

Dự đoán co ngót bê tông tuổi sớm dựa trên nhiệt độ và độ ẩm bên trong

Predict shrinkage of early-age concrete based on internal temperature and humidity

> THS NGUYỄN KHÁNH HÙNG¹, PGS.TS PHẠM THANH TÙNG²,
PGS.TS NGUYỄN TUẤN TRUNG², THS TRẦN THÁI DƯƠNG¹

¹Khoa Kỹ thuật công trình, Trường Đại học Lạc Hồng.

Email: nguyengkhanhhung@lhu.edu.vn, duongtt@lhu.edu.vn

²Khoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

Email: tungpt@nuce.edu.vn, trungnt@nuce.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày mô hình dự đoán co ngót của bê tông ở tuổi sớm. Mô hình này dựa trên lý thuyết về sức căng mao dẫn được tạo ra trong các lỗ mao dẫn trong bê tông, sử dụng độ ẩm và nhiệt độ bên trong bê tông làm thông số chính. Các kết quả dự đoán của mô hình về sự phát triển của biến dạng co ngót được so sánh với kết quả thực nghiệm và cho thấy sự phù hợp tốt.

Từ khóa: Bê tông tuổi sớm; độ ẩm bên trong; co ngót; mô hình.

ABSTRACT

This paper presents a model to predict shrinkage of concrete at an early age. This model is based on the theory of capillary tension generated in capillary pores in concrete, using moisture and temperature inside the concrete as key parameters. The predicted results for the development of shrinkage strain were compared with the experimental results and showed good agreement.

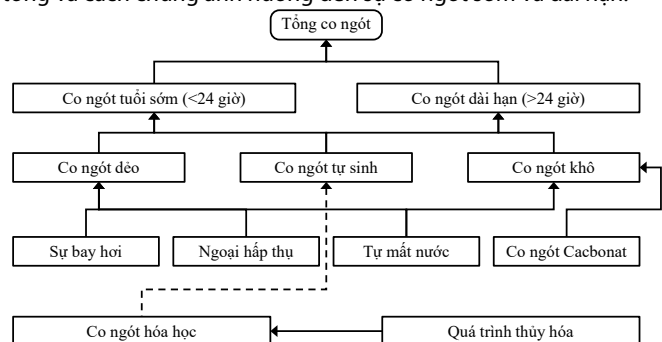
Keywords: Early; age concret; Internal relative humidity; shrinkage; model.

1. GIỚI THIỆU

Bê tông là vật liệu xây dựng được sử dụng rộng rãi nhất trên thế giới. Tuổi thọ của bê tông được xem là đồng nghĩa với cường độ, độ bền và khả năng phục vụ lâu dài. Việc lựa chọn thành phần và tỷ lệ cấp phối thích hợp là rất quan trọng để tạo ra bê tông có thể đáp ứng các yêu cầu về cường độ và độ bền. Tuy nhiên, để đạt được bê tông chất lượng cao cần chú ý đến các đặc tính, đặc biệt trong giai đoạn tuổi sớm. Do đó, sự hiểu biết đầy đủ về ứng xử của bê tông ngay từ giai đoạn tuổi sớm là rất cần thiết để đảm bảo an toàn trong quá trình xây dựng, cũng như độ bền và các đặc tính lâu dài. Định nghĩa về tuổi sớm của bê tông chưa được định nghĩa thống nhất và phụ thuộc vào các đặc tính cần nghiên cứu. Nói cách khác, thời gian cần thiết để đạt được một mức độ nhất định của một đặc tính đang khảo sát được xem là giai đoạn đầu [1]. Nói

chung, giai đoạn sớm là vài giờ hoặc vài ngày đầu tiên sau khi đổ bê tông được đặc trưng bởi hai quá trình chính: ninh kết (mất dần tính lưu động) và đông cứng (tăng cường độ). Trong các quá trình này, cấu trúc đa pha (dạng lỏng) của bê tông tươi chuyển thành cấu trúc cứng do tiến trình của các phản ứng hydrat hóa, dẫn đến sự phát triển các tính chất cơ học, giải phóng nhiệt và biến dạng [2]. Sự giải phóng nhiệt và mất nước này, do bay hơi hoặc tiêu hao bởi các phản ứng hydrat hóa, dẫn đến biến dạng bên trong/bên ngoài. Do đó, sự kết hợp giữa các đặc tính nhiệt và cơ học của bê tông ở tuổi sớm là quan trọng hơn so với bê tông trưởng thành. Hơn nữa, bảo dưỡng thích hợp sau khi đổ là rất quan trọng để duy trì độ ẩm thỏa đáng và nhiệt độ thích hợp trong bê tông trong giai đoạn đầu này để các đặc tính mong muốn có thể phát triển sau này [3].

Tổng độ co ngót mà bất kỳ phần tử bê tông nào trải qua trong suốt tuổi thọ của nó được gây ra bởi các cơ chế co ngót khác nhau. Ngoài ra, các hiện tượng như bay hơi, hydrat hóa, cacbonat hóa có thể góp phần vào sự co ngót toàn phần của vật liệu xi măng [4]. Tuy nhiên, ảnh hưởng của những hiện tượng này đối với độ co ngót toàn phần của bê tông phụ thuộc rất nhiều vào thời gian và do đó, độ co ngót toàn phần của bê tông có thể được chia thành: (1) độ co ngót sớm thể hiện độ co ngót trong 24 giờ đầu tiên sau khi trộn, và (2) độ co ngót dài hạn trong thời gian sau đó [4]. Hình 1 minh họa các cơ chế chủ đạo trong co ngót toàn phần trong bê tông và cách chúng ảnh hưởng đến sự co ngót sớm và dài hạn.

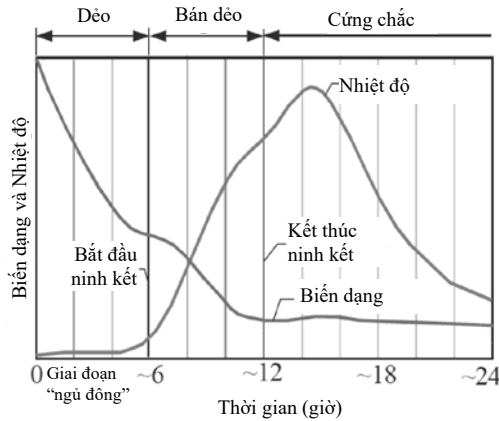


Hình 1. Các cơ chế co ngót trong bê tông [4]

Theo [4, 5], bê tông tươi trải qua ba giai đoạn (trạng thái) kết cấu khác nhau trong 24 giờ đầu sau khi trộn: (1) Trạng thái dẻo (**plastic**): bê tông ở giai đoạn này vẫn ở thể lỏng, dẻo, và đàn dẻo. (2) Trạng thái bán dẻo (**semi-plastic**): bắt đầu sau khi ninh kết ban

đầu, khi khung xương cứng bắt đầu hình thành và bê tông dần trở nên cứng chắc. (3) Trạng thái cứng chắc (*rigid*): bắt đầu sau điểm đông kết cuối cùng. Ở giai đoạn này, nhiệt thủy hóa tối đa có thể đạt được và cường độ của bê tông tăng lên do quá trình thủy hóa diễn ra liên tục.

Do phản ứng hóa học giữa xi măng và nước, một khung chịu lực tự hình thành bên trong bê tông dẫn đến quá trình hóa rắn của hỗn hợp. Ninh kết ban đầu của bê tông được định nghĩa là ranh giới giữa pha dẻo và bán dẻo, khi bê tông bắt đầu hóa rắn. Quá trình ninh kết hoàn thành khi hỗn hợp chuyển từ trạng thái bán dẻo sang trạng thái cứng. Hình 2 minh họa mối quan hệ giữa nhiệt thủy hóa, biến dạng ban đầu và thời gian ninh kết (bắt đầu và kết thúc) của hỗn hợp bê tông trong 24 giờ đầu tiên sau khi trộn trong các thí nghiệm do Esping và Löfgren thực hiện [6]. Khoảng thời gian sau khi trộn hỗn hợp đến khi bắt đầu ninh kết được gọi là giai đoạn "ngủ đông". Trong giai đoạn này, tốc độ hydrat hóa rất thấp, theo đó, cơ chế gây nứt ở giai đoạn này hoàn toàn là cơ chế vật lý do mất nước, chủ yếu do bay hơi.



Hình 2. Các giai đoạn chuyển pha trong bê tông [6]

Co ngót của bê tông là một trong những cơ chế chính dẫn đến sự hình thành vết nứt ban đầu trong kết cấu bê tông. Bê tông co lại khi độ ẩm bị mất đi do điều kiện môi trường hoặc do tự mất nước. Các ứng suất sinh ra có thể vượt quá cường độ chịu kéo và làm cho bê tông bị nứt. Các vết nứt trong cấu kiện bê tông làm giảm khả năng chịu tải của kết cấu; hoặc làm cho các tác nhân ăn mòn hóa học tiếp xúc với cốt thép, dẫn đến ăn mòn và suy yếu cốt thép. Khi độ ẩm môi trường thấp hơn độ ẩm bên trong bê tông, nước trong bê tông bốc hơi và phát sinh hiện tượng co ngót của bê tông, gọi là co ngót khô. Một quá trình khác dẫn đến mất độ ẩm là thông qua quá trình hydrat hóa xi măng, quá trình này được gọi là quá trình tự mất nước và co ngót tương ứng được gọi là co ngót tự sinh. Co ngót khô đã được nghiên cứu sâu từ những năm 40 của thế kỷ trước và co ngót tự sinh là một chủ đề được tập trung nghiên cứu trong thập kỷ qua với sự phát triển của bê tông tính năng cao. Trong thực tế, quá trình thủy hóa xi măng và mất độ ẩm ra môi trường diễn ra đồng thời, do đó, nghiên cứu tổng hợp về co ngót tự sinh và co khô của bê tông là rất cần thiết để dự đoán ứng suất do co ngót gây ra và đánh giá nguy cơ nứt.

Theo [7], các hệ thống đo biến dạng có thể chia thành sáu nhóm:

- Sử dụng chốt định vị, xuyên qua mặt bích ở cuối đầu dầm, một đầu được nhúng hoàn toàn trong bê tông.
- Sử dụng mặt bích di động với các jack cắm trong dầm bê tông.
- Sử dụng thanh ngang xuyên qua dầm đặt trước trong khuôn đúc.
- Sử dụng các thanh đứng cắm vào mẫu dạng tấm.

- Sử dụng cảm biến đo biến dạng đặt trong mẫu thử.
- Sử dụng các tấm kim loại đặt trên ống mềm hình trụ.

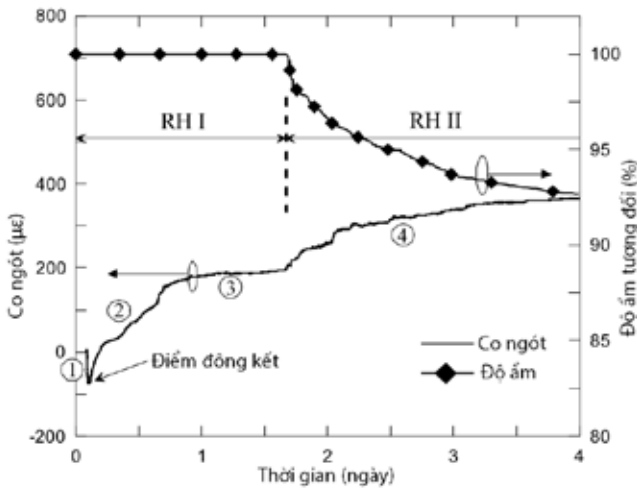
Khi sử dụng đầu dò nhúng, đinh tán, cảm biến hoặc lưới bên ngoài, các phép đo không đáng tin cậy do liên kết không đảm bảo giữa hệ thống đo và bê tông vẫn còn ướt. Vấn đề này đã dẫn đến sự phát triển của các phương pháp đo quang học, không tiếp xúc, có ưu điểm là hạn chế hoặc tránh hoàn toàn sự xáo trộn đối với bê tông tươi. Trong các hệ thống tương quan hình ảnh 2D, một camera được sử dụng và chỉ đo biến dạng trong mặt phẳng. Hơn nữa, sự khúc xạ ánh sáng do nước tách ra không được tính đến trong phân tích tương quan hình ảnh; điều này có thể tạo ra các ảnh hưởng đến các biến dạng thu được.

Để đo biến dạng tự sinh của vật liệu gốc xi măng (đặc biệt là hồ xi măng), có thể sử dụng phương pháp biến dạng thể tích hoặc phương pháp biến dạng một chiều [8-10]. Cho đến nay, phương pháp thử nghiệm để đo đồng thời cả biến dạng và độ ẩm bên trong đối với bê tông vẫn còn hạn chế. Zhang và cộng sự [11] đã phát triển một phương pháp thử nghiệm để đo đồng thời cả biến dạng và độ ẩm bên trong của bê tông bắt đầu từ thời điểm đông kết, các kết quả thí nghiệm đã chỉ ra mối liên hệ cao tồn tại giữa co ngót và độ ẩm bên trong bê tông ở tuổi sớm.

2. BIẾN DẠNG VÀ ĐỘ ẨM BÊN TRONG BÊ TÔNG Ở GIAI ĐOẠN TUỔI SỚM

Theo nghiên cứu của các tác giả trước đây [11-14], sự phát triển biến dạng và độ ẩm bên trong có thể được mô tả trong Hình 3. Theo đó, quy luật phát triển biến dạng của bê tông đặc trưng bởi sự giãn nở ban đầu và co lại sau đó. Điểm cuối của biến dạng giãn nở có thể được định nghĩa là thời điểm đông kết của bê tông, tương đương với điểm chuyển tiếp từ trạng thái lỏng sang trạng thái rắn. Biến dạng tự do của bê tông sau khi đổ có thể chia thành bốn giai đoạn: 1) Giai đoạn dẻo. Bê tông mới đổ có tính dẻo, khi ở trạng thái tự do, biến dạng tuyến tính của nó biểu hiện bằng sự giãn nở ban đầu. Dưới phản ứng thủy hóa xi măng, các sản phẩm thủy hóa tăng lên và tạo ra các tinh thể dạng rắn chồng lên nhau. Khi cường độ tổng thể của bê tông đủ để hỗ trợ trọng lượng của chính bê tông, quá trình giãn nở dừng lại và biến dạng bắt đầu chuyển thành co ngót, giai đoạn dẻo kết thúc. 2) Giai đoạn co rút nhanh. Do khung không gian vật liệu đang được hình thành nên độ cứng của bản thân bê tông thấp. Sự co ngót biểu hiện đặc trưng bởi sự gia tăng nhanh chóng. 3) Giai đoạn chậm phát triển. Khi các sản phẩm thủy hóa chồng lên các hạt rắn bên trong bê tông tạo thành một mạng lưới hoàn chỉnh thì độ cứng của bê tông càng lớn, hạn chế biến dạng. 4) Giai đoạn co ngót khô. Khi độ ẩm bên trong bê tông không bão hòa, áp suất âm mao dẫn bên trong đá xi măng được hình thành và bê tông tiếp tục co lại dưới tác động của lực căng mao dẫn.

Ở giai đoạn đầu của quá trình đổ bê tông, bề mặt của các hạt rắn và các khoảng trống của chúng được lấp đầy bởi nước, tạo thành mạng lưới nước lỏng liên tục và độ ẩm tương đối bên trong bê tông là 100%. Khi tuổi càng cao, quá trình thủy hóa xi măng tiếp tục tiêu tốn nước, đồng thời các sản phẩm thủy hóa xi măng chồng lên pha rắn của các hạt rắn, cắt đứt dần mạng nước lỏng ban đầu để hình thành mạng pha rắn, lúc này, độ ẩm tương đối bên trong bê tông bắt đầu giảm xuống. Do đó, sự phát triển độ ẩm bên trong của bê tông tuổi sớm có thể được chia thành: Giai đoạn I). Độ ẩm tương đối là 100%, thời kỳ bão hòa độ ẩm. Giai đoạn II). Độ ẩm tương đối bên trong bê tông giảm dần. Thời điểm độ ẩm tương đối bên trong bê tông bắt đầu giảm được gọi là thời điểm chuyển (t_c); mức độ thủy hóa ứng với thời điểm này là mức độ thủy hóa chuyển (α_c).



Hình 3. Co ngót và độ ẩm bên trong ở giai đoạn tuổi sớm

3. MỘT SỐ MÔ HÌNH DỰ ĐOÁN CO NGÓT BÊ TÔNG TUỔI SỚM

Mặc dù ngày càng có nhiều nghiên cứu về co ngót tự sinh nhưng cơ chế co ngót của bê tông vẫn chưa được làm sáng tỏ hoàn toàn và chưa có sự thống nhất về tiêu chuẩn đo lường co ngót tự sinh [15]. Lý thuyết về sự co ngót của bê tông đã được cải thiện rất nhiều và các lý thuyết thường được sử dụng gồm: (1) lý thuyết sức căng mao dẫn; (2) lý thuyết áp lực tách liên kết; (3) lý thuyết sức căng bề mặt; (4) lý thuyết nước xen kẽ. Trong các lý thuyết trên, mô hình giả thuyết đàn hồi dựa trên lý thuyết sức căng mao dẫn được áp dụng rộng rãi để tính toán độ co ngót tự sinh của hồ xi-măng [16, 17]; nhưng đối với bê tông, chưa có mô hình co ngót tự sinh dựa trên lý thuyết được chấp nhận rộng rãi.

Đối với co ngót tự sinh thường có hai loại mô hình: (1) mô hình phân tích (*Analysis*), thiết lập mối quan hệ giữa hiện tượng khách quan và cơ chế xảy ra của vật liệu bê tông, nắm bắt hiện tượng khách quan từ các đặc điểm bản chất; và (2) mô hình thực nghiệm (*Empirical*), dựa trên phân tích thống kê của một số lượng lớn dữ liệu thực nghiệm để thiết lập các phương trình thực nghiệm. Trong mục này, một số mô hình điển hình được lựa chọn từ các mô hình co ngót tự sinh của bê tông được cập nhật gần đây.

3.1. Các mô hình thực nghiệm

Mô hình AS3600-2018

Mô hình này xuất phát từ Tiêu chuẩn Úc do Ủy ban BD-002 ban hành. Trong mô hình này, phần biến dạng co ngót tự sinh có thể được dự đoán bằng biểu thức (1).

$$\varepsilon_e = \varepsilon_e^* \left(1 - e^{-0,07t}\right) \quad (1)$$

trong đó: ε_e là biến dạng co ngót tự sinh của bê tông ($\mu\text{m}/\text{m}$); ε_e^* là giá trị cực hạn co ngót tự sinh ($\mu\text{m}/\text{m}$); t là thời gian kể từ thời điểm đông kết (ngày).

Mô hình B4 cải tiến

Mô hình B4 được đề xuất bởi Hubler và cộng sự năm 2014 [18]. Trong những năm tiếp theo, Rasoolinejad và cộng sự đã cải thiện mô hình B4 một lần nữa bằng cách sử dụng cơ sở dữ liệu mới được tại Đại học Northwestern [19]. Mô hình B4 cải tiến có thể được mô tả bằng biểu thức (2).

$$\varepsilon_{au} = k_y k_s C (t/1)^n \quad (2)$$

trong đó: ε_{au} là biến dạng co ngót tự sinh của bê tông ($\mu\text{m}/\text{m}$); k_y , k_s là thông số liên quan đến loại xi-măng và hệ số ảnh hưởng

của silica fume, xi; n và C là các tham số liên quan đến N/X ; t là thời gian kể từ thời điểm đông kết (ngày).

3.2. Các mô hình lý thuyết về co ngót tự sinh

Mô hình giả thiết đàn hồi (Elastic hypothesis model-EHM)

Mô hình được đề xuất trên cơ sở giả thiết rằng vật liệu có tính đàn hồi và đẳng hướng [20]. Lura và cộng sự [17] đã sử dụng nó để tính toán độ co ngót tự sinh sớm của hồ xi-măng và kết quả dự đoán phù hợp tốt với dữ liệu đo được khi $RH > 97\%$. Mô hình giả thuyết đàn hồi có thể được biểu thị bằng biểu thức (3) [21].

$$\varepsilon = \frac{S\sigma_{cap}}{3} \left(\frac{1}{K_s} - \frac{1}{K} \right) \quad (3)$$

trong đó: ε là biến dạng co ngót tự sinh ($\mu\text{m}/\text{m}$); S là tỉ lệ bão hòa; σ_{cap} là áp suất mao dẫn (MPa); K_s và K là mô đun khối của khung vật liệu và hồ xi-măng (GPa)

Co ngót tự sinh tuyến tính của hồ xi-măng được tính toán theo sức căng mao dẫn, tỷ lệ bão hòa và mô đun đàn hồi.

Mô hình giả thuyết từ biến (Creep hypothesis model-CHM)

Nhiều nhà nghiên cứu nhận thấy rằng việc sử dụng mô hình giả thuyết đàn hồi để dự đoán độ co ngót tự sinh của vật liệu gốc xi-măng thường cho kết quả dự đoán thấp hơn so với dữ liệu đo được [22]. Theo [23, 24], biến dạng từ biến của xi-măng portland thông thường (OPC) và xi-măng xỉ lò cao (BFS) bằng khoảng 2-3 lần biến dạng đàn hồi, trong khi ở vật liệu hoạt tính kiềm (AAMs), biến dạng từ biến thậm chí có thể gấp 5 lần biến dạng đàn hồi [25]. Sự co ngót tự sinh của hồ xi-măng có thể được dự đoán theo biểu thức (4) [26].

$$\varepsilon(t, \tau) = \varepsilon_{el}(\tau) + \varepsilon_{cr}(t, \tau) \quad (4)$$

trong đó: $\varepsilon(t, \tau)$ là tổng co ngót tự sinh ($\mu\text{m}/\text{m}$); $\varepsilon_{el}(\tau)$ là thành phần đàn hồi ($\mu\text{m}/\text{m}$); $\varepsilon_{cr}(t, \tau)$ là thành phần từ biến ($\mu\text{m}/\text{m}$), được tính bằng cách chia thời gian t thành n khoảng; τ là tuổi tải (ngày).

Mô hình Pickett mở rộng (Extended Pickett model-ExPickett)

Li và cộng sự đã tính đến độ nhớt đàn hồi của hồ xi-măng và cải tiến mô hình Pickett [26, 27]. Mô hình này rất thích hợp cho mô phỏng co ngót của bê tông hoặc vữa, mô hình có thể được mô tả qua các biểu thức (5), (6).

$$\varepsilon_m = \varepsilon_p (1 - g)^\beta \quad (5)$$

$$\beta = f(\sigma, E_p, E_s) \quad (6)$$

trong đó: ε_m và ε_p lần lượt là co ngót tự sinh của vữa và hồ xi-măng ($\mu\text{m}/\text{m}$); β là một tham số bị ảnh hưởng bởi các thuộc tính của cốt liệu và hồ xi-măng; g là tỷ lệ thể tích của cốt liệu; σ là ứng suất hữu hiệu; E_p và E_s lần lượt là mô đun đàn hồi của hồ xi-măng và cốt liệu.

3.3. Mô hình dự đoán biến dạng co ngót theo độ ẩm bên trong

Trong giai đoạn độ ẩm bão hòa, quá trình thủy hóa xi măng gây ra hiện tượng co ngót hóa học, lượng nước bên trong bê tông vẫn có thể tạo thành mạng lưới liên kết và độ ẩm bên trong là 100%. Khi bê tông đã đông kết, sự hình thành độ cứng bản thân khiến nó có khả năng chống biến dạng nhất định và chỉ một phần giảm thể tích do co ngót hóa học được chuyển thành co ngót biểu kiến, và mức độ chuyển đổi có liên quan đến mô đun đàn hồi của bê tông. Giả thiết rằng hệ số ảnh hưởng đến độ cứng của bê tông (η) là một hàm của mô đun đàn hồi của bê tông (E), và có thể được biểu thị bởi biểu thức (7), với k_1 , k_2 là các hệ số thực nghiệm.

$$\eta = k_1 E^{k_2} \quad (7)$$

Đối với mẫu bê tông dạng lăng trụ, mối quan hệ giữa co ngót hóa học và co ngót biểu kiến có thể được biểu thị bởi biểu thức (8)

$$\eta(V_{cs} - V_{cs0}) = 1 - (1 - \varepsilon)^3 \quad (8)$$

trong đó: ε là biến dạng co ngót của bê tông; V_{cs} là độ giảm thể tích đơn vị do co ngót hóa học; V_{cs0} là co ngót hóa học của bê tông tại thời điểm mà độ ẩm bên trong bắt đầu giảm từ 100%.

Như vậy, xét đến độ cứng của bê tông và co ngót hóa học, co ngót thời kỳ bão hòa ẩm của bê tông có thể tính theo biểu thức (9).

$$\varepsilon = 1 - \sqrt[3]{1 - \eta(V_{cs} - V_{cs0})} \quad (9)$$

Trong bê tông tươi, tất cả các lỗ rỗng giữa xi măng và các hạt rắn khác ban đầu chứa đầy nước và một ít bọt khí. Sau khi bê tông tươi ninh kết, một khung xương cứng được hình thành và co ngót hóa học do quá trình thủy hóa xi măng tạo ra không thể chuyển hoàn toàn thành co ngót vĩ mô của bê tông. Do đó, với việc tiếp tục thủy hóa xi măng, một số lỗ mao dẫn giữa các hạt xi măng dần dần được hình thành và các mặt khum tương ứng được tạo ra để bù lại sự giảm thể tích. Trong giai đoạn độ ẩm bên trong giảm dần, Zhang và cộng sự [11], dựa trên các nghiên cứu trước đó ([10, 20, 28]), đề xuất tính biến dạng theo biểu thức (10).

$$\varepsilon_w = \frac{Sv_p \rho RT}{3M} \left(\frac{1}{K_s} - \frac{1}{K} \right) \ln(RH) \quad (10)$$

trong đó: RH là độ ẩm bên trong; M là khối lượng mol của nước ($M=0,01802$ kg/mol); S là tỷ lệ bão hòa nước mao dẫn; ρ là khối lượng riêng của nước; R là hằng số khí lý tưởng; T là nhiệt độ; K là mô đun khối của toàn bộ thể tích xốp; K_s là mô đun khối của vật liệu rắn; v_p là hệ số ảnh hưởng lỗ rỗng; E là mô đun đàn hồi; ν là hệ số Poisson.

Kết hợp hai biểu thức (9) và (10), mô hình tính toán co ngót của bê tông được đề xuất theo biểu thức (11).

$$\varepsilon_w = \begin{cases} 1 - \sqrt[3]{1 - \eta(V_{cs} - V_{cs0})} & ; RH = 1 \\ \varepsilon_{w,c} + \frac{Sv_p \rho RT}{3M} \left(\frac{1}{K_s} - \frac{1}{K} \right) \ln(RH) & ; RH < 1 \end{cases} \quad (11)$$

trong đó: $\varepsilon_{w,c}$ là biến dạng khi độ ẩm bên trong bắt đầu giảm dưới 100%, tính theo biểu thức (9).

4. THÍ NGHIỆM XÁC ĐỊNH CÁC THÔNG SỐ

Để tính co ngót theo biểu thức (11), các thông số cần được xác định bao gồm: 1) Thời điểm đông kết và thời điểm độ ẩm bên trong bắt đầu giảm xuống dưới 100%. 2) Mức độ thủy hóa của bê tông theo thời gian. 3) Sự phát triển của mô đun đàn hồi. 4) Tỷ lệ bão hòa nước mao dẫn. 5) Hệ số ảnh hưởng lỗ rỗng.

4.1. Xác định mức độ thủy hóa từ thí nghiệm đo độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt

Theo [29, 30], quan hệ giữa mức độ thủy hóa và nhiệt lượng tích lũy tại thời điểm t được biểu thị bởi biểu thức (12).

$$\alpha(t) = \frac{H(t)}{H_u} \quad (12)$$

trong đó: $\alpha(t)$ là mức độ thủy hóa tại thời điểm t ; $H(t)$ là tổng nhiệt lượng tỏa ra tính đến thời điểm t (J/g); H_u là tổng nhiệt lượng tỏa ra ở thời điểm cuối cùng của quá trình thủy hóa (J/g).

Dựa trên thí nghiệm tăng nhiệt độ đoạn nhiệt của bê tông, giả sử nhiệt dung riêng của bê tông là không đổi, độ thủy hóa $\alpha(t)$ của xi măng có thể được biểu thị bởi biểu thức (13).

$$\alpha(t) = \frac{\Delta T(t)}{\Delta T_{\infty}} \quad (13)$$

trong đó: $\Delta T(t)$ là giá trị độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt của mẫu tăng nhiệt độ bê tông ở tuổi t , °C; ΔT_{∞} là giá trị độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt đạt được khi thủy hóa hoàn toàn, °C.

Trên thực tế, xi măng trong bê tông không thể thủy hóa hoàn toàn. Khi độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt của bê tông đạt ΔT_{max} , quá trình hydrat hóa xi măng gần như đã hoàn thành và mức độ hydrat hóa cuối cùng α_u của xi măng có thể được biểu thị bởi biểu thức (14).

$$\alpha_u = \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{\infty}} \quad (14)$$

Mức độ thủy hóa tới hạn, α_u , có thể được tính theo biểu thức (15) [30], trong đó w/cm là tỷ lệ nước/chất kết dính; p_{fa} , p_{sl} là tỷ lệ khối lượng của tro bay, xỉ trên tổng khối lượng chất kết dính.

$$\alpha_u = \frac{1,031w/cm}{0,194 + w/cm} + 0,5p_{fa} + 0,3p_{sl} \quad (15)$$

Từ (13) và (14), mối quan hệ giữa độ thủy hóa $\alpha(t)$ của xi măng ở tuổi t và độ thủy hóa cuối cùng α_u của xi măng có thể được biểu thị bởi biểu thức (16).

$$\alpha(t) = \alpha_u \frac{\Delta T(t)}{\Delta T_{max}} \quad (16)$$

trong đó $\Delta T(t)$ và ΔT_{max} có thể thu được từ đường cong tăng nhiệt độ đoạn nhiệt.

Về mặt lý thuyết, thời gian thí nghiệm tăng nhiệt độ đoạn nhiệt càng dài thì giá trị ΔT_{max} đo được càng chính xác. Tuy nhiên, trong các lịch sử nhiệt độ khác nhau của cùng một tỷ lệ hỗn hợp, mức độ thủy hóa bên trong xi măng khác nhau ở cùng một tuổi. Dựa trên lý thuyết về mức độ trưởng thành (*maturity*) [31], khái niệm tuổi tương đương được đề xuất để loại bỏ ảnh hưởng của lịch sử nhiệt độ của bê tông đối với quá trình thủy hóa (tuổi t cần thiết cho quá trình thủy hóa xi măng trong bê tông ở các lịch sử nhiệt độ khác nhau tương đương với tuổi t_e cần thiết cho bê tông ở nhiệt độ chuẩn (thường là 20°C), và được tính bởi biểu thức (17).

$$t_e = \sum_{i=1}^n \exp \left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{273 + T_c} - \frac{1}{273 + T_r} \right) \right] \Delta t_i \quad (17)$$

trong đó: E_a là năng lượng kích hoạt biểu kiến, (J/mol); R là hằng số khí lý tưởng, $R= 8,314$ J/K-mol; T_c là nhiệt độ trung bình của bê tông trong khoảng thời gian Δt_i , (°C); T_r là nhiệt độ tham chiếu (thông thường 20°C hoặc 23°C).

Năng lượng kích hoạt biểu kiến E_a là thước đo độ nhạy nhiệt của phản ứng hydrat hóa phản ứng, có thể xác định theo công thức thực nghiệm [32] theo biểu thức (18).

$$E_a = 41230 + 1416000(p_{C_3A} + p_{C_4AF})p_{cem}p_{SO_3} - 347000p_{Na_2O_{eq}} - 19,8Blaine + 29600p_{FAPFA-CaO} + 16200p_{slag} - 51600p_{SF} \quad (18)$$

trong đó: p_{FA} là tỷ lệ tro bay theo hàm lượng chất kết dính; p_{FA-CaO} là tỷ lệ CaO có trong tro bay; p_{slag} là tỷ lệ xỉ theo hàm lượng chất kết dính; p_{SF} là tỷ lệ silica fume theo hàm lượng chất kết dính; $Blaine$ là độ mịn của xi măng, trong nghiên cứu này lấy bằng 375 (m²/kg); p_x là tỷ lệ hàm lượng của chất X (cem = xi măng, C₃A, C₄AF, SO₃) có trong toàn bộ xi măng; $p_{Na_2O_{eq}}$ là tỷ lệ phần trăm Na₂O tương đương có trong xi măng.

Theo [2], mối quan hệ giữa độ thủy hóa α và tuổi tương đương t_e được biểu thị bởi biểu thức (19).

$$\alpha(t_e) = \alpha_u \exp \left(\frac{A}{t_e} \right)^B \quad (19)$$

trong đó: các hằng số của A và B thu được từ thực nghiệm bằng phương pháp bình phương tối thiểu.

4.2. Xác định thời điểm ninh kết và thời điểm độ ẩm bên trong giảm.

Từ quá trình thiết lập mô hình trên, có hai thời điểm đặc trưng quan trọng trong đường cong co ngót và biến dạng của bê tông. Thứ nhất là thời gian ninh kết của bê tông. Từ thời điểm này, cường độ và mô đun đàn hồi của bê tông bắt đầu phát triển. Thứ hai là thời điểm độ ẩm tương đối bên trong bê tông bắt đầu giảm xuống (thời điểm chuyển). Việc xác định hai thời điểm đặc trưng này dựa trên kết quả đo đạc thực nghiệm. Để loại trừ ảnh hưởng của yếu tố nhiệt độ, thời gian ninh kết và thời gian chuyển của bê tông được biểu thị bằng tuổi tương đương ($t_{e,0}$ và $t_{e,c}$). Theo dữ liệu thực nghiệm của Zhang và cộng sự, cả hai có thể được biểu thị gần đúng dưới dạng hàm tuyến tính của tỷ lệ nước/chất kết dính (w/cm) theo biểu thức (20) và (21).

$$t_{e,0} = 20,8 - 76,0w / cm + 117,3(w / cm)^2 \tag{20}$$

$$t_{e,c} = 336,7 - 1884,3w / cm + 3053,8(w / cm)^2 \tag{21}$$

4.3. Xác định sự phát triển Mô đun đàn hồi

Theo [33], mô đun khối của thể tích rắn xốp (ở đây là vữa), K, có thể được tính từ mô đun đàn hồi E và hệ số Poisson ν bởi biểu thức (22). Theo [34], mô đun khối của khung không gian, $K_s = 44$ Gpa. Ảnh hưởng của việc lựa chọn K_s đối với biến dạng co ngót không đáng kể, sự thay đổi của K_s từ 40 đến 50 GPa dẫn đến sự thay đổi 6% trong biến dạng co ngót được tính toán.

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \tag{22}$$

Mô đun đàn hồi của bê tông là một thông số quan trọng để tính toán co ngót. Sau khi ninh kết, mô đun đàn hồi của bê tông bắt đầu tăng từ 0. Có thể mô hình sự phát triển của mô đun đàn hồi của bê tông theo mức độ thủy hóa bởi biểu thức (23) [35].

$$E(\alpha) = 1,05E_{28} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_u - \alpha_0} \right)^b \tag{23}$$

trong đó: E_{28} là mô đun đàn hồi ở 28 ngày trong điều kiện bảo dưỡng ở nhiệt độ chuẩn; α_0 là độ thủy hóa khi bê tông ninh kết; và b là hằng số có thể được xác định bằng dữ liệu thực nghiệm.

Để xác định các hệ số trong biểu thức (23), cần đo mô đun đàn hồi của bê tông ở các độ tuổi 1, 3, 5, 7, 14, 21 và 28 ngày.

4.4. Hệ số bão hòa nước mao dẫn

Theo mô hình Powers [36], giả sử mức độ thủy hóa của xi măng là α và tổng thể tích của các hạt xi măng và nước là 1, thành phần pha (phase composition) của hồ xi măng portland (bao gồm co ngót hóa học V_{cs} , thể tích nước lỗ rỗng mao dẫn V_{cw} , thể tích gel nước V_{gw} , thể tích gel rắn V_{gs} và thể tích xi măng không ngâm nước V_c) có thể được tính toán theo biểu thức (24).

$$\begin{aligned} V_{cs} &= 0,2(1 - p)\alpha \\ V_{cw} &= p - 1,3(1 - p)\alpha \\ V_{gw} &= 0,6(1 - p)\alpha \\ V_{gs} &= 1,5(1 - p)\alpha \\ V_c &= (1 - p)(1 - \alpha) \\ p &= \frac{w / c}{w / c + \rho_w / \rho_c} \end{aligned} \tag{24}$$

trong đó: w và c là khối lượng nước và xi măng; ρ_w và ρ_c là khối lượng riêng của nước và xi măng.

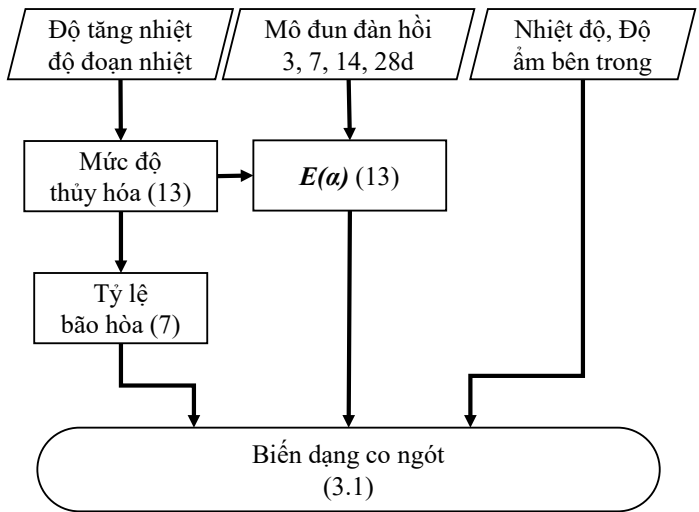
Tỷ lệ bão hòa S có thể được tính toán theo biểu thức (25).

$$S = \frac{p - 0,7(1 - p)\alpha}{p - 0,5(1 - p)\alpha} \tag{25}$$

4.5. Xác định hệ số ảnh hưởng lỗ rỗng

Hệ số ảnh hưởng lỗ rỗng (ν_p) thể hiện đặc điểm phân bố cấu trúc lỗ rỗng trong bê tông. Kiểm tra sự xâm nhập của thủy ngân (MIP) là một phương pháp phổ biến để đo cấu trúc lỗ rỗng của vữa và vữa sạch. Trong nghiên cứu của Zhang và cộng sự [11], vữa được tách ra khỏi hỗn hợp bê tông, sau đó được bảo dưỡng trong 1, 3, 7 và 28 ngày. Thử nghiệm xâm nhập thủy ngân được thực hiện và giá trị của hệ số được xác định theo xác suất phân bố lỗ rỗng và bán kính lỗ rỗng tại từng mức độ ẩm khác nhau.

Sơ đồ tính toán biến dạng co ngót được thể hiện trong Hình 4.



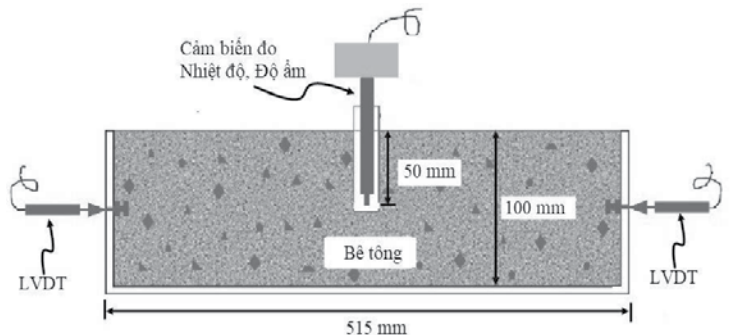
Hình 4. Sơ đồ tính biến dạng co ngót

5. THÍ NGHIỆM VÀ TÍNH TOÁN CO NGÓT THEO NHIỆT ĐỘ VÀ ĐỘ ẨM BÊN TRONG

5.1. Kết quả thí nghiệm [37]

5.1.1. Thí nghiệm đo co ngót và nhiệt độ, độ ẩm bên trong bê tông

Thí nghiệm được thực hiện bởi Jin và cộng sự [37]. Sơ đồ thí nghiệm được mô tả trong Hình 5. Thành phần cấp phối bê tông được thể hiện trong Bảng 1. Kích thước của mẫu bê tông 100 mm x 100 mm x 515 mm. Cảm biến nhiệt-ẩm được đặt tại vị trí trung tâm của mẫu thử, có thể thu thập nhiệt độ và độ ẩm bên trong của bê tông. Hai cảm biến chuyển vị (LVDT) được lắp đặt tại hai đầu khuôn để thu thập biến dạng co ngót. Tất cả dữ liệu được thu thập được lưu trữ tự động trên máy tính.



Hình 5. Sơ đồ thí nghiệm đo co ngót và nhiệt độ-độ ẩm bên trong bê tông

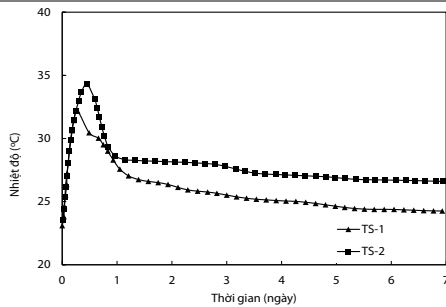
Bảng 1. Thành phần cấp phối bê tông.

Mẫu	Xi măng (kg/m ³)	Nước (kg/m ³)	Cát (kg/m ³)	Đá (kg/m ³)	Xỉ (kg/m ³)	Tro bay (kg/m ³)	Phụ gia siêu dẻo (kg/m ³)	N/X
TS-1	250,0	170,0	920,0	930,0	65,0	65,0	6,0	0,45
TS-2	270,0	157,0	830,0	930	85,0	95,0	8,0	0,35

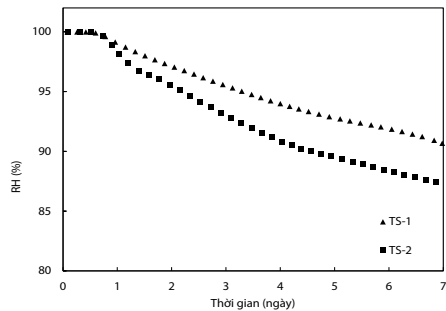
Kết quả đo co ngót thể hiện trong Bảng 2. Kết quả đo nhiệt độ và độ ẩm bên trong thể hiện trong Hình 6, Hình 7.

Bảng 2. Kết quả đo co ngót theo thời gian (µε).

BT	1 ngày	3 ngày	5 ngày	7 ngày
TS-1	121	181	215	238
TS-2	173	214	249	271



Hình 6. Nhiệt độ theo thời gian

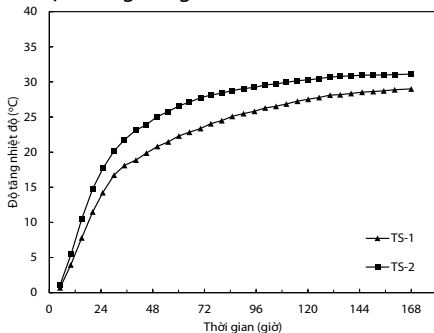


Hình 7. Độ ẩm bên trong bê tông theo thời gian

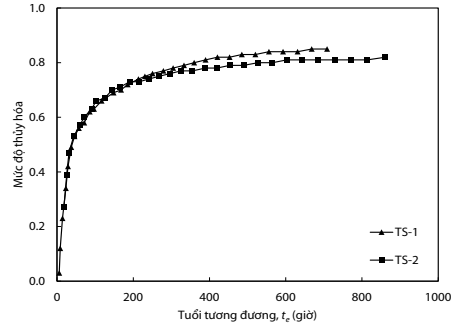
5.1.2. Thí nghiệm đo độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt

Thí nghiệm đo độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt được tiến hành cho các hỗn hợp bê tông với thành phần cấp phối được thể hiện trong Bảng 1. Các mẫu bê tông có thể tích 50L. Ở giai đoạn đầu của thí nghiệm, nhiệt độ tăng đoạn nhiệt được ghi lại sau mỗi 0,5 giờ. Sau 24 giờ cho đến khi kết thúc, tần suất lấy mẫu là 5 giờ. Thí nghiệm đo độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt được kéo dài trong 7 ngày.

Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong Hình 8. Dựa trên độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt và các biểu thức (12)-(19) (mục 4.1), mức độ thủy hóa theo tuổi tương đương được tính toán và thể hiện trong Hình 9. Các hệ số (a_u, A, B) sử dụng trong mô hình, biểu thức (19), được thể hiện trong Bảng 3.



Hình 8. Độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt của các hỗn hợp bê tông



Hình 9. Mức độ thủy hóa theo tuổi tương đương

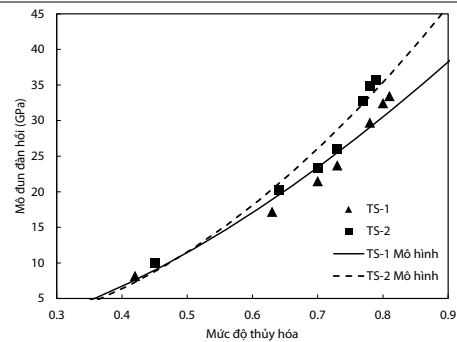
5.1.3. Thí nghiệm đo mô đun đàn hồi

Thí nghiệm đo mô đun đàn hồi cho các hỗn hợp bê tông TS-1, TS-2 được tiến hành tại các đợt tuổi 1, 3, 5, 7, 14, 21 và 28 ngày.

Dựa trên kết quả thí nghiệm, mô hình phát triển của mô đun đàn hồi theo mức độ thủy hóa, biểu thức (23), có thể được thiết lập với các hệ số (a_u, a_0, b) được thể hiện trong Bảng 3. Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong Hình 10.

Bảng 3. Các tham số mô hình.

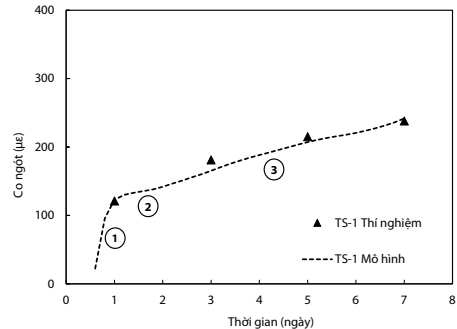
Mẫu	a_0	a_u	A	B	b
TS-1	0,152	0,858	14,49	0,76	1,575
TS-2	0,125	0,821	13,02	0,81	1,910



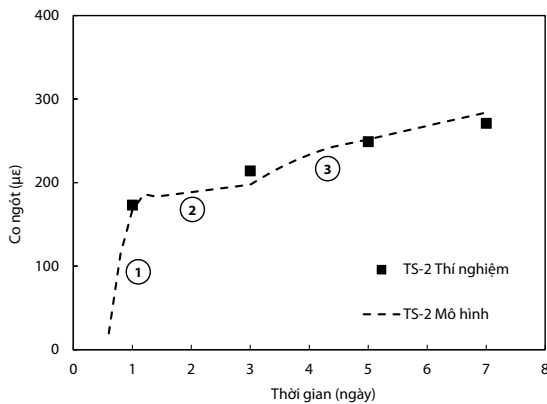
Hình 10. Mô đun đàn hồi theo mức độ thủy hóa

5.2. Dự đoán co ngót

Trên cơ sở các kết quả thí nghiệm thu được từ mục 5.1, mô hình tính toán co ngót theo biểu thức (11) được thực hiện. Kết quả tính toán cho 2 hỗn hợp bê tông TS-1 và TS-2 được thể hiện trong Hình 11 và Hình 12.



Hình 11. Co ngót mẫu TS-1



Hình 12. Co ngót mẫu TS-2

Mô hình thể hiện đặc trưng của biến dạng co ngót ở tuổi sớm (từ sau khi đông kết) [11-14], với các giai đoạn: phát triển nhanh (1), chậm phát triển (2) và co ngót khô (3). Co ngót tại các thời điểm 1, 3, 5 và 7 ngày khá gần với kết quả thí nghiệm của Jin và cộng sự [37].

6. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày mô hình dự đoán co ngót của bê tông trong giai đoạn tuổi sớm dựa trên lý thuyết về sức căng mao dẫn. Để xác định các thông số trong mô hình, các dữ liệu cần thu thập và phân tích bao gồm: độ ẩm và nhiệt độ bên trong mẫu thử; độ tăng nhiệt độ đoạn nhiệt của hỗn hợp bê tông; mô đun đàn hồi (1, 3, 5, 7, 14, 21 và 28 ngày) và thời gian đông kết của hỗn hợp bê tông.

Xu hướng phát triển của biến dạng co ngót theo mô hình phù hợp với mô tả của các nghiên cứu trước đây, đồng thời kết quả tính toán từ mô hình tương đồng cao với kết quả đo đạc thực nghiệm. Để sử dụng mô hình, cần thí nghiệm xác định các thông số cụ thể đối với các hỗn hợp bê tông tại địa phương.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Mehta PK, Monteiro PJ. Concrete: microstructure, properties, and materials: McGraw-Hill Education; 2014.

[2]. Pane I, Hansen W. Concrete hydration and mechanical properties under nonisothermal conditions. *Materials Journal*. 2002;99(6):534-42.

[3]. Huo XS, Wong LU. Experimental study of early-age behavior of high performance concrete deck slabs under different curing methods. *Construction and Building Materials*. 2006;20(10):1049-56.

[4]. Esping O. Early age properties of self-compacting concrete-Effects of fine aggregate and limestone filler: Chalmers University of Technology; 2007.

[5]. Holt EE. Early age autogenous shrinkage of concrete: University of Washington; 2001.

[6]. Esping O, Löfgren I. Cracking due to plastic and autogenous shrinkage- Investigation of early age deformation of self-compacting concrete-Experimental study. Chalmers University of Technology; 2005.

[7]. Hammer TA. Deformations, strain capacity and cracking of concrete in plastic and early hardening phases: Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi; 2007.

[8]. Paulini P, editor A weighing method for cement hydration. Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement; 1992: National Council for Cement and Building Materials, New Delhi, India.

[9]. Mejlhede Jensen O, Freiesleben Hansen P. A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste. *Materials and structures*. 1995;28:406-9.

[10]. Jensen OM, Hansen PF. Autogenous deformation and RH-change in perspective. *Cement and Concrete Research*. 2001;31(12):1859-65.

[11]. Zhang J, Hou D, Han Y. Micromechanical modeling on autogenous and drying shrinkages of concrete. *Construction Building Materials*. 2012;29:230-40.

[12]. Bentur A, Igarashi S-i, Kovler K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. *Cement and concrete research*. 2001;31(11):1587-91.

[13]. Sule M, van Breugel K. Cracking behaviour of reinforced concrete subjected to early-age shrinkage. *Materials and Structures*. 2001;34:284-92.

[14]. Zhang J, Qi K, Huang Y. Calculation of moisture distribution in early-age concrete. *Journal of engineering mechanics*. 2009;135(8):871-80.

[15]. Wyrzykowski M, Hu Z, Ghourchian S, Scrivener K, Lura P. Corrugated tube protocol for autogenous shrinkage measurements: review and statistical assessment. *Materials and Structures*. 2017;50:1-14.

[16]. Montanari L, Amirkhani AN, Suraneni P, Weiss J. Design methodology for partial volumes of internal curing water based on the reduction of autogenous shrinkage. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2018;30(7):04018137.

[17]. Lura P, Jensen OM, Van Breugel K. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms. *Cement concrete research*. 2003;33(2):223-32.

[18]. Hubler MH, Wendner R, Bažant ZP. Statistical justification of Model B4 for drying and autogenous shrinkage of concrete and comparisons to other models. *Materials and Structures*. 2015;48:797-814.

[19]. Rasoolinejad M, Rahimi-Aghdam S, Bažant ZP. Prediction of autogenous shrinkage in concrete from material composition or strength calibrated by a large database, as update to model B4. *Materials and Structures*. 2019;52:1-17.

[20]. Bentz DP, Garboczi EJ, Quenard DA. Modelling drying shrinkage in reconstructed porous materials: application to porous Vycor glass. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 1998;6(3):211.

[21]. Hu Z, Wyrzykowski M, Scrivener K, Lura P. Prediction of autogenous shrinkage of cement pastes as poro-visco-elastic deformation. *Cement and Concrete Research*. 2019;126:105917.

[22]. Grasley ZC, Leung CK. Desiccation shrinkage of cementitious materials as an aging, poroviscoelastic response. *Cement and Concrete Research*. 2011;41(1):77-89.

[23]. Uppalapati S, Vandewalle L, Cizer Ö. Autogenous shrinkage of slag-fly ash blends activated with hybrid sodium silicate and sodium sulfate at different curing temperatures. *Construction and Building Materials*. 2020;265:121276.

[24]. Lu T, Li Z, van Breugel K. Modelling of autogenous shrinkage of hardening cement paste. *Construction and Building Materials*. 2020;264:120708.

[25]. Abate SY, Park S, Kim H-K. Parametric modeling of autogenous shrinkage of sodium silicate-activated slag. *Construction and Building Materials*. 2020;262:120747.

[26]. Tianshi L. Autogenous shrinkage of early age cement paste and mortar. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 2019.

[27]. Lu T, Li Z, Huang H. Restraining effect of aggregates on autogenous shrinkage in cement mortar and concrete. *Construction and Building Materials*. 2021;289:123166.

[28]. Mackenzie J. The elastic constants of a solid containing spherical holes. *Proceedings of the Physical Society Section B*. 1950;63(1):2.

[29]. Van Breugel K. Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials. 1993.

[30]. Schindler AK, Folliard KJ. Heat of hydration models for cementitious materials. *ACI materials journal*. 2005;102(1):24.

[31]. Rastrup E. Heat of hydration in concrete. *Magazine of concrete research*. 1954;6(17):79-92.

[32]. Poole JL. Modeling temperature sensitivity and heat evolution of concrete: The University of Texas at Austin; 2007.

[33]. Di Bella C. Drying shrinkage of cementitious materials at early age: ETH Zurich; 2016.

[34]. Lura P. Autogenous deformation and internal curing of concrete. 2003.

[35]. Gutsch A. Properties of fresh concrete, experiments and modeling: Ph. D. thesis, Braunschweig Univ. of Technology, Brunswick, Germany; 1998.

[36]. Powers TC, Brownard TL, editors. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. *Journal Proceedings*; 1946.

[37]. Jin C, Liu J, Wang Z, Li Y. Early Cracking Risk Prediction Model of Concrete under the Action of Multifield Coupling. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021;2021:1-14.