■Ngày nhận bài: 28/7/2025 ■Ngày sửa bài: 07/8/2025 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/8/2025

Đánh giá tình trạng và nguyên nhân gây nứt của bê tông khối lớn - Trường hợp móng điện gió

Evaluation of conditions and causes of cracks in large concrete blocks - Case study of wind turbine foundations

> **NGUYỄN THẾ HOÀNG GIA[1], NGUYỄN DUY HƯNG[2]**
[1]HVCH Viện Xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải TP.HCM; Email: hoanggiaksxd@gmail.com
[2]GV Đại học Giao thông vận tải TP.HCM; Email: hung.nguyen@ut.edu.vn

TÓM TẮT

Phân tích trường nhiệt độ và ứng suất trong kết cấu bê tông khối lớn là một phần không thể thiếu trong việc kiểm soát và ngăn ngừa hiện tượng nứt bê tông. Tuy nhiên, đây là một quá trình phức tạp, đặc biệt đối với các kết cấu có khối tích lớn như móng nhà siêu cao tầng, móng điện gió, đập thủy lợi... do số lượng phần tử nhiều và các điều kiện biên phức tạp cần được tính toán. Bài báo này giới thiệu quy trình lập và giải bài toán phân tích trường nhiệt độ và ứng suất trong bê tông khối lớn bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Thông qua kết quả phân tích, có thể dự đoán được quy luật và mức độ phát triển của trường nhiệt độ cũng như ứng suất trong giai đoạn đầu của quá trình đóng rắn bê tông. Từ đó, đề xuất các giải pháp thi công thích hợp nhằm kiểm soát và ngăn ngừa hiện tượng nứt do nhiệt thủy hóa xi măng.

Từ khóa: Bê tông khối lớn, trường nhiệt độ, ứng suất nhiệt, nứt nhiệt, phân tích phần tử hữu hạn.

ABSTRACT

The analysis of temperature and stress fields in mass concrete structures is an essential part of controlling and preventing concrete cracking. However, this is a complex process, especially for large-volume structures such as high-rise building foundations, wind turbine foundations, and hydraulic dams, due to the large number of elements and complex boundary conditions involved. This paper presents a procedure for formulating and solving the problem of analyzing temperature and stress fields in mass concrete using the finite element method. Through the analysis results, we can predict the patterns and development levels of temperature and stress fields during the early stages of concrete hardening. Based on this, suitable construction solutions can be proposed to control and prevent cracking caused by cement hydration heat.

Keyword: Mass concrete blocks, temperature fields, thermal stress, thermal cracking, finite element analysis.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Điện gió là nguồn năng lượng tái tạo quan trọng, trong đó móng điện gió giữ vai trò truyền tải tải trọng, đảm bảo ổn định và tuổi thọ công trình. Tuy nhiên, thi công móng gặp thách thức do nứt nhiệt từ thủy hóa xi măng trong bê tông khối lớn, ảnh hưởng đến độ bền và an toàn. Do đó, kiểm soát nhiệt và hạn chế nứt là yếu tố then chốt để đảm bảo hiệu quả và độ bền công trình.

Tình trạng nứt trong bê tông khối lớn ngày càng được cơ quan quản lý, đơn vị thiết kế và các nhà nghiên cứu quan tâm, do có thể ảnh hưởng nghiêm trọng đến chất lượng, tuổi thọ và chi phí công trình. Nguyên nhân phổ biến là nhiệt thủy hóa, vì vậy nhiều nghiên cứu đã tập trung đề xuất giải pháp kiểm soát hiệu quả và tiết kiệm. [1].

Phân tích ứng suất nhiệt trong bê tông là bài toán phức tạp, chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như điều kiện và tiến độ thi công, nhiệt độ ban đầu, cấp phối, sự phát triển cường độ, modul đàn hồi, biến thiên nhiệt môi trường, khả năng tích nhiệt và giãn nở vật liệu. Với móng điện gió, việc kiểm soát càng khó khăn do điều kiện khí hậu khắc nghiệt và vị trí thi công hẻo lánh.

Nghiên cứu sử dụng Midas/Civil 2019 để mô phỏng nhiệt và ứng suất nhiệt trong móng điện gió, xét đến các điều kiện môi trường, vật liệu và biện pháp thi công ở Việt Nam. Kết quả được so sánh với các nghiên cứu trước và một công trình thực tế tại Bình Thuận.

Phân tích phân tử hữu hạn xác định biến đổi nhiệt độ, ứng suất tại các giai đoạn đóng rắn và so sánh với số liệu thực nghiệm. Từ đó, nghiên cứu đánh giá và điều chỉnh thông số thiết kế, cấp phối và biện pháp thi công nhằm kiểm soát nứt, đảm bảo chất lượng bê tông khối lớn.

2. LÝ THUYẾT VỀ QUÁ TRÌNH TRUYỀN NHIỆT VÀ ỨNG SUẤT DO HIỆU ỨNG NHIỆT

2.1. Phương trình vi phân chủ đạo của quá trình truyền nhiệt

Theo nghiên cứu của Benjamin Gebhart và J.E Akin và [2, 3], quá trình truyền nhiệt ba chiều trong môi trường bất đẳng hướng được mô tả bởi phương trình:

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

Trong đó:

ρ : Khối lượng thể tích của bê tông, (kg/m^3)

C: Tỷ nhiệt của bê tông, (kcal/kg.^{0}C)

T (x,y,z,t): Nhiệt độ tại tọa độ (x,y,z) tại thời điểm t (^{0}C)

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$: Hệ số dẫn nhiệt của vật liệu theo các phương x, y, z

q: Nhiệt sinh ra trong một đơn vị thể tích (kcal/m^3)

Các điều kiện biên:

Tại biên nhiệt độ không đổi T = T_0, T (x, y, z, t) = T_0 với t > 0

Tại biên truyền nhiệt : $\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z + q(t) = 0$

với t > 0

Tại biên đối lưu : $\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z + h_c(T - T_\infty) = 0$

với t > 0

Trong đó:

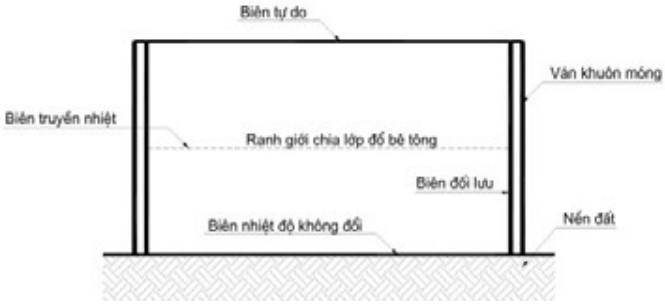
n_x, n_y, n_z : Cosin chỉ phương của mặt truyền nhiệt đang xét

q(t): Nhiệt sinh ra trong một đơn vị thể tích tại thời điểm t (kcal/m^3)

h_c: Hệ số đối lưu (kcal/m^2.h.^{0}C)

T_∞ : Nhiệt độ tại mặt đối lưu (^{0}C)

Các điều kiện biên trên mô hình đài móng bê tông khối lớn thể hiện ở hình sau:



Hình 1. Các biên truyền nhiệt trong kết cấu móng bê tông khối lớn

2.2. Các thông số tính toán nhiệt

2.2.1. Nguồn nhiệt và tăng nhiệt độ đoạn nhiệt của bê tông

Nguồn nhiệt trong bê tông là từ phản ứng hóa học giữa xi măng và nước gọi là phản ứng thủy hóa của xi măng.

Quá trình này tỏa nhiệt và làm tăng mạnh nhiệt độ của bê tông trong giai đoạn đầu mới đổ. Tùy theo hàm lượng xi măng và thành phần của từng khoáng trong hỗn hợp mà tốc độ phản ứng và lượng nhiệt phát ra khác nhau [4, 5]. Bê tông dẫn nhiệt kém nên nhiệt thoát chậm và tích tụ trong khối, khiến quá trình thủy hóa xi măng và đóng rắn diễn ra gần như đoạn nhiệt, với nhiệt tỏa ra chính là năng lượng phản ứng thủy hóa.

Nhiệt độ đoạn nhiệt tăng có thể gây giãn nở không đều, làm ứng suất kéo vượt giới hạn và gây nứt bê tông. Năm 1985 tại Tokyo, Tanabe đưa ra công thức xác định nguồn nhiệt và quy luật tăng nhiệt độ đoạn nhiệt, sau đó được ASCE công nhận vào năm 1986. [6]

$$q = \frac{1}{24} \rho \times C \times K \times e^{\frac{-\alpha t}{24}} \quad (2)$$

$$T_{ad} = K \times (1 - e^{-\alpha t}) \quad (3)$$

Trong đó:

q : Nhiệt sinh ra trong một đơn vị thể tích (kcal/m^3)

ρ : Khối lượng thể tích của bê tông (kg/m^3)

C: Tỷ nhiệt của bê tông, (kcal/kg.^{0}C)

t: Thời gian (ngày)

α : Hệ số thể hiện mức độ thủy hóa

K : Nhiệt độ tối đa của bê tông trong điều kiện đoạn nhiệt (^{0}C)

T_{ad} : Nhiệt độ của bê tông trong điều kiện đoạn nhiệt ở tuổi t (ngày), (^{0}C)

Tính toán K, α rất phức tạp vì quá trình sinh nhiệt diễn ra trong thời gian dài và phụ thuộc vào nhiều yếu tố. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm chỉ ra K, α phụ thuộc vào hàm lượng xi măng, loại xi măng sử dụng và nhiệt độ vữa bê tông khi đổ. Cùng một loại xi măng, khi hàm lượng xi măng và nhiệt độ vữa bê tông khi đổ tăng thì K, α đều tăng. Nhiệt độ trong khối bê tông giảm thì giảm hàm lượng xi măng và nhiệt độ ban đầu của vữa bê tông. Theo Japan Concrete Institute - JCI [7], nhiệt độ tại tâm khối bê tông trong điều kiện đoạn nhiệt được xác định bằng phương pháp thực nghiệm theo công thức sau:

$$Q(t) = Q_\infty \times \left[1 - e^{-r_{AT} \times (t - t_{0,Q})^{S_{AT}}}\right] \quad (4)$$

Trong đó:

t: Tuổi bê tông, (ngày)

$Q(t) \equiv T_{ad}$: Nhiệt độ đoạn nhiệt của bê tông ở tuổi t (ngày) (^{0}C)

Q_∞ : Nhiệt độ tối đa của bê tông trong điều kiện đoạn nhiệt (^{0}C)

r_{AT}, S_{AT} : Các thông số thể hiện tốc độ thay đổi nhiệt độ

$t_{0,Q}$: Tuổi bê tông bắt đầu nâng nhiệt (ngày)

$Q_\infty; r_{AT}; S_{AT}; t_{0,Q}$: được thiết lập là hàm số của nhiệt độ bê tông khi đổ và hàm lượng xi măng tùy theo loại xi măng sử dụng.

2.2.2. Nhiệt độ bê tông khi đổ (nhiệt độ ban đầu)

Nhiệt độ ban đầu được xác định từ nhiệt độ trung bình của xi măng, nước, cốt liệu tại thời điểm đổ bê tông. Theo P. P. Bamforth, D. Chisholm, J. Gibbs, T. Harrison và Japan Society of Civil Engineers [6, 8] nhiệt độ bê tông sau khi được trộn với các vật liệu đã làm mát theo công thức sau:

$$T_m = \frac{C_s \times (T_g \times W_g + T_c \times W_c) + T_m \times W_m}{C_s \times (W_g + W_c) + W_m} \quad (5)$$

Trong đó:

T_m : Nhiệt độ bê tông sau khi được trộn với các vật liệu đã làm mát (^{0}C)

C_s : Tỷ nhiệt của xi măng và cốt liệu có tính đến nước (lấy $C_s = 0{,}2$)

T_g, W_g : Khối lượng (kg/m^3) và nhiệt độ (^{0}C) của cốt liệu

T_c, W_c : Khối lượng (kg/m^3) và nhiệt độ (^{0}C) của xi măng

T_m, W_m : Khối lượng (kg/m^3) và nhiệt độ (^{0}C) của nước

Lưu ý nhiệt độ đo thực tế có thể cao hơn giá trị tính toán do ảnh hưởng nhiệt thủy hóa xi măng, nhiệt ma sát trộn bê tông, hiện tượng nóng cơ học của máy trộn,…

2.2.3. Nhiệt độ đầu vào

Nhiệt độ môi trường ảnh hưởng trực tiếp tới nhiệt độ tối đa và sự giảm nhiệt độ bê tông khi đổ. Nhiệt độ môi trường được tính toán bằng cách lấy nhiệt độ trung bình trong ba năm tại công trường hoặc sử dụng số liệu quan trắc khí tượng tại khu vực thi công [7, 8].

Nhiệt độ tại biên không thay đổi, nhiệt độ được lấy theo nhiệt độ trung bình cố định tại mặt tiếp xúc đó. Ví dụ: Tại biên đối lưu, nhiệt độ phụ thuộc vào loại ván khuôn, thời gian tháo ván khuôn, phương pháp và thời gian bảo dưỡng [2].

2.3. Quan hệ giữa trường ứng suất và nhiệt độ

Theo J.E Akin [3], quan hệ giữa trường ứng suất và nhiệt độ thể hiện qua công thức sau:

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

Trong đó:

$\{\sigma\}$: véc tơ ứng suất tại thời điểm khảo sát (kG/m^2)

$[R]$: Ma trận dạng cản biến của bê tông

E : Modul đàn hồi của bê tông (kg/m^2)

β : Hệ số giãn nở nhiệt của bê tông

$\{\Delta T\}$: Véc tơ gradient nhiệt độ

Qua công thức trên cho ta thấy $\{\Delta T\}$ càng lớn thì ứng suất nhiệt trong bê tông càng lớn, dễ xảy ra nứt nhiệt trong khối bê tông do ứng suất vượt quá giới hạn bền kéo của bê tông. Vì vậy để chống nứt phải kiểm soát chênh lệch nhiệt độ $\{\Delta T\}$ trong giới hạn cho phép.

3. PHÂN TÍCH NHIỆT ĐỘ VÀ ỨNG SUẤT TRONG BÊ TÔNG KHỐI LỚN BẰNG PHẦN MỀM MIDAS/CIVIL 2019

3.1. Các giả thiết

Trong quá trình phân tích nhiệt độ và ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn, một số giả thiết quan trọng đã được đặt ra để đơn giản hóa mô hình tính toán.

Bê tông được giả định là vật liệu đồng chất, đẳng hướng, truyền nhiệt và chịu lực đồng đều. Nhiệt chủ yếu tỏa ra môi trường theo dạng mặt phẳng, với hệ số dẫn nhiệt và tỷ nhiệt C không đổi theo tuổi bê tông. Nhiệt phát sinh phụ thuộc loại xi măng và biến đổi theo thời gian, trong khi đặc trưng tỏa nhiệt biên được coi là không đổi.

Khi xác định ứng suất nhiệt, bê tông được xem xét làm việc trong giới hạn đàn hồi, nghĩa là không có biến dạng dư hoặc nứt gãy ngoài phạm vi đàn hồi. Các đặc trưng đàn hồi và tính chất tỏa nhiệt của bê tông, bao gồm mô đun đàn hồi (E) và hệ số giãn nở nhiệt, được giả định không thay đổi theo thời gian.

Những giả thiết này giúp đơn giản hóa quá trình mô phỏng và tính toán, đồng thời tạo điều kiện để đánh giá và kiểm soát các yếu tố ảnh hưởng đến sự phát triển ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn.

3.2. Mô phỏng trong phần mềm Midas/Civil 2019

Phần mềm Midas/Civil 2019 được sử dụng để mô phỏng quá trình phát triển nhiệt và ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn theo điều kiện thi công thực tế (tiến độ, nhiệt độ ban đầu, cấp phối, biến thiên nhiệt môi trường). Ưu điểm nổi bật là khả năng so sánh nhiệt độ, ứng suất và sự phát triển cường độ bê tông theo thời gian, qua đó đánh giá chính xác ảnh hưởng nhiệt độ và đề xuất biện pháp kiểm soát nhằm hạn chế nứt nhiệt khi thi công.

Hình 2. Quy trình thực hiện mô phỏng

Quy trình mô phỏng bắt đầu với việc xác định đặc tính vật liệu (modul đàn hồi, dẫn nhiệt, giãn nở, trọng lượng riêng, từ biến và co ngót). Tiếp đó, thiết lập điều kiện nhiệt gồm nhiệt độ môi trường, biên và quá trình đối lưu. Sau khi xây dựng mô hình 3D và chia lưới, các thuộc tính vật liệu, thông số nhiệt và ứng suất nhiệt được gán cho phần tử. Kết quả phân tích cho thấy phân bố nhiệt độ, ứng suất, chênh lệch nhiệt và chỉ số nứt, cung cấp cơ sở đánh giá, cải thiện thiết kế và nâng cao độ bền kết cấu.

4. NGHIÊN CỨU TRƯỜNG HỢP DỰ ÁN NHÀ MÁY ĐIỆN GIÓ QUỐC VINH - SÓC TRĂNG

4.1. Mẫu thí nghiệm và mô hình phân tích

Dự án Nhà máy điện gió Quốc Vinh - Sóc Trăng góp phần phát triển năng lượng bền vững.

Hạng mục quan trọng là thiết kế và thi công đài móng chịu tải tuabin.

Mẫu thí nghiệm bê tông có kích thước 3000×3000×2800 mm.

Kích thước lớn giúp mô phỏng chính xác biến đổi nhiệt độ, ứng suất và biến dạng. Cấp phối bê tông bảng 1 gồm xi măng, nước, cốt liệu và phụ gia, quyết định tính chất cơ học và nhiệt học.

Bảng 1. Cấp phối C35 (45Mpa) (R28)

Stt	Vật liệu	Nguồn gốc	Đơn vị	Lượng vật liệu	Thể tích	Tỷ lệ theo lượng xi măng
1	Cát sông	Concrete mixing plant	kg	494	0.360	1.28
2	Cát nghiền	Concrete mixing plant	kg	266	0.168	0.69
3	Đá	Concrete mixing plant	kg	1080	0.726	2.81
4	Xi măng	Ha Tien Type V	kg	385		1.00
5	Tro bay	Duyen Hai 1	kg	69		0.18
6	Nước	Concrete mixing plant	Lít	168		0.44
7	Phụ gia	Sika Plast 319	Lít	4.24		0.011
8	Tỷ lệ nước/xi măng + tro bay					0.37

4.2. Tính chất vật liệu và nhiệt

Tính chất vật liệu và nhiệt đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá và thiết kế các cấu kiện bê tông khối lớn. Các tính chất vật liệu và nhiệt thường được xem xét bao gồm:

1. Nhiệt dung riêng: Đây là khả năng lưu trữ nhiệt của vật liệu. Bê tông có nhiệt dung riêng cao hơn lớp đất dưới, cho thấy khả năng lưu giữ nhiệt tốt hơn.

2. Khối lượng riêng: Thông số này quyết định mật độ và trọng lượng của vật liệu. Bê tông với khối lượng riêng lớn hơn thể hiện tính chắc chắn, trong khi lớp đất dưới nhẹ hơn nhưng có thể đóng vai trò nền móng hỗ trợ.

3. Hệ số dẫn nhiệt: Bê tông dẫn nhiệt tốt hơn so với lớp đất dưới, một yếu tố cần xem xét trong điều kiện nhiệt độ môi trường thay đổi.

4. Hệ số trao đổi nhiệt tiếp xúc môi trường: là tham số quan trọng trong việc xác định tốc độ mà vật liệu trao đổi nhiệt với môi trường xung quanh.

5. Hệ số trao đổi nhiệt với ván khuôn gỗ phản ánh tốc độ truyền nhiệt từ bê tông ra ngoài. Do có hệ số thấp, ván khuôn gỗ giúp giảm thất thoát nhiệt, giữ nhiệt ổn định trong giai đoạn bê tông đông cứng và hạn chế nứt nhiệt.

6. Nhiệt độ môi trường: Nhiệt độ môi trường là yếu tố quan trọng, ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình đông cứng và phát triển cường độ bê tông.

7. Nhiệt độ đổ bê tông: Đây là nhiệt độ khởi đầu của bê tông khi được đưa vào khuôn, đóng vai trò quan trọng trong quá trình đông cứng và phát triển cường độ.

8. Cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi: Đây là thông số quan trọng để đánh giá khả năng chịu lực của bê tông sau khi đã trải qua quá trình đông cứng và phát triển cường độ trong 28 ngày.

9. Hàm số phát triển cường độ nén: Hàm số này là một phần quan trọng trong mô hình dự đoán của tiêu chuẩn ACI (American Concrete Institute), được áp dụng rộng rãi để thiết kế và kiểm soát chất lượng bê tông.

10. Modul đàn hồi: là thông số quan trọng biểu thị khả năng chống biến dạng của vật liệu dưới tác động của tải trọng.

11. Hệ số giãn nở nhiệt: Đây là một thông số vật lý biểu thị mức độ thay đổi kích thước của vật liệu khi nhiệt độ thay đổi.

12. Hệ số poisson's: Hệ số poisson's mô tả mối quan hệ giữa biến dạng theo chiều ngang và chiều dọc khi vật liệu chịu lực nén hoặc kéo.

13. Hàm lượng xi măng: Hàm lượng xi măng là thông số quyết định thành phần, cường độ và chất lượng bê tông.

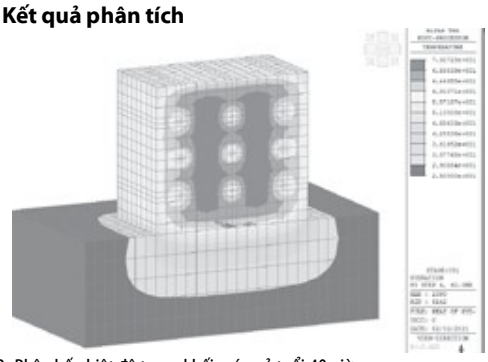
14. Hệ số hàm nguồn nhiệt: là một thông số quan trọng để tính toán lượng nhiệt sinh ra trong bê tông khi các phản ứng hóa học (đặc biệt là phản ứng hydrat hóa của xi măng) xảy ra.

Các tính chất vật liệu và nhiệt được sử dụng trong nghiên cứu này được trình bày chi tiết trong Bảng 2.

Bảng 2. Tính chất vật liệu và nhiệt

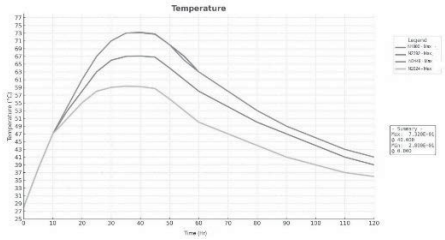
Đặc điểm	Bê tông	Lớp đất dưới	Diễn giải
Nhiệt dung riêng (kcal/kg^{0}C)	0,25	0,2	1
Khối lượng riêng (kgf/m^3)	2400	1800	2
Hệ số dẫn nhiệt (kcal/m.h.^{0}C)	2.3	1.7	3
Hệ số trao đổi nhiệt khi tiếp xúc với môi trường (kcal/m^2.h.^{0}C)	4,5	12	4
Hệ số trao đổi nhiệt khi tiếp xúc với ván khuôn gỗ (kcal/m^2.h.^{0}C)	4,5	-	5
Nhiệt độ môi trường (^{0}C)	28	-	6
Nhiệt độ bê tông khi đổ (^{0}C) *(Tính theo công thức 5)*	30	-	7
Cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi (kg/m^2)	350	-	8
Hệ số hàm phát triển cường độ nén (ACI)	a=4; b=0,85	-	9
Modul đàn hồi (kg/m^2)	2.9910x10^5	1x10^4	10
Hệ số giãn nở nhiệt	1x10^{-5}	1x10^{-5}	11
Hệ số poisson's	0,18	0,2	12
Hàm lượng xi măng (kg/m^3)	395	-	13
Hệ số hàm nguồn nhiệt *(Tính theo công thức 3)*	K=55,57 α =1,13	-	14

4.3. Kết quả phân tích



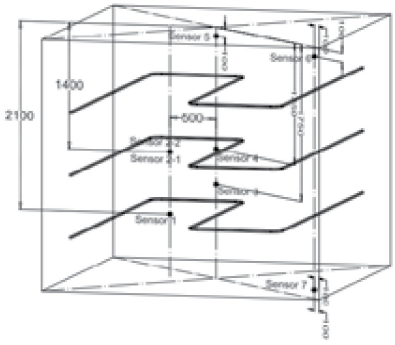
Hình 3. Phân bố nhiệt độ trong khối móng ở tuổi 40 giờ

Hình 3 cho thấy ở tuổi 40 giờ, nhiệt độ tại tâm móng đạt cực đại 73,3°C, sau đó giảm dần. Hình 4 thể hiện sự chênh lệch nhiệt độ giữa tâm khối và mặt hở giảm theo thời gian. Đến 120 giờ, nhiệt độ tại tâm gần bằng nhiệt độ ban đầu và gần như không khác biệt so với môi trường.



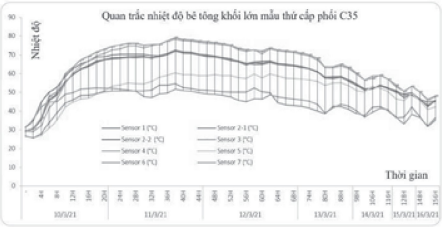
Hình 4. Thay đổi nhiệt độ tại tâm khối đổ và mặt hở ở các thời điểm khác nhau

Hình 4 còn chỉ ra, tại thời điểm 40 giờ sau khi đổ bê tông, nhiệt độ tại tâm khối bê tông đạt 73,3°C, trong khi nhiệt độ tại bề mặt thoát nhiệt tự do là 57,3°C, dẫn đến chênh lệch nhiệt độ khoảng 16°C.



Hình 5. Bản vẽ vị trí cảm biến trong Mockup

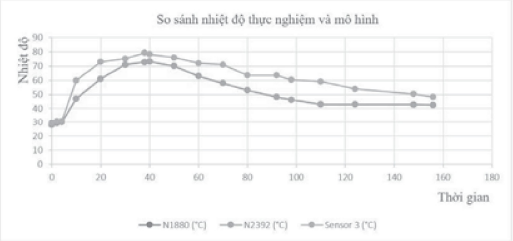
Hình 5 mô tả sơ đồ bố trí cảm biến nhiệt trong mô hình Mockup. Bảy cảm biến được lắp đặt tại các vị trí khác nhau theo phương đứng và ngang để đo nhiệt độ tại tâm, các vị trí trung gian và bề mặt khối bê tông. Cách bố trí này giúp đánh giá chính xác sự phân bố và chênh lệch nhiệt độ trong toàn khối đổ.



Hình 6. Biểu đồ quan trắc bê tông thực nghiệm

Sau khi tiến hành đo nhiệt độ thực tế tại từng vị trí, biểu đồ quan trắc được xây dựng để đánh giá sự biến đổi nhiệt độ trong quá trình thủy hóa bê tông (Hình 6). Kết quả cho thấy nhiệt độ ban đầu của bê tông trước khi đúc là khoảng 28,9°C. Nhiệt độ cực đại đo được trong quá trình thủy hóa đạt 79,2°C, thấp hơn giới hạn kỹ thuật 85°C, cho thấy sự gia tăng nhiệt độ của bê tông vào khoảng 50,3°C.

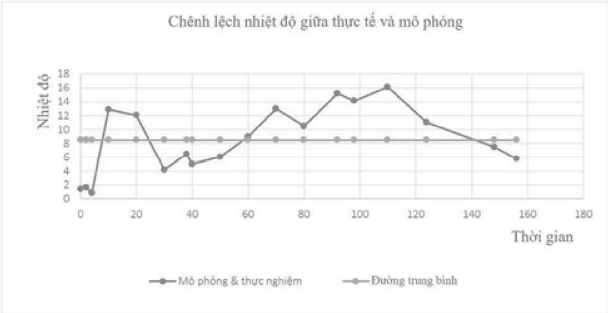
Dùng ống thép D27 đặt cách ngang 1000 mm, đứng 700 mm, bơm nước liên tục 7 ngày, giúp kiểm soát nhiệt hiệu quả. Sau 7 ngày dừng bơm, tháo ván khuôn; kiểm soát nhiệt giai đoạn đầu giúp hạn chế nứt và đảm bảo độ bền công trình.



Hình 7. Biểu đồ nhiệt độ thực nghiệm và mô hình

Kết quả phân tích (Hình 7) cho thấy mô hình và thực nghiệm có xu hướng nhiệt độ tương đồng, mô hình dự đoán khá chính xác quá

trình thủy hóa và chênh lệch tâm bề mặt. Tuy nhiên, vẫn có sai lệch do điều kiện môi trường, thông số đầu vào và biện pháp thi công. Điều này khẳng định cần hiệu chỉnh mô hình bằng dữ liệu thực nghiệm để nâng cao độ chính xác dự báo, hỗ trợ kiểm soát nứt nhiệt và đảm bảo độ bền bê tông khối lớn.



Hình 8. Biểu đồ sai số giữa thực nghiệm và mô hình

Hình 8 thể hiện sai số nhiệt độ giữa mô hình mô phỏng và thực nghiệm theo thời gian. Sai số dao động từ 2°C đến 16°C, với giá trị trung bình khoảng 8,4°C. Kết quả cho thấy mô hình mô phỏng có độ chính xác phù hợp cho bài toán phân tích nhiệt độ bê tông khối lớn.

Đánh giá định lượng sai số nhiệt độ**:** Sai số dao động ±2–16°C (~3,4–26,8%), sai số trung bình 14,1%, với nhiệt độ thực nghiệm trung bình 59,67°C (Sensor 3, Hình 7). Sai lệch trong khoảng 10-25% thường được coi là chấp nhận được trong các mô phỏng kỹ thuật có tính phức tạp cao hoặc mục tiêu chính là mô phỏng xu hướng thay vì giá trị tuyệt đối [9].

Sai số mô phỏng vượt nhẹ 25% nhưng vẫn chấp nhận được do tính phi tuyến của bài toán và điều kiện thực tế khó kiểm soát. Mục tiêu chính là dự báo xu hướng và kiểm soát nứt nhiệt, không yêu cầu chính xác tuyệt đối. Với khí hậu Việt Nam ít biến thiên khắc nghiệt, kết quả nghiên cứu vẫn đảm bảo an toàn và phù hợp cho thiết kế móng trụ điện gió. Ngoài ra, các tiêu chuẩn hiện hành (TCVN 2737, TCVN 10304, TCVN 10687-1/IEC 61400-1) chưa quy định rõ về sai số mô phỏng, nên kỹ sư có thể linh hoạt đánh giá nếu có cơ sở luận chứng, đồng thời vẫn có thể hiệu chỉnh mô hình để tăng độ chính xác khi cần.

4.4. Thảo luận về kết quả

Kết quả so sánh cho thấy nhiệt độ thực nghiệm cao hơn mô phỏng khoảng 6°C, chủ yếu do khác biệt về môi trường, thủy hóa hoặc khả năng giữ nhiệt của bê tông. Tuy có chênh lệch giá trị cực đại, nhưng thời gian đạt đỉnh khá tương đồng, chứng tỏ mô hình phản ánh đúng xu hướng. Sai lệch này cần được xem xét qua các thông số đầu vào (nhiệt thủy hóa, truyền nhiệt, điều kiện biên) để hạn chế nguy cơ nứt nhiệt trong khối bê tông lớn.

Nghiên cứu đã xây dựng mô hình mô phỏng sự phát triển nhiệt độ và ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn bằng Midas/Civil 2019, tích hợp yếu tố môi trường, vật liệu và biện pháp thi công. Phương pháp phần tử hữu hạn cho kết quả phù hợp với thực nghiệm, khẳng định độ chính xác của mô hình và tầm quan trọng của kiểm soát nhiệt độ. Mô hình này là công cụ hữu hiệu hỗ trợ thiết kế, thi công móng trụ điện gió trong điều kiện khí hậu nhiệt đới, nơi nguy cơ nứt nhiệt luôn hiện hữu.

Kết quả nghiên cứu có thể áp dụng cho công trình thực tế, hỗ trợ dự báo và điều chỉnh biện pháp thi công nhằm giảm nguy cơ nứt, tiết kiệm chi phí. Mô hình Midas/Civil 2019 giúp xác định chính xác vị trí, thời điểm nứt, từ đó đề xuất giải pháp như cách nhiệt, làm mát bằng ống nước lạnh, điều chỉnh cấp phối và bổ sung cốt thép. Nhờ vậy, công trình được tối ưu về vật liệu, nhân công, thiết bị và rút ngắn thời gian thi công, nâng cao hiệu quả kinh tế.

Các thông số nhiệt như dẫn nhiệt, truyền nhiệt và giãn nở được tích hợp vào Midas/Civil 2019, nhưng do hạn chế dữ liệu thực nghiệm tại Việt Nam nên vẫn có sai lệch giữa mô phỏng và thực tế. Điều này cho thấy cần nghiên cứu bổ sung để hiệu chỉnh, nâng cao độ chính xác mô hình. Nghiên cứu khẳng định tầm quan trọng của kiểm soát nhiệt độ và ứng suất nhiệt nhằm đảm bảo chất lượng, độ bền bê tông khối lớn trong điều kiện thi công thực tế

Những ý kiến trên nhấn mạnh vai trò quan trọng của việc kiểm soát nhiệt độ và ứng suất nhiệt trong thi công bê tông khối lớn, từ đó nâng cao chất lượng và độ bền của các công trình xây dựng tại Việt Nam.

5. KẾT LUẬN

Nứt trong bê tông khối lớn là một yếu tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng và tuổi thọ của công trình. Do đó, việc áp dụng mô hình dự đoán vết nứt là cần thiết nhằm hỗ trợ dự báo và điều chỉnh kịp thời các phương án thi công trước khi triển khai chính thức. Từ phân tích mô hình, có thể mở rộng ứng dụng cho các kết cấu thực tế, giúp tối ưu hóa quá trình thi công và giảm thiểu nguy cơ nứt do ứng suất nhiệt.

Nghiên cứu đã mô phỏng nhiệt độ và ứng suất nhiệt trong bê tông khối lớn bằng phần mềm Midas/Civil 2019.Mô hình tích hợp yếu tố môi trường (nhiệt độ, độ ẩm), vật liệu (xi măng, phụ gia) và biện pháp thi công thực tế tại Việt Nam. Kết quả có thể áp dụng cho nhiều loại cấu kiện bê tông khối lớn với kích thước, điều kiện khác nhau. Nghiên cứu góp phần tối ưu chất lượng công trình và tăng tính bền vững trước biến đổi khí hậu, thi công phức tạp.

Các thông số nhiệt như dẫn nhiệt, truyền nhiệt, trao đổi nhiệt và giãn nở được lấy từ tài liệu và tích hợp vào Midas/Civil 2019. Do hạn chế dữ liệu thực nghiệm, vẫn có sai lệch giữa kết quả mô phỏng và đo đạc thực tế. Nghiên cứu tiếp theo cần xác định chính xác hơn các hệ số nhiệt để cải thiện độ tin cậy mô hình. Ứng dụng vi sợi thứ cấp có thể là giải pháp tiềm năng tăng khả năng chịu kéo và độ bền của bê tông khối lớn.

Đề xuất quy trình mô phỏng nhiệt: thu thập dữ liệu đầu vào, mô phỏng sơ bộ bằng Midas/Civil 2019, thiết kế biện pháp thi công, hiệu chỉnh mô hình bằng dữ liệu thực nghiệm, và ứng dụng để giám sát, tối ưu thi công. Ngoài ra, đề xuất tăng cường thí nghiệm thực tế, cải thiện cơ sở dữ liệu vật liệu trong nước, và nghiên cứu giải pháp làm mát, phụ gia giảm nhiệt để nâng cao hiệu quả kiểm soát nứt nhiệt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Bộ Xây dựng, Nứt bê tông khối lớn: Cần định lượng nguy cơ và có giải pháp phù hợp. Khoa học - Công nghệ, 2021.

[2]. B. Gebhart (1993), Heat Condtion and Mass Diffusion. McGraw-Hill.

[3]. J.E Akin (1994), Finite Element for Analysis and Design. Academic Press.

[4]. Bazenov, Bạch Đình Thiên,Trần Ngọc Tính, Công nghệ bê tông. NXB Xây dựng, Hà Nội, 2004.

[5]. Nguyễn Tiến Đích, Công tác bê tông trong điều kiện khí hậu nóng ẩm Việt Nam. NXB Xây dựng, Hà Nội, 2010.

[6]. P. P. Bamforth, D.C., J.Gibbs, T.Harrison, Bamforth, D.Chisholm, J.Gibbs, Properties of Concrete for use in Eurocode 2. The Concrete centre.

[7]. JCI, VCA, Hướng dẫn kiểm soát nứt trong bê tông khối lớn - phiên bản 2008. VCA,Hà Nội, 2011.

[8].nJSCE (2007),Standard specifications for concrete structures, Materials and Construction

[9]. Versteeg, H.K., Malalasekera,, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2nd ed.). Pearson Education. 2007.