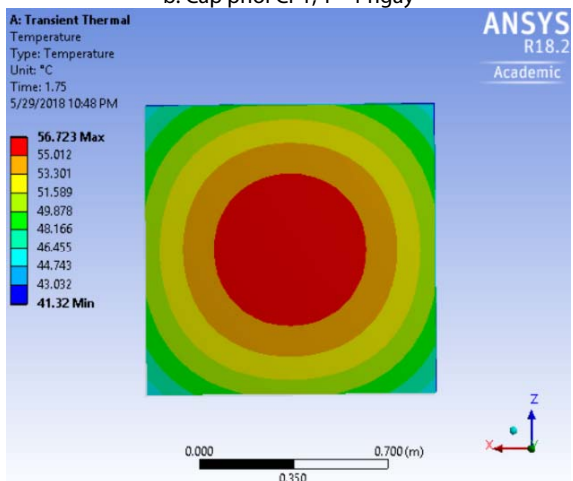
a'. Cấp phối CP2, T= 3 giờ



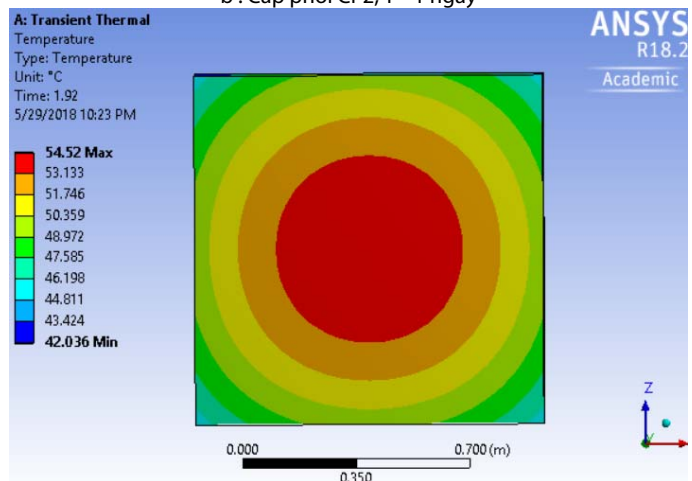
b. Cấp phối CP1, T= 1 ngày



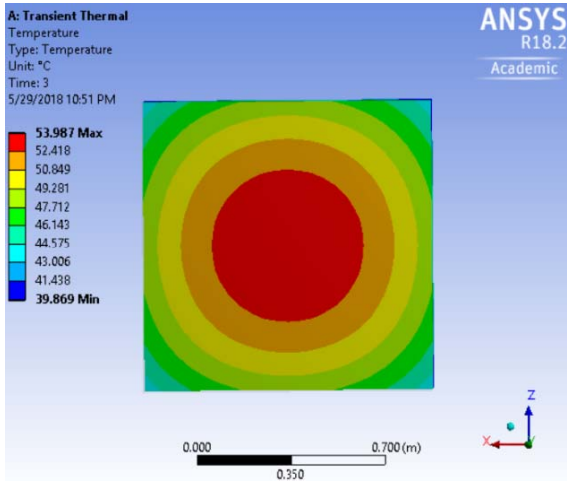
b'. Cấp phối CP2, T= 1 ngày



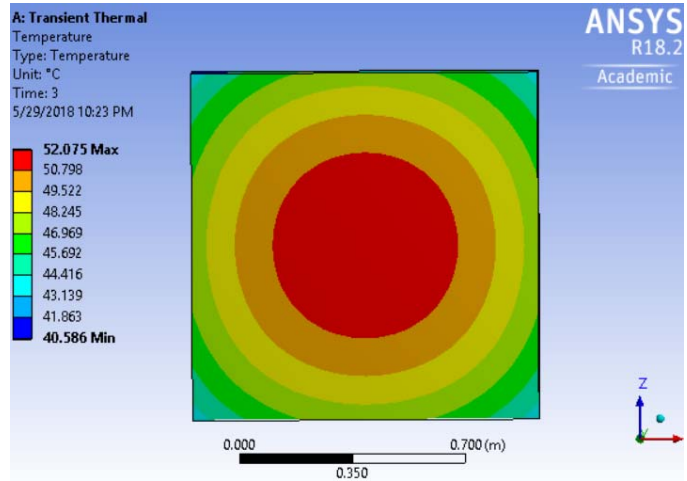
c. Cấp phối CP1, T= 42 giờ (đạt nhiệt độ lớn nhất)



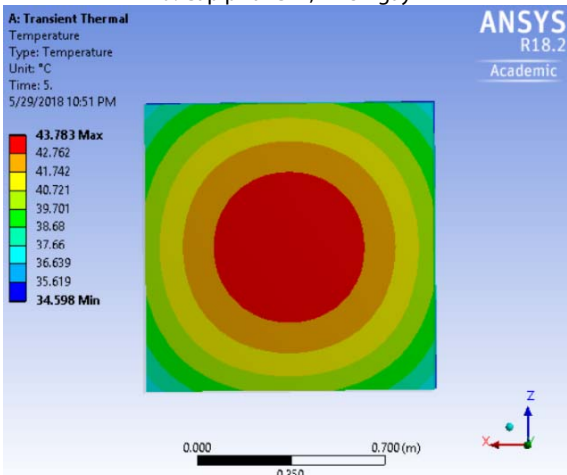
c'. Cấp phối CP2, T= 46 giờ (đạt nhiệt độ lớn nhất)



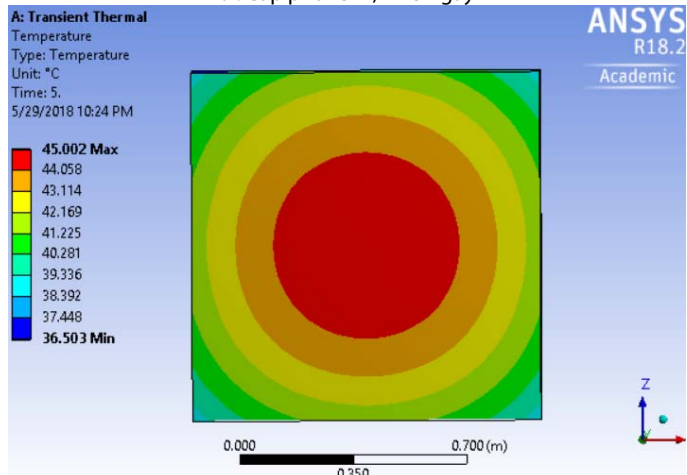
d. Cấp phối CP1, T= 3 ngày



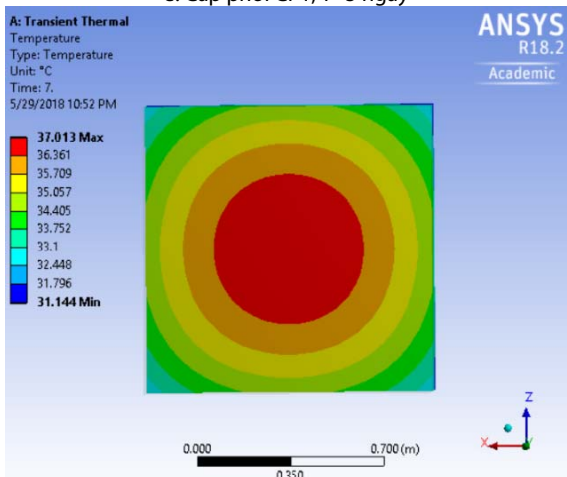
d'. Cấp phối CP2, T= 3 ngày



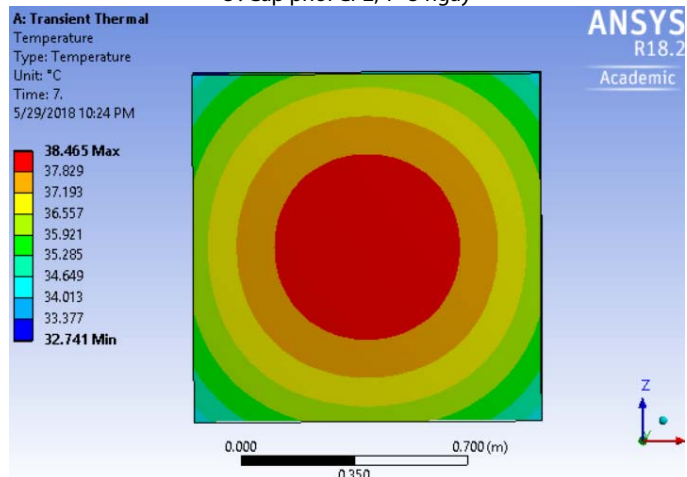
e. Cấp phối CP1, T=5 ngày



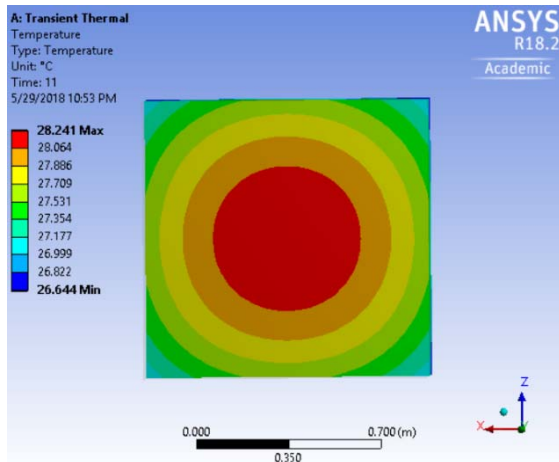
e'. Cấp phối CP2, T=5 ngày



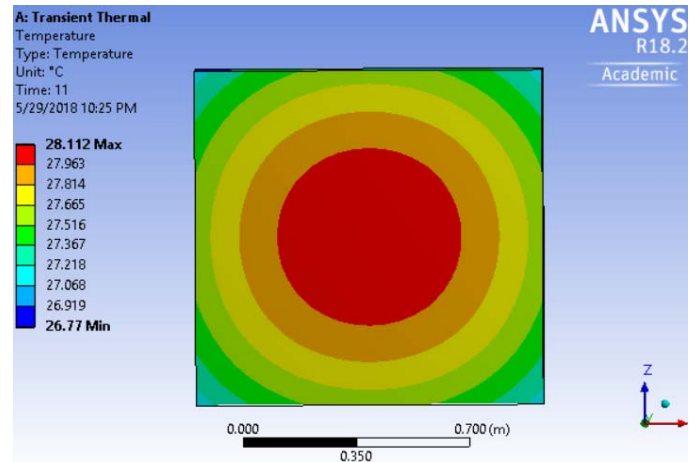
f. Cấp phối CP1, T=7 ngày



f'. Cấp phối CP2, T=7 ngày

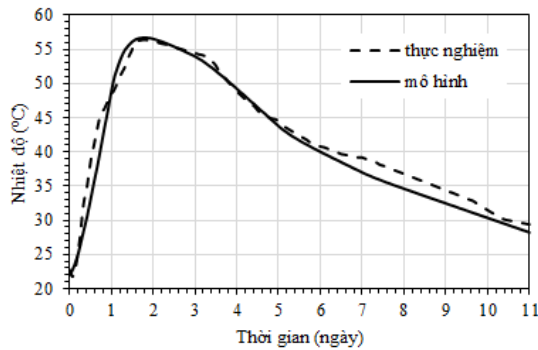


g. Cấp phối CP1, T=11 ngày

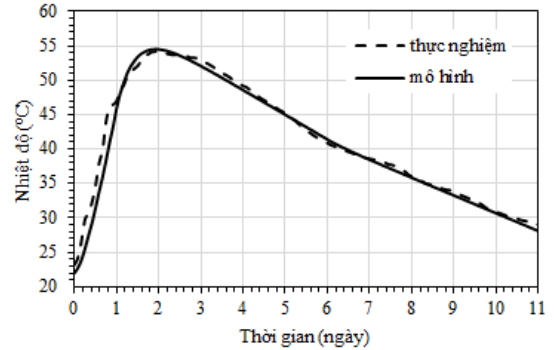


g'. Cấp phối (CP2), T=11 ngày

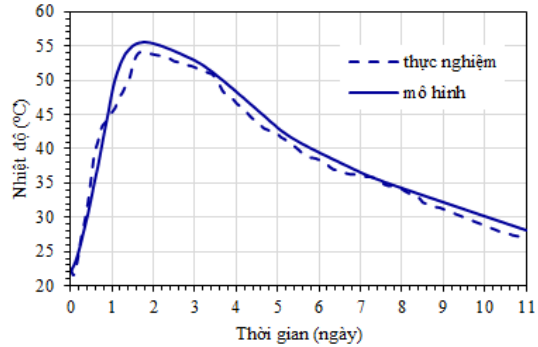
Hình 5. Sự phân bố nhiệt độ ở mặt cắt ngang trung tâm ở một số thời điểm của cấp phối CP1 và CP2



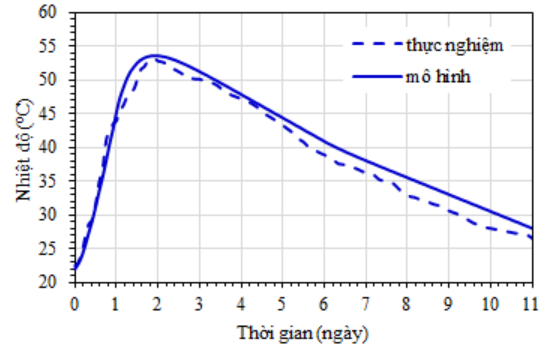
a. Sự phát triển nhiệt độ ở vị trí CB1 của cấp phối CP1



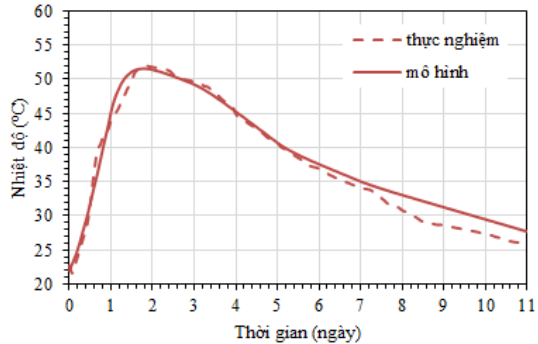
a'. Sự phát triển nhiệt độ ở vị trí CB1 của cấp phối CP2



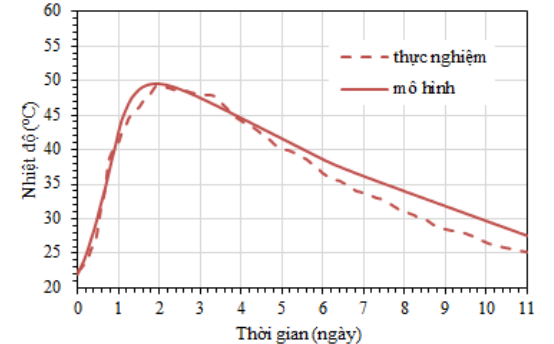
b. Sự phát triển nhiệt độ ở vị trí CB2 của cấp phối CP1



b'. Sự phát triển nhiệt độ ở vị trí CB2 của cấp phối CP2



c. Sự phát triển nhiệt độ ở vị trí CB3 của cấp phối CP1



c'. Sự phát triển nhiệt độ ở vị trí CB3 của cấp phối CP2

Hình 6. So sánh quá trình phát triển nhiệt độ tại các vị trí (CB1, CB2 và CB3) theo thí nghiệm và mô hình của cấp phối CP1 và CP2

5. Kết luận

Với mục đích kiểm soát sự phát triển và phân bố nhiệt độ trong khối đổ đối với các cấp phối (có và không sử dụng tro bay) dự kiến áp dụng cho hạng mục trụ pin tràn xả lũ của dự án hồ chứa nước Tân Mỹ tỉnh Ninh Thuận, bài báo này đã tiến hành thí nghiệm đo nhiệt độ một cách tự động và liên tục trong 11 ngày bằng các cảm biến nhiệt độ tại một số vị trí trong khối đổ mẫu kết hợp với phân tích nhiệt độ bằng phần mềm ANSYS. Từ kết quả nghiên cứu, chúng tôi rút ra các kết luận sau:

- Việc sử dụng các mô hình toán để mô phỏng sự phân phát triển và phân bố nhiệt độ trong khối đổ có thể tránh được hiện tượng nứt do nhiệt thủy hóa trong bê tông khối lớn. Tuy nhiên, để kết quả mô phỏng phù hợp với thực thể thì việc quan trắc nhiệt độ trong trong khối đổ mẫu là rất cần thiết bởi kết quả thí nghiệm trên khối đổ mẫu sẽ cung cấp một số tham số đầu vào tin cậy và hiệu chỉnh mô hình;

- Kết quả phân tích nhiệt độ thu được bằng phần mềm ANSYS trong nghiên cứu này là khá phù hợp với số liệu thực nghiệm. Do vậy, một số thông số dùng để mô phỏng trong nghiên cứu này hoàn toàn có thể dùng cho mô phỏng để phục vụ cho quá trình thi công thực tế của trụ pin tràn xả lũ của dự án hồ chứa nước Tân Mỹ (chọn cấp phối, kích thước khối đổ, trình tự và thời gian nghỉ chờ cho các khối đổ kế và khối đổ chống) tránh được nứt do nhiệt thủy hóa và mang lại hiệu quả kinh tế;

- Cả hai cấp phối CP1 và CP2 đều có thể sử dụng mà không có nguy cơ bị tấn công nội sun phát do sự hình thành ettringite gián đoạn nếu khống chế nhiệt độ môi trường trong quá trình thi công không vượt quá tương ứng 33°C và 35°C.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Phòng thí nghiệm Công trình thủy – khoa Xây dựng Thủy lợi Thủy điện - Trường đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng, Phòng thí nghiệm Chuyên ngành XD LAS-XD 325 – Công ty Cổ phần Xây dựng 47 và Công ty Cổ phần Hóa chất Hoa Sen đã hỗ trợ vật liệu và thiết bị thí nghiệm cho nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. B. Chen, X. C. Li, X. Zhang, 'Mass Concrete Simulation and Analysis for Temperature Field during Pouring' *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, vol. 2, pp. 37-39, 2004.
- [2] ACI Committee 207.1R-05, 'Guide to Mass Concrete (Reapproved 2012)', *American Concrete Institute*, Farmington Hills, 2005.
- [3] TCXDVN 305:2004 'Bê tông khối lớn-Quy phạm thi công và nghiệm', Bộ Xây dựng, Hà Nội, 2004.
- [4] K. A. Riding, 'Early age concrete thermal stress measurement and modeling', The University of Texas at Austin, 2007.
- [5] M. Collepardi, 'A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete'. *Cement and Concrete Composites*, vol. 25(4-5), pp. 401-407, 2003.
- [6] ACI Committee 301, Specifications for Structural Concrete 301-16', *American Concrete Institute*, Farmington Hills, 2016.
- [7] Z. Bofang, 'Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete', *Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier*, Kidlington, Oxford, 2014.
- [8] A. M. Lawrence, M. Tia, C. Ferraro, M. Bergin, 'Effect of Early Age Strength on Cracking in Mass Concrete Containing Different Supplementary Cementitious Materials: Experimental and Finite-Element Investigation', *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24(4), pp. 362-372, 2012.
- [9] G. John, V. Martha, 'Controlling Temperatures in Mass Concrete', *Concrete International*, vol. 24(1), pp. 58-62, 2002.
- [10] H. Abeka, S. Agyeman, M. Adom-Asamoah, 'Thermal effect of mass concrete structures in the tropics: Experimental, modelling and parametric studies', *Civil & Environmental Engineering*, vol. 4(1), 1278297, 2017.