

MỘT MÔ HÌNH TÍNH TOÁN ỨNG SUẤT NHIỆT TRONG BÊ TÔNG Ở TUỔI SỚM

ThS. HOÀNG THỊ TUYẾT
Đại học Giao thông vận tải

TÓM TẮT:

Nứt là một vấn đề phổ biến trong các kết cấu bê tông trong điều kiện làm việc thực tế. Rủi ro nứt tuổi sớm xảy ra trong kết cấu bê tông có thể dẫn đến những vấn đề bảo trì dài hạn và ảnh hưởng đến chất lượng công trình. Có nhiều mô hình dự đoán nứt tuổi sớm trong kết cấu bê tông, những mô hình này giúp các kỹ sư hiểu được những hạn chế trong thiết kế, đặc biệt trong giai đoạn tuổi sớm. Trong nghiên cứu này, một chương trình máy tính có tên “EACTSA” đã được sử dụng để dự đoán sự phát triển nhiệt độ và phân bố ứng suất trong tiết diện ngang trụ cầu sử dụng hỗn hợp bê tông cường độ cao. Nguy cơ nứt trong trường hợp này khá cao và cần một số biện pháp để giảm thiểu rủi ro này.

Từ khóa: Nứt, mô hình, bê tông tuổi sớm...

ABSTRACT:

In real-life service conditions, cracking is a common problem in concrete members. Early-age cracking occurs in concrete structures may lead to long-term maintenance issues. There are various models available to predict the early-age cracking in concrete structures, these models could help construction engineers understand the limitations of their design, especially at the early stage. A modeling program named EACTSA was used in this study to predict temperature development and stress distribution in a pier's cross section using high-strength concrete mixture. The thermal cracking risk in this case was very high and some measures need to be taken for minimizing risk of cracking.

Keywords: cracking, modeling, early-age concrete...

1. GIỚI THIỆU

Vết nứt ở tuổi sớm được định nghĩa là vết nứt thường được phát triển trong vòng bảy ngày đầu sau khi đổ bê tông. Tuy nhiên, 60 ngày có thể được coi là giới hạn tối đa đối với vết nứt ở độ tuổi sớm, có tính đến sự bắt đầu của các vết nứt ở bề mặt đáy của bê tông mà có thể mất nhiều hơn một tuần để có thể hình thấy [1].

Vết nứt tuổi sớm xảy ra trong các kết cấu bê tông do chênh lệch nhiệt độ và sự phát triển ứng suất trong quá trình bê tông đóng rắn. Ở tuổi sớm, khi các kết cấu bê tông chịu biến dạng kéo do sự kiềm chế co giãn nhiệt hoặc chênh lệch nhiệt độ vượt quá khả năng chịu kéo của bê tông, vết nứt sẽ xảy ra; Biến dạng kéo cũng có thể được sinh ra từ sự co sớm gây ra bởi co ngót tự sinh. Bê tông cường độ cao dễ bị nứt tuổi sớm do co ngót tự sinh [10].

Mô phỏng và mô hình hóa rất hữu ích để tìm ra những điểm không chắc chắn và điểm yếu trong các nghiên cứu thực nghiệm và cho phép dự đoán định lượng. Do đó,

Bảng 1. Nhóm các mô hình nứt sớm cho các kết cấu bê tông.

TT	Tác giả	Nhiệt	Cơ học	Hóa học
1	Faria, Azenha, và Figueiras [4]	x	x	-
2	De Schutter [13]	x	x	x
3	Li et al.[6]	x	x	-
4	Liu et al. [9]	x	x	-
5	Lawrence et al. [5]	x	-	-
6	Wu et al. [11]	x	x	x
7	Lin và Chen [8]	x	x	-
8	Yuan và Wan [12]	-	x	-
9	T.A.Do và cộng sự [2]	x	x	-

nhiều nhà nghiên cứu đã nỗ lực trong việc phát triển và cải tiến các mô hình để cung cấp sự hiểu biết tốt hơn và dự đoán sự nứt vỡ trong bê tông ở tuổi sớm.

Bài báo này đã nhóm các mô hình liên quan đến nứt bê tông tuổi sớm có sẵn trong tài liệu, theo các tiêu chí nhiệt, cơ học, hóa học (Bảng 1). Các tiêu chí cơ học đã được tìm thấy có liên quan đến hầu hết các mô hình, bởi vì ứng suất và biến dạng luôn đóng vai trò quan trọng

trong sự phát triển của vết nứt. Ứng suất nhiệt là một trong những lý do chính gây ra nứt vỡ trong bê tông đóng rắn và do đó nhiều nhà nghiên cứu cũng đã xem xét nó trong mô hình nứt sớm.

Faria và cộng sự [4] đã đưa ra một mô hình cơ nhiệt để dự đoán sự thay đổi thể tích do hydrat hóa trong tấm bê tông bị kiềm chế. Các thông số chính được xem xét trong mô hình là nhiệt gây ra bởi quá trình hydrat hóa xi măng, sự phát

triển các đặc tính của bê tông trong quá trình hydrat hóa và từ biến tuổi sớm. De Schutter [13] cũng đã phát triển một mô hình mô phỏng về nứt nhiệt trong các kết cấu bê tông đóng rắn khối lớn dựa trên mức độ hydrat hóa. Hơn nữa, Wu và cộng sự [11] đã phát triển một mô hình mô phỏng rủi ro nứt của bê tông do ứng suất nhiệt. Mức độ hydrat hóa, tính chất nhiệt (như nhiệt dung riêng và độ khuếch tán nhiệt), điều kiện biên về nhiệt, và tính chất cơ học tuổi sớm (như co ngót và từ biến) đã được xem xét trong mô hình này.

Yuan và Wan [12] đã phát triển một mô hình vi cơ và các công thức thực nghiệm về phát triển đặc tính của bê tông non để dự đoán nguy cơ nứt tuổi sớm sau khi đổ bê tông. Họ đã quan sát các ảnh hưởng của điều kiện môi trường và quy trình xây dựng, chẳng hạn như loại bỏ ván khuôn, điều kiện bảo dưỡng và sự thay đổi nhiệt độ xung quanh và độ ẩm tương đối đến ứng xử nứt của bê tông tuổi sớm. Hơn nữa, Li và cộng sự [6] đã sử dụng luật từ biến kéo trong bê tông để dự đoán sự phát triển nhiệt độ và ứng suất trong giai đoạn tuổi sớm của một tường ngăn có kích thước thật.

Một mô hình cấu thành đàn nhớt phi tuyến của bê tông đóng rắn trong một hàm chìm được phát triển bởi Liu và cộng sự [9], trong đó nhiệt độ đổ bê tông, độ dẫn nhiệt của ván khuôn, thời gian loại bỏ ván khuôn, nhiệt độ bảo dưỡng và nhiệt độ môi trường được tính toán bằng phương pháp đa biến ngẫu nhiên để xác định độ không đảm bảo và xác định các yếu tố ảnh hưởng. Người ta đã phát hiện ra rằng nhiệt độ khi đổ và nhiệt độ bảo dưỡng là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất trong mô hình.

Lawrence và cộng sự [5] đã nghiên cứu sự phân bố nhiệt độ trong một cấu kiện bê tông khối lớn đóng rắn bằng phương pháp phần tử hữu hạn, mô hình có xét đến ảnh hưởng của mức độ thủy hóa đến nhiệt độ trong bê tông, đồng thời tính toán tuổi tương đương của

bê tông trong quá trình thủy hóa của xi măng. Mô hình này có thể định lượng chênh lệch nhiệt độ tối đa cho phép giữa lõi và bề mặt bê tông để ngăn ngừa nứt. Sự phân bố nhiệt độ được quan sát được trong quá trình thí nghiệm được định lượng tốt bởi mô hình được xây dựng.

Lin và Chen (2013)[8] đã sử dụng phần mềm ABAQUS để mô phỏng sự truyền nhiệt trong bê tông khối lớn với các đặc điểm cải thiện chính bao gồm: thuộc tính vật liệu bê tông phụ thuộc vào nhiệt độ và mức độ thủy hóa, hàm tải trọng nhiệt độ cũng phụ thuộc vào mức độ thủy hóa, mức độ thủy hóa thì lại khác nhau tại các điểm khác nhau trong bê tông và phụ thuộc vào sự phát triển nhiệt độ theo thời gian. Mô hình của Lin và Chen đã cho kết quả dự đoán tương đối trùng khớp với kết quả đo được từ các thí nghiệm.

Đỗ Anh Tú và cộng sự [2] đã xây dựng chương trình tính EACTSA tính toán quá trình sinh nhiệt, truyền nhiệt và phát triển ứng suất trong giai đoạn tuổi sớm của bê tông kết cấu cầu (xà mũ, trụ,...). Mô hình đã xét đến từ biến của bê tông dưới tác dụng của tải trọng nhiệt độ và sự biến thiên nhiệt độ trong ngày. Mô hình đã được so sánh và kiểm chứng với nghiên cứu của Lin và Chen (2015) [7] cho thấy kết quả tương đồng. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy thời điểm đổ bê tông của kết cấu cầu phù hợp nhất để giảm thiểu khả năng nứt là buổi tối (khoảng 7h), và giữa trưa (11h-12h) là thời điểm nên tránh khi đổ bê tông.

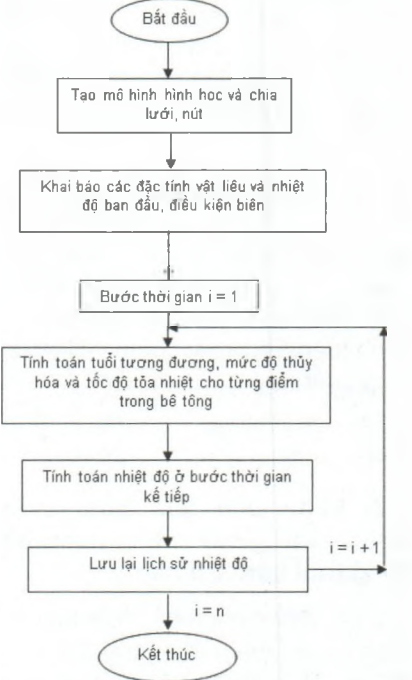
Hầu hết các mô hình được đề cập ở trên được phát triển dựa trên các phân tích phần tử hữu hạn và phân tích toán học. Các mô hình số dự đoán nứt này có thể giúp các kỹ sư hiểu được những hạn chế trong thiết kế, đặc biệt là ở giai đoạn đầu. Từ đó có những biện pháp để hạn chế xảy ra rủi ro nứt tuổi sớm trong bê tông, góp phần đảm bảo độ bền vững của công trình.

2. VÍ DỤ SỬ DỤNG MÔ HÌNH KIỂM SOÁT NHIỆT VÀ DỰ ĐOÁN KHẢ NĂNG NỨT TRONG TRỤ CẦU BÊ TÔNG

2.1. Chương trình tính EACTSA

Chương trình tính EACTSA được tác giả Đỗ Anh Tú và cộng sự [2] xây dựng trên phần mềm MATLAB gồm 2 phần: Phân tích nhiệt và phân tích ứng suất nhiệt.

Phân tích nhiệt sử dụng phương pháp sai phân hữu hạn FD để mô phỏng quá trình phát sinh nhiệt thủy hóa và truyền nhiệt trong khối bê tông ở tuổi sớm. Trình tự tính toán của quá trình phân tích nhiệt được thể hiện trên Hình 1. Kết quả của quá trình phân tích là dữ liệu nhiệt độ theo thời gian tại các điểm khác nhau trong khối bê tông.



Hình 1. Sơ đồ tính toán phân tích nhiệt

Phân tích ứng suất nhiệt FE sử dụng dữ liệu đầu vào là kết quả tải trọng nhiệt độ theo thời gian của bước phân tích trước. Kết quả của quá trình phân tích là phân bố ứng suất theo thời gian tại các vị trí khác nhau trong khối bê tông. Trình tự thực hiện phân tích ứng suất như sau:

1. Rời rạc hóa kết cấu (mặt cắt) thành các phần tử tam giác với các

đỉnh ứng với các nút lưới đã chia ở mô hình SPHH

2. Tại bước thời gian $t=n$ ($n=1,2,...$) Đặt tải trọng nhiệt độ của nút, tính toán nhiệt độ trung bình của mỗi phần tử từ nhiệt độ các nút, tính toán tuổi tương đương và mức độ thủy hóa

3. Bắt đầu từ mức chênh ứng suất $\Delta\sigma_{i=1}$, đặt tải trọng ứng suất của phần tử theo hướng chính. Tùy thuộc vào dấu của ứng suất chính, tính toán từ biến kéo/nén phù hợp của mỗi phần tử ($J(t=n, t'=i)$) tương ứng với từng số gia tải trọng $\Delta\sigma_1$. Tính toán mô đun có hiệu $E_{eff}(t=n, t'=i)$.

4. Tính toán ma trận độ cứng của phần tử dựa vào các tính chất cơ lý của vật liệu ở bước thời gian hiện tại. Thiết lập ma trận độ cứng tổng thể [K], tính toán lực nút tương đương cho các mức chênh ứng suất $\Delta\sigma_{i=1}$, sau đó tính toán chuyển vị nút. Tính toán biến dạng và ứng suất của phần tử.

5. Lặp lại các bước 3 và 4 cho đến bước thời gian $i=n$. Ứng suất tổng tại thời điểm $t=n$ là tổng các số gia ứng suất đã tính được từ thời điểm đầu tiên đến thời điểm hiện tại. Tính toán ứng suất chính và lưu lại ứng suất này.

6. Bước thời gian tiếp theo $n = n+1$: Lặp lại các bước từ 2 đến 6.

2.2. Phân tích quá trình sinh nhiệt và ứng suất nhiệt trong bê tông tuổi sớm trụ cầu

Trụ cầu được chọn để phân tích có kích thước mặt cắt ngang 2,4 m x 3,2 m. Thân trụ là bộ phận có một kích thước (chiều cao) tương đối lớn so với 2 kích thước còn lại (mặt cắt ngang), vì vậy khi tính toán có thể lấy mặt cắt ngang ở giữa kết cấu để mô phỏng bài toán 2 chiều.

Bê tông được sử dụng trong trụ cầu là hỗn hợp BT cường độ cao có sử dụng tro bay loại F với hàm lượng thay thế xi măng là 20% (CĐC-TB20) có cấp phối được cho trong Bảng 2.

Kết quả thí nghiệm nén và ép chế mẫu trụ 0,15mx0,3m sử dụng hỗn

Bảng 2. Thành phần cấp phối chuẩn cho 1m3 bê tông

N/CKD	Nước (lít)	Xi măng (kg)	Tro bay (kg)	Đá 5x10 (kg)	Tổng cát (kg)	Phụ gia (l)
0.32	170	424	106	1050	695	5.0

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm cường độ theo các ngày tuổi

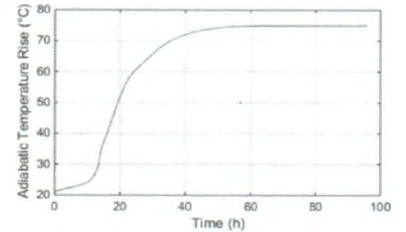
Tuổi (ngày)	Cường độ chịu nén	Cường độ chịu kéo
1	27.8	1.78
2	40.5	2.67
3	47.3	3.48
7	56.0	3.77
28	68.0	4.62

Bảng 4. Các tham số nhiệt thủy hóa

τ (h)	β	α_u	H_u (J/g)	Q_c (J/m³)	E_a (J/mol)
0.08	1.184	0.737	367.78	1.95×10^8	34,454

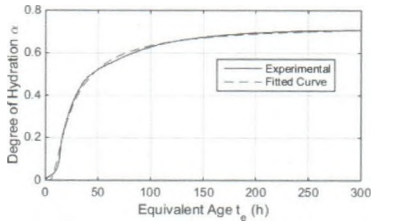
hợp bê tông CĐC-TB20 theo tiêu chuẩn ASTM C39 và ASTM496 ở các ngày tuổi khác nhau được thể hiện ở Bảng 3:

Nhiệt thủy hóa cho hỗn hợp bê tông được đo bằng máy đo nhiệt lượng đoạn nhiệt tại trường Đại học GTVT, nhiệt độ đoạn nhiệt của hỗn hợp được thể hiện trên Hình 2, nhiệt độ ban đầu của mẫu là 20.8°, độ tăng nhiệt độ lớn nhất trong mẫu là 54.2°.



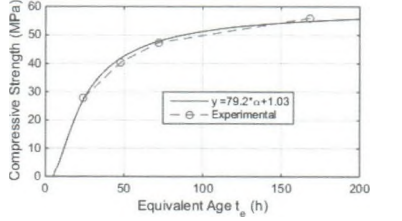
Hình 2. Nhiệt độ đoạn nhiệt thực nghiệm của bê tông CĐC-TB20

Để sử dụng mô hình thủy hóa trong phân tích nhiệt, các tham số nhiệt thủy hóa và năng lượng kích hoạt E_a đã được tính toán và trình bày trong Bảng 4, đường cong mức độ thủy hóa thực nghiệm và hồi quy được thể hiện trong Hình 3. Đường cong hồi quy cho cường độ nén được thể hiện ở Hình 4.



Hình 3. Đường cong mức độ thủy hóa thực nghiệm và hồi quy.

Các tham số τ và β là những tham số quan trọng để mô tả đặc tính phát triển nhiệt của bê tông, được sử dụng để đưa vào mô hình phân tích ứng xử nhiệt và sau đó là phân tích ứng suất nhiệt của cấu kiện bê tông.



Hình 4. Đường cong hồi quy cho cường độ nén

Mô đun đàn hồi của bê tông có thể xác định theo ACI 318-11:

$$E = 0.043w_c^{1.5}\sqrt{f_c} \text{ (Mpa)} \tag{1}$$

Trong đó w_c = khối lượng riêng của bê tông (kg/m^3), và f_c = cường độ nén (MPa).

BT CĐC-TB20 có khối lượng riêng là 2450 kg/m^3 , và nhiệt dung riêng lần lượt là, $1049 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. Hệ số dẫn nhiệt và hệ số giãn nở nhiệt của bê tông CĐC-TB20 được giả định là $8.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

Phân tích nhiệt được thực hiện trước, sử dụng bộ dữ liệu nhiệt độ môi trường giả định như thể hiện trên Hình 5a. Nhiệt độ ban đầu của bê tông là 27°C , thấp hơn nhiệt độ không khí một chút. Nhiệt tỏa ra thông qua sự đối lưu không khí ở bề mặt với môi trường xung quanh. Hệ số đối lưu ở các bề mặt bê tông được che phủ bởi ván khuôn thép được giả định là $13.9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ [2].

Lịch sử nhiệt độ dự đoán ở tâm, điểm giữa của các cạnh và ở góc của mặt cắt được thể hiện trên Hình 6a. Phân bố nhiệt độ dự đoán trong mặt cắt ngang thân trụ ở thời điểm 50h sau khi đổ bê tông được thể hiện trên Hình 5b. Nhiệt độ cao nhất tại tâm là 79.5°C ở thời điểm xấp xỉ 53 giờ sau khi đổ bê tông. Sau đỉnh nhiệt độ này, nhiệt độ lõi bê tông giảm chậm do độ lớn của khối bê tông.

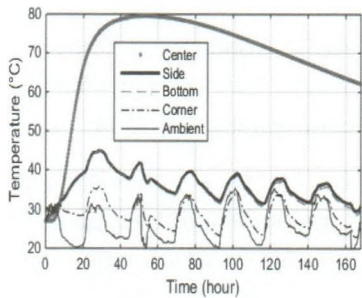
Phân tích ứng suất được thực hiện sau đó sử dụng tải trọng nhiệt đã đạt được từ phân tích trước.

Ứng suất nhiệt tại các điểm theo thời gian được tính toán và thể hiện trên Hình 6a. Có thể thấy ứng suất chính tại điểm giữa cạnh bên (cạnh dài) của trụ có giá trị bất lợi nhất. Vì vậy ứng suất tại điểm này được sử dụng để so sánh với sự phát triển cường độ chịu kéo theo thời gian để đánh giá rủi ro nứt, như được thể hiện trên Hình 6b.

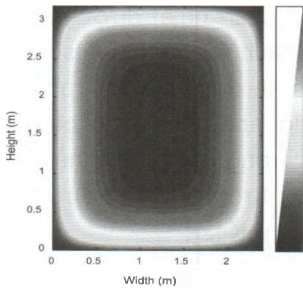
Từ Hình 6b có thể thấy ứng suất kéo hầu như lớn hơn cường độ chịu kéo trong vòng 4 ngày sau khi đổ bê tông thể hiện rủi ro nứt rất cao trong thời gian này.

2.3. Biện pháp hạn chế rủi ro nứt

Để giảm thiểu rủi ro nứt của kết cấu bê tông, các biện pháp như

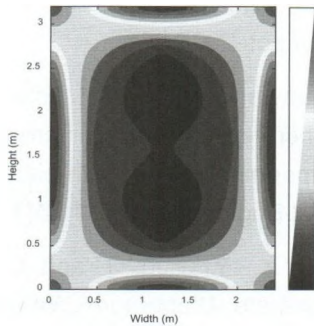


a) Lịch sử nhiệt độ

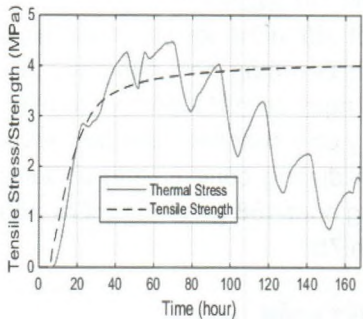


b) Phân bố nhiệt độ ($^\circ\text{C}$) tại thời điểm 50 giờ

Hình 5. Sự phát triển nhiệt độ và phân bố nhiệt trong mặt cắt ngang trụ cầu

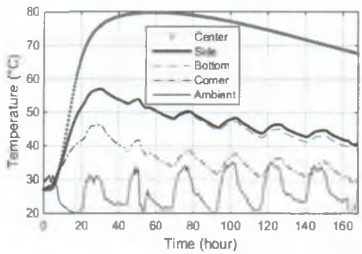


a) Phân bố ứng suất chính tại 50h trên mặt cắt ngang thân trụ

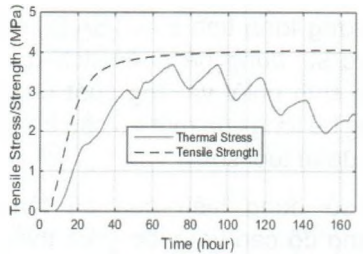


b) ứng suất nhiệt /cường độ chịu kéo

Hình 6. Lịch sử nhiệt độ, ứng suất kéo và cường độ chịu kéo lớn nhất trong trụ cầu sử dụng CĐC-TB20



a) Lịch sử nhiệt độ



b) ứng suất/cường độ chịu kéo

Hình 7. Lịch sử nhiệt độ, ứng suất kéo và cường độ chịu kéo lớn nhất trong trụ cầu sử dụng CĐC-TB20 được che phủ bởi lớp cách nhiệt

sử dụng các vật liệu cách nhiệt, làm mát trước thành phần bê tông trước khi trộn, hoặc sử dụng ống làm mát trong quá trình xây dựng nên được thực hiện. Việc sử dụng các vật liệu cách nhiệt là một cách đơn giản có thể làm giảm đáng kể sự chênh lệch nhiệt độ và do đó làm giảm ứng suất trong bê tông ở tuổi sớm [3]. Trong nghiên cứu

này, lớp phủ cách nhiệt sợi thủy tinh được dùng để che phủ bề mặt ván khuôn thép. Các tính chất của lớp phủ như sau: Khối lượng riêng $\rho = 32 \text{ kg/m}^3$, hệ số dẫn nhiệt $k = 0,038 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ và nhiệt dung riêng $C_p = 835 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. Lớp phủ dày 3mm được giả định tiếp xúc hoàn toàn với bề mặt bê tông. Ban đầu, chương trình máy tính EACTSA

chưa tính đến lớp phủ cách nhiệt và lớp cách nhiệt được cân nhắc bằng cách sử dụng "hệ số đối lưu tương đương" để mô phỏng sự trao đổi nhiệt đối lưu ở bề mặt bê tông. Trong mô phỏng này, hệ số đối lưu tương đương được lấy là $5.0 \text{ W/m}^2\text{-K}$ [2].

Hình 3.13a thể hiện sự phát triển nhiệt độ tại tâm, điểm giữa các cạnh bên và tại góc của tiết diện. Có thể thấy rõ nhiệt độ cao nhất (80°C) ở tâm bằng với trường hợp không sử dụng lớp cách nhiệt (Hình 7a), tuy nhiên sự chênh lệch nhiệt độ giữa lõi và điểm giữa cạnh bên thấp hơn đáng kể, dẫn đến nguy cơ nứt thấp hơn (đường cong ứng suất kéo thấp hơn hoàn toàn đường cong cường độ kéo) trong suốt 168 giờ, như chỉ ra trên Hình 7b.

3. KẾT LUẬN

Bài báo đã thảo luận về các mô hình dự đoán vết nứt tuổi sớm trong kết cấu bê tông, các mô hình đã được phân nhóm dựa trên các tiêu chí nhiệt, cơ học, hóa học.

Chương trình tính EACTSA [2] đã được sử dụng để phân tích quá trình sinh nhiệt và ứng suất nhiệt trong bê tông của một trụ cầu trong giai đoạn tuổi sớm.

Để sử dụng hiệu quả bê tông cường độ cao với việc giảm thiểu rủi ro nứt, biện pháp kiểm soát nhiệt đơn giản bằng cách che phủ vật liệu cách nhiệt trong quá trình xây dựng (kéo dài ít nhất 4 ngày từ khi đổ BT) nên được áp dụng.

Các kết quả của nghiên cứu có ý nghĩa lớn đối với các kỹ sư và nhà thầu xây dựng trong việc thiết kế và xây dựng kết cấu sử dụng các vật liệu bê tông hiện đại (cường độ cao, tính năng cao...) để giảm thiểu nguy cơ nứt trong kết cấu và tối ưu hóa lịch trình xây dựng.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo cho đề tài mã số B2021-GHA-06. ■

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

- 1.ACPA,Concrete Crack and Partial-Depth Spall Repair Manual for Airfields. American Concrete Pavement Association: Rosemont,IL,USA,2003.
- 2.Do,T.,et al., A combined finite difference and finite element model for temperature and stress predictions of cast-in-place cap beam on precast columns.Construction and Building Materials,2019.217:p.172-184.
- 3.Do,T.,et al,Importance of insulation at the bottom of mass concrete placed on soil with high groundwater. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2013(2342).
- 4.Faria,R.,M.Azenha, and J.A. Figueiras, Modelling of Concrete at Early Ages: Application to an Externally Restrained Slab. Cem. Concr. Compos 2006.28
- 5.Lawrence, A.M., et al., Effect of early age strength on cracking in mass concrete containing different supplementary cementitious materials: Experimental and finite-element investigation. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011.24(4):p.362-372.
- 6.Li, K., Y.H. Ju, J, and C. Zhou, Early-Age Stress Analysis of a Concrete Diaphragm Wall through Tensile Creep Modeling.Mater. Struct,2009.42.
- 7.Lin, Y. and H.-L. Chen, Thermal analysis and adiabatic calorimetry for early-age concrete members. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2015. 122(2):p.937-945.
- 8.Lin,Y and R.H.L Chen, Temperature Prediction for Mass Concrete Using Finite Element Method.January 13-17, 2013,Transportation Research Board 92nd Annual Meeting, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- 9.Liu,X.,Y. Yuan, and Q. Su, Sensitivity Analysis of the Early-Age Cracking Risk in an Immersed Tunnel. Struct. Concr, 2014.15:p.179-190.
- 10.Sule, M. and K. Van Breugel, The Effect of Reinforcement on Early-Age Cracking due to Autogenous Shrinkage and Thermal Effects. Cem. Concr. Compos, 2004.26:p.581-587.
- 11.Wu, S., et al., Estimation of cracking risk of concrete at early age based on thermal stress analysis. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2011.105(1):p.171-186.
- 12.Yuan, Y. and Z. Wan, Prediction of Cracking within Early-Age Concrete Due to Thermal, Drying and Creep Behavior. Cem.Conc. Res,2002.32.
- 13.De Schutter, G., Finite Element Simulation of Thermal Cracking in Massive Hardening Concrete Elements Using Degree of Hydration Based Material Laws.Comput.Struct,2002.80:p.2035-2042.