

NGHIÊN CỨU PHÂN BỐ VÙNG BỀ MẶT CÓ NGUY CƠ NÚT DO NHIỆT TRONG BÊ TÔNG KHỐI LỚN BẰNG MÔ PHỎNG SỐ

Trần Hồng Hải^a, Lưu Văn Thực^{a,*}, Phạm Nguyễn Văn Phương^a,

Nguyễn Ngọc Thoan^a, Lê Thị Phương Loan^a

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

Nhận ngày 30/09/2020, Sửa xong 29/10/2020, Chấp nhận đăng 29/10/2020

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn bằng công cụ phân tích nhiệt dạng dòng của chương trình Midas Civil. Sáu mô hình với hàm lượng bột khác nhau, ba mô hình với ba loại ván khuôn: tấm xốp polystyren, ván khuôn gỗ và ván khuôn thép, và bốn mô hình với kích thước thay đổi: 3×3×3 m, 4×4×4 m, 5×5×5 m và 6×6×6 m đã được nghiên cứu. Kết quả phân tích cho thấy khu vực góc của khối bê tông là nơi có nguy cơ xuất hiện các vết nứt do nhiệt đầu tiên. Giá trị vùng nứt bề mặt không phải là cố định mà sẽ thay đổi phụ thuộc vào các yếu tố bất lợi tác động lên khối bê tông trong giai đoạn thi công. Quy định phải có các đầu đo tại các điểm cách mặt ngoài bê tông khoảng 0,4 ÷ 0,5 m theo Điều 6.6.1 tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành TCVN 305:2004 có thể là không còn phù hợp cho khối có kích thước lớn hơn 5 m. Thêm nữa, vật liệu ván khuôn có hệ số đối lưu nhiệt h_c thấp sẽ có lợi cho một kế hoạch tổng thể kiểm soát nứt do nhiệt. Yếu tố sắc xuất nứt cũng được đưa vào phân tích cho phù hợp với xu hướng lập kế hoạch kiểm soát nứt do nhiệt ở một số nước hiện nay.

Từ khóa: bê tông khối lớn; chỉ số nứt do nhiệt; xác suất nứt nhiệt; mô phỏng số; ứng suất nhiệt.

DISTRIBUTION OF THERMAL CRACKING RISK SURFACE ZONES IN MASS CONCRETE USING NUMERICAL SIMULATION

Abstract

This paper presents research results of distribution of thermal cracking risk surface zones in mass concrete using flow analysis of Midas Civil finite elements software. Six of models with various contents of binder, three models using three types of formwork, including polystyrene foam sheets, wood formwork and steel formwork, and four models with different dimensions of 3×3×3 m, 4×4×4 m, 5×5×5 m and 6×6×6 m were studied. The analytical results demonstrate that corner zones of mass have the highest risk of occurrence of thermal cracking. Dimensions of thermal cracking risk surface zones is not fixed, it changes depending on the effect of disadvantage factors in construction phases. The regulation in Section 6.6.1 of current Vietnamese standard TCVN 305:2004 for positions of temperature sensors which is 0.4 ÷ 0.5 m far from surface of mass is able to not suitable for masses with dimensions of larger than 5 m. In addition, formwork materials having lower coefficient of thermal convection is beneficial for a plan for thermal cracking control. Thermal cracking probability which is currently used for controlling thermal cracking in mass concrete in some nations is also applied for analysis in the paper.

Keywords: mass concrete; thermal cracking index; thermal cracking probability; numerical simulation; thermal stress.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(5V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(5V)-02) © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

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

1. Giới thiệu

Nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn đã trở thành một thách thức trong giai đoạn thiết kế cũng như giai đoạn thi công các công trình xây dựng. Các vết nứt do nhiệt xuất hiện sẽ phá vỡ tính toàn khối, sự ổn định và dẫn tới những ảnh hưởng nguy hại cho kết cấu [1]. Do đó, cho đến nay, nhiều quốc gia và khu vực trên thế giới đã phát triển các tiêu chuẩn hoặc hướng dẫn kỹ thuật cho việc thiết kế và thi công bê tông khối lớn để kiểm soát được các vết nứt do nhiệt này. Ở Mỹ, ủy ban ACI 207 đã ban hành bộ tiêu chuẩn cho bê tông khối lớn, gồm 5 tiêu chuẩn thành phần [2–6]. Năm 2008, hiệp hội bê tông Nhật Bản JCI đã chỉnh sửa và ban hành hướng dẫn kỹ thuật kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn [7]. Ở Anh, các quy định cho thi công bê tông khối lớn có thể tìm thấy trong phần 1 của tiêu chuẩn BS 8110 [8]. Ở Nga, một số quy định về bê tông khối lớn có thể tìm thấy ở trong tiêu chuẩn CΠ 63.13330.2012 [9]. Ở Trung Quốc, các điều khoản cho thi công bê tông khối lớn được quy định trong tiêu chuẩn quốc gia GB 50496-2018 [10]. Ở Việt Nam, các yêu cầu cho công tác thi công bê tông khối lớn được quy định trong tiêu chuẩn TCVN 305:2004 [11].

Hầu hết các tiêu chuẩn và hướng dẫn kỹ thuật trên thế giới hiện nay cho công tác kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn đều hướng tới 2 mục tiêu: i) khống chế nhiệt độ trong tâm khối bê tông $T_{\max}$ không vượt quá 70 °C trong giai đoạn sớm xi măng thủy hóa nhằm tránh sự hình thành entringite muộn (DEF) [12], và theo đó tránh được sự xuất hiện của các vết nứt trong khối ở giai đoạn muộn vì sự giãn nở entringite; ii) khống chế chênh lệch nhiệt độ ΔT giữa bề mặt và trong lòng khối không vượt quá 20 °C ÷ 25 °C. Về cơ chế nứt, nhiệt được tạo ra từ quá trình thủy hóa xi măng cùng với tốc độ thoát nhiệt chậm trong hỗn hợp bê tông là nguyên nhân chính dẫn tới sự tăng nhiệt độ của toàn khối. Bê tông trong lòng khối với nhiệt lượng lớn có xu thế nở ra trong khi tại bề mặt bên ngoài, nơi tiếp xúc với môi trường, nhiệt độ lại thấp hơn nên bê tông có xu thế co lại và cản trở sự nở của bê tông phía trong. Điều này gây ra ứng suất kéo cho bê tông ở vùng bề mặt, và theo đó gây nứt nhiệt khi ứng suất kéo do nhiệt vượt quá ứng suất kéo cho phép [12, 13].

Theo tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành TCVN 305:2004 [11], để khối bê tông không bị nứt nhiệt thì bên cạnh việc khống chế chênh lệch nhiệt độ $\Delta T \leq 20$ °C như các tiêu chuẩn trên thế giới thì tiêu chuẩn Việt Nam còn quy định mô đun chênh lệch nhiệt độ M_T giữa các điểm trong khối bê tông cũng phải được khống chế nhỏ hơn 50 °C/m. Khái niệm mô đun nhiệt M_T được hiểu là chênh lệch nhiệt độ giữa hai điểm của khối bê tông cách nhau 1 m, và giá trị M_T này trong tiêu chuẩn đã được biên soạn dựa trên kết quả trong một nghiên cứu của Đích và cs. năm 1999 [14, 15]. Giá trị giới hạn $M_T = 50$ °C/m đã được Đích và cs. [14, 15] suy ra một cách đơn giản từ kết quả thí nghiệm của khối 3×3×3 m trong điều kiện mùa hè ở Hà Nội. Cũng từ giá trị giới hạn $M_T = 50$ °C/m này, kết hợp với việc coi mức chênh lệch nhiệt độ $\Delta T = 20$ °C là có nguy cơ gây nứt, Đích và cộng sự đã kết luận vùng bề mặt có nguy cơ nứt là toàn bộ bê tông từ bề mặt ăn sâu vào phía trong 0,4 m ÷ 0,5 m và phần bê tông phía trong còn lại được gọi là lõi an toàn. Đồng thời, Đích và cộng sự cũng kết luận, để kiểm soát diễn biến nhiệt độ trong bê tông khối lớn với mục tiêu đảm bảo an toàn nứt thì cần phải có các đầu đo ở vị trí nằm sâu vào trong khối 0,4 m ÷ 0,5 m.

Tuy nhiên, trước những thay đổi trong bối cảnh thi công bê tông khối lớn hiện đại, giá trị phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt 0,4 m ÷ 0,5 m cũng như vị trí điểm đặt đầu đo như quy định trong Mục 6.6.1-Yếu tố gây nứt bê tông khối lớn, tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành TCVN 305:2004 [11] có thể không còn hoàn toàn phù hợp và cần phải được nghiên cứu thêm. Thứ nhất, với sự phát triển của các công trình nhà siêu cao tầng hiện nay ở Việt Nam, các kết cấu bê tông cốt thép ngày càng có kích thước lớn và chiều dày nhiều cấu kiện bê tông khối lớn đã lớn hơn 3 m (giá trị được sử dụng cho nghiên cứu và biên soạn TCVN 305:2004 [11]). Cụ thể, i) đài móng công trình Lotte center Hà Nội có khối tích lên tới 18600 m³, kích thước 44,1×92,7×5,7 m và mẫu sử dụng cho thí nghiệm có kích

thước $5,7 \times 5,7 \times 5,7$ m [16]; ii) móng của tòa nhà Bitexco Financial Tower ở Thành phố Hồ Chí Minh dày tới 4,0 m; iii) đài móng công trình Keangnam Hanoi Landmark Tower Hà Nội có khối tích lên tới gần 24870 m^3 , có diện tích bề mặt 6217 m^2 và cũng dày tới 4,0 m; và gần đây nhất là Tháp Landmark 81 ở Thành phố Hồ Chí Minh có diện tích bề mặt đài móng 3000 m^2 , độ dày 8,4 m, khối tích bê tông gần 17000 m^3 . Mặc dù, một nghiên cứu gần đây về ảnh hưởng của kích thước khối đến sự hình thành trường nhiệt độ và vết nứt ở tuổi sớm ngày đã được thực hiện bởi Dung và cs. [17]. Tuy nhiên, cũng giống như các nghiên cứu khác, Dung và cộng sự đã chỉ nghiên cứu chênh lệch nhiệt độ ở các điểm đặc trưng bao gồm tâm và bề mặt khối và kích thước lớn nhất đang dừng lại ở 5 m. Thứ hai, các giá trị chiều dày vùng bề mặt có nguy cơ nứt cũng như vị trí đặt đầu đo nhiệt được đề cập ở [14, 15] và TCVN 305:2004 [11] đã được rút ra từ thí nghiệm mà loại ván khuôn sử dụng đã không được đề cập đến. Trong khi đó, ván khuôn là một yếu tố quan trọng có ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình đổi lưu nhiệt từ khối bê tông ra môi trường bên ngoài [18]. Vì thế, cần phải có những khảo sát phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt với ảnh hưởng của loại ván khuôn khác nhau để có kết luận chính xác hơn. Thêm nữa, trong quá trình thi công, các yếu tố ngẫu nhiên không kiểm soát được ở giai đoạn thiết kế như thời tiết, trình độ của nhà thầu thi công, loại cốt liệu được sử dụng... cũng sẽ dẫn đến nguy cơ nứt cho khối bê tông. Do đó, nó là cần thiết để đưa thêm yếu tố sắc xuất nứt vào phân tích vùng bề mặt có nguy cơ nứt, như các tiêu chuẩn và hướng dẫn của một số nước trên thế giới đã áp dụng gần đây [7, 19].

Từ 1999 đến nay, sau báo cáo duy nhất của Đích và cs. [14, 15], cũng như từ khi ban hành với tiêu chuẩn TCVN 305:2004 [11] vào năm 2004 đến nay, chưa có một nghiên cứu mô phỏng số nào giải thích cho giá trị chiều dày vùng bề mặt có nguy cơ nứt trong báo cáo [14, 15] cũng như vị trí đặt đầu đo được gợi ý trong tiêu chuẩn TCVN 305:2004 [11]. Trong hiểu biết của nhóm tác giả, các nghiên cứu gần đây về bê tông khối lớn mà sử dụng công cụ mô phỏng số thì việc kiểm soát nứt cũng như chênh lệch nhiệt độ đều được thực hiện thông qua việc đánh giá ở một số điểm đặc trưng trên khối bê tông, bao gồm: điểm tâm khối, điểm bề mặt, điểm góc [16, 20–26] mà chưa có một nghiên cứu nào chỉ rõ phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt. Việc đánh giá nứt trên cả vùng bề mặt khối sẽ cho phép việc quan sát trở nên trực quan và chính xác hơn, và đặc biệt khi các khối có kích thước lớn hơn thì việc quan sát ở các điểm cục bộ có thể sẽ phản ánh chưa hoàn toàn đầy đủ tình trạng nứt trên toàn bề mặt khối. Trong khi đó, có thể thấy, phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt do nhiệt cũng như vị trí đặt đầu đo nhiệt phía gần mặt ngoài bê tông là một thông số rất quan trọng cho quá trình thiết kế cũng như lập biện pháp thi công bê tông khối lớn, để từ đó có thể đưa ra các biện pháp gia cường chống nứt nhiệt cần thiết ở ngay giai đoạn thiết kế. Do đó, việc thực hiện nghiên cứu này là rất cần thiết và có ý nghĩa khoa học. Mục tiêu của nghiên cứu là làm rõ phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt trong bê tông khối lớn dựa trên kết quả mô phỏng số, sử dụng công cụ phân tích nhiệt dạng dòng của chương trình Midas Civil. Yếu tố sắc xuất nứt cũng được đưa vào phân tích cho phù hợp với xu hướng lập kế hoạch kiểm soát nứt do nhiệt ở một số nước hiện nay.

2. Lý thuyết về quá trình truyền nhiệt và trường nhiệt độ - ứng suất

2.1. Quá trình dẫn nhiệt trong bê tông

Dẫn nhiệt là một dạng của quá trình truyền nhiệt và luôn đi kèm với sự trao đổi năng lượng. Đối với chất lỏng, năng lượng được trao đổi thông qua chuyển động hoặc va chạm của các phân tử chất lỏng. Đối với chất rắn như bê tông trong bài báo này, quá trình dẫn nhiệt diễn ra thông qua chuyển động của electrons, từ vùng có nhiệt độ cao về nơi có nhiệt độ thấp. Theo [27, 28], quá trình dẫn nhiệt

trong phần tử khối ba chiều bất đẳng hướng được mô tả bởi theo phương trình (1) dưới đây:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad (1)$$

trong đó: $T(x, y, z, t)$ là nhiệt độ tại phần tử có tọa độ (x, y, z) ở thời điểm t ($^{\circ}\text{C}$); $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ là hệ số dẫn nhiệt của vật liệu tương ứng theo 3 phương x, y, z ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$); q là nhiệt sinh ra trong một đơn vị thể tích (W/m^3); C là tỉ nhiệt của bê tông ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$); ρ là khối lượng riêng của bê tông (kg/m^3); t là thời gian.

Phương trình (1) có thể được trình bày dưới dạng ma trận như phương trình (2) dưới đây:

$$[C] \{\dot{T}\} + [\bar{K}] \{T\} = \{Q\} \quad (2)$$

trong đó: $[C]$ là ma trận nhiệt dung riêng; $[\bar{K}]$ là ma trận dẫn nhiệt (truyền nhiệt và đối lưu); $\{Q\}$ là véc tơ thông lượng nhiệt tổng cho nội thủy hóa và đối lưu nhiệt; $\{T\}$ là véc tơ nhiệt độ nút; $\{\dot{T}\}$ là đạo hàm theo thời gian của các véc tơ nhiệt độ của nút trên.

Đối với bê tông, theo [1] hệ số dẫn nhiệt λ thường trong khoảng từ 1,21 đến 3,11 ($\text{kcal/h.m.}^{\circ}\text{C}$), trong khi đó, theo tiêu chuẩn kỹ thuật Hàn Quốc λ ở trong khoảng 2,15 đến 2,51 ($\text{kcal/h.m.}^{\circ}\text{C}$) và ở trong khoảng 1,7 đến 2,53 ($\text{kcal/h.m.}^{\circ}\text{C}$) theo tiêu chuẩn ACI 207.2R-07 [29]. Hệ số dẫn nhiệt λ trong bê tông có xu hướng giảm khi nhiệt độ tăng, đặc biệt là ở khu vực tiếp giáp nhiệt độ môi trường [1]. Trong bài báo, hệ số dẫn nhiệt được lấy trong khoảng trung bình của các giá trị trên, như trong Bảng 1.

Các điều kiện biên cho phương trình (1) và (2):

Tại biên nhiệt độ không đổi (biên nhiệt độ của khối đất nền):

$$T = T_0 \text{ và } T(x, y, z, t) = T_0 \text{ với } t > 0 \quad (3)$$

Tại biên truyền nhiệt (ranh giới của các lớp đổ bê tông):

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z + q(t) = 0 \text{ với } t > 0 \quad (4)$$

Tại biên đối lưu (mặt tiếp xúc bê tông với ván khuôn hoặc môi trường):

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z + h_c(T - T_{\infty}) = 0 \text{ với } t > 0 \quad (5)$$

trong đó: n_x, n_y, n_z là cosin chỉ phương của bề mặt truyền nhiệt đang xét, tương ứng theo 3 phương x, y, z ; $q(t)$ là nhiệt sinh ra trong một đơn vị thể tích tại thời điểm t , (kcal/m^3); h_c là hệ số đối lưu, ($\text{kcal/m}^2.\text{h.}^{\circ}\text{C}$); T_{∞} là nhiệt độ tại mặt đối lưu, ($^{\circ}\text{C}$).

2.2. Nhiệt dung riêng

Nhiệt dung riêng của bê tông là một thông số chính ảnh hưởng đến sự phát triển nhiệt độ trong khối bê tông. Nó được định nghĩa như là nhiệt lượng cần phải cung cấp cho 1 kg bê tông để nhiệt độ của 1 kg bê tông đó tăng lên 1 $^{\circ}\text{C}$. Giá trị này phụ thuộc vào nhiệt dung riêng của các thành phần cốt liệu, chủ yếu bị ảnh hưởng bởi độ rỗng của hồ xi măng, hàm lượng nước và các đặc tính nhiệt độ của mẫu. Theo Hiệp hội bê tông Nhật Bản [7], giá trị nhiệt dung riêng của bê tông nằm trong khoảng 0,27 đến 0,31 $\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$, trong khi theo tiêu chuẩn ACI 207.2R-07 [29], giá trị này dao động từ 0,22 đến 0,24 $\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$. Trong bài báo, giá trị nhiệt dung riêng của bê tông được sử dụng là 0,25 $\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$ như được trình bày trong Bảng 1.

2.3. Đối lưu nhiệt

Đối lưu nhiệt là một dạng khác của quá trình truyền nhiệt mà nhờ đó nhiệt được truyền giữa một dòng chảy và bề mặt của một khối cứng thông qua chuyển động tương đối của phân tử của dòng chảy. Đối lưu nhiệt phụ thuộc vào loại và thời gian giữ ván khuôn, phương pháp bảo dưỡng và tốc độ gió. Ảnh hưởng tổng thể của đối lưu nhiệt được mô tả theo định luật làm mát của Newton, như công thức (6):

$$Q = h_c A (T_s - T_a) \quad (6)$$

trong đó: Q là dòng nhiệt (kcal/h); h_c là hệ số đối lưu, (kcal/m².h.°C); A là diện tích (m²); T_s là nhiệt độ tại bề mặt khối (°C); T_a là nhiệt độ môi trường (°C).

Hệ số đối lưu h_c phụ thuộc vào nhiều yếu tố: loại dòng chảy, thuộc tính vật lý của dòng chảy, nhiệt độ trung bình của bề mặt tiếp xúc với đối lưu, vị trí, cấu trúc hình học và diện tích tiếp xúc với dòng chảy, và các yếu tố khác [1]. Đối với bê tông khối lớn, vấn đề đối lưu cùng với phân tích nhiệt độ liên quan tới dạng truyền nhiệt của bề mặt bê tông và không khí. Giá trị đối lưu h_c của ván khuôn và bề mặt bê tông trong bài báo này được chọn như trong Bảng 1.

2.4. Nguồn nhiệt

Nguồn nhiệt chính là lượng nhiệt được tạo ra trong quá trình thủy hóa xi măng trong khối bê tông. Theo [1, 7], lượng nhiệt sinh ra trong quá trình thủy hóa trong một đơn vị thể tích bê tông và nhiệt độ của bê tông tại một thời điểm trong quá trình đoạn nhiệt được xác định theo công thức (7) và (8) tương ứng:

$$q = \frac{1}{24} \rho C K e^{\frac{-\alpha t}{24}} \quad (7)$$

$$T_{ad} = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (8)$$

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

2.5. Nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông

Nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông có thể được xác định thông qua nhiệt độ trung bình của các thành phần vật liệu tại thời điểm trộn, bao gồm: nước, xi măng và cốt liệu (thô, mịn). Đây là điều kiện nhiệt ban đầu áp dụng cho quá trình phân tích [1, 7]. Tuy nhiên, nhiệt độ thực tế của hỗn hợp bê tông có thể cao hơn giá trị trung bình như cách tính này 1–2 °C do sự ảnh hưởng của nhiệt thủy hóa xi măng trong quá trình trộn và vận chuyển, nhiệt độ do ma sát khi trộn và nhiệt độ do ma sát của hỗn hợp bê tông với thùng của xe bồn khi vận chuyển. Giá trị nhiệt độ ban đầu này có thể đo chính xác bằng nhiệt kế hoặc chính bằng các đầu đo nhiệt độ tại thời điểm bắt đầu đổ bê tông. Ở giai đoạn thiết kế biện pháp, giá trị nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp có thể được xác định sơ bộ theo công thức (9) dưới đây, phụ thuộc vào nhiệt độ và hàm lượng của thành phần vật liệu [7]:

$$T_b = \frac{C_b (T_c \times W_c + T_x \times W_x) + T_n \times W_n}{C_b (W_c + W_x) + W_n} \quad (9)$$

trong đó: T_b là nhiệt độ trung bình sau khi trộn (°C); C_b là nhiệt dung riêng của xi măng và cốt liệu có tính đến nước, giá trị có thể chấp nhận là $C_b = 0,2$; W_c, T_c là khối lượng riêng (kg/m³) và nhiệt độ

trung bình của cốt liệu (thô, mịn) ($^{\circ}\text{C}$); W_x, T_x là khối lượng riêng (kg/m^3) và nhiệt độ trung bình của xi măng ($^{\circ}\text{C}$); W_n, T_n là khối lượng riêng (kg/m^3) và nhiệt độ trung bình của nước ($^{\circ}\text{C}$).

Theo Thực và cs. [18], hỗn hợp bê tông có nhiệt độ ban đầu càng thấp thì nguy cơ nứt càng giảm. Với các điều kiện trong nghiên cứu, Thực và cộng sự đã kết luận rằng, cứ giảm được 10°C nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp thì chỉ số nứt I_{cr} tăng khoảng 20%. Trong bài báo này, nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông được lấy theo giá trị trung bình đo được trong một nghiên cứu thực nghiệm năm 2019 của nhóm tác giả [22], Bảng 1.

2.6. Nhiệt độ môi trường

Nhiệt độ môi trường là nhiệt độ hằng ngày ở vị trí thi công khối bê tông được sử dụng trong phân tích. Giá trị nhiệt độ môi trường có thể đưa vào phân tích ở dạng giá trị trung bình, ở dạng hàm Sine hoặc ở dạng biến động theo giá trị thực tế theo thời gian. Ở giai đoạn thiết kế, giá trị này có thể lấy theo nhiệt độ trung bình 3 năm theo lịch sử của khu vực đó hoặc dựa vào kết quả của trạm quan trắc khí tượng thủy văn của khu vực. Theo [7, 18], nhiệt độ môi trường là một nhân tố ảnh hưởng trực tiếp tới nhiệt độ lớn nhất ở tâm $T_{\max}$ và lượng giảm nhiệt độ của khối bê tông khi đổ. Chế tạo và đổ bê tông vào sáng sớm hoặc vào ban đêm cũng là một giải pháp giúp giảm nhiệt độ $T_{\max}$ và lượng giảm nhiệt độ của bê tông khi đổ. Ở khía cạnh mùa thi công (hè, đông), khi công trình thi công vào mùa hè, nhiệt độ của bê tông khi đổ lớn hơn nhiều so với nhiệt độ bê tông khi thi công vào mùa đông. Điều này làm cho nhiệt độ $T_{\max}$ và lượng tăng nhiệt độ khối bê tông cũng lớn hơn, dẫn đến chỉ số nứt do nhiệt I_{cr} có xu hướng nhỏ hơn, tức là khối bê tông có nguy cơ nứt nhiều hơn. Trong nghiên cứu này, nhiệt độ môi trường được lấy theo giá trị trung bình thực tế trong một nghiên cứu thực nghiệm của nhóm tác giả [22], như Bảng 1.

2.7. Nhiệt độ đất nền

Nhiệt độ đất nền đại diện cho một điều kiện biên trong phân tích truyền nhiệt và giá trị này được đưa vào phân tích ở dạng hằng số. Khi các nút không được gán điều kiện đối lưu hoặc hằng số nhiệt độ, nó được tự động phân tích với điều kiện đoạn nhiệt mà không có sự truyền nhiệt [1]. Trong bài báo này, giá trị của nhiệt độ đất nền đưa vào phân tích cũng được lấy từ thực nghiệm trong nghiên cứu [22] như trong Bảng 1.

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

Theo [1, 7, 13, 30], khi chênh lệch nhiệt độ ΔT càng lớn thì ứng suất nhiệt trong khối bê tông càng lớn, mối quan hệ giữa ứng suất nhiệt và nhiệt độ trong khối bê tông thể hiện trong công thức (10):

$$\{\sigma\} = [R] \times E \times \beta \times \{\Delta T\} \quad (10)$$

trong đó: $\{\sigma\}$ là vectơ ứng suất tại điểm khảo sát, (Kg/m^2); $[R]$ là ma trận cản biến dạng của bê tông; E là mô đun đàn hồi của bê tông, (Kg/m^2); $\{\Delta T\}$ là véc tơ gradient nhiệt độ; β là hệ số giãn nở nhiệt của bê tông.

Theo [7], chỉ số nứt I_{cr} của kết cấu bê tông được định nghĩa như là tỉ số của cường độ kéo tách chia cho ứng suất kéo do nhiệt được tính trong toàn bộ quá trình diễn biến của nhiệt độ, xác định theo công thức (11) dưới đây. Khái niệm chỉ số nứt do nhiệt I_{cr} được đề cập trong hướng dẫn của hiệp hội bê tông Nhận Bản JCI [7] cũng như Viện bê tông Hàn quốc [19].

$$I_{cr} = \frac{f_t(t_e)}{\sigma_t(t_e)} \quad (11)$$

$$f_t(t_e) = C_1 x f'_c(t_e)^{C_2} \quad (12)$$

trong đó: $f_t(t_e)$ là giá trị thiết kế cường độ kéo tách bê tông tại thời điểm t_e (Kgf/m²), xác định theo công thức (10); $\sigma_t(t_e)$ là ứng suất kéo trong kết cấu bê tông tại thời điểm t_e (Kgf/m²); C_1, C_2 : các hằng số phụ thuộc vào loại bê tông; $f'_c(t_e)$ là cường độ nén của bê tông tại thời điểm t_e (Kgf/m²). Trong nghiên cứu này, sự phát triển cường độ nén của bê tông theo thời gian được xác định theo tiêu chuẩn ACI, công thức (13); t_e là tuổi chỉnh nhiệt độ (ngày);

$$f'_c(t_e) = \frac{t}{a + bt_e} \times f'_c(28) \quad (13)$$

trong đó: Hệ số phát triển cường độ a, b phụ thuộc vào loại bê tông. Trong nghiên cứu này, giá trị a, b được lấy như ở Bảng 1; $f'_c(28)$ là cường độ nén bê tông ở tuổi 28 ngày.

2.9. Xác suất nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn

Do chất lượng của kết cấu bê tông phụ thuộc rất nhiều vào các vết nứt nên việc ngăn ngừa các vết nứt do nhiệt hoặc kiểm soát chiều rộng vết nứt này dưới mức cho phép là mục tiêu của kế hoạch kiểm soát nứt do nhiệt. Khi phân tích khối bê tông, kết luận kết cấu có nứt hay không phụ thuộc vào cường độ kéo tách của bê tông có lớn hơn ứng suất kéo do nhiệt xuất hiện trong khối bê tông hay không. Tuy nhiên, một vấn đề được đặt ra là các tính chất cơ – nhiệt của bê tông sử dụng trong giai đoạn phân tích thử nghiệm (giai đoạn thiết kế) chắc chắn có điểm khác so với các giá trị trong thực tế (giai đoạn thi công) [7]. Đồng thời, cường độ kéo tách của bê tông có thể không đồng nhất do có nhiều phương án khác nhau trong việc sử dụng nguyên liệu, phương pháp sản xuất, quy trình đổ, dưỡng hộ và điều kiện môi trường. Do đó, có thể chấp nhận nứt do nhiệt xảy ra phụ thuộc vào xác suất [7]. Hiệp hội bê tông Nhận Bản JCI đã thiết lập mối liên hệ giữa chỉ số nứt I_{cr} và xác suất nứt do nhiệt $P(I_{cr})$ thông qua việc so sánh chỉ số nứt do nhiệt thu được từ phân tích phần tử hữu hạn ba chiều của các kết cấu thực tế với số liệu quan sát được dù có nứt do nhiệt hay không [7]. Xác suất nứt do nhiệt của kết cấu bê tông được xác định theo công thức (14) dưới đây:

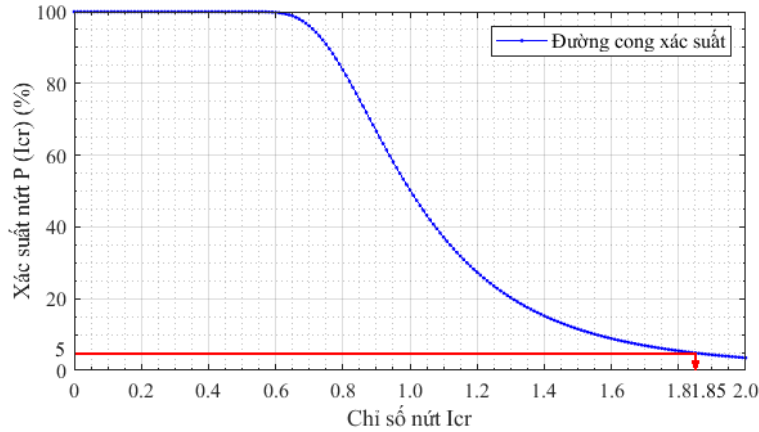
$$P(I_{cr}) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{I_{cr}}{0,92} \right)^{-4,92} \right] \times 100 (\%) \quad (14)$$

trong đó: $P(I_{cr})$ là xác suất nứt do nhiệt (%); I_{cr} là chỉ số nứt của kết cấu bê tông.

Để có cái nhìn trực quan về mối tương quan giữa chỉ số nứt và xác suất nứt. Biểu diễn công thức (14) lên đồ thị với giá trị I_{cr} trong khoảng [0-2] (Hình 1).

Theo hiệp hội bê tông Nhận Bản JCI, đối với các kết cấu bê tông, chỉ số nứt an toàn là $I_{cr} \geq 1,85$, tương ứng với xác suất nứt do nhiệt $\leq 5\%$. Khi xác suất nứt $> 5\%$ thì cấu kiện có nguy cơ nứt cao. Theo tiêu chuẩn kỹ thuật của Hàn quốc [19], i) để ngăn ngừa sự xuất hiện của nứt do nhiệt, chỉ số nứt $I_{cr} \geq 1,5$, ii) để giới hạn vết nứt do nhiệt $1,5 > I_{cr} \geq 1,2$, iii) để giới hạn các vết nứt nguy hại $1,2 > I_{cr} \geq 0,7$. Trong bài báo này, giá trị $I_{cr} = 1,5$ được lựa chọn như là giá trị giới hạn quyết định kết cấu bê tông có nứt hay không. Khi phân tích, nếu khối bê tông có chỉ số nứt $I_{cr} \geq 1,5$ thì khối bê tông đó được kết luận là không nứt và ngược lại.

Tuy nhiên, mở rộng trong các trường hợp thực tế, cũng tùy vào tầm quan trọng của kết cấu và đặc thù của từng dự án, giá trị của xác suất nứt sẽ được quyết định, từ đó tra biểu đồ trên hoặc áp dụng công thức ta có được giá trị chỉ số nứt tương ứng. Các biện pháp kiểm soát nứt nhiệt được đưa ra phải đảm bảo chỉ số nứt phải lớn hơn giá trị đó.



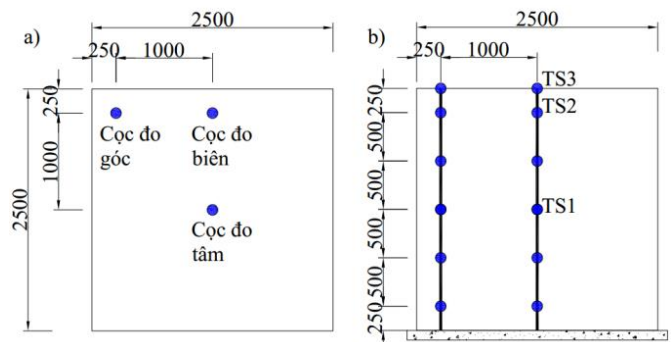
Hình 1. Tương quan giữa chỉ số nứt và sắc xuất nứt do nhiệt [7]

3. Kiểm chứng phần mềm và cách thức mô phỏng

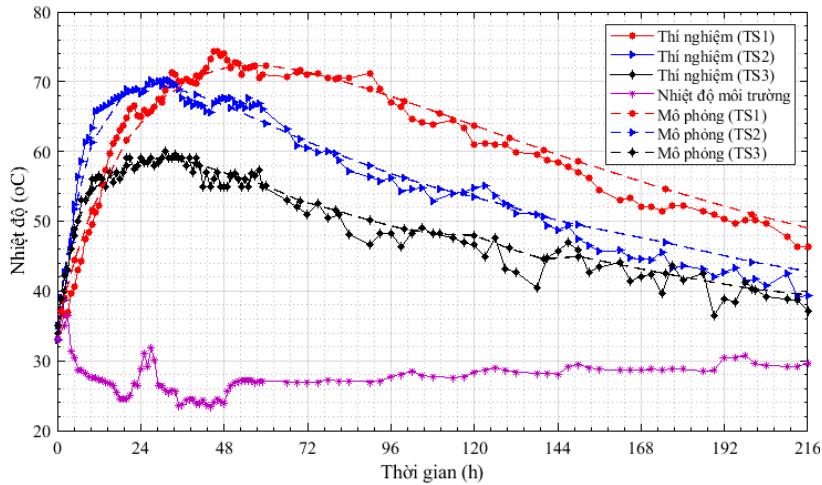
Tính chính xác của mô hình và cách thức nhóm tác giả mô phỏng có ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả phân tích và các kết luận được đưa ra trong bài báo. Do đó, việc kiểm chứng mô hình và cách thức nhóm tác giả mô phỏng là rất quan trọng. Thứ nhất, hiện nay rất nhiều các nghiên cứu trên thế giới đã sử dụng công cụ phân tích nhiệt dạng dòng của chương trình Midas Civil để phân tích trường ứng suất – nhiệt độ trong khối bê tông [13, 17, 31–40]. Bên cạnh đó, trong một nghiên cứu vừa công bố [22], nhóm tác giả đã tiến hành thực nghiệm đo nhiệt độ của một khối bê tông với kích thước $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ m (Hình 2, Hình 3) và mô phỏng lại khối bê tông đó với các điều kiện thực tế để kiểm chứng và kết luận tính chính xác giữa mô hình và thực tế. Kết quả nghiên cứu cho thấy, các biểu đồ phát triển nhiệt độ đo được từ khối bê tông thực nghiệm (nét liền) và mô phỏng số (nét đứt) là tương đối gần nhau (Hình 4). Sự tương đồng về quy luật phát triển nhiệt cũng như giá trị nhiệt độ lớn nhất tại các điểm khảo sát cho thấy độ tin cậy, tính tương thích giữa cách thức mô phỏng và thực nghiệm. Kết quả này khẳng định quá trình phân tích bằng mô phỏng số sử dụng công cụ Midas Civil của nhóm tác giả là đáng tin cậy. Do đó, các kết quả thu được từ quá trình mô phỏng trong bài báo này là có giá trị, phản ánh được ứng xử thực tế của trường ứng suất – nhiệt độ trong khối bê tông.



Hình 2. Khối bê tông thực nghiệm



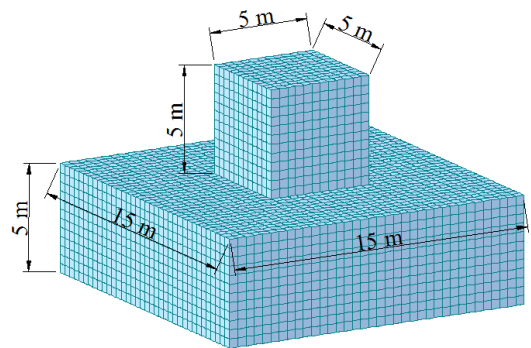
Hình 3. Vị trí đặt đầu đo nhiệt độ
a) Mặt bằng; b) Mặt cắt đứng



Hình 4. So sánh sự phát triển nhiệt độ giữa mô phỏng và thực nghiệm ở vị trí tâm khối [22]

4. Mô hình phân tích trong bài báo

Đối tượng khảo sát là một kết cấu đài móng phổ biến, bao gồm khối đất nền và khối bê tông đài móng với kích thước $5,0 \times 5,0 \times 5,0$ m (Hình 5). Vật liệu bê tông và các điều kiện biên phân tích được sử dụng như Bảng 1 và Bảng 2. Mô hình khối bê tông gồm 1000 phần tử và 1320 nút. Mô hình khối nền đất gồm 9000 phần tử và 10912 nút. Tại mỗi nút của các phần tử bê tông, giá trị chỉ số nứt nhiệt I_{cr} được rút ra từ việc chia ứng suất kéo cho phép của bê tông và ứng suất kéo do nhiệt theo thời gian. Trên mỗi mặt cắt bê tông, tiến hành nối các điểm có cùng chỉ số nứt sẽ thu được một đường đồng mức có cùng chỉ số nứt. Theo [7], việc mô hình hóa cốt thép trong bê tông khối lớn là không cần thiết do cản trở bởi cốt thép nói chung là không đáng kể, do đó ảnh hưởng đến ứng suất nhiệt là nhỏ. Thực tế, rất nhiều các nghiên cứu về bài toán nhiệt trong bê tông khối lớn đều không xem xét mô phỏng cốt thép. Trong nghiên cứu này, cốt thép được bỏ qua khi mô hình.



Hình 5. Mô hình tổng thể khối móng

5. Kết quả phân tích và thảo luận

5.1. Phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt trong khối bê tông

Để xem xét phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt của khối bê tông, nhóm nghiên cứu tiến hành quan sát ở mặt cắt đi qua tâm khối, nơi có phân bố chỉ số nứt I_{cr} là rõ ràng nhất. Khối bê tông được điều chỉnh hàm lượng tro bay và xi măng, dựa trên cấp phối gốc ở Bảng 2, để sau khi phân tích khối bê tông xuất hiện các trạng thái: từ không nứt (i) – khối bê tông có $I_{cr} \geq 1,5$ đến bắt đầu nứt (ii) – khối bê tông có $1,5 \geq I_{cr} \geq 1,2$ và nứt nguy hại (iii) – khối bê tông có $I_{cr} \leq 1,2$. Việc điều chỉnh này sẽ giúp quá trình quan sát phân bố vùng bề mặt khối có nguy cơ nứt dễ dàng hơn.

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

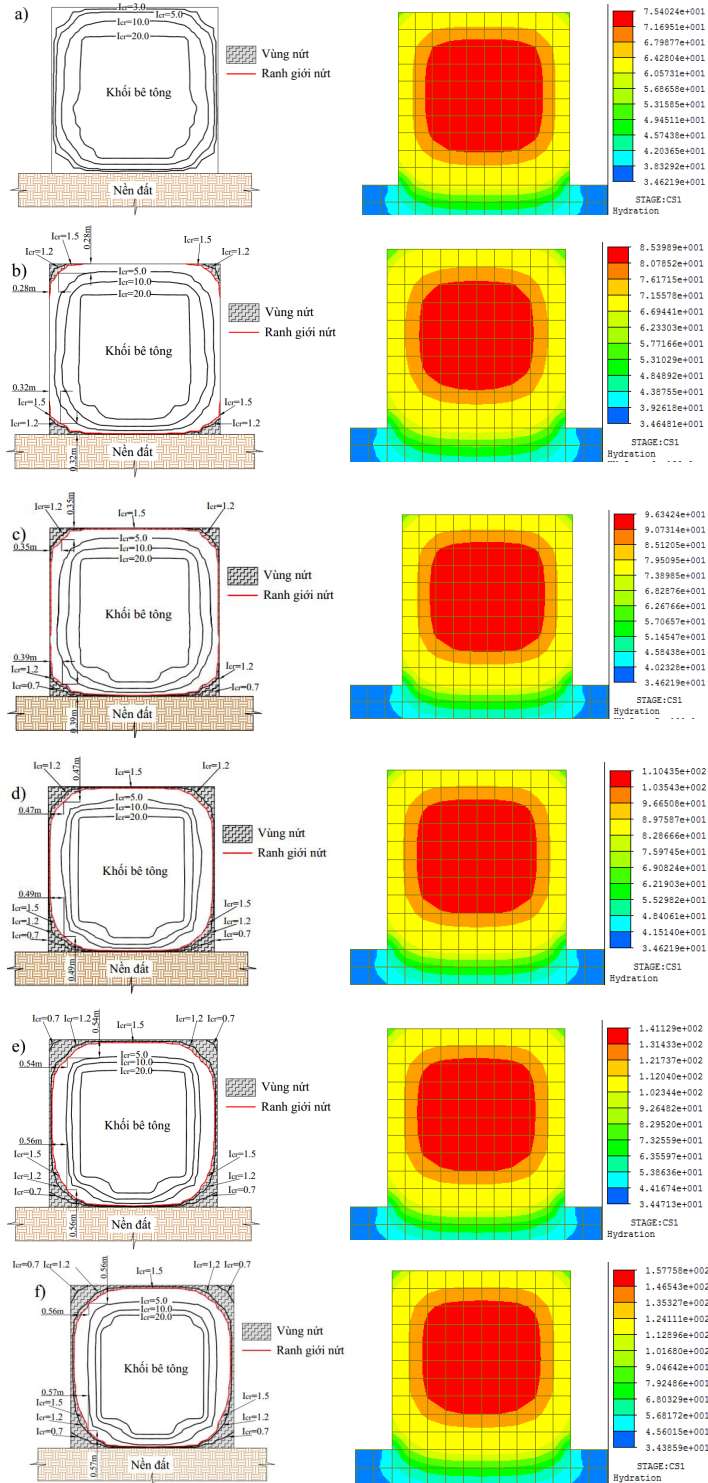
Đặc điểm	Đơn vị	Bê tông	Lớp đất dưới
Nhiệt dung riêng	kcal/kg°C	0,25	0,2
Khối lượng riêng	kgf/m ³	2400	1800
Hệ số dẫn nhiệt	kcal/m.h.°C	2,3	1,7
Hệ số trao đổi nhiệt khi tiếp xúc môi trường	kcal/m ² .h.°C	12	12
Hệ số trao đổi nhiệt khi tiếp xúc ván khuôn gỗ	kcal/m ² .h.°C	8	-
Nhiệt độ môi trường	°C	35	-
Nhiệt độ bê tông khi đổ	°C	36	-
Nhiệt độ nền đất	°C	-	27,5
Cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi	kG/m ²	400	-
Hệ số hàm phát triển cường độ nén	ACI	$a = 4,0; b = 0,85$	-
Hệ số giãn nở nhiệt		$1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5}$
Hệ số poisson's		0,18	0,2

Bảng 2. Thành phần cấp phối lớp dưới đài móng tòa nhà Lotte Center

Cát (kg)	Đá (kg)	Nước (l)	Bột (kg/m ³)	Xi măng (%)	Tro bay (%)	Phụ gia siêu dẻo
880	951	160	385	75	25	1,35%

Hình 6 thể hiện phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt và chỉ số nứt I_{cr} cho mặt cắt dọc giữa khối bê tông tại thời điểm nhiệt độ trong tâm khối đạt cực đại (100 giờ sau khi đổ bê tông), thời điểm, tức là nguy cơ nứt cho lớp bê tông bề mặt là lớn nhất. Các phần tử bê tông nằm trên cùng một đường đồng mức có I_{cr} là như nhau. Đường đồng mức $I_{cr} = 1,5$ (màu đỏ) là ranh giới phân chia vùng bê tông có nứt và không nứt. Vùng bê tông nằm giữa hai đường đồng mức có $1,5 \geq I_{cr} \geq 1,2$ là vùng bê tông bắt đầu nứt và vùng bê tông nằm ngoài đường đồng mức $I_{cr} = 1,2$ là vùng bê tông nứt nguy hại (màu xám, gạch zigzag). Từ đây, có thể nhận thấy, khu vực góc của khối bê tông là nơi có nguy cơ xuất hiện các vết nứt do nhiệt đầu tiên (Hình 6(b)). Sự xuất hiện này có thể được giải thích bởi khu vực góc là vùng có diện tích mặt thoáng lớn, chịu đối lưu nhiệt theo cả 2 phương (theo mặt cắt) nên quá trình thoát nhiệt diễn ra nhanh. Bên cạnh đó, có thể thấy các góc tiếp xúc với nền đất, vùng nứt phát triển nhanh hơn (Hình 6(b, c, d, e, f)) so với các góc tiếp xúc với môi trường phía trên. Điều này là bởi vì trong phân tích này, nhiệt độ nền đất được áp dụng đã thấp hơn nhiệt độ môi trường (Bảng 1) nên góc tiếp xúc với nền đất bị thoát nhiệt nhanh hơn. Do đó, khi thi công, cần phải có biện pháp tránh làm mất nhiệt nhanh ở các khu vực góc, nơi có nhiều mặt tiếp xúc với môi trường.

Nếu khối bê tông tiếp tục chịu các yếu tố bất lợi, dẫn đến nguy cơ nứt, thì vùng nứt tiếp tục phát triển ra toàn bộ bê tông bề mặt (Hình 6(c, d, e, f)) và tạo thành một lõi an toàn ở phía trong. Khái niệm lõi an toàn đã được đề cập bởi tác giả Địch và các cộng sự trong một báo cáo năm 1999 [14, 15]. Theo tài liệu này, lõi an toàn là toàn bộ vùng bê tông cách bề mặt 0,4 m, được suy ra một cách đơn giản từ mô đun nhiệt $M_T = 50$ °C/m và coi mốc $\Delta T = 20$ °C là mốc nguy cơ nứt. Tuy nhiên, bản thân giá trị mô đun nhiệt $M_T = 50$ °C/m đã được tác giả rút ra từ việc thí nghiệm khối bê tông chỉ có kích thước 3×3×3 m. Kích thước này có thể không còn phù hợp khi kết luận cho các khối bê tông có kích thước lớn hơn như nhiều kết cấu bê tông khối lớn hiện nay. Theo nghiên cứu của tác giả với khối 5×5×5 m, trong những tình huống bất lợi (Hình 6(d, e, f)), vùng nứt ở góc đều lớn hơn 0,4 m nhưng lại nhỏ hơn



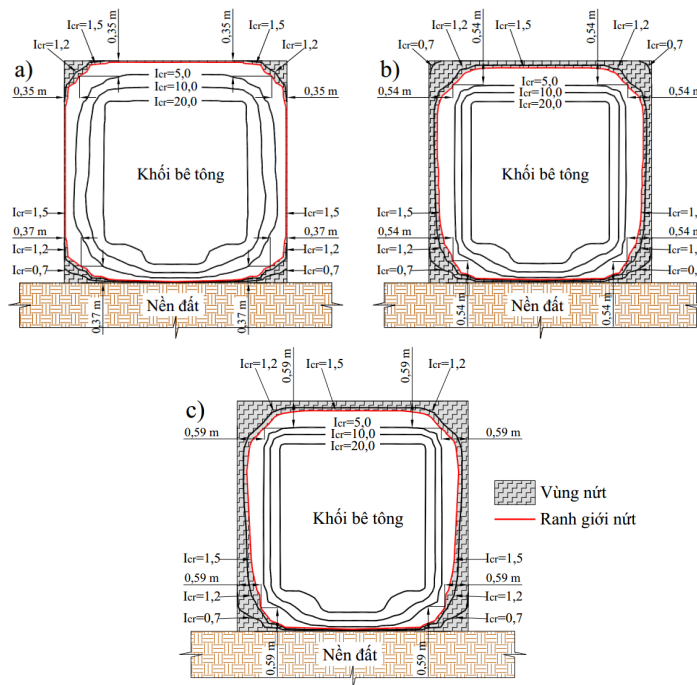
Hình 6. Phân bố vùng bê tông bề mặt có nguy cơ nứt và trường nhiệt độ tương ứng: a) Hàm lượng: 231 (kg) xi măng +154 (kg) tro bay; b) Hàm lượng: 308 (kg) xi măng +77 (kg) tro bay; c) Hàm lượng: 385 (kg) xi măng; d) Hàm lượng: 481,3 (kg) xi măng; e) Hàm lượng: 577,5 (kg) xi măng; f) Hàm lượng: 770 (kg) xi măng

ở các vùng bề mặt trung tâm. Thêm nữa, giá trị vùng nứt bề mặt không phải là giá trị cố định như đã được gợi ý bởi tác giả Đích và cs. [14, 15] mà sẽ thay đổi phụ thuộc vào các yếu tố bất lợi tác động lên khối bê tông trong giai đoạn thi công. Do đó, quy định phải có các điểm đo tại các điểm cách mặt ngoài bê tông khoảng $0,4 \div 0,5$ m như báo cáo [14,15] và theo Điều 6.6.1, tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành TCVN 305:2004 [11] là không còn hoàn toàn phù hợp. Thay vào đó, phải có các phân tích mô hình cho các khối bê tông cụ thể để đánh giá phân bố vùng có nguy cơ nứt bề mặt và từ đó mới kết luận vị trí đặt đầu đo trước khi thi công. Thực tế gần đây, trong các dự án nhà siêu cao tầng ở Việt Nam, các nhà thầu lớn đều đã thực hiện thí nghiệm các khối mẫu và tiến hành mô phỏng số để đánh giá trước khi đưa ra biện pháp thi công cuối cùng cho khối bê tông thực tế. Cũng từ phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt này, có thể thấy, khi thiết kế cho kết cấu bê tông khối lớn, cần phải chú ý việc ưu tiên đặt thép chống nứt do nhiệt cho các khu vực bề mặt, đặc biệt là khu vực góc khối.

Tiếp theo, nhóm nghiên cứu tiến hành khảo sát cụ thể một số yếu tố có ảnh hưởng trực tiếp đến phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt do nhiệt. Hai yếu tố được khảo sát là loại ván khuôn sử dụng và kích thước khối. Đây là hai yếu tố mà trong phân tích của Đích và cộng sự (sử dụng để biên soạn TCVN 305:2004 [11]) đã chưa đề cập đến.

5.2. Ảnh hưởng của loại ván khuôn đến phân bố vùng nứt bề mặt

Như đã đề cập ở trên, ván khuôn là một nhân tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp tới nhiệt độ lớn nhất ở tâm $T_{\max}$ và lượng giảm nhiệt độ của khối bê tông khi đổ, nên nhân tố này sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt. Xem xét được sự ảnh hưởng này sẽ giúp người thiết kế có cơ sở để lựa chọn loại ván khuôn có lợi nhất cho một kế hoạch tổng thể kiểm soát nứt do nhiệt, từ giai đoạn thiết kế đến khi hoàn thành khối. Để quan sát ảnh hưởng của loại ván khuôn sử dụng đến



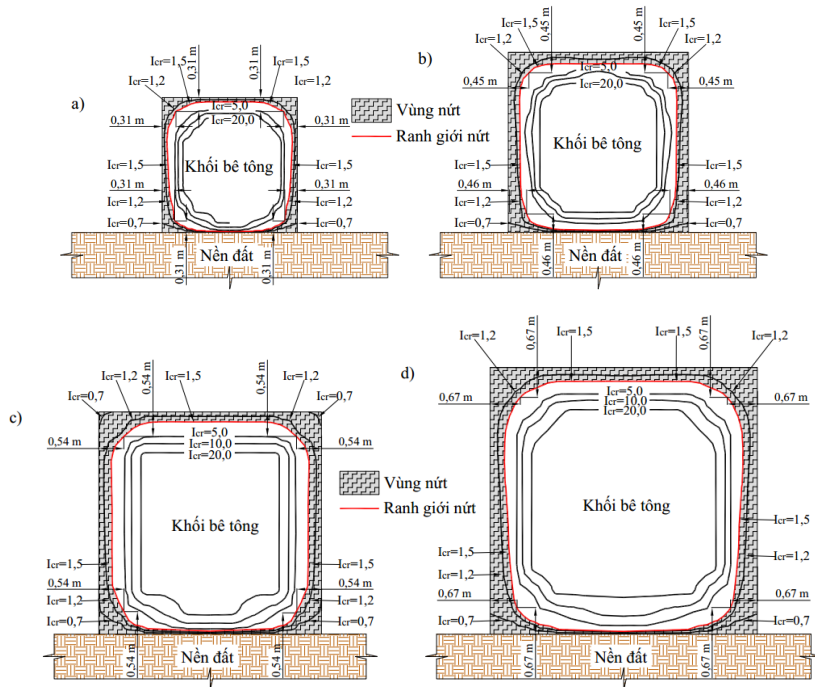
Hình 7. Phân bố vùng bê tông bề mặt có nguy cơ nứt với loại ván khuôn khác nhau
a) Tấm xốp polystyren; b) Ván khuôn gỗ; c) Ván khuôn thép

phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt, nhóm nghiên cứu tiến hành phân tích với ba loại ván khuôn khác nhau, bao gồm: tấm xốp polystyren, ván khuôn gỗ và ván khuôn thép. Về bản chất phân tích, sự thay đổi ván khuôn sẽ dẫn tới sự thay đổi hệ số đối lưu nhiệt h_c giữa bề mặt bê tông và môi trường bên ngoài. Theo [7], hệ số đối lưu nhiệt h_c của ba tấm trên lần lượt là 2, 8 và 14 (kcal/m².h.°C). Nhóm nghiên cứu tiến hành mô phỏng khối bê tông có cùng kích thước như Hình 5, cùng cấp phối như Bảng 2, chỉ thay đổi điều kiện hệ số đối lưu nhiệt h_c .

Sự thay đổi phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt khi sử dụng loại ván khuôn khác nhau được thể hiện ở Hình 7. Có thể thấy, khối bê tông sử dụng khuôn xốp polystyren có phân bố vùng nứt bề mặt nhỏ nhất, với chiều dày nứt ở góc chỉ 0,35 m (Hình 7(a)), trong khi khối dùng ván gỗ và ván thép, phân bố vùng nứt bề mặt đã tăng lên đáng kể, với chiều dày nứt ở góc lần lượt là 0,54 m và 0,59 m (Hình 7(b, c)). Vật liệu ván khuôn có hệ số đối lưu nhiệt h_c thấp hơn có xu hướng giữ lại nhiệt của bê tông vùng bề mặt tốt hơn nên chênh lệch nhiệt độ ΔT giảm, làm cho ứng suất nhiệt giảm, và theo đó giảm vùng nứt bề mặt. Từ đây, có thể kết luận, các loại ván khuôn có hệ số đối lưu nhiệt thấp sẽ rất có lợi cho một kế hoạch tổng thể kiểm soát nứt do nhiệt. Đồng thời, bên cạnh việc dùng ván khuôn, cũng có thể bổ sung thêm các lớp vật liệu dưỡng hộ, với hệ số đối lưu nhiệt thấp, bên ngoài ván khuôn để giảm hệ số đối lưu tổng thể và theo đó giảm được vùng nứt bề mặt.

5.3. Ảnh hưởng của kích thước khối đổ bê tông đến phân bố vùng nứt bề mặt

Trước những thay đổi trong bối cảnh thi công bê tông khối lớn hiện đại, các kết cấu bê tông cốt thép ngày càng có kích thước lớn hơn và chiều dày nhiều cấu kiện bê tông khối lớn đã lớn hơn 3 m (giá trị được sử dụng cho nghiên cứu và biên soạn TCVN 305:2004 [11]). Vì vậy, giá trị phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt 0,4 m ÷ 0,5 m được kết luận bởi Đích và cs. [14, 15] cũng như vị trí điểm đặt



Hình 8. Phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt với kích thước khối thay đổi
a) Khối 3×3×3 m; b) Khối 4×4×4 m; c) Khối 5×5×5 m; d) Khối 6×6×6 m

đầu đo như quy định trong Mục 6.6.1 tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành TCVN 305:2004 [11] có thể không còn phù hợp. Do đó, nghiên cứu phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt ở các khối có kích thước lớn hơn $3 \times 3 \times 3$ m là cần thiết. Để làm được điều này, nhóm nghiên cứu tiến hành phân tích các khối có kích thước lớn hơn, với 4 trường hợp: $3 \times 3 \times 3$ m, $4 \times 4 \times 4$ m, $5 \times 5 \times 5$ m và $6 \times 6 \times 6$ m. Các thông số đầu vào được cố định như Bảng 1 và Bảng 2.

Kết quả nghiên cứu cho thấy, giá trị chiều dày vùng bề mặt có nguy cơ nứt không phải là cố định mà tăng lên theo kích thước khối. Kết luận của Đích và cs. trong [14, 15] về vùng bề mặt có nguy cơ nứt (toàn bộ bê tông từ bề mặt ăn sâu vào phía trong $0,4 \text{ m} \div 0,5 \text{ m}$) cũng như giá trị điểm đặt đầu đo quy định trong tiêu chuẩn TCVN 305:2004 [11] là không còn phù hợp với các khối có kích thước trên 5 m. Cụ thể, chiều dày vùng nứt ở góc khối $3 \times 3 \times 3$ m là 0,31 m (Hình 8(a)), đã tăng lên là 0,45 m với khối $4 \times 4 \times 4$ m (Hình 8(b)), và đã vượt giá trị 0,5 m với khối $5 \times 5 \times 5$ m và $6 \times 6 \times 6$ m, tương ứng là 0,54 m và 0,67 m (Hình 8(c, d)). Như vậy, cần phải có các phân tích mô hình cho các khối bê tông cụ thể với từng dự án để đánh giá phân bố vùng có nguy cơ nứt bề mặt và từ đó mới có thể kết luận được vị trí đặt đầu đo trước khi thi công.

6. Kết luận

Từ kết quả nghiên cứu mô phỏng, có thể đưa ra các kết luận về phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn như sau:

- Khu vực góc của khối bê tông là nơi có nguy cơ xuất hiện các vết nứt do nhiệt đầu tiên do vùng góc có diện tích mặt thoáng lớn nên quá trình thoát nhiệt diễn ra nhanh. Vì vậy, khi thi công, cần phải có biện pháp tránh làm mất nhiệt nhanh của khối ở các khu vực góc, nơi có nhiều mặt tiếp xúc với môi trường.

- Giá trị vùng nứt bề mặt không phải là giá trị cố định mà sẽ thay đổi phụ thuộc vào các yếu tố bất lợi tác động lên khối bê tông trong giai đoạn thi công. Quy định phải có các điểm đo tại các điểm cách mặt ngoài bê tông khoảng $0,4 \div 0,5$ m theo Điều 6.6.1 tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành TCVN 305:2004 có thể là không còn phù hợp. Thay vào đó, phải có các phân tích mô hình cho các khối bê tông cụ thể để đánh giá phân bố vùng có nguy cơ nứt bề mặt và từ đó mới kết luận được vị trí đặt đầu đo trước khi thi công.

- Vật liệu ván khuôn có hệ số đối lưu nhiệt hc thấp có xu hướng giữ lại nhiệt của bê tông vùng bề mặt tốt hơn, dẫn đến chênh lệch nhiệt độ giảm nên có lợi cho một kế hoạch tổng thể kiểm soát nứt do nhiệt.

- Với các khối có kích thước lớn hơn 5m như phân tích trong bài báo, giá trị phân bố vùng bề mặt có nguy cơ nứt ($0,4 \div 0,5$ m từ bề mặt vào) đã không còn đúng. Nó là cần thiết phải có các thí nghiệm với các khối thử và tiến hành mô phỏng số để đánh giá trước khi đưa ra kế hoạch kiểm soát nứt cuối cùng cho khối.

Tài liệu tham khảo

- [1] Midas Information Technology. *Heat of Hydration- Analysis Analysis Manual Version 7.0.1*.
- [2] ACI Committee 207 (2005). *Guide to Mass Concrete (ACI 207.1R-05) (Reapproved 2012)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 30.
- [3] ACI Committee 207 (2007). *Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete (ACI 207.2R-07)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 28.
- [4] ACI Committee 207 (2018). *Report on Practices for Evaluation of Concrete in Existing Massive Structures for Service Conditions (ACI 207.3R-18)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 16.

- [5] ACI Committee 207 (2005). *Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete (ACI 207.4R-05) (Reapproved 2012)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 15.
- [6] ACI Committee 207 (2011). *Report on Roller-Compacted Mass Concrete (ACI 207.5R-11)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 71.
- [7] Japan Concrete Institute (2011). *Guideline for control of cracking of mass concrete*.
- [8] British Standard Institution (1997). *Structural use of concrete (BS 8110). Part 1: Code of practice for design and construction*. 389 Chiswick High Road, London, W4 4AL, UK.
- [9] The USSR Ministry of Transport (1958). *Execution Requirements for Concrete Work for Construction of Hydraulic Structures*. Technical guidelines for the protection of concrete bridge piers against thermal cracks.
- [10] Ministry of Housing and Urban-Rural Development (2018). *Code for construction of mass concrete - National Standard of the People's Republic of China (GB 50496-2018)*. The Standardization Administration of the People's Republic of China.
- [11] TCXDVN 305:2004. *Bê tông khối lớn - Quy phạm thi công và nghiệm thu*. Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng, Bộ Xây Dựng, Hà Nội.
- [12] Taylor, H. F. W., Famy, C., Scrivener, K. L. (2001). [Delayed ettringite formation](#). *Cement and Concrete Research*, 31(5):683–693.
- [13] Khalifah, H. A., Rahman, M. K., Zakariya, A.-H., Al-Ghamdi, S. (2016). Stress generation in mass concrete blocks with fly ash and silica fume-an experimental and numerical study. *Proceeding 4th International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7–11.
- [14] Đích, N. T., cs. (1999). *Báo cáo tổng kết đề tài khoa học mã số R20 9720: Đặc điểm công nghệ bê tông trong điều kiện khí hậu nóng ẩm Việt Nam*. 111.
- [15] Đích, N. T. (2011). *Công tác bê tông trong điều kiện khí hậu nóng ẩm Việt Nam*. Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.
- [16] Park, S. J., Kim, K. K., Lee, S. H. (2018). Application example of hydration heat management of mega foundation and pumpability for high performance concrete used in super high rise building. *Hội nghị khoa học quốc tế Kỷ niệm 55 năm ngày thành lập Viện KHCN Xây dựng, Viện khoa học công nghệ xây dựng IBST*.
- [17] Dung, Đ. T. M., Chúc, N. T., Khải, L. T. Q. (2020). Ảnh hưởng của kích thước kết cấu bê tông khối lớn đến sự hình thành trường nhiệt độ và vết nứt ở tuổi sớm ngày. *Tạp chí Xây Dựng Việt Nam*, 2020(1):11–14.
- [18] Thực, L. V., Quang, V. M., Khoa, H. N. (2019). Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ thi công đến chỉ số nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn. *Hội nghị Khoa học trẻ Trường Đại học Xây dựng, Hà Nội*.
- [19] Korea Concrete Institute (2010). *Korean Concrete Standard Specification: Thermal Crack Control in Mass Concrete*. Kimoonadang Publishing Company, Seoul, 166.
- [20] Hai, T. H., Thuc, L. V. (2017). [The effect of splitting concrete placement on controlling thermal cracking in mass concrete](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 11(6):22–28.
- [21] Nguyen, T.-C., Huynh, T.-P., Tang, V.-L. (2019). [Prevention of crack formation in massive concrete at an early age by cooling pipe system](#). *Asian Journal of Civil Engineering*, 20(8):1101–1107.
- [22] Le, H.-H., Vu, C.-C., Ho, N.-K., Luu, V.-T. (2020). [A method of controlling thermal crack for mass concrete structures: modelling and experimental study](#). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 869(7):072054.
- [23] Yang, B.-G., He, P., Peng, G.-Y., Lu, T. (2019). [Temperature-stress coupling mechanism analysis of one-time pouring mass concrete](#). *Thermal Science*, 23(3 Part A):1615–1621.
- [24] Ho, N.-T., Nguyen, T.-C., Bui, A.-K., Huynh, T.-P. (2020). [Temperature Field in Mass Concrete at Early-Age: Experimental Research and Numerical Simulation](#). *International Journal on Emerging Technologies*, 11(3):936–941.
- [25] Xiao, X., Peng, Y., Luo, G. (2020). [Study on hydration heat of concrete channel-box girder](#). *Thermal Science*, 257–257.
- [26] Lee, M. H., Chae, Y. S., Khil, B. S., Yun, H. D. (2014). Influence of casting temperature on the heat of hydration in mass concrete foundation with ternary cements. *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, 525:478–481.

- [27] Akin, J. E. (2014). *Finite Elements for Analysis and Design: Computational Mathematics and Applications Series*. Elsevier.
- [28] Baehr, H. D., Stephan, K. (2011). Heat conduction and mass diffusion. *Heat and Mass Transfer*, 107–273.
- [29] American Concrete Institute Committee 207 (2007). *Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete (ACI 207.2 R-07)*. American Concrete Institute.
- [30] ACI Committee 207.R1-96 (2005). *Mass Concrete*. American Concrete Institute.
- [31] Tang, L. V., Nguyen, C. T., Bulgakov, B., Pham, A. N. (2018). Composition and early-age temperature regime in massive concrete foundation. *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 196:04017.
- [32] Wang, F., Chen, C. (2012). [Temperature Sensitivity Analysis of Massive Concrete Mixing with Slag Powder and Fly ash](#). *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, 594:804–807.
- [33] Zhou, M. R., Shen, Q. F., Zhang, Z. N., Li, H. S., Guo, Z. Y., Li, Z. B. (2013). [Based on MIDAS/CIVIL the anchorage of mass concrete temperature field and stress field simulation analysis](#). *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, 724:1482–1488.
- [34] Yunchuan, Z., Liang, B., Shengyuan, Y., Guting, C. (2012). [Simulation analysis of mass concrete temperature field](#). *Procedia Earth and Planetary Science*, 5:5–12.
- [35] Liu, W., Cao, W., Yan, H., Ye, T., Jia, W. (2016). [Experimental and numerical studies of controlling thermal cracks in mass concrete foundation by circulating water](#). *Applied Sciences*, 6(4):110.
- [36] Li, C.-R., Du, J.-L. (2011). The application of Midas/Civil software in mass concrete pile cap hydration heat control. *Shandong Transportation Science and Technology*, 1.
- [37] Wang, J., Li, F., Wang, S.-X. (2007). A Study on 3-dimensional FEM Analysis of Massive Concrete Hydration Heat of Cable-stayed Bridge Platform [J]. *Highway*, 11:173–176.
- [38] Xingang, W., Wei, Z., Shiguang, F., Huaishang, Q. (2010). Study of Layout for Water-cooling Pipes in Mass Concrete Based on MIDAS [J]. *Port Engineering Technology*, 6.
- [39] Yu, R., Wang, X., Liu, T. (2010). [Admixtures on Mass Concrete Temperature Crack Control Study and Numerical Simulation](#). *2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment*, IEEE, 1–8.
- [40] Thực, L. V., Trung, L. Q., Hùng, N. M. (2019). [Nghiên cứu kiểm soát nứt do nhiệt trong bê tông khối lớn bằng cơ chế sử dụng ống làm lạnh](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD)-ĐHXD*, 13(3V): 99–107.