Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (4V): 152–165

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA TỶ LỆ THAY THẾ XI MĂNG BẰNG TRO BAY ĐẾN CƯỜNG ĐỘ VÀ NHIỆT THỦY HÓA CỦA CỘT BÊ TÔNG KHỐI LỚN THI CÔNG THEO CÔNG NGHỆ CỐP PHA LEO

Lê Văn Minh[a], Vũ Chí Công[a,*], Hồ Ngọc Khoa[a], Lê Hồng Quân[b]

[a]*Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*
[b]*Khoa Cơ khí, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 10/8/2026, Sửa xong 21/10/2026, Chấp nhận đăng 22/10/2026

Tóm tắt

Tro bay được ứng dụng trong bê tông khối lớn cho thấy nhiều lợi ích, như tính công tác tốt và giảm sinh nhiệt. Việc sử dụng tro bay giúp làm chậm quá trình phản ứng thủy hóa nhưng cũng làm giảm cường độ và thời gian đạt đỉnh nhiệt trong bê tông, đặc biệt là trong kết cấu cột bê tông khối lớn thi công theo công nghệ cốp pha leo. Mặc dù tro bay có thể làm giảm cường độ bê tông ở giai đoạn đầu, nhưng nó lại là biện pháp hiệu quả để kiểm soát nhiệt độ thủy hóa. Điều này giúp giảm chênh lệch nhiệt độ giữa trung tâm và bề mặt khối bê tông, từ đó giảm nguy cơ nứt do nhiệt. Nghiên cứu cho thấy, hàm lượng tro bay thay thế xi măng có thể lên đến 33% mà cường độ bê tông vẫn đảm bảo yêu cầu, đồng thời giúp kiểm soát bộ chỉ số kiểm soát nứt nhiệt nằm trong các giới hạn cho phép, từ đó làm giảm nguy cơ nứt nhiệt cho kết cấu cột bê tông khối lớn thi công theo công nghệ cốp pha leo.

Từ khoá: Tro bay; bê tông khối lớn; nhiệt thủy hóa; cốp pha leo; chỉ số kiểm soát nứt nhiệt.

STUDY ON THE EFFECT OF CEMENT REPLACEMENT RATIO WITH FLY ASH ON THE STRENGTH AND HYDRATION TEMPERATURE OF LARGE CONCRETE COLUMNS CONSTRUCTED USING CLIMBING FORMWORK TECHNOLOGY

Abstract

Fly ash, when used in mass concrete, offers several advantages, such as improved workability and reduced heat generation. While fly ash slows down the hydration reaction, it also reduces the strength and peak temperature of the concrete, particularly in mass concrete column structures constructed using climbing formwork. Although fly ash may reduce concrete strength in the initial stages, it is an effective method for controlling hydration temperature. This reduces the temperature difference between the core and surface of the concrete mass, thereby reducing the risk of thermal cracking. Studies show that fly ash can replace cement at levels up to 33% while maintaining the required concrete strength and keeping the thermal cracking control index within acceptable limits, thus reducing the risk of thermal cracking in mass concrete column structures constructed using climbing formwork.

Keywords: Fly ash; mass concrete; thermal hydration; climbing formwork; thermal crack control index.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(4V)-12 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Hệ ván khuôn tự leo sử dụng trong thi công các công trình cao tầng đảm bảo chất lượng kỹ thuật thi công, vận hành an toàn, giảm chi phí nhân công và tăng mức độ cơ giới hóa xây dựng. Trước những đặc điểm trên, công nghệ ván khuôn leo đã được phát triển nhanh chóng và được áp dụng trong thi công nhiều tòa nhà và công trình cao tầng trên thế giới và ở Việt Nam [1].

Các công trình dân dụng và công nghiệp lớn đang ngày càng xuất hiện nhiều hơn trên toàn thế giới, bao gồm cả tại Việt Nam. Hệ kết cấu bê tông cốt thép của chúng như cột thường có kích thước

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* congvc@huce.edu.vn (Công, V. C.)

rất lớn. Bê tông khối lớn được định nghĩa là khối bê tông có kích thước đủ lớn để yêu cầu thực hiện các biện pháp hạn chế phát sinh nhiệt từ quá trình thủy hóa của xi măng và thể tích bê tông thay đổi dẫn đến sự hình thành vết nứt trong bê tông. Trong điều kiện nóng ẩm Việt Nam kết cấu có cạnh nhỏ (a) và chiều cao (h) lớn hơn 1,2 m có thể xem là khối lớn [2].

Việc thi công các kết cấu bê tông khối lớn đòi hỏi những tiêu chuẩn kỹ thuật và công nghệ nghiêm ngặt. Trong đó, việc chống nứt do nhiệt thủy hóa của xi măng trong kết cấu là vấn đề quan trọng cần chú ý. Để giải quyết vấn đề này, chúng ta cần áp dụng các giải pháp thay thế một phần xi măng bằng các vật liệu khác để giảm thiểu nhiệt phát sinh trong quá trình bê tông đông cứng, đồng thời vẫn đảm bảo đạt được cường độ theo thiết kế yêu cầu [3]. Hơn nữa, việc sản xuất xi măng cũng đang gây ảnh hưởng lớn đến môi trường, trong khi nguồn tài nguyên tự nhiên cho xi măng đang dần cạn kiệt. Đối với việc sản xuất bê tông khối lớn, cần một lượng lớn chất kết dính, do đó, nghiên cứu sử dụng một số loại phế thải từ ngành công nghiệp và nông nghiệp thay thế xi măng để sản xuất bê tông là rất có ý nghĩa trong việc bảo vệ môi trường và phát triển bền vững. Tro bay (FA) đang được xem như một trong những phụ gia khoáng có tiềm năng để thay thế xi măng trong sản xuất bê tông. Đặc biệt, việc sử dụng FA với hàm lượng cao trong sản xuất bê tông cột khối lớn có thể đáp ứng đồng thời cả yêu cầu kỹ thuật và mục tiêu kinh tế – môi trường. Hiện nay, trong bối cảnh Việt Nam phát triển lĩnh vực năng lượng, nhiệt điện từ than vẫn là nguồn điện chủ yếu. Hơn nữa, lượng lớn FA đang được tích trữ tại các bãi chứa nếu không được xử lý sẽ tạo ra nhiều thách thức cho đất nước, như cần nhiều diện tích đất cho bãi chứa và gây áp lực lên môi trường. Việc sử dụng tro bay không chỉ giảm việc khai thác và sản xuất xi măng mà còn giúp tiêu thụ lượng lớn tro bay từ các nhà máy nhiệt điện, từ đó giảm thiểu diện tích bãi chứa phế thải. Thứ hai, về mặt kỹ thuật, việc thay thế xi măng bằng tro bay (FA) thường gây ra những khó khăn lớn, làm giảm cường độ bê tông trong giai đoạn đầu [4–6]. Tuy nhiên, đây lại là giải pháp hữu hiệu để kiểm soát nhiệt độ trong quá trình thủy hóa, làm giảm sự chênh lệch nhiệt độ giữa phần giữa và bề mặt của khối bê tông, từ đó hạn chế nguy cơ nứt do nhiệt. Để giải quyết vấn đề về cường độ bê tông khi mới đổ, chúng ta cần xác định lượng tro bay phù hợp để có thể đạt được yêu cầu về cường độ mà vẫn kiểm soát tốt nhiệt độ thủy hóa. Hàm lượng tro bay được sử dụng sao cho có thể đảm bảo cả hai yếu tố trên chính là bài toán mà đề tài đang tìm kiếm lời giải. Trên thực tế, đã có nhiều nghiên cứu về việc sử dụng FA trong chế tạo bê tông, tuy nhiên, đến nay số lượng nghiên cứu công bố về tác động của FA đến cường độ và nhiệt thủy hóa của bê tông cho các cột bê tông khối lớn vẫn còn hạn chế. Với những lý do đã nêu cùng với tình hình nghiên cứu FA trong việc sản xuất bê tông khối lớn trên toàn cầu và thực trạng phát triển bê tông này tại Việt Nam, đặc biệt với lượng phế thải FA từ nhà máy nhiệt điện ngày càng gia tăng, việc nghiên cứu cột bê tông khối lớn sử dụng tro bay tại Việt Nam là một hướng đi cần thiết và khoa học.

Quá trình nhiệt thủy hóa sinh ra nhiệt và kích thước khối bê tông lớn làm cho khả năng tản nhiệt thấp dẫn đến nhiệt độ tăng nhanh trong giai đoạn đầu của quá trình đông kết làm cho nhiệt độ trong khối bê tông tăng cao trong suốt quá trình đóng rắn và phát triển cường độ. Điều này đã tác động trực tiếp đến sự thay đổi thể tích của bê tông, kết hợp với các điều kiện khống chế dẫn đến bê tông bị nứt trong giai đoạn đầu. Điều này gây nguy hại cho công trình và cần được kiểm soát đối với các kết cấu có ứng xử khối lớn [7].

Lượng nhiệt của bê tông khối lớn có thể được giảm bằng nhiều cách. Có thể lựa chọn thành phần bê tông thích hợp như sử dụng loại xi măng tỏa nhiệt thấp hoặc sử dụng hệ thống giảm nhiệt cho bê tông khối lớn bằng nước lạnh hoặc đường ống giải nhiệt (pipe cooling). Dùng phụ gia khoáng thay thế xi măng trong bê tông [8]. Trong các cách trên thì việc kiểm soát nhiệt độ từ việc lựa chọn cấp phối sẽ tốn ít chi phí và đạt hiệu quả kinh tế cao. Tuy nhiên, việc xác định lượng nhiệt thủy hóa ngay từ giai đoạn thiết kế cấp phối là nhiệm vụ còn nhiều khó khăn và thách thức. Từ những phân tích trên

có thể thấy nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ lệ thay thế xi măng bằng tro bay đến cường độ và nhiệt thủy hóa của cột bê tông khối lớn thi công theo công nghệ cốp pha leo là thiết thực và cấp bách.

Lượng nhiệt thủy hóa cần được đánh giá và kiểm soát trong quá trình đổ bê tông và bảo dưỡng nhằm hạn chế khả năng gây nứt trong bê tông. Bài viết này trình bày phương pháp thí nghiệm xác định mức độ sử dụng tro bay thay thế xi măng, đồng thời phân tích ảnh hưởng của việc sử dụng tro bay tới lượng nhiệt thủy hóa của bê tông theo phương pháp phần tử hữu hạn, từ đó dự đoán và phân tích trường nhiệt độ cũng như trường chỉ số nứt trong cột bê tông khối lớn bằng phần mềm Midas Civil phiên bản 2022.

2. Cơ sở lý thuyết tính toán nhiệt thủy hóa

2.1. Phương trình truyền nhiệt trong bê tông

Các ứng suất sinh nhiệt được phát triển do trường độ của quá trình nhiệt thủy hóa vật liệu xi măng trong bê tông khối lớn. Sự phân bố nhiệt độ không đồng đều trong các kết cấu bê tông cốt thép và sự phát triển nhiệt độ theo thời gian của nó phụ thuộc vào các yếu tố: Tính chất bê tông, lượng xi măng, điều kiện khí hậu, nhiệt độ ban đầu của hỗn hợp bê tông, tốc độ thi công, chiều dày lớp đổ... Những ứng suất do nhiệt gây ra này có thể đủ lớn để làm xuất hiện các vết nứt. Với sự phát triển của phần mềm mô phỏng số ngày nay (dựa trên các phương pháp phần tử hữu hạn) đã có thể cho phép thực hiện các phân tích phức tạp đối với các vấn đề nhiệt thủy hóa trong kết cấu bê tông cốt thép. Tại một điểm bất kỳ trong trường tính toán, trường nhiệt độ không ổn định $T(x, y, z, t)$ phải thỏa mãn phương trình dẫn nhiệt liên tục theo phương trình (1) [9, 10]:

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

trong đó T là nhiệt độ vật liệu (°C); k_x, k_y, k_z là hệ số dẫn nhiệt của vật liệu theo các hướng x, y và z tương ứng; $q(t)$ là tốc độ sinh nhiệt trên một đơn vị thể tích (kcal/m^3); c là nhiệt dung riêng (kcal/kg.°C); ρ là khối lượng thể tích vật liệu (kg/m^3); t là thời gian (ngày).

$q(t)$ là nhiệt độ đoạn nhiệt tăng lên trong bê tông do quá trình thủy hóa xi măng. Theo các đánh giá chi tiết trong [11] $q(t)$ được biểu thị thông qua hàm số mũ của thời gian (hoặc tuổi của bê tông), t, như trong phương trình (2) sau:

$$q(t) = q_\infty \left(1 - e^{-r.t}\right) \tag{2}$$

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

Để giải được phương trình (1) ta cần biết hai loại điều kiện biên chính chứa biên Dirichlet và Cauchy [10, 11], trong các trường hợp sau:

Biên truyền nhiệt:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l + k_y \frac{\partial T}{\partial y} m + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n + q(t) = 0 \tag{3}$$

Biên đối lưu:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l + k_y \frac{\partial T}{\partial y} m + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n + h(T - T_\infty) = 0 \tag{4}$$

trong đó h là hệ số đối lưu (kcal/m.h.°C); T_∞ là nhiệt độ tại bề mặt đối lưu (°C); l, m, n là cosin chỉ phương của các mặt truyền nhiệt đang xét.

2.2. *Nhiệt độ môi trường xung quanh khối đổ*

Nhiệt độ môi trường xung quanh cũng ảnh hưởng đáng kể đến nhiệt độ tại tâm và sự giảm nhiệt độ của bê tông khi đổ trong quá trình khối bê tông đông cứng. Thông thường, nhiệt độ xung quanh được xác định bởi nhiệt độ trung bình hàng tháng, theo mùa và cũng có thể theo năm. Trong nghiên cứu [12], nhiệt độ mùa hè ở miền Bắc Việt Nam được biến đổi theo phương trình (5):

$$t_{air} = 26{,}5 + 5\sin\left(\frac{2\pi\tau}{24}\right) \tag{5}$$

trong đó t_{air} là nhiệt độ không khí trung bình hàng ngày (°C); τ là thời gian (giờ).

2.3. *Nhiệt độ bê tông khi đổ*

Nhiệt độ bê tông khi đổ là nhiệt độ của hỗn hợp bê tông tươi trước khi được đổ vào ván khuôn. Nhiệt độ này sẽ ảnh hưởng đến quá trình nhiệt thủy hóa, cường độ, độ bền và chất lượng của bê tông khối lớn. Nếu nhiệt độ quá cao hoặc quá thấp, có thể gây ra các vết nứt, giảm tính công tác và thẩm mỹ của bê tông. Theo [13] nhiệt độ bê tông khi đổ sẽ được tính theo nhiệt độ và hàm lượng của các thành phần bê tông khi trộn theo phương trình (6):

$$T_m = \frac{C_S(T_g.W_g + T_c.W_c) + T_n.W_n}{C_S.(W_g + W_c) + W_n} \tag{6}$$

trong đó T_m là nhiệt độ bê tông sau khi được trộn với các vật liệu đã làm mát (°C); C_S là tỷ nhiệt của xi măng và cốt liệu có tính đến nước (lấy $C_S = 0{,}2$); T_g, W_g là khối lượng thể tích (kg/m^3) và nhiệt độ (°C) của cốt liệu; T_c, W_c là khối lượng thể tích (kg/m^3) và nhiệt độ (°C) của xi măng; T_n, W_n là khối lượng thể tích (kg/m^3) và nhiệt độ (°C) của nước.

2.4. *Chỉ số nứt trong khối bê tông*

Chỉ số nứt của bê tông được xác định theo phương trình (7) [9]:

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

trong đó $f_t(t_e)$ là giá trị cường độ kéo của bê tông tại thời điểm t_e (kgf/m^2) được xác định theo phương trình (8) [9]; $\sigma_t(t_e)$ là ứng suất kéo trong kết cấu bê tông tại thời điểm t_e (kgf/m^2); Khi giá trị của $I_{cr} < 1$ thì cấu kiện sẽ xuất hiện các vết nứt.

$$f_t(t_e) = C_1.f'_C(t_e)^{C_2} \tag{8}$$

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

$$f'_C(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b(t_e - S_f)} f'_C(t_n) \tag{9}$$

trong đó: t_e (ngày) là tuổi chỉnh nhiệt độ; t_n (ngày) là tuổi kiểm soát cường độ của bê tông dưỡng hộ dưới nước 20 °C; a, b là các thông số thể hiện phát triển cường độ, S_f là tuổi chỉnh nhiệt độ tương ứng bắt đầu đóng rắn, phụ thuộc loại xi măng (ngày); $f'_C(t_n)$ là cường độ nén của bê tông tại t_n (kgf/m^2).

3. Ảnh hưởng mức độ sử dụng tro bay đến cường độ của bê tông

Mục đích của nghiên cứu thực nghiệm này là để xác định mức độ thay thế xi măng bằng tro bay, bê tông cấp độ bền B30, độ sụt 12 ± 2 cm, sử dụng cho kết cấu cột bê tông khối lớn. Để từ đó có thể định lượng được hàm lượng xi măng cho cấp phối của khối bê tông, đồng thời kết quả sẽ được sử dụng trong các nghiên cứu ở Mục 4.

3.1. Thiết kế cấp phối

Tiến hành thí nghiệm với các trường hợp sử dụng tro bay thay thế xi măng từ 0 ÷ 40%. Định mức vật liệu cho các cấp phối được mô tả ở trong Bảng 1.

Bảng 1. Cấp phối cho 1 m^3 bê tông

Mẫu	Cát (kg)	Đá (kg)	Nước (lít)	Bột (kg/m^3)	Xi măng		Tro bay		Loại xi măng	Phụ gia siêu dẻo (kg/m^3)
					kg/m^3	%	kg/m^3	%		
M1	730	1.050	173	450	450	100	0	0	PC40	0
M2	730	1.050	173	450	405	90	45	10	PC40	3,6
M3	730	1.050	173	450	360	80	90	20	PC40	3,6
M4	730	1.050	173	450	315	70	135	30	PC40	3,6
M5	730	1.050	173	450	270	60	180	40	PC40	3,6

Để phù hợp với biện pháp thi công cột khối lớn, các tổ mẫu được thí nghiệm xác định cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày theo tiêu chuẩn. Xi măng PC40 Xuân Thành đáp ứng tiêu chí cấp bền theo TCVN 10306:2014 [14] và phù hợp với TCVN 2682:2020 [15], xi măng có khối lượng riêng 3,13 (g/cm^3), thành phần SiO_2 (21,1%), Al_2O_3 (4,5%), Fe_2O_3 (3,9%), CaO (62,5%), MgO (2,4%), SO_3 (2,6%), K_2O (0,7%), Na_2O (0,3%), MKN (2,0%).

Vì sử dụng tro bay sẽ làm thay đổi tính chất của hỗn hợp bê tông, do đó các thí nghiệm về độ sụt của hỗn hợp bê tông được thực hiện để khảo sát ảnh hưởng của tro bay. Tro bay sử dụng là loại F theo ASTM C618:12 [16] và TCVN 10302:2014 [4], tro bay có khối lượng riêng 2,36 (g/cm^3), thành phần SiO_2 (54,3%), Al_2O_3 (22,5%), Fe_2O_3 (8,5%), CaO (1,1%), MgO (1,7%), SO_3 (2,5%), K_2O (1,5%), Na_2O (1,4%), MKN (6,5%).

Cốt liệu lớn: đá có kích thước $D = 1 \div 2$ cm, khối lượng riêng 2,7 (g/cm^3). Cốt liệu mịn: cát vàng hạt thô sông Hồng, khối lượng riêng 2,65 (g/cm^3). Phụ gia siêu dẻo: Roadcon-SPR2000.

Đánh giá về độ sụt: Thí nghiệm trên 5 mẫu bê tông được trộn theo cấp phối thiết kế cho thấy độ sụt của hỗn hợp bê tông có xu hướng tăng theo lượng tro bay sử dụng, chi tiết được thể hiện ở Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm độ sụt

Mẫu	Hàm lượng tro bay (%)	Độ sụt (mm)
M1	0	100
M2	10	110
M3	20	120
M4	30	140
M5	40	170

Bảng 3. Cấp phối vật liệu dùng cho thí nghiệm xác định cường độ

Mẫu vật liệu	Cát (kg)	Nước (lít)	Xi măng (kg)	Tro bay (kg)	Đá (kg)
M1	46,4	11	28,6	0	66,8
M2	46,4	11	25,8	2,8	66,8
M3	46,4	11	22,9	5,7	66,8
M4	46,4	11	20,0	8,6	66,8
M5	46,4	11	17,2	11,4	66,8

3.2. Chương trình thí nghiệm

Thí nghiệm cường độ chịu nén được thực hiện theo tiêu chuẩn ASTM C39 [17]. Trên cơ sở tính toán thành phần cấp phối lý thuyết cho 1 m^3 hỗn hợp bê tông không có tro bay (Bảng 1) xác định được vật liệu dùng cho thí nghiệm (Bảng 3).

Tiến hành phối trộn vật liệu đúng tiêu chuẩn thực hiện thí nghiệm xác định độ sụt của hỗn hợp bê tông. Sau đó chế tạo mẫu bê tông sử dụng các hàm lượng tro bay khác nhau thay thế một phần xi măng, với các tỷ lệ % so với xi măng là: 0%, 10%, 20%, 30%, 40%. Lần lượt thí nghiệm độ sụt và xác định cường độ chịu nén của mẫu thí nghiệm sau khi bảo dưỡng ở tuổi 3, 7, 14 và 28 ngày. Mẫu bê tông là mẫu hình trụ kích thước D150 × 300 mm, được chế tạo và bảo dưỡng trong điều kiện phòng thí nghiệm, số lượng mẫu theo Bảng 4.

Bảng 4. Thông số và phương pháp thí nghiệm cường độ nén

TT	Tên chỉ tiêu	Mô tả			
1	Tiêu chuẩn thí nghiệm	ASTM C39			
2	Tuổi mẫu thí nghiệm (ngày)	3	7	14	28
3	Số lượng mẫu thí nghiệm M1	3	3	3	3
4	Số lượng mẫu thí nghiệm M2	3	3	3	3
5	Số lượng mẫu thí nghiệm M3	3	3	3	3
6	Số lượng mẫu thí nghiệm M4	3	3	3	3
7	Số lượng mẫu thí nghiệm M5	3	3	3	3



Hình 1. Chế tạo các mẫu



Hình 2. Các khuôn đúc mẫu và máy trộn vữa



Hình 3. Mẫu thí nghiệm



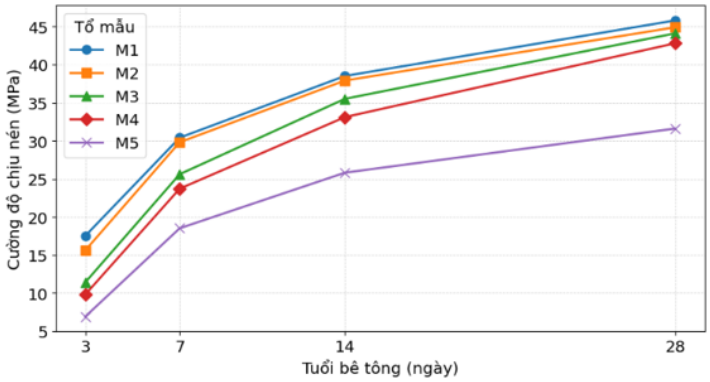
Hình 4. Mẫu bị phá hủy

Một số hình ảnh của quá trình triển khai thí nghiệm như (Hình 1, 2, 3, 4). Kết quả xác định cường độ nén các tổ mẫu M1, M2, M3, M4, M5 ở thời điểm 3, 7, 14 và 28 ngày như ở Bảng 5.

Bảng 5. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén của các mẫu (MPa)

	3 ngày	7 ngày	14 ngày	28 ngày
M1	17,5	30,4	38,5	45,8
M2	15,6	29,8	37,9	44,9
M3	11,4	25,6	35,5	44,1
M4	9,8	23,7	33,1	42,8
M5	6,9	18,5	25,8	31,6

3.3. Kết quả thí nghiệm



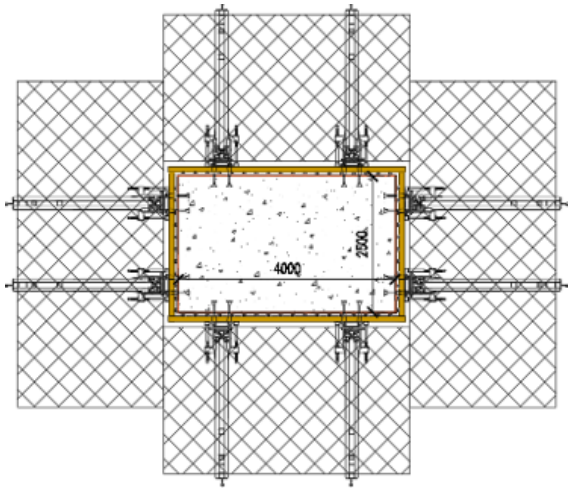
Hình 5. Sự thay đổi cường độ chịu nén của 5 tổ mẫu theo thời gian

Kết quả ở Bảng 5, Hình 5 cho thấy, cường độ của bê tông giảm dần và tỷ lệ nghịch với hàm lượng tro bay thay thế xi măng trong cấp phối ở tất cả các thời điểm nén mẫu 3 ngày, 7 ngày, 14 ngày và 28 ngày. Về tốc độ phát triển: thời gian đầu cường độ bê tông của mẫu không có tro bay lớn hơn so với mẫu có tro bay do quá trình thủy hóa của mẫu nhanh hơn làm tăng cường độ tuổi sớm, càng về thời điểm 28 ngày, nhịp phát triển không có sự khác biệt lớn, ngoại trừ trường hợp sử dụng 40% tro bay. Như vậy, sử dụng tro bay làm tăng tính công tác và giảm cường độ bê tông ở giai đoạn đầu của bê tông, tăng cường độ nhanh hơn ở giai đoạn sau. Từ biểu đồ các đường thực nghiệm cấp phối bê tông

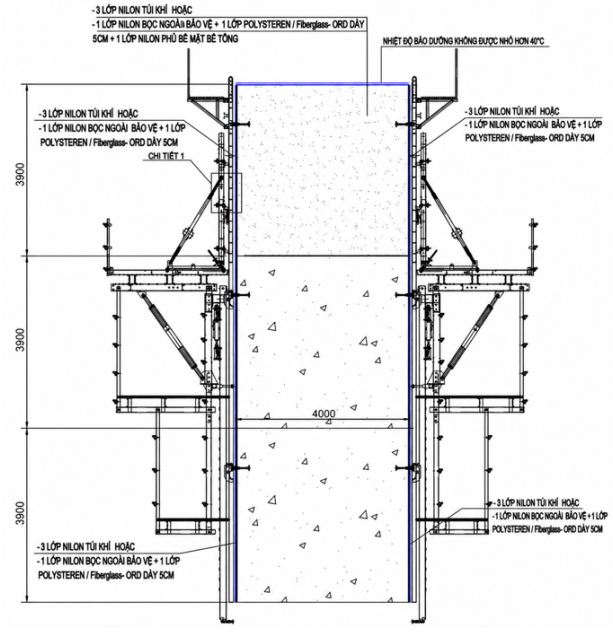
(Hình 5), sử dụng phương pháp nội suy có thể thấy việc thiết kế cấp phối bê tông với cấp độ bền nén mục tiêu B30 ở tuổi 28 ngày với hàm lượng tro bay thay thế xi măng có thể lên đến 33%.

4. Ảnh hưởng của tỷ lệ thay thế xi măng bằng tro bay đến nhiệt thủy hóa của cột bê tông khối lớn thi công theo công nghệ cốp pha leo

4.1. Thông số hình học, mô hình tính toán cột bê tông khối lớn

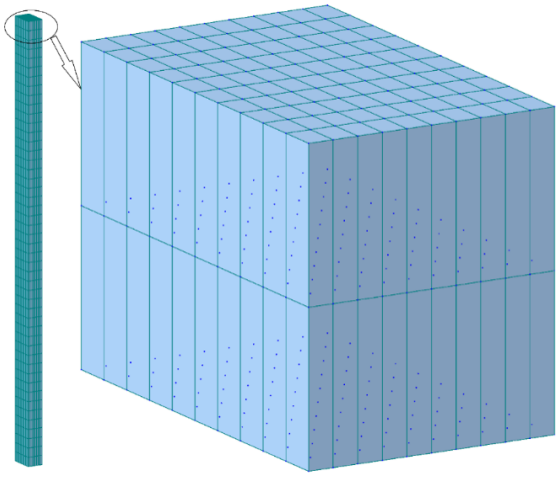


Hình 6. Mặt bằng thi công cho cột có kích thước 2,5 × 4 × 74,1 m



Hình 7. Mặt cắt thi công cột có kích thước 2,5 × 4 × 74,1 m sử dụng cốp pha leo

Cột khối lớn bê tông cốt thép có tiết diện mặt cắt ngang là 2,5 × 4 m với chiều cao 74,1 m (xem mặt bằng và mặt cắt cột ở Hình 6 và Hình 7) được thi công theo công nghệ ván khuôn leo với mỗi phân đợt đổ (tương ứng là mỗi đợt leo của hệ ván khuôn) là 3,9 m. Mỗi phân đợt đổ này được mô phỏng trong phần mềm tính toán như thể hiện ở Hình 8. Khoảng cách các đợt đổ là 120 giờ.



Hình 8. Mô hình tính toán khối cột có kích thước 2,5 × 4 × 74,1 m trong phân tích

4.2. Thông số đầu vào trong mô hình tính toán

Thông số dữ liệu đầu vào sử dụng trong các phân tích mô phỏng số của nghiên cứu này được tổng hợp ở Bảng 6.

Bảng 6. Thông số dữ liệu đầu vào sử dụng trong phân tích

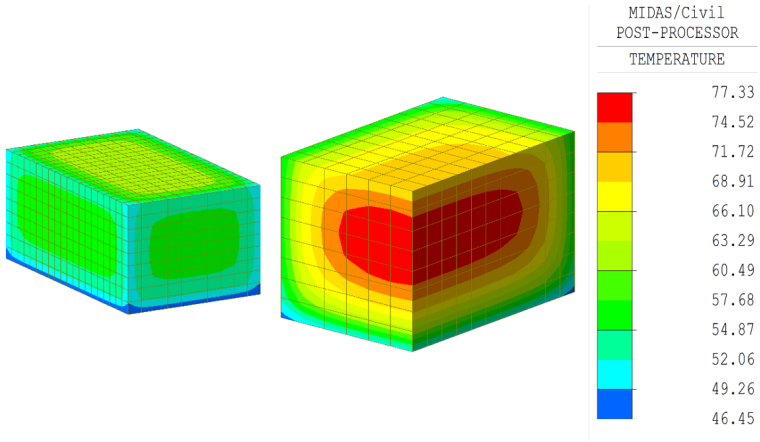
Dữ liệu đầu vào	Đơn vị	Bê tông
Nhiệt dung riêng	kcal/(kg.°C)	0,25
Khối lượng riêng	kg/m^3	2400
Hệ số dẫn nhiệt	kcal/(m.h.°C)	2,3
Hệ số trao đổi nhiệt khi tiếp xúc môi trường	kcal/(m^2.h.°C)	15
Hệ số trao đổi nhiệt khi tiếp xúc ván khuôn	kcal/(m^2.h.°C)	12
Nhiệt độ môi trường	°C	30
Nhiệt độ bảo dưỡng	°C	40
Nhiệt độ bê tông khi đổ	°C	30
Cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi	MPa	Theo Bảng 5
Môđun đàn hồi	kG/cm^2	$2{,}7734 \times 10^5$
Hệ số giãn nở nhiệt		$1{,}0 \times 10^{-5}$
Hệ số Poisson		0,18

4.3. Kết quả tính toán

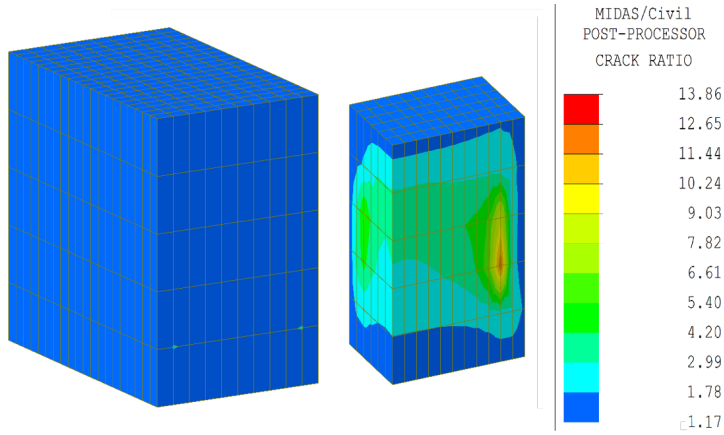
Kết quả tính toán thể hiện ở (từ Hình 9 đến Hình 16) đối với cấp phối sử dụng cho quá trình tính toán phân tích là trường hợp M3 (sử dụng 20% tro bay thay thế xi măng).

Kết quả tính toán cho phân đợt đổ đầu tiên được thể hiện ở (từ Hình 9 đến Hình 12).

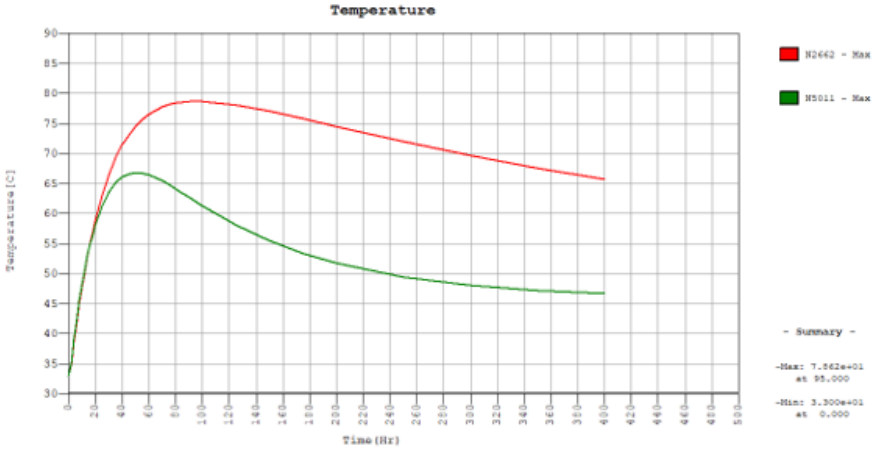
Kết quả phân tích chế độ nhiệt của cột bê tông khối lớn cho thấy các thông số đều nằm trong giới hạn cho phép, đáp ứng yêu cầu kiểm soát nứt do nhiệt thủy hóa xi măng trong giai đoạn đầu đóng rắn theo cả tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 14334:2025 [2] và tiêu chuẩn Nhật Bản JCI [10]. Nhiệt độ cực đại ghi nhận đạt 78,62 °C, trong khi chênh lệch nhiệt độ lớn nhất là 21,69 °C. Đáng chú ý, chỉ số nứt đạt 1,14, cho thấy nguy cơ hình thành vết nứt đã được kiểm soát hiệu quả và kết cấu đảm bảo an toàn về mặt nhiệt.



Hình 9. Trường nhiệt độ khối cột 2,5 × 4 × 74,1 m trong phân tích tại thời điểm đổ bê tông đợt đầu



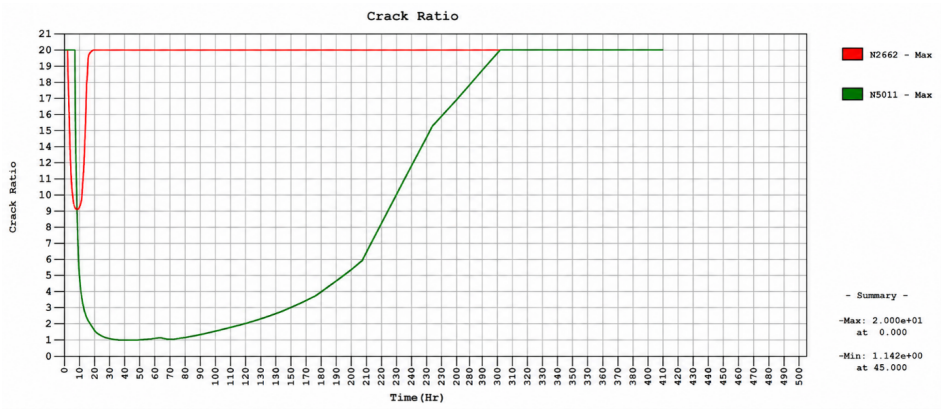
Hình 10. Chỉ số nứt khối cột 2,5 × 4 × 74,1 m trong phân tích tại thời điểm đổ bê tông đợt đầu



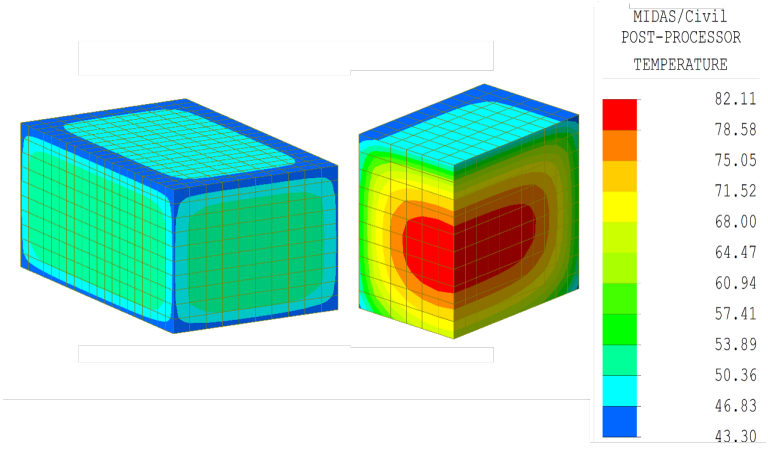
Hình 11. Đồ thị diễn biến nhiệt độ tại tâm và bề mặt cột 2,5 × 4 × 74,1 m tại thời điểm đổ bê tông đợt đầu

Thời điểm xuất hiện nhiệt độ lớn nhất ở đợt đầu trong khối bê tông với trường hợp sử dụng 20% tro bay thay thế xi măng là 90 h tính từ thời điểm bắt đầu đổ bê tông.

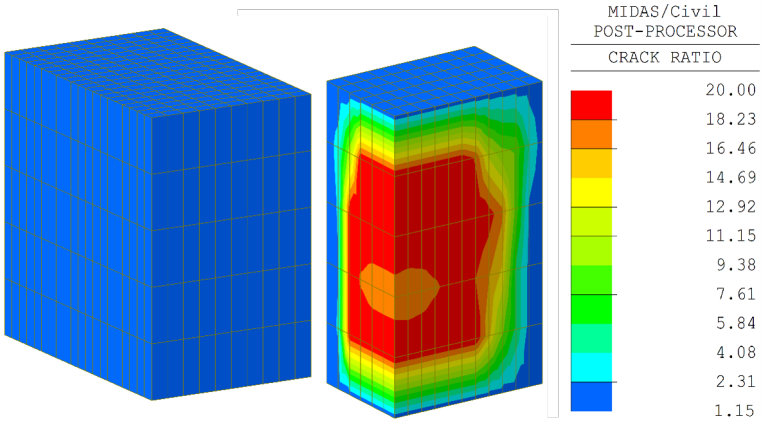
Kết quả tính toán cho phân đợt đổ cuối cùng được thể hiện ở (từ Hình 13 đến Hình 16).



Hình 12. Đồ thị diễn biến chỉ số nứt tại tâm và bề mặt khối cột 2,5 × 4 × 74,1 m tại thời điểm đổ bê tông đợt đầu

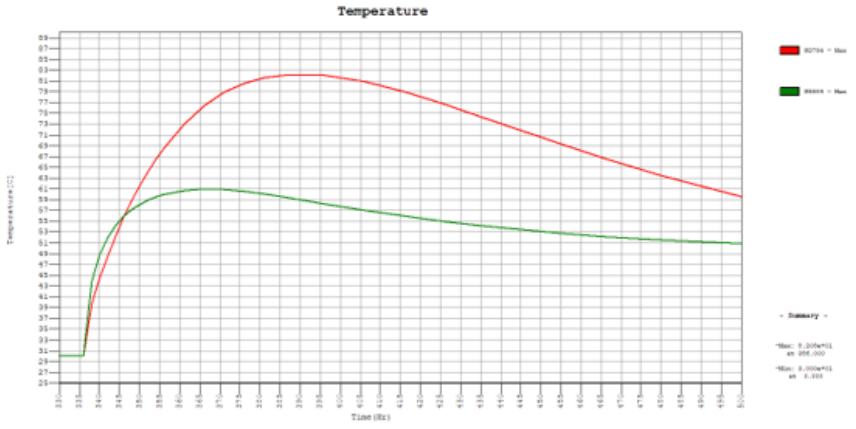


Hình 13. Trường nhiệt độ khối cột 2,5 × 4 × 74,1 m trong phân tích tại thời điểm đổ bê tông đợt cuối

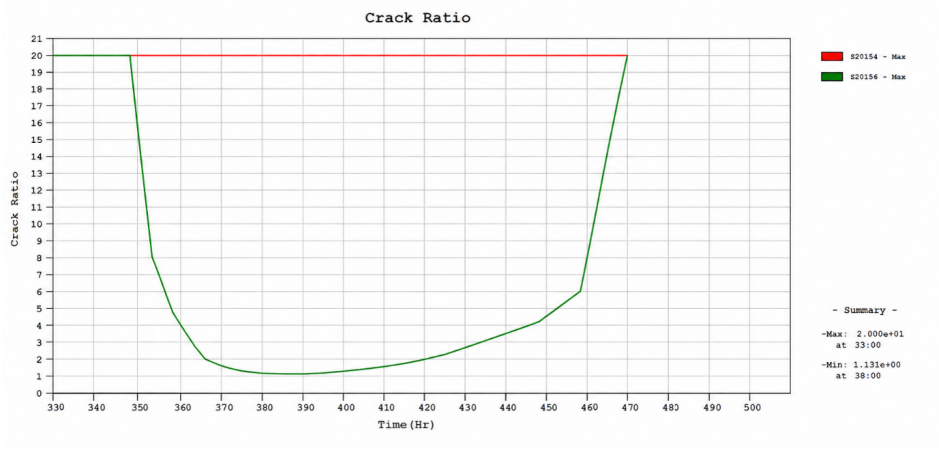


Hình 14. Chỉ số nứt khối cột 2,5 × 4 × 74,1 m trong phân tích tại thời điểm đổ bê tông đợt cuối

Kết quả phân tích trường nhiệt độ của cột bê tông khối lớn cho thấy các thông số đều nằm trong giới hạn cho phép, đáp ứng yêu cầu kiểm soát nứt do nhiệt thủy hóa xi măng trong giai đoạn đầu đóng rắn theo cả hai tiêu chuẩn TCVN 14334:2025 [2] và JCI [10]. Nhiệt độ cực đại ghi nhận đạt 82,08 °C, trong khi chênh lệch nhiệt độ lớn nhất là 24,2 °C. Đáng chú ý, chỉ số nứt đạt 1,13 cho thấy nguy cơ hình thành vết nứt đã được kiểm soát hiệu quả và kết cấu đảm bảo an toàn về mặt nhiệt.

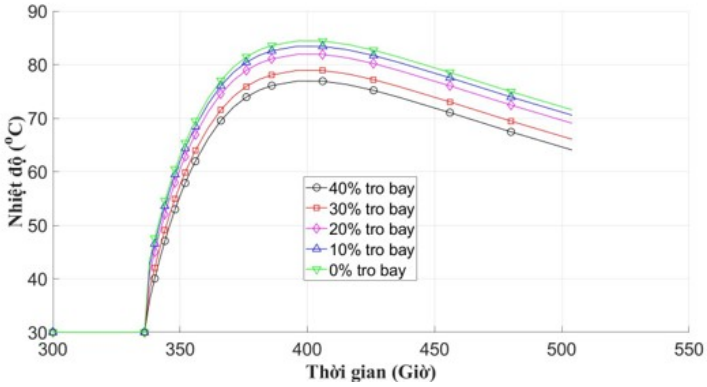


Hình 15. Đồ thị diễn biến nhiệt độ tại tâm và bề mặt cột 2,5 × 4 × 74,1 m tại thời điểm đổ bê tông đợt cuối



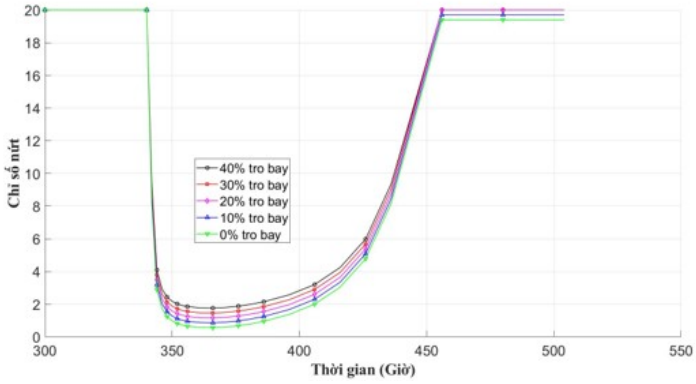
Hình 16. Đồ thị diễn biến chỉ số nứt tại tâm và bề mặt khối cột 2,5 × 4 × 74,1 m tại thời điểm đổ bê tông đợt cuối

Khi sử dụng 20% tro bay thay thế xi măng, nhiệt độ cực đại ở đợt đổ cuối của khối bê tông ghi nhận tại thời điểm 90 h tính từ thời điểm bắt đầu đổ.



Hình 17. Tổng hợp kết quả so sánh sự phát triển nhiệt thủy hóa tại tâm giai đoạn cuối của kết cấu cột bê tông khối lớn với các trường hợp sử dụng tro bay khác nhau

Kết quả phân tích mô phỏng cho 5 trường hợp như thể hiện ở Hình 17 cho thấy: Đối với trường hợp không sử dụng tro bay thì nhiệt thủy hóa bên trong kết cấu bê tông khối lớn đạt trị số lớn nhất và thời gian xuất hiện nhiệt độ lớn nhất tại tâm khối cột là sớm nhất. Khi tăng hàm lượng tro bay thay thế xi măng thì sẽ có hiệu quả trong việc làm giảm đỉnh nhiệt thủy hóa và làm chậm thời gian xuất hiện đỉnh nhiệt thủy hóa trong khối bê tông. Đối với trường hợp sử dụng thay thế xi măng lên đến 40% tro bay thì đỉnh nhiệt thủy hóa giảm đáng kể (giảm tới 20,8%) đồng thời chỉ số nứt nhỏ nhất của kết cấu có xu hướng tăng đáng kể (tăng tới 68,10%) so với việc không sử dụng tro bay. Xu hướng thay đổi này có lợi hơn về điều kiện kiểm soát nứt do nhiệt thủy hóa xi măng, đánh giá thông qua chỉ số nứt như thể hiện ở Hình 18.



Hình 18. Tổng hợp kết quả so sánh sự phát triển chỉ số nứt tại biên giai đoạn cuối của kết cấu cột bê tông khối lớn với các trường hợp sử dụng tro bay khác nhau

5. Kết luận

Dựa vào kết quả nghiên cứu thu được có thể đưa ra một số kết luận về ảnh hưởng của tỷ lệ thay thế xi măng bằng tro bay đến cường độ và nhiệt thủy hóa của cột bê tông khối lớn thi công theo công nghệ cốp pha leo:

Kết quả từ các thí nghiệm chỉ ra rằng cường độ của bê tông giảm dần và có mối quan hệ nghịch với tỷ lệ tro bay thay thế cho xi măng trong hỗn hợp bê tông. Điều này có thể nhận thấy không chỉ ở thời điểm 28 ngày mà còn trong các kỳ thử nghiệm 3 ngày, 7 ngày và 14 ngày.

Các kết quả thí nghiệm cũng cho thấy rằng vào giai đoạn đầu, cường độ bê tông của mẫu không chứa tro bay cao hơn so với mẫu có tro bay. Điều này là do quá trình thủy hóa diễn ra nhanh hơn, làm tăng cường độ trong giai đoạn tuổi sớm, nhưng về sau mẫu chứa tro bay lại phát triển cường độ nhanh hơn. Như vậy, việc thêm tro bay giúp tăng tính linh hoạt nhưng có thể làm giảm cường độ bê tông trong giai đoạn đầu, trong khi cường độ của bê tông sẽ được cải thiện trong các giai đoạn tiếp theo.

Việc sử dụng tro bay trong bê tông khối lớn đã cho thấy hiệu quả trong khả năng thi công và sinh nhiệt thấp của nó. Tro bay giúp làm chậm quá trình phản ứng thủy hóa đồng thời giảm giá trị và thời gian đạt đỉnh nhiệt bên trong kết cấu cột khối lớn.

Mặc dù tro bay thường gây ảnh hưởng tiêu cực đến cường độ bê tông ở giai đoạn sớm, nhưng nó lại là một giải pháp hiệu quả trong việc kiểm soát nhiệt thủy hóa, giúp giảm thiểu sự chênh lệch nhiệt độ giữa tâm và bề mặt khối đổ, đồng thời hạn chế nguy cơ nứt do nhiệt thủy hóa ở kết cấu cột khối lớn thi công theo công nghệ cốp pha leo. Nghiên cứu cho thấy rằng hàm lượng tro bay thay thế xi măng có thể lên tới 33% vẫn có thể đảm bảo cường độ bê tông đạt yêu cầu và đồng thời hiệu quả trong việc giảm nhiệt thủy hóa, tức là giảm nguy cơ nứt cho kết cấu cột bê tông khối lớn.

Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Các tác giả xác nhận không sử dụng bất kỳ công cụ trí tuệ nhân tạo tạo sinh hoặc công nghệ hỗ trợ bởi AI nào trong quá trình chuẩn bị và hoàn thiện bản thảo.

Tài liệu tham khảo

[1] Khoa, H. N., Dũng, T. Q., Hà, L. H., Tuyến, T. N. (2022). *Nghiên cứu xây dựng hướng dẫn sử dụng hệ ván khuôn leo trong thi công các công trình cao tầng tại Việt Nam*. Báo cáo đề tài khoa học, Hội Kết cấu và Công nghệ Xây dựng Việt Nam, Bộ Xây dựng, Hà Nội.

[2] TCVN 14334:2025. *Kết cấu bê tông khối lớn – Thi công và nghiệm thu*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.

[3] Tuyết, H. T. (2022). *Nghiên cứu ứng xử nhiệt và một số giải pháp kiểm soát nhiệt, hạn chế vết nứt trong bê tông cường độ cao tuổi sớm kết cấu cầu*. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Giao thông Vận tải, Hà Nội.

[4] TCVN 10302:2014. *Tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng – Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.

[5] TCVN 8262:2009. *Tro bay – Phương pháp phân tích hóa học*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.

[6] ACAA (2003). *Fly ash facts for highway engineers*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA.

[7] Đích, N. T. (2010). *Công tác bê tông trong điều kiện khí hậu nóng ẩm Việt Nam*. NXB Xây dựng, Hà Nội.

[8] Te, V. V., Lượng, Đ. V. (2004). Những biện pháp khống chế sự phát triển nhiệt, ứng suất nhiệt để đề phòng các vết nứt vì nhiệt trong thi công bê tông khối lớn. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi & Môi trường*, (7):97–103.

[9] Zhu, B. (2014). Conduction of heat in mass concrete, boundary conditions, and methods of solution. *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete*, Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 11–47.

[10] JCI (2016). *Guidelines for control of cracking of mass concrete 2016*. Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan.

[11] Noorzaei, J., Bayagoob, K. H., Thanoon, W. A., Jaafar, M. S. (2009). Three dimensional nonlinear temperature and structural analysis of roller compacted concrete dam. *CMES - Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 47(1):43–60.

[12] Semenov, K., Barabanshchikov, Y., Vatin, N. (2019). Unsteady temperature fields in the calculation of crack resistance of massive foundation slab during the building period. Borodinecs, A., Vatin, N., Sergeev, V., editors, *Proceedings of EECE 2019, Lecture Notes in Civil Engineering*, Cham, Switzerland, Springer, 70:455–467.

[13] Hung, N. Q. (2009). Stress analysis of roller compacted concrete in the process of construction. *Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, (27):58–64.

[14] TCVN 10306:2014. *Bê tông cường độ cao – Thiết kế thành phần theo mẫu hình trụ*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.

[15] TCVN 2682:2020. *Xi măng poóc lăng – Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.

[16] ASTM C618-12. *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[17] ASTM C39/C39M-21. *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.