



TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

Ảnh hưởng kết hợp của hàm lượng xi măng và phân đoạn thi công đến ứng xử nhiệt-cơ của bệ móng bê tông khối lớn

Combined effects of cement content and staged construction on the thermo-mechanical response of a mass-concrete foundation

PGS.TS Võ Duy Hùng

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

Email: vdhung@dut.udn.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 06/10/2026

Ngày sửa bài: 12/10/2026

Ngày chấp nhận đăng: 26/10/2026

Ngày xuất bản Online: 31/10/2026

Tác giả liên hệ:

Email: vdhung@dut.udn.vn

TÓM TẮT

Bài báo đánh giá đồng thời ảnh hưởng của hàm lượng xi măng và phân đoạn thi công đến ứng xử nhiệt-cơ của bệ móng bê tông khối lớn. Mô hình phần tử hữu hạn ba chiều được xây dựng cho bệ móng kích thước (25×25×3)m, bê tông cấp cường độ khoảng 30 MPa, thi công theo hai giai đoạn, mỗi giai đoạn cao 1,5 m. Sáu mức hàm lượng xi măng từ 300 đến 450 kg/m³ được khảo sát. Kết quả cho thấy nhiệt độ cực đại tăng gần tuyến tính theo hàm lượng xi măng: Từ 53,2°C lên 69,2°C ở giai đoạn 1 và từ 51,5°C lên 66,0°C ở giai đoạn 2. Ngược lại, mặc dù phân đoạn thi công làm giảm nhiệt độ cực đại ở hầu hết các trường hợp, ứng suất cực đại ở giai đoạn 2 lại cao hơn giai đoạn 1; giá trị tăng từ 5,2 đến 7,5 MPa khi hàm lượng xi măng tăng từ 300 đến 450 kg/m³. Phân tích hồi quy cho thấy độ nhạy của nhiệt độ và ứng suất đối với hàm lượng xi măng là rõ rệt, đồng thời phản ánh tác động của điều kiện giữ giữ giữa hai đợt đổ. Kết quả nhấn mạnh rằng tối ưu hàm lượng xi măng và tổ chức phân đoạn thi công cần được xem xét đồng thời, thay vì chỉ kiểm soát nhiệt độ cực đại, nhằm giảm nguy cơ nứt nhiệt trong bệ móng bê tông khối lớn.

Từ khóa: Bê tông khối lớn; nhiệt thủy hóa; hàm lượng xi măng; phân đoạn thi công; ứng suất nhiệt; phần tử hữu hạn.

ABSTRACT

This paper evaluates the combined effects of cement content and staged construction

on the thermo-mechanical response of a mass-concrete foundation. A three-dimensional finite-element model is established for a (25×25×3)m foundation made of approximately 30 MPa concrete and cast in two 1.5 m lifts. Six cement contents ranging from 300 to 450 kg/m³ are investigated. The results indicate an almost linear increase in peak temperature with cement content, from 53.2°C to 69.2°C in Stage 1 and from 51.5°C to 66.0°C in Stage 2. Although staged casting generally lowers the peak temperature, the maximum stress in Stage 2 is higher than in Stage 1, increasing from 5.2 to 7.5 MPa as cement content rises from 300 to 450 kg/m³. Regression analysis confirms a strong sensitivity of both temperature and stress to cement content and highlights the role of restraint introduced by the interface between successive lifts. The results demonstrate that cement-content optimization and construction staging should be considered together rather than relying solely on peak-temperature control when assessing thermal-cracking risk in mass-concrete foundations.

Keywords: Mass concrete; hydration heat; cement content; staged construction; thermal stress; finite element method.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các công trình cầu hiện đại, kích thước bệ móng và trụ tháp ngày càng lớn nhằm đáp ứng yêu cầu chịu lực và điều kiện địa chất phức tạp. Khi kích thước khối đổ tăng, nhiệt sinh ra do phản ứng thủy hóa xi măng khó thoát nhanh ra môi trường, làm nhiệt độ vùng lõi tăng mạnh trong giai đoạn tuổi sớm. Sự phát triển nhiệt phụ thuộc đáng kể vào thành phần chất kết dính, đặc biệt là lượng xi măng sử dụng trong một đơn vị thể tích bê tông [1, 2]. Vì vậy, cùng một hình học kết cấu và cùng điều kiện môi trường, thay đổi hàm lượng xi măng có thể làm thay đổi đáng kể giá trị nhiệt độ cực đại cũng như lịch sử nhiệt của khối bê tông.

Sự phân bố nhiệt độ không đồng đều gây ra biến dạng nhiệt khác nhau giữa vùng lõi và vùng biên. Khi biến dạng này bị kìm giữ bởi nền, bởi các vùng bê tông nguội hơn hoặc bởi các phần kết cấu đã thi công trước, ứng suất kéo có thể phát triển và gây nứt ở tuổi sớm. Các hướng dẫn về bê tông khối lớn đều nhấn mạnh rằng kiểm soát nứt không chỉ dựa trên nhiệt độ cực đại mà còn cần xem xét chênh lệch nhiệt độ, tốc độ thay đổi nhiệt và điều kiện kìm giữ [3, 4, 5]. Trong điều kiện khí hậu nóng ẩm, vấn đề này đặc biệt quan trọng đối với bệ trụ cầu có kích thước lớn và thời gian thi công kéo dài.

Nhiều nghiên cứu đã sử dụng phân tích liên hợp nhiệt-cơ để mô phỏng diễn biến nhiệt độ và ứng suất của bê tông khối lớn. Malkawi và cộng sự [6] chỉ ra rằng mô hình nhiệt-kết cấu có thể hỗ trợ đánh giá hiệu quả kiểm soát nhiệt độ trong kết cấu bê tông khối lớn. Ha và cộng sự [7] cho thấy chế độ bảo dưỡng và kiểm soát nhiệt có ảnh hưởng rõ đến nguy cơ nứt nhiệt. Các nghiên cứu sau đó tiếp tục phát triển mô hình số nhằm mô tả chính xác hơn trường nhiệt trong các kết cấu có kích thước lớn [8, 9, 10].

Bên cạnh các biện pháp làm mát, tối ưu cấp phối là một hướng kiểm soát ngay từ nguồn sinh nhiệt. Giảm lượng xi măng, sử dụng chất kết dính hỗn hợp hoặc điều chỉnh cấp cường độ theo tuổi muộn hơn có thể làm giảm tốc độ và tổng lượng nhiệt thủy hóa. Tuy nhiên, giảm hàm lượng xi măng phải đồng thời thỏa mãn các yêu cầu về cường độ, độ bền và tính công tác của hỗn hợp. Do đó, cần định lượng mức độ nhạy của trường nhiệt-cơ đối với hàm lượng xi măng để hỗ trợ lựa chọn cấp phối hợp lý.

Một biện pháp khác thường được áp dụng trong thi công bê tông khối lớn là phân chia khối đổ theo chiều cao hoặc theo mặt bằng. Về mặt nhiệt, phân đoạn thi công làm giảm thể tích bê tông được kích hoạt trong một thời điểm và tăng diện tích trao đổi nhiệt tương đối, vì vậy có thể giảm nhiệt độ cực đại. Tuy nhiên, khi đợt đổ sau được thực hiện trên lớp bê tông đã đóng rắn của đợt trước, điều kiện kìm giữ cơ học và lịch sử nhiệt trở

nên phức tạp hơn. Do đó, nhiệt độ cực đại thấp hơn không đồng nghĩa với ứng suất nhiệt luôn thấp hơn. Đây là điểm cần được xem xét khi đánh giá hiệu quả thật sự của giải pháp phân đoạn thi công.

Các nghiên cứu về hệ thống làm lạnh bằng ống cũng cho thấy phân bố nhiệt trong bê tông khối lớn chịu ảnh hưởng mạnh của vị trí nguồn/sink nhiệt và lịch sử trao đổi nhiệt [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Mặc dù bài báo này không tập trung vào pipe cooling, các kết quả đó cho thấy một nguyên tắc chung: Ứng xử cơ học phụ thuộc vào toàn bộ trường nhiệt, không chỉ vào một giá trị nhiệt độ cực đại. Vì vậy, khi khảo sát hàm lượng xi măng và phân đoạn thi công, cần đánh giá đồng thời nhiệt độ, ứng suất và chuyển vị.

Phương pháp phần tử hữu hạn cho phép xét đồng thời nguồn nhiệt thủy hóa, dẫn nhiệt, đối lưu, sự phát triển tính chất vật liệu theo tuổi và các giai đoạn thi công. MIDAS/Civil cung cấp mô-đun phân tích nhiệt thủy hóa phù hợp với loại bài toán này [14], trong khi các quy định của JSCE và tiêu chuẩn về bê tông khối lớn cung cấp cơ sở cho việc kiểm soát nhiệt và nứt trong thi công [4, 15].

Trên cơ sở số liệu và mô hình của một bể móng bê tông khối lớn (25×25×3)m, nghiên cứu này tập trung vào một nội dung khác với cách trình bày truyền thống chỉ liệt kê kết quả từng cấp phối: Đánh giá định lượng ảnh hưởng kết hợp của hàm lượng xi măng và phân đoạn thi công. Sáu hàm lượng xi măng từ 300 đến 450 kg/m³ được phân tích ở hai giai đoạn đổ. Bên cạnh so sánh giá trị cực đại, bài báo xác định độ nhạy tuyến tính, tỷ lệ giảm nhiệt độ do phân đoạn và mức tăng ứng suất ở giai đoạn 2. Qua đó, nghiên cứu làm rõ sự đánh đổi giữa lợi ích nhiệt học và bất lợi cơ học của phân đoạn thi công, từ đó đề xuất hàm ý cho thiết kế cấp phối và tổ chức thi công bể móng bê tông khối lớn.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Bài toán truyền nhiệt và ứng suất nhiệt

Phân tích nhiệt thủy hóa được thực hiện theo hai bước liên tiếp: Xác định trường nhiệt theo thời gian và sử dụng trường nhiệt này làm tải trọng nhiệt cho bài toán cơ học. Đối với quá trình dẫn nhiệt, quan hệ Fourier được sử dụng để mô tả dòng nhiệt trong bê tông:

$$Q_x = -kA(\partial T/\partial x) \quad (1)$$

Trong đó: Q_x là lượng nhiệt truyền theo phương x ; k là hệ số dẫn nhiệt; A là diện tích vuông góc với phương truyền nhiệt và T là nhiệt độ. Tại bề mặt tiếp xúc với môi trường, trao đổi nhiệt được mô tả bằng điều kiện đối lưu:

$$q = h_c(T - T^\infty) \quad (2)$$

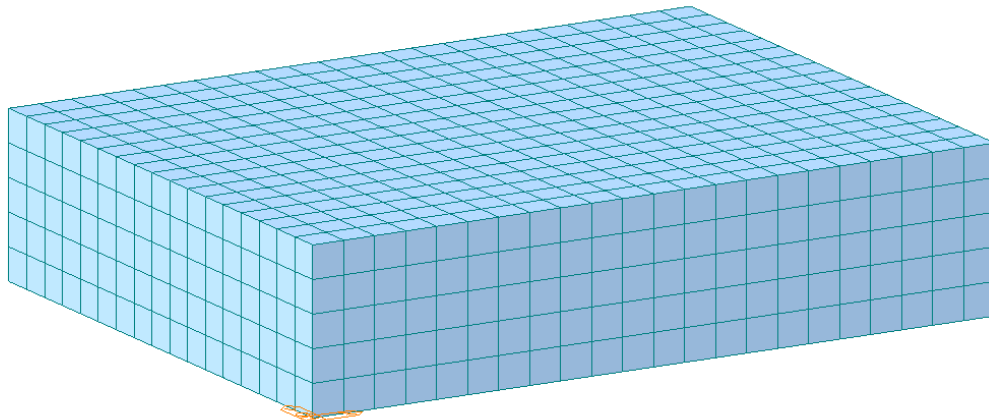
Với h_c là hệ số đối lưu, T là nhiệt độ bề mặt và T^∞ là nhiệt độ môi trường. Nguồn nhiệt bên trong khối bê tông được mô tả thông qua hàm tăng nhiệt đoạn nhiệt dạng mũ, trong đó biên độ nguồn nhiệt phụ thuộc vào lượng xi măng trong hỗn hợp. Theo cách khai báo trong MIDAS/Civil, tăng hàm lượng xi măng làm tăng nguồn nhiệt trên một đơn vị thể tích, do đó làm thay đổi trực tiếp lịch sử nhiệt của khối bê tông [14].

Trường ứng suất được xác định từ biến dạng nhiệt và điều kiện kìm giữ. Ứng suất nhiệt phụ thuộc không chỉ vào nhiệt độ tuyệt đối mà còn vào gradient nhiệt, hệ số giãn nở nhiệt, mô-đun đàn hồi theo tuổi và mức độ ràng buộc. Trong thi công phân đoạn, bề mặt tiếp giáp giữa hai đợt đổ tạo ra thay đổi về độ cứng và điều kiện biên cơ học, vì vậy giai đoạn 2 có thể phát sinh ứng suất lớn mặc dù nhiệt độ cực đại nhỏ hơn giai đoạn 1.

2.2. Mô hình bể móng và sơ đồ phân đoạn thi công

Đối tượng phân tích là bể móng trụ cầu có kích thước (25×25×3)m, tổng thể tích xấp xỉ 1.875 m³. Kích thước này thỏa mãn điều kiện của bê tông khối lớn trong bối cảnh nghiên cứu. Bê tông được mô hình hóa bằng phần tử khối ba chiều. Do kết cấu và điều

kiện biên đối xứng theo hai phương, mô hình tính sử dụng 1/4 kết cấu nhằm giảm khối lượng tính toán nhưng vẫn bảo toàn đặc trưng truyền nhiệt và biến dạng của khối.



Hình 1. Mô hình phần tử hữu hạn của bộ móng bê tông khối lớn

Hình 1 thể hiện hình học tổng thể và mức độ rời rạc hóa của mô hình phần tử hữu hạn. Hình này được sử dụng để làm rõ đối tượng tính toán trước khi thiết lập trình tự thi công: lưới phần tử khối bao phủ toàn bộ chiều dày 3 m, cho phép truyền trường nhiệt theo ba phương và sau đó ánh xạ trường nhiệt sang bài toán cơ học. Do bài toán có đối xứng hình học và điều kiện biên, mô hình tính toán khai thác tính đối xứng để giảm khối lượng tính toán nhưng vẫn giữ được quy luật phân bố nhiệt-cơ cần khảo sát. Quá trình thi công được chia thành hai giai đoạn. Giai đoạn 1 đổ lớp bê tông cao 1,5 m; giai đoạn 2 tiếp tục đổ 1,5 m còn lại để đạt tổng chiều cao 3 m. Ở giai đoạn 1, đáy khối tiếp xúc với nền, các mặt bên tiếp xúc với ván khuôn và mặt trên trao đổi nhiệt với không khí. Khi chuyển sang giai đoạn 2, bề mặt trên của lớp bê tông giai đoạn 1 trở thành mặt tiếp xúc với lớp bê tông mới, đồng thời điều kiện biên nhiệt ở các mặt bên thay đổi theo quá trình tháo/lắp ván khuôn. Sự thay đổi này làm cho bài toán giai đoạn 2 khác bản chất so với việc chỉ nhân đôi chiều cao khối đổ.

2.3. Vật liệu, điều kiện biên và các trường hợp khảo sát

Bê tông sử dụng trong mô hình có cấp cường độ khoảng 30 MPa. Nhiệt độ môi trường và nhiệt độ nền được lấy bằng 25°C. Các tham số vật liệu theo thời gian, bao gồm mô-đun đàn hồi, co ngót, từ biến và sự phát triển cường độ, được khai báo trong mô hình theo các quan hệ vật liệu của phần mềm. Sáu trường hợp hàm lượng xi măng được khảo sát: 300, 330, 360, 390, 420 và 450 kg/m³. Các tham số hình học, điều kiện biên và quy trình phân đoạn được giữ nguyên, qua đó cho phép tách ảnh hưởng của hàm lượng xi măng khỏi các yếu tố khác.

Bảng 1. Các thông số chính của mô hình và phạm vi khảo sát

Thông số	Giá trị/Phạm vi	Ghi chú
Kích thước bệ	(25×25×3)m	Bê tông khối lớn
Phân đoạn thi công	2 giai đoạn × 1,5 m	Theo chiều cao
Nhiệt độ môi trường	25°C	Điều kiện biên
Cấp cường độ bê tông	≈ 30 MPa	Mô hình vật liệu
Hàm lượng xi măng	300 - 450 kg/m ³	Bước 30 kg/m ³
Số trường hợp	6	Giữ nguyên các thông số khác

Bảng 1 tổng hợp các biến được giữ cố định và biến khảo sát của mô hình. Việc giữ nguyên kích thước bệ, nhiệt độ môi trường, cấp cường độ và sơ đồ hai đợt đổ trong cả sáu trường hợp giúp cô lập ảnh hưởng của hàm lượng xi măng. Do đó, các khác biệt về

hiệu ứng nhiệt, ứng suất và chuyển vị trình bày ở phần kết quả có thể được quy chủ yếu cho sự thay đổi nguồn nhiệt do hàm lượng xi măng và cho hiệu ứng của trình tự thi công.

2.4. Chỉ tiêu đánh giá và xử lý số liệu

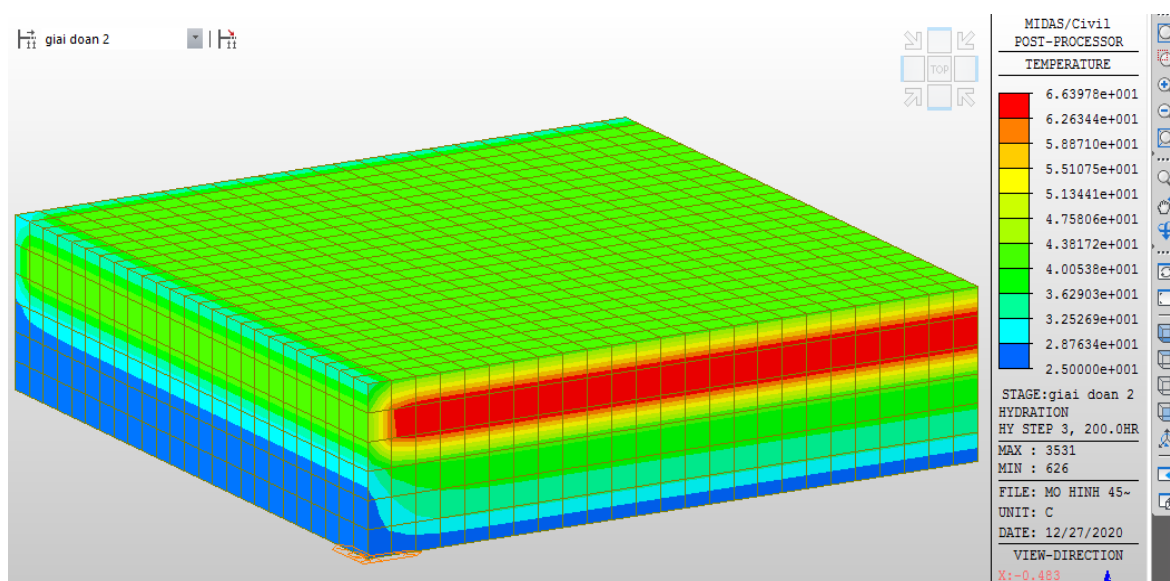
Ba nhóm chỉ tiêu được sử dụng gồm: (i) Nhiệt độ cực đại trong từng giai đoạn; (ii) ứng suất cực đại; và (iii) chuyển vị đặc trưng của khối. Để đánh giá xu hướng định lượng, quan hệ tuyến tính $y = aC + b$ được khớp giữa hàm lượng xi măng C và từng đại lượng y . Hệ số góc a biểu thị độ nhạy của đáp ứng đối với mỗi 1 kg/m^3 xi măng tăng thêm, trong khi hệ số xác định R^2 được dùng để đánh giá mức độ phù hợp của xu hướng tuyến tính.

Ngoài ra, hiệu ứng phân đoạn được lượng hóa qua hai chỉ tiêu: Tỷ lệ giảm nhiệt độ cực đại của giai đoạn 2 so với giai đoạn 1 và tỷ lệ tăng ứng suất cực đại của giai đoạn 2 so với giai đoạn 1. Cách tiếp cận này giúp làm rõ một đặc điểm quan trọng của bài toán: phân đoạn có thể có lợi về nhiệt nhưng đồng thời làm tăng ứng suất do mức độ kìm giữ thay đổi.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Diễn biến nhiệt và vị trí xuất hiện nhiệt độ cực đại

Kết quả mô phỏng cho thấy vùng nhiệt độ cao nhất tập trung tại phần lõi của lớp bê tông đang phát triển nhiệt. Đối với giai đoạn 1, nhiệt độ cực đại thường xuất hiện trong khoảng 25 - 50 giờ sau khi đổ, tùy hàm lượng xi măng. Khi thi công giai đoạn 2, vùng nhiệt độ cao chuyển lên phần bê tông mới, trong khi lớp giai đoạn 1 tiếp tục tham gia truyền nhiệt và tạo điều kiện biên nhiệt-cơ cho lớp trên. Với hàm lượng xi măng 450 kg/m^3 , nhiệt độ vùng tâm giai đoạn 1 đạt xấp xỉ 69°C , còn vùng tâm giai đoạn 2 đạt khoảng 66°C trong quá trình phát triển nhiệt.



Hình 2. Trường nhiệt độ diễn hình ở giai đoạn 2 đối với trường hợp hàm lượng xi măng cao

Hình 2 được chọn để minh họa cơ chế phân bố nhiệt ở giai đoạn 2, thay vì chỉ trình bày một giá trị nhiệt độ cực đại. Dải nhiệt cao nằm trong lớp bê tông mới cho thấy nguồn nhiệt thủy hóa tập trung ở phần vừa thi công, trong khi lớp dưới và các bề mặt trao đổi nhiệt có nhiệt độ thấp hơn. Vì vậy, hình này là cơ sở để thảo luận đồng thời vị trí tích nhiệt, ảnh hưởng của mặt tiếp giáp giữa hai đợt đổ và sự cần thiết phải xét lịch sử nhiệt của lớp bê tông giai đoạn 1.

Hình 2 cho thấy nhiệt độ phân bố theo lớp, với dải nhiệt độ cao tập trung trong vùng bê tông mới và giảm dần về các bề mặt trao đổi nhiệt. Kết quả này phù hợp với cơ chế

tích nhiệt của bê tông khối lớn: Vùng xa bề mặt thoát nhiệt có nhiệt độ cao hơn. Đồng thời, mặt tiếp giáp giữa hai giai đoạn tạo ra một vùng chuyển tiếp nhiệt độ rõ rệt, cho thấy lịch sử nhiệt của lớp dưới ảnh hưởng trực tiếp đến lớp bê tông được đổ sau.

3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng đến nhiệt độ cực đại

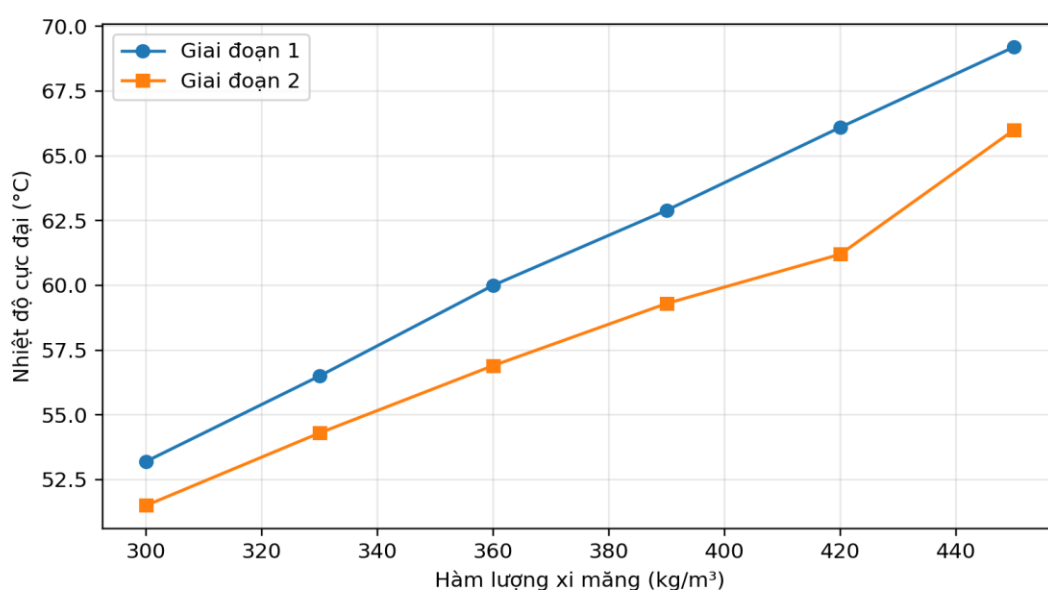
Bảng 2 và Hình 3 cho thấy nhiệt độ cực đại tăng liên tục khi hàm lượng xi măng tăng. Ở giai đoạn 1, nhiệt độ tăng từ 53,2°C tại 300 kg/m³ lên 69,2°C tại 450 kg/m³, tức tăng 16,0°C. Ở giai đoạn 2, nhiệt độ tăng từ 51,5°C lên 66,0°C, tương ứng tăng 14,5°C. Điều này khẳng định hàm lượng xi măng là một trong những biến chi phối trực tiếp mức phát nhiệt của khối bê tông.

Hồi quy tuyến tính cho giai đoạn 1 cho quan hệ gần đúng $T_{max,1} = 0,1064C + 21,42$ với $R^2 \approx 0,999$. Nghĩa là, trong phạm vi khảo sát, tăng 30 kg/m³ xi măng làm nhiệt độ cực đại tăng trung bình khoảng 3,19°C. Đối với giai đoạn 2, quan hệ $T_{max,2} = 0,0910C + 24,06$ có $R^2 \approx 0,983$, tương ứng mức tăng trung bình khoảng 2,73°C cho mỗi 30 kg/m³ xi măng. Độ dốc nhỏ hơn ở giai đoạn 2 phản ánh khả năng phân tán nhiệt tốt hơn nhờ tổ chức thi công theo lớp và lịch sử truyền nhiệt của khối đã thi công trước.

Bảng 2. Nhiệt độ cực đại theo hàm lượng xi măng và giai đoạn thi công

Hàm lượng xi măng (kg/m ³)	T _{max} giai đoạn 1 (°C)	T _{max} giai đoạn 2 (°C)	Giảm ở GĐ2 (°C)
300	53,2	51,5	1,7
330	56,5	54,3	2,2
360	60,0	56,9	3,1
390	62,9	59,3	3,6
420	66,1	61,2	4,9
450	69,2	66,0	3,2

Bảng 2 là cơ sở định lượng cho đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng xi măng đến nhiệt độ. Ngoài xu hướng tăng T_{max} theo C, cột “Giảm ở GĐ2” cho thấy tác dụng của phân đoạn không đồng đều: Mức giảm tăng từ 1,7°C tại 300 kg/m³ lên 4,9°C tại 420 kg/m³ nhưng giảm còn 3,2°C tại 450 kg/m³. Vì vậy, hiệu quả nhiệt của phân đoạn phụ thuộc vào cấp phối và không thể giả định là một tỷ lệ giảm cố định.



Hình 3. Quan hệ giữa hàm lượng xi măng và nhiệt độ cực đại ở hai giai đoạn

Hình 3 trực quan hóa số liệu của Bảng 2 và cho thấy hai đường nhiệt độ đều tăng gần tuyến tính theo hàm lượng xi măng. Khoảng cách giữa hai đường biểu diễn mức giảm nhiệt do phân đoạn thi công; khoảng cách này không cố định, chứng tỏ hiệu quả của phân đoạn còn phụ thuộc vào mức nguồn nhiệt. Hình đồng thời cho thấy độ dốc ở giai đoạn 1 lớn hơn giai đoạn 2, phù hợp với các hệ số hồi quy 0,1064 và 0,0910°C/(kg/m³).

3.3. Hiệu quả nhiệt của phân đoạn thi công

So với giai đoạn 1, nhiệt độ cực đại của giai đoạn 2 thấp hơn từ 1,7 đến 4,9°C trong cả sáu trường hợp khảo sát. Tỷ lệ giảm dao động khoảng 3,2 - 7,4%. Giá trị giảm lớn nhất xuất hiện ở 420 kg/m³, trong khi ở 450 kg/m³ mức giảm còn 3,2°C, cho thấy khi nguồn nhiệt tăng cao, lợi ích tương đối của việc phân đoạn có xu hướng giảm.

Kết quả này cho thấy phân đoạn thi công là biện pháp có hiệu quả trong việc giảm biên độ nhiệt, nhưng mức hiệu quả phụ thuộc vào cấp phối. Khi lượng xi măng tăng cao, lượng nhiệt sinh ra trong lớp bê tông mới lớn hơn và phần nhiệt tích lũy từ lớp dưới cũng làm điều kiện ban đầu của giai đoạn 2 bất lợi hơn. Vì vậy, không nên xem phân đoạn thi công là giải pháp thay thế hoàn toàn cho tối ưu cấp phối.

3.4. Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng đến ứng suất nhiệt

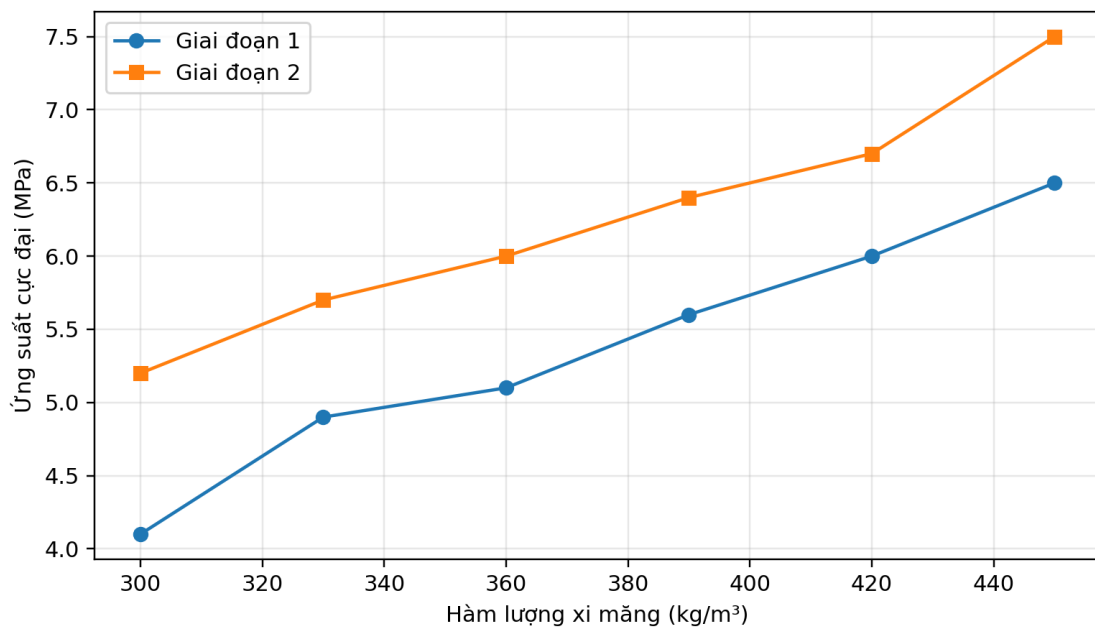
Ứng suất cực đại tăng theo hàm lượng xi măng ở cả hai giai đoạn. Giai đoạn 1 tăng từ 4,1 MPa lên 6,5 MPa khi C tăng từ 300 lên 450 kg/m³; giai đoạn 2 tăng từ 5,2 MPa lên 7,5 MPa. Hồi quy tuyến tính cho kết quả $\sigma_{\max,1} = 0,01505C - 0,276$ với $R^2 \approx 0,982$ và $\sigma_{\max,2} = 0,01419C + 0,929$ với $R^2 \approx 0,974$. Như vậy, cứ tăng 30 kg/m³ xi măng, ứng suất cực đại tăng trung bình khoảng 0,45 MPa ở giai đoạn 1 và 0,43 MPa ở giai đoạn 2.

Phân bố ứng suất cho thấy các vùng ứng suất lớn không trùng hoàn toàn với vùng nhiệt độ lớn nhất. Ứng suất cao thường xuất hiện ở vùng bị kìm giữ mạnh, đặc biệt gần đáy và vùng chuyển tiếp giữa các lớp. Điều này giải thích vì sao chỉ sử dụng nhiệt độ cực đại để đánh giá nguy cơ nứt là chưa đầy đủ. Hai mô hình có nhiệt độ đỉnh gần nhau nhưng lịch sử nhiệt và điều kiện ràng buộc khác nhau có thể tạo ra ứng suất rất khác nhau.

Bảng 3. Ứng suất cực đại theo hàm lượng xi măng và giai đoạn thi công

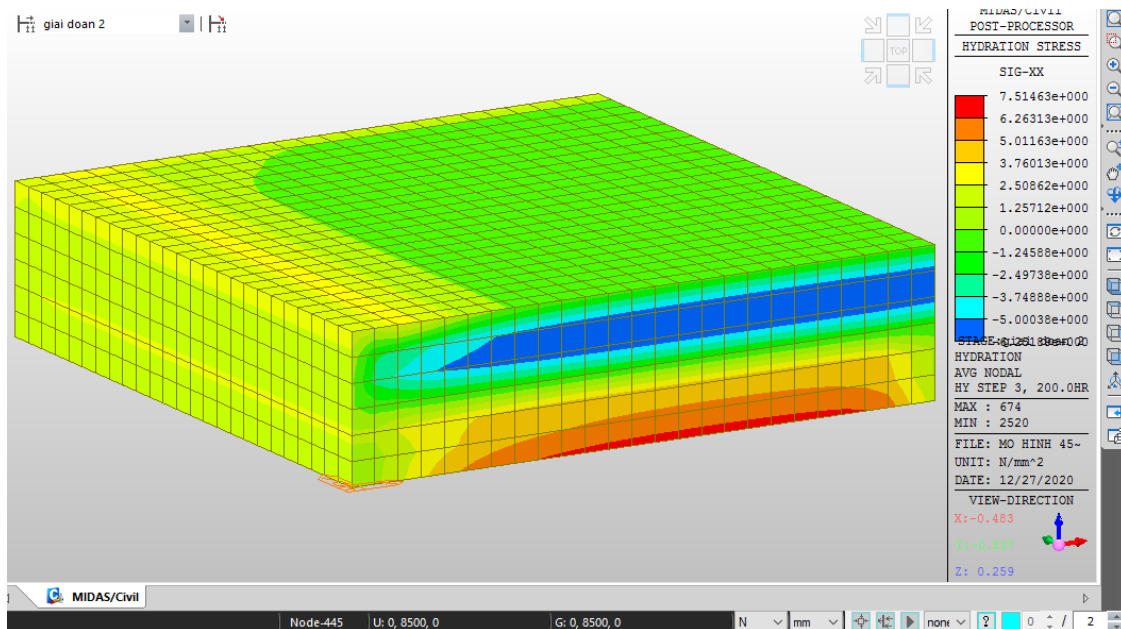
Hàm lượng xi măng (kg/m ³)	$\sigma_{\max}$ giai đoạn 1 (MPa)	$\sigma_{\max}$ giai đoạn 2 (MPa)	Tăng ở GD2 (MPa)
300	4,1	5,2	1,1
330	4,9	5,7	0,8
360	5,1	6,0	0,9
390	5,6	6,4	0,8
420	6,0	6,7	0,7
450	6,5	7,5	1,0

Bảng 3 cho thấy một quy luật nhất quán nhưng trái với Bảng 2: Ứng suất cực đại ở giai đoạn 2 cao hơn giai đoạn 1 trong toàn bộ phạm vi hàm lượng xi măng. Mức tăng tuyệt đối từ 0,7 đến 1,1 MPa cho thấy mặt tiếp giáp và sự phát triển độ cứng của lớp bê tông cũ làm tăng mức kìm giữ. So sánh Bảng 2 và Bảng 3 vì vậy là cơ sở chính để kết luận rằng giảm nhiệt độ cực đại chưa đủ để khẳng định nguy cơ nứt nhiệt đã giảm.



Hình 4. Quan hệ giữa hàm lượng xi măng và ứng suất cực đại ở hai giai đoạn

Hình 4 cho thấy ứng suất cực đại tăng theo hàm lượng xi măng ở cả hai giai đoạn, nhưng đường của giai đoạn 2 luôn nằm phía trên giai đoạn 1. Đây là điểm khác với xu hướng nhiệt độ ở Hình 3: Phân đoạn làm giảm nhiệt độ đỉnh nhưng không làm giảm ứng suất cực đại. Sự tách biệt giữa hai đường ứng suất vì vậy phản ánh rõ vai trò của điều kiện giữ ẩm và mặt tiếp giáp giữa hai lớp bê tông.

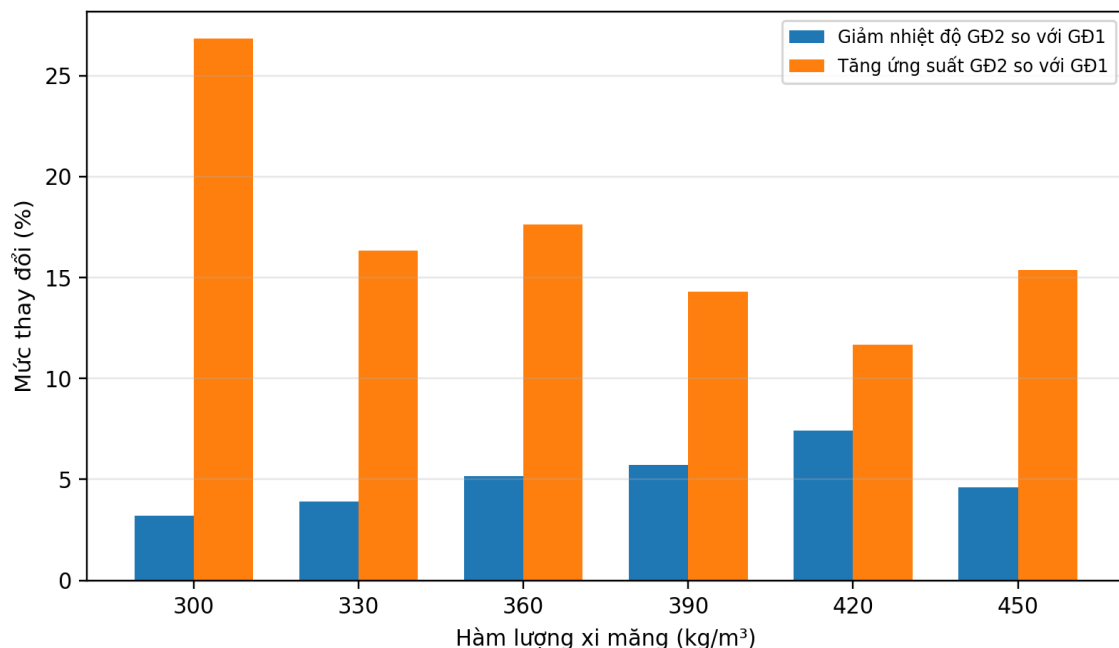


Hình 5. Trường ứng suất điển hình trong khối bê tông ở giai đoạn phát triển nhiệt mạnh

Hình 5 minh họa phân bố không gian của ứng suất trong thời kỳ nhiệt phát triển mạnh. Vùng ứng suất lớn tập trung về khu vực bị ràng buộc và vùng chuyển tiếp, không trùng hoàn toàn với vùng có nhiệt độ cao nhất ở Hình 2. Điều này cho thấy ứng suất không chỉ do biên độ nhiệt mà còn do gradient nhiệt và khả năng biến dạng tự do bị hạn chế. Do đó, đánh giá nguy cơ nứt chỉ bằng Tmax có thể bỏ sót trạng thái bất lợi về cơ học.

3.5. Tương tác giữa phân đoạn thi công và trạng thái ứng suất

Một kết quả đáng chú ý là ứng suất cực đại ở giai đoạn 2 luôn lớn hơn giai đoạn 1, mặc dù nhiệt độ cực đại của giai đoạn 2 nhìn chung thấp hơn. Mức tăng ứng suất dao động từ 0,7 đến 1,1 MPa, tương ứng khoảng 11,7 - 26,8%. Đây là bằng chứng rõ cho thấy lợi ích về nhiệt của phân đoạn không chuyển hóa trực tiếp thành lợi ích tương đương về cơ học.



Hình 6. Hiệu ứng phân đoạn: Giảm nhiệt độ nhưng tăng ứng suất ở giai đoạn 2

Hình 6 tổng hợp trực tiếp hai tác động trái chiều của phân đoạn thi công. Các cột giảm nhiệt độ đều dương, cho thấy lợi ích về nhiệt; ngược lại, các cột tăng ứng suất cũng đều dương, cho thấy bất lợi về cơ học. Đặc biệt tại 300 kg/m³, mức tăng ứng suất tương đối lớn nhất trong khi mức giảm nhiệt nhỏ, còn tại 420 kg/m³ lợi ích giảm nhiệt lớn nhất nhưng ứng suất vẫn tăng. Kết quả này khẳng định cần tối ưu đồng thời cấp phối và trình tự thi công thay vì đánh giá từng yếu tố riêng lẻ.

Cơ chế có thể được giải thích bởi ba yếu tố. Thứ nhất, lớp bê tông giai đoạn 2 được đổ trên lớp bê tông giai đoạn 1 đã phát triển độ cứng, do đó biến dạng nhiệt tự do của lớp mới bị kìm giữ mạnh hơn. Thứ hai, trường nhiệt của lớp dưới không còn đồng nhất mà mang theo lịch sử nung nóng và hạ nhiệt từ giai đoạn trước, tạo ra gradient nhiệt phức tạp tại mặt tiếp giáp. Thứ ba, sự khác biệt về tuổi và mô-đun đàn hồi giữa hai lớp làm thay đổi phân bố ứng suất tự cân bằng trong toàn khối. Vì vậy, phân đoạn thi công cần được thiết kế đồng thời với thời gian chờ giữa các đợt, chế độ bảo ôn và cấp phối của từng lớp.

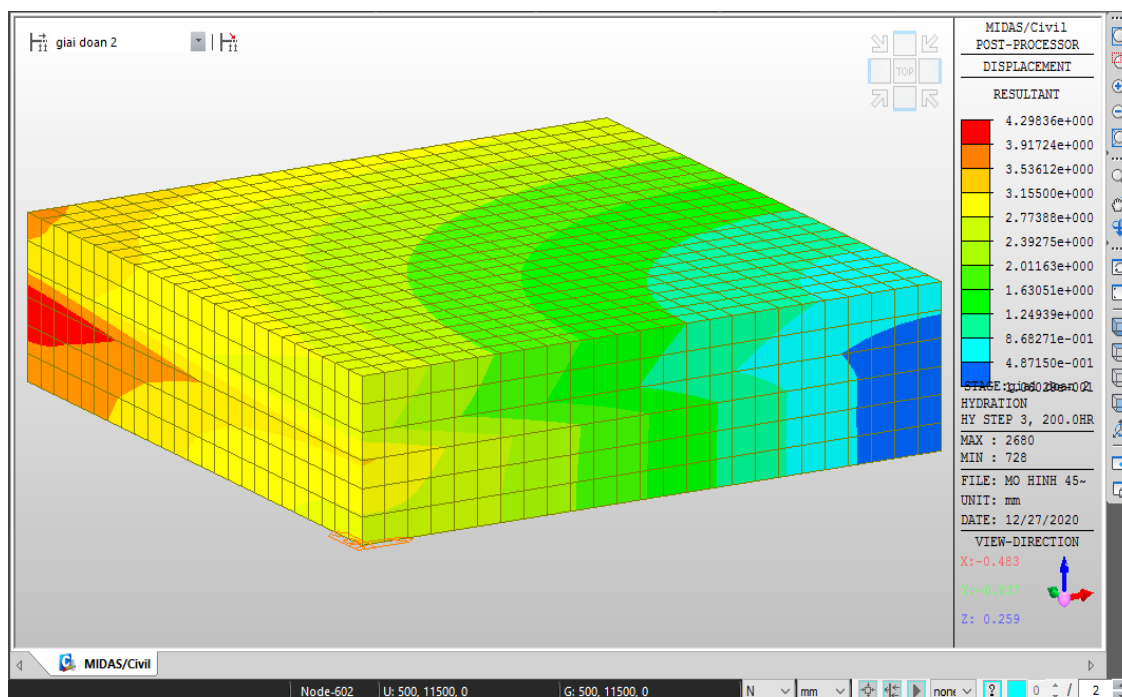
3.6. Chuyển vị và biến dạng nhiệt

Chuyển vị của khối bê tông tăng theo mức phát nhiệt và phản ánh tổng hợp ảnh hưởng của nhiệt độ, gradient nhiệt và điều kiện kìm giữ. Với hàm lượng xi măng 300 kg/m³, chuyển vị cực đại xấp xỉ 2,9 mm; khi tăng hàm lượng xi măng, chuyển vị tăng dần và đạt khoảng 4,7 mm ở trường hợp 450 kg/m³ trong giai đoạn phát triển nhiệt mạnh. Các trường hợp trung gian cho thấy xu hướng tương tự: Khoảng 3,4 mm tại 360 kg/m³, 4,0 mm tại 390 kg/m³ và 4,4 mm tại 420 kg/m³.

Ở giai đoạn 2, chuyển vị không tăng mạnh như ứng suất và trong nhiều trường hợp còn giảm nhẹ so với giai đoạn 1. Chẳng hạn, với 390 kg/m³, chuyển vị giảm từ khoảng

3,6 xuống 3,5 mm; với 420 kg/m^3 giảm từ khoảng 3,8 xuống 3,7 mm. Trường hợp 450 kg/m^3 có xu hướng khác, chuyển vị tăng từ khoảng 4,1 lên 4,2 mm. Sự khác biệt này một lần nữa cho thấy phân đoạn thi công làm thay đổi quan hệ giữa nhiệt độ, biến dạng tự do và ứng suất cưỡng bức.

Hình 7 thể hiện trường chuyển vị tổng hợp và cho thấy biến dạng lớn tập trung về vùng biên tự do, trong khi vùng chịu ràng buộc có chuyển vị nhỏ hơn. Hình này bổ sung cho Hình 5 ở khía cạnh cơ học: Chuyển vị phản ánh xu hướng giãn nở tổng thể của khối, còn ứng suất phản ánh mức độ cản trở biến dạng. Vì vậy, trường hợp chuyển vị không tăng đáng kể ở giai đoạn 2 nhưng ứng suất vẫn tăng là phù hợp với việc độ cứng và mức kìm giữ của hệ đã thay đổi.



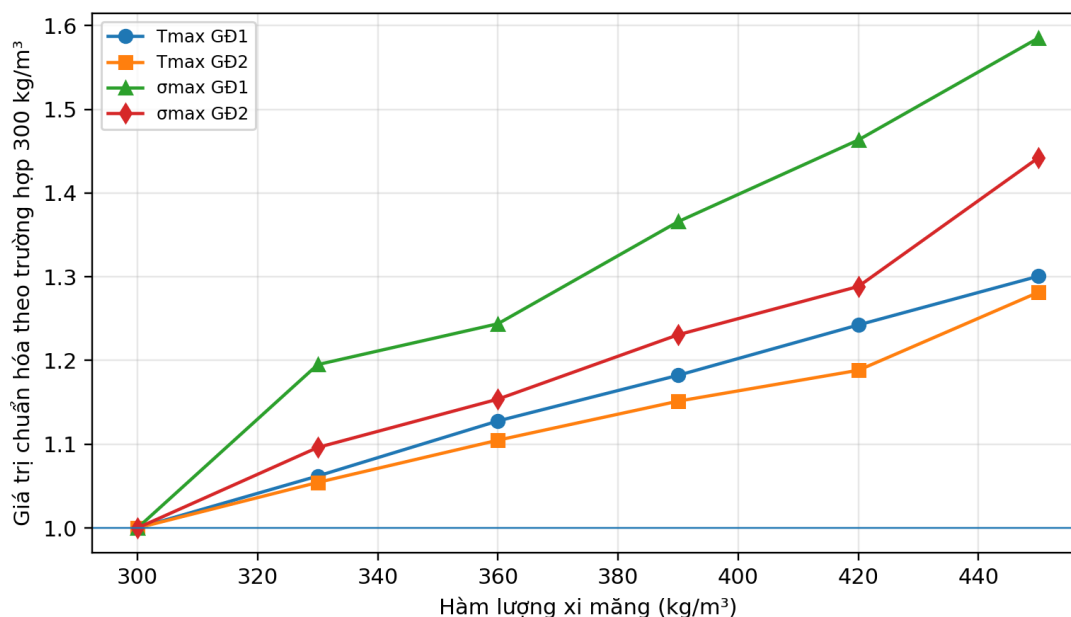
Hình 7. Trường chuyển vị điển hình của bộ móng trong giai đoạn phát triển nhiệt

3.7. Đánh giá độ nhạy và chỉ số chuẩn hóa

Hình 8 đưa các đại lượng có đơn vị khác nhau về cùng mốc chuẩn tại 300 kg/m^3 để so sánh độ nhạy. Các đường ứng suất tăng nhanh hơn các đường nhiệt độ, đặc biệt ở giai đoạn 1, cho thấy đáp ứng cơ học nhạy hơn với sự gia tăng hàm lượng xi măng. Do đó, lợi ích của việc giảm hàm lượng xi măng không chỉ thể hiện ở vài độ C giảm của nhiệt độ đỉnh mà còn có thể lớn hơn xét theo tỷ lệ giảm ứng suất.

Để so sánh trực tiếp độ nhạy của các đại lượng có đơn vị khác nhau, các giá trị được chuẩn hóa theo trường hợp 300 kg/m^3 . Khi tăng hàm lượng xi măng lên 450 kg/m^3 , nhiệt độ cực đại tăng khoảng 30,1% ở giai đoạn 1 và 28,2% ở giai đoạn 2. Trong cùng khoảng biến thiên, ứng suất tăng khoảng 58,5% ở giai đoạn 1 và 44,2% ở giai đoạn 2. Như vậy, về tỷ lệ tương đối, ứng suất nhạy với hàm lượng xi măng mạnh hơn nhiệt độ cực đại.

Kết quả này có ý nghĩa thiết kế: Giảm một lượng xi măng hợp lý có thể tạo ra lợi ích cơ học lớn hơn mức giảm nhiệt độ thể hiện trực tiếp. Tuy nhiên, việc giảm xi măng không thể thực hiện độc lập với yêu cầu cường độ và độ bền. Cần xem xét sử dụng phụ gia khoáng, phụ gia giảm nước hoặc lựa chọn tuổi thiết kế phù hợp để duy trì cường độ trong khi giảm nhiệt thủy hóa.



Hình 8. Mức tăng chuẩn hóa của nhiệt độ và ứng suất theo hàm lượng xi măng

4. HÀM Ý ĐỐI VỚI THIẾT KẾ CẤP PHỐI VÀ TỔ CHỨC THI CÔNG

Từ các kết quả trên, có thể rút ra một số hàm ý cho thiết kế và thi công bê tông khối lớn. Thứ nhất, hàm lượng xi măng cần được xem là một biến kiểm soát ngay từ giai đoạn thiết kế cấp phối. Trong phạm vi khảo sát, mỗi 30 kg/m³ xi măng tăng thêm làm nhiệt độ cực đại tăng khoảng 2,7 - 3,2°C và ứng suất cực đại tăng khoảng 0,43 - 0,45 MPa. Đây là mức thay đổi đủ lớn để ảnh hưởng đến chỉ tiêu kiểm soát nứt đối với các khối có kích thước lớn.

Thứ hai, phân đoạn thi công theo chiều cao có tác dụng giảm nhiệt độ cực đại nhưng không bảo đảm làm giảm ứng suất. Do đó, khi lựa chọn chiều cao đợt đổ và thời gian chờ, cần kiểm tra đồng thời hai tiêu chí nhiệt và cơ học. Việc chỉ chứng minh rằng Tmax giảm sau khi chia lớp là chưa đủ để kết luận phương án an toàn hơn. Mặt tiếp giáp giữa các đợt đổ, độ cứng của lớp cũ và lịch sử nhiệt của nó phải được đưa vào mô hình.

Thứ ba, đối với các trường hợp hàm lượng xi măng cao từ khoảng 420 - 450 kg/m³, nhiệt độ cực đại đạt trên 61°C ở cả hai giai đoạn và ứng suất cực đại giai đoạn 2 đạt 6,7 - 7,5 MPa. Các trường hợp này cần được ưu tiên áp dụng thêm biện pháp kiểm soát như hạ nhiệt độ bê tông ban đầu, bảo ôn bề mặt, sử dụng chất kết dính có nhiệt thủy hóa thấp hoặc điều chỉnh lịch thi công. Nếu có hệ thống quan trắc, cảm biến nên được bố trí tại vùng tâm từng lớp, gần bề mặt, tại đáy và gần mặt tiếp giáp giữa hai giai đoạn.

Thứ tư, kết quả hồi quy trong nghiên cứu có thể sử dụng như chỉ báo sơ bộ trong phạm vi mô hình đã khảo sát, nhưng không nên ngoại suy trực tiếp cho kết cấu khác. Hệ số độ nhạy phụ thuộc vào hình học khối, nhiệt độ môi trường, loại xi măng, tính chất nhiệt của bê tông, điều kiện bảo dưỡng và mức độ kìm giữ. Đối với công trình thực tế, mô hình cần được hiệu chỉnh bằng kết quả thử nghiệm nhiệt đoạn nhiệt hoặc dữ liệu quan trắc hiện trường.

Cuối cùng, kiểm soát nứt nhiệt nên được tổ chức theo quy trình tích hợp: Lựa chọn cấp phối có hàm lượng chất kết dính hợp lý; mô phỏng nhiệt-cơ theo trình tự thi công thực tế; dự báo vị trí và thời điểm bất lợi; bố trí cảm biến tại các vị trí này; điều chỉnh biện pháp bảo ôn, thời gian tháo cốp pha hoặc chế độ làm mát theo số liệu quan trắc. Cách tiếp cận này phù hợp với nguyên tắc kiểm soát chủ động được khuyến nghị trong các hướng dẫn về bê tông khối lớn [3, 4, 5, 15].

5. KẾT LUẬN

- Hàm lượng xi măng ảnh hưởng rất rõ đến ứng xử nhiệt-cơ của bê tông khối lớn. Khi hàm lượng xi măng tăng từ 300 lên 450 kg/m³, nhiệt độ cực đại tăng từ 53,2 lên 69,2°C ở giai đoạn 1 và từ 51,5 lên 66,0°C ở giai đoạn 2.

- Quan hệ giữa hàm lượng xi măng và nhiệt độ cực đại gần tuyến tính trong phạm vi khảo sát. Độ nhạy tương ứng khoảng 0,106°C/(kg/m³) ở giai đoạn 1 và 0,091°C/(kg/m³) ở giai đoạn 2.

- Ứng suất cực đại cũng tăng gần tuyến tính với hàm lượng xi măng. Giá trị tăng từ 4,1 lên 6,5 MPa ở giai đoạn 1 và từ 5,2 lên 7,5 MPa ở giai đoạn 2. Mức tăng tương đối của ứng suất lớn hơn mức tăng tương đối của nhiệt độ, cho thấy nguy cơ cơ học nhạy hơn so với chỉ tiêu nhiệt độ đỉnh.

- Phân đoạn thi công theo hai lớp 1,5 m làm giảm nhiệt độ cực đại khoảng 3,2 - 7,4% trong phần lớn các trường hợp. Tuy nhiên, ứng suất cực đại ở giai đoạn 2 lại cao hơn giai đoạn 1 khoảng 11,7 - 26,8% do điều kiện kìm giữ và lịch sử nhiệt của lớp bê tông đã thi công trước.

- Kết quả cho thấy đánh giá hiệu quả phân đoạn thi công chỉ dựa trên nhiệt độ cực đại là chưa đủ. Thiết kế cấp phối và trình tự thi công cần được tối ưu đồng thời dựa trên cả nhiệt độ, ứng suất và chuyển vị. Đối với công trình thực tế, cần hiệu chỉnh mô hình bằng quan trắc nhiệt độ, khi có thể số liệu biến dạng/ứng suất ở tuổi sớm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Y. Ballim, P. C. Graham. Early-age heat evolution of clinker cements in relation to microstructure and composition: implications for temperature development in large concrete elements. *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, no. 5, pp. 417-426, 2004, doi: 10.1016/S0958-9465(03)00064-7.

[2] Y. Zhao, G. Li, C. Fan, W. Pang, Y. Wang. Effect of Thermal Parameters on Hydration Heat Temperature and Thermal Stress of Mass Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2021, Article ID 5541181, 2021, doi: 10.1155/2021/5541181.

[3] ACI Committee 207. Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete (ACI 207.2R-07). American Concrete Institute, 2007.

[4] Japan Concrete Institute. JCI Guidelines for Control of Cracking of Mass Concrete 2016. Japan Concrete Institute, Tokyo, 2016.

[5] TCXDVN 305:2004. Bê tông khối lớn - Quy phạm thi công và nghiệm thu. Bộ Xây dựng, 2004.

[6] Abdallah I. Husein Malkawi, Saad A. Mutasher, Tony J. Qiu. Thermal-Structural Modeling and Temperature Control of Roller Compacted Concrete Gravity Dam. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 17, no. 4, pp. 177-187, 2003, doi: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2003)17:4(177).

[7] J.-H. Ha, Y. Jung, Y.-G. Cho. Thermal crack control in mass concrete structure using an automated curing system. *Automation in Construction*, vol. 45, pp. 16-24, 2014, doi: 10.1016/j.autcon.2014.04.014.

[8] X. Liu, C. Zhang, X. Chang, W. Zhou, Y. Cheng, Y. Duan. Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system. *Applied Thermal Engineering*, vol. 78, pp. 449-459, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.050.

[9] S. Qiang, Z.-Q. Xie, R. Zhong. A p-version embedded model for simulation of concrete temperature fields with cooling pipes. *Water Science and Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 248-256, 2015, doi: 10.1016/j.wse.2015.08.001.

- [10] Y.-X. Hong, W. Chen, J. Lin, J. Gong, H.-D. Cheng. Thermal field in water pipe cooling concrete hydrostructures simulated with singular boundary method. *Water Science and Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 107-114, 2017, doi: 10.1016/j.wse.2017.06.004.
- [11] P. R. Singh, D. C. Rai. Effect of Piped Water Cooling on Thermal Stress in Mass Concrete at Early Ages. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 144, no. 3, 04017183, 2018, doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001418.
- [12] Y. Huang, G. Liu, S. Huang, R. Rao, C. Hu. Experimental and finite element investigations on the temperature field of a massive bridge pier caused by the hydration heat of concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 192, pp. 240-252, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.128.
- [13] H. Zhang, C. Su, Z. Song, Z. Shen, H. Lei. Calculation of Mass Concrete Temperature Containing Cooling Water Pipe Based on Substructure and Iteration Algorithm. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol. 138, no. 1, pp. 813-826, 2024, doi: 10.32604/cmes.2023.030055.
- [14] MIDAS Information Technology. Heat of Hydration Analysis Manual. Version 7.0.1, 2004.
- [15] JSCE. Standard Specifications for Concrete Structures - 2007: Materials and Construction. Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, 2007.