

# Nghiên cứu thực nghiệm đánh giá khả năng nứt ở độ tuổi ban đầu của bê tông thường và bê tông cường độ cao bằng phương pháp vòng kiềm chế

Nguyễn Ngọc Thành<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Bộ môn Vật liệu Xây Dựng, Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa Tp.HCM

<sup>2</sup>Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

## TỪ KHÓA

Cường độ chịu nén  
Cường độ chịu kéo  
Mô đun đàn hồi  
Mức ứng suất kéo  
Phương pháp vòng kiềm chế

## TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá khả năng nứt ở độ tuổi ban đầu của bê tông thường (NC) và bê tông cường độ cao (HC) bằng phương pháp vòng kiềm chế, nhằm cung cấp cho việc dự đoán khả năng ứng xử của từng loại bê tông để từ đó đưa ra những biện pháp thi công phù hợp cho công trình xây dựng. Hai loại bê tông được khảo sát bao gồm NC với mức thiết kế M350 và HC với mức thiết kế M600. Kết quả thực nghiệm đã chỉ ra rằng khi so với NC, HC có tốc độ co ngót nhanh hơn trong 24 giờ đầu, và tăng rất chậm trong những ngày sau đó. Vết nứt xuất hiện trong HC thường xảy ra rất sớm khi so sánh với NC. Khả năng nứt của bê tông có thể được đánh giá dựa trên thời điểm nứt hoặc tốc độ phát triển ứng suất kéo theo thời gian của bê tông, không phụ thuộc vào loại bê tông. Kết luận rằng, việc dự đoán khả năng nứt trong mỗi loại bê tông thông qua thí nghiệm vòng kiềm chế mang tính khả thi để từ đó có thể đưa ra nhiều biện pháp thi công phù hợp khi áp dụng từng loại bê tông trong xây dựng.

## KEYWORDS

Compressive strength  
Tensile strength  
Young's modulus  
Tensile stress  
Restrained ring test

## ABSTRACT

This study concentrates on evaluating early-age cracking behavior of normal-strength concrete (NC) and high-strength concrete (HC) by using a restrained ring test, to provide a prediction of behaviors of each type of concrete for suggesting available construction methods applied to construction works. Two types of concrete include the NC with a strength grade of M350 and the HC with that of M600. Experimental results showed that the shrinkage rate of HC was faster during the first 24 hours and increased more slowly in the following days when compared with the NC. The cracking behavior of hardened concrete can be assessed based on the time of cracking or the rate of tensile stress development over time, independent of the types of concrete. It is concluded that it is feasible to predict the cracking ability in each type of concrete through the restrained ring test so that many suitable construction measures can be given when applying each type of concrete in construction.

## 1. Giới thiệu

Bê tông là một trong những vật liệu được sử dụng rộng rãi trong xây dựng do sở hữu những đặc tính kỹ thuật như dễ dàng thi công, khả năng chịu lực cao, tuổi thọ trung bình. Tuy nhiên, một trong các nhược điểm của bê tông là tính co ngót hay biến dạng co ngót trong quá trình đóng rắn. Tính co ngót xảy ra trong bê tông thường là do việc mất nước bởi quá trình hydrat hóa của xi măng. Nhìn chung, trong kết cấu bê tông cốt thép, khi có sự xuất hiện biến dạng co ngót trong bê tông, cốt thép trong kết cấu cũng như các điều kiện biên kiềm chế sẽ cản trở biến dạng này và gây ra ứng suất kéo. Ứng suất kéo này vượt qua ứng suất kéo của bê tông sẽ dẫn đến hiện tượng nứt bên trong bê tông [1, 2]. Vết nứt không những làm giảm khả năng chịu lực của kết cấu bê tông mà còn thúc đẩy các quá trình ăn mòn bên trong kết cấu, kéo theo việc làm gia tăng chi phí bảo trì sửa chữa [3]. Đối với trường hợp bê tông cường

độ cao (tức bê tông sử dụng hàm lượng lớn chất kết dính kết hợp với tỷ lệ nước/chất kết dính thấp) đang được ứng dụng rộng rãi trên thế giới, dưới điều kiện bị kiềm chế và điều kiện dưỡng hộ thông thường, biến dạng co ngót này có giá trị cao. Một trong những nguyên nhân là do tỷ lệ nước/chất kết dính thấp có khả năng gây ra khả năng tự khô, dẫn đến sự phát triển co ngót nội sinh và gây nứt trong bê tông dưới điều kiện bị kiềm chế [4]. Kết quả dẫn đến việc làm giảm các đặc tính kỹ thuật và độ bền của kết cấu, thậm chí có thể gây nguy hiểm do có sự xuất hiện các vết nứt ở các độ tuổi ban đầu. Do đó, việc dự đoán khả năng nứt trong bê tông, đặc biệt ở độ tuổi ban đầu là điều cần thiết để đảm bảo tuổi thọ cho các công trình xây dựng và sự an toàn cho con người trong quá trình thi công cũng như trong quá trình triển khai đưa vào sử dụng thực tế.

Nhiều phương pháp thí nghiệm đã và đang được áp dụng để đánh giá khả năng nứt của hệ nền xi măng và bê tông khi bị kiềm chế như

\*Liên hệ tác giả: nnthanh@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 05/05/2023, sửa xong ngày 18/09/2023, chấp nhận đăng 25/09/2023

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2023.571>

phương pháp thanh [5], phương pháp tấm [6] và phương pháp vòng [7]. Phương pháp vòng kiểm chế đã và đang được sử dụng rộng rãi do đơn giản thực hiện và giá thành thấp [1]. Hiệp hội Thử nghiệm và Vật liệu Hoa Kỳ (American Society for Testing and Materials - ASTM) đã đề xuất và hướng dẫn chi tiết phương thức thực hiện của phương pháp vòng kiểm chế trong ASTM C1581 [8]. Trong phương pháp thí nghiệm vòng kiểm chế này, thời gian xuất hiện vết nứt (hay còn gọi là tuổi nứt) thường được xác định từ sự biến đổi biến dạng của vòng thép bên trong [8].

Do đó, nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá khả năng nứt ở độ tuổi ban đầu của bê tông thường và bê tông cường độ cao bằng phương pháp vòng kiểm chế, nhằm cung cấp dự đoán khả năng ứng xử của từng loại bê tông để từ đó đưa ra những biện pháp thi công phù hợp cho công trình xây dựng.

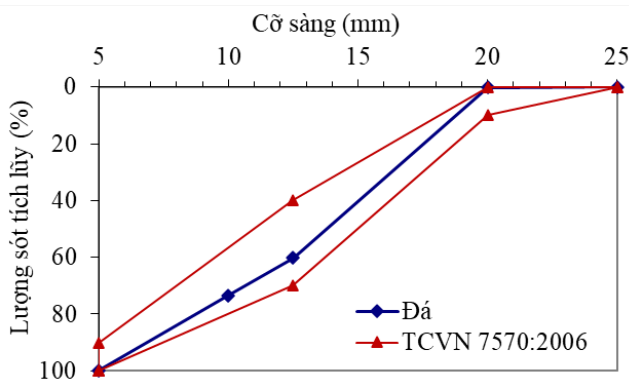
## 2. Vật liệu và phương pháp thí nghiệm

### 2.1. Vật liệu thí nghiệm

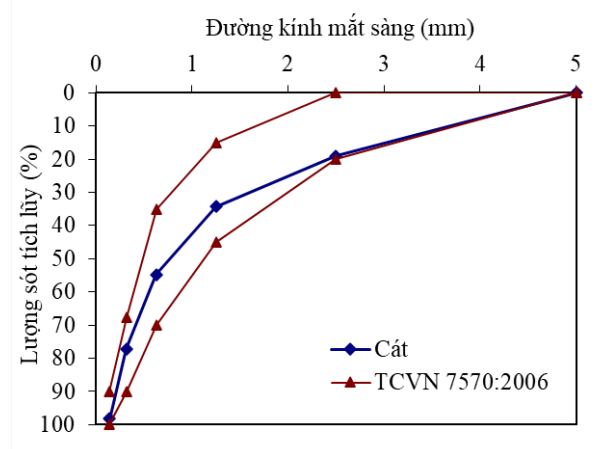
Bê tông thường (NC) và bê tông cường độ cao (HC) được chế tạo cùng một hệ nguyên vật liệu bao gồm xi măng Nghi Sơn PCB40, đá dăm, cát vàng thiên nhiên, nước và phụ gia giảm nước. Xi măng có khối lượng riêng là 3,1 g/cm<sup>3</sup> và thỏa mãn TCVN 6260:2020 [9], trong khi đá dăm và cát thiên nhiên có thành phần hạt nằm trong vùng cho phép theo TCVN 7570:2006 [10], xem Hình 1 và 2. Các tính chất kỹ thuật của cốt liệu được trình bày ở Bảng 1. Nước sử dụng để trộn bê tông là nước sinh hoạt do thành phố cung cấp và đáp ứng các yêu cầu đưa ra trong TCVN 4506:2012 [11]. Bên cạnh đó, phụ gia giảm nước được sử dụng nhằm đảm bảo tính công tác cho hỗn hợp bê tông.

### 2.2. Thành phần cấp phối

Với mục tiêu đánh giá khả năng chống nứt ở độ tuổi sớm của NC với mức thiết kế M350 và HC với mức thiết kế M600, tỷ lệ thành phần vật liệu của hai cấp phối NC và HC được trình bày ở Bảng 2.



Hình 1. Thành phần hạt của đá dăm so sánh với TCVN 7570:2006.



Hình 2. Thành phần hạt của cát vàng thiên nhiên so sánh với TCVN 7570:2006.

Bảng 1. Các tính chất kỹ thuật của cốt liệu.

Chỉ tiêu	Đơn vị	Đá dăm	Cát vàng
Khối lượng riêng	g/cm <sup>3</sup>	2,92	2,70
D <sub>max</sub> và D <sub>min</sub>	mm	20 và 5	-
Mô đun độ lớn	x	-	1,91

x: không đơn vị; -: không thí nghiệm

Bảng 2. Thành phần cấp phối của 1 m<sup>3</sup> bê tông.

Cấp phối	N/X	Xi măng (kg)	Nước (lít)	Cát (kg)	Đá (kg)	Phụ gia (kg)
NC	0,42	410	170	800	1070	2,05
HC	0,29	552	160	654	1073	2,05

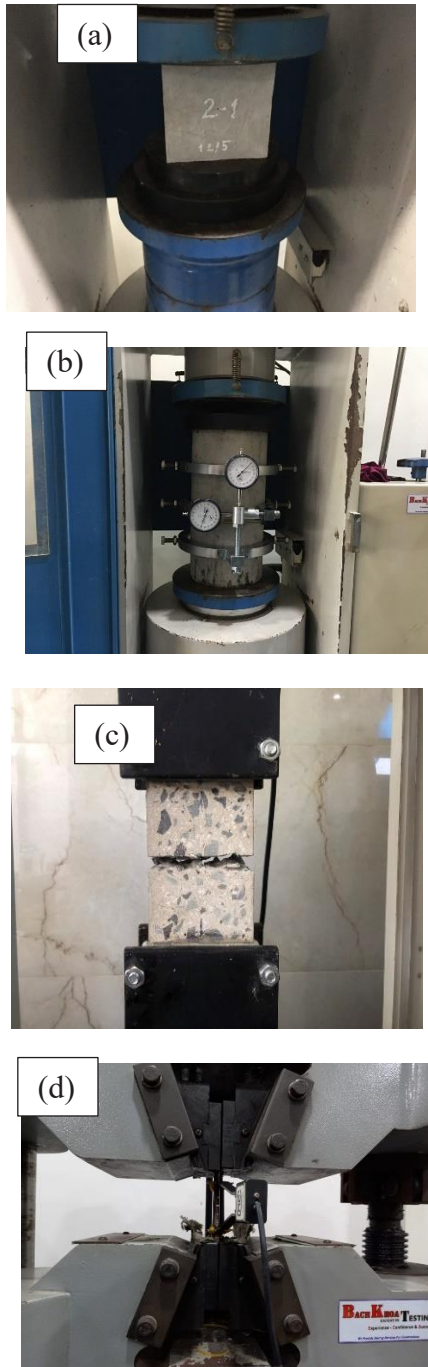
### 2.3. Quy trình nhào trộn, chuẩn bị mẫu thử và dưỡng hộ

Sau khi định lượng nguyên vật liệu của mỗi cấp phối theo Bảng 2, việc nhào trộn bê tông và chuẩn bị mẫu thử được thực hiện theo TCVN 3015:2022 [12]. Sau khi kết thúc quá trình nhào trộn, hỗn hợp bê tông được đổ vào các khuôn đã được vệ sinh và bôi dầu. Sau đó, các khuôn mẫu được phủ bằng tấm nilong dưỡng ẩm trong 24 giờ. Sau đó, mẫu được tháo ra khỏi khuôn và cho vào bể dưỡng hộ nước ở nhiệt độ 27 ± 2°C cho đến đủ ngày tuổi xác định các chỉ tiêu kỹ thuật bao gồm cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi của bê tông.

### 2.4. Kiểm tra các chỉ tiêu kỹ thuật của bê tông và thép

Cường độ chịu nén của bê tông là giá trị trung bình của ba mẫu có kích thước 150 × 150 × 150 mm trong mỗi cấp phối được tiến hành kiểm tra bằng máy nén thủy lực theo TCVN 3118:2022 [13] ở 3 và 7 ngày tuổi. Mô đun đàn hồi là giá trị trung bình của ba mẫu trụ có đường kính 150 mm và chiều cao 300 mm trong mỗi cấp phối được tiến hành kiểm tra bằng máy nén thủy lực theo ASTM C469 [14] ở 3 và 7 ngày tuổi. Trong khi đó, cường độ chịu kéo của bê tông là giá trị

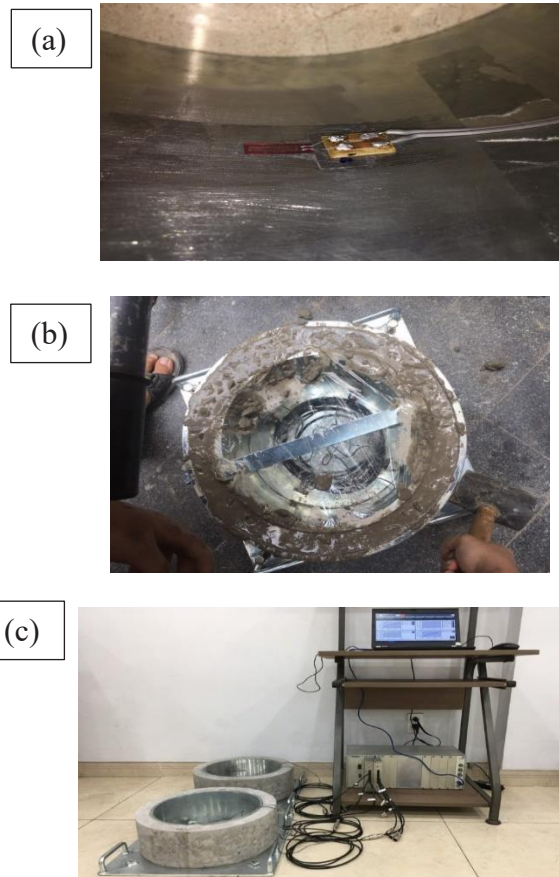
trung bình của ba mẫu bê tông hình trụ trong mỗi cấp phối ở 3 và 7 ngày tuổi được thí nghiệm theo ASTM C496 [15]. Bên cạnh đó, mô đun đàn hồi của thép là giá trị trung bình của ba mẫu thép cũng được xác định theo ASTM A370 [16] và ASTM A106 [17]. Hình 3 (a), (b), (c) và (d) lần lượt thể hiện các thí nghiệm xác định cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và cường độ chịu kéo của bê tông và thép sử dụng trong nghiên cứu này.



**Hình 3.** Các thí nghiệm xác định (a) cường độ chịu nén, (b) mô đun đàn hồi, (c) cường độ chịu kéo của bê tông, và (d) mô đun đàn hồi của thép.

### 2.5. Đánh giá khả năng chống nứt ở độ tuổi ban đầu của bê tông

Để đánh giá khả năng chống nứt ở độ tuổi ban đầu của bê tông, thí nghiệm xác định biến dạng co ngót của bê tông ở giai đoạn đầu được thực hiện bằng việc sử dụng vòng kiểm chế theo ASTM C1581 [8]. Phương pháp này sử dụng vòng thép và cảm biến nhằm xác định tuổi nứt và ứng suất kéo đặc trưng của bê tông dưới sự co ngót bị hạn chế trong phòng thí nghiệm. Vòng kiểm chế này được cấu tạo bởi 2 vòng thép bao gồm (a) vòng thép trong với độ dày thành 13 mm, đường kính ngoài 330 mm và chiều cao 150 mm, và (b) vòng thép ngoài có đường kính trong là 394 mm, chiều cao 150 mm. Quy trình thí nghiệm bao gồm các bước sau: (1) cảm biến Showa loại N11-FA-10-120-11 được dán ở mặt trong của vòng thép trong (Hình 4 (a)), (2) các vòng thép ngoài và trong được điều chỉnh và lắp ráp cố định vào khuôn bằng các bu lông cố định, (3) mặt ngoài của vòng thép trong và mặt trong của vòng thép ngoài được bôi lớp dầu, (4) đổ hỗn hợp bê tông của mỗi cấp phối vào trong vòng trước khi làm mặt mẫu (Hình 4 (b)), (5) các bu lông định vị các vòng thép được nới lỏng, cảm biến biến dạng được gắn vào thiết bị thu thập dữ liệu nhằm ghi nhận lại kết quả và bắt đầu thu dữ liệu sau 30 phút (Hình 4 (c)).



**Hình 4.** Quy trình thí nghiệm xác định biến dạng co ngót của bê tông ở giai đoạn đầu bao gồm (a) cảm biến được dán ở mặt trong của vòng thép trong, (b) tạo hình mẫu bê tông trong vòng thép và (c) thu thập dữ liệu co ngót trong môi trường thí nghiệm.

Dựa trên dữ liệu thu thập, biến dạng kéo của vòng thép theo thời gian, biến dạng kéo của bê tông và mức ứng suất kéo của bê tông theo thời gian được tính toán lần lượt theo công thức (1), (2) và (3).

$$\epsilon_s = \alpha\sqrt{t} + k \tag{1}$$

$$\sigma_c = K \times \epsilon_s(t) \tag{2}$$

$$S(t) = \frac{K|\alpha|}{2\sqrt{t}} \tag{3}$$

trong đó,

$\epsilon_s$ : biến dạng kéo theo thời gian của vòng thép (m/m)

$\alpha$ : hệ số mức độ biến dạng cho từng cảm biến trên mẫu thử ((m/m)/ngày<sup>1/2</sup>)

t: thời gian (ngày)

k: hằng số hồi quy

$\sigma_c$ : ứng suất kéo của bê tông theo thời gian (MPa)

K: hệ số được tính như sau  $K = -\frac{1}{2} \frac{A_s}{A_c} E_s \frac{R_{oc} + R_{is}}{R_{oc}} = -65,3$  (GPa),

với  $A_s$ : diện tích của vòng thép chịu lực (mm<sup>2</sup>),  $A_c$ : diện tích của bê tông chịu lực (mm<sup>2</sup>),  $E_s$ : mô đun đàn hồi của bê tông (MPa),  $R_{oc}$ : bán

kính ngoài của bê tông (mm),  $R_{is}$ : bán kính trong của vòng thép (mm)

$S(t)$ : ứng suất kéo tại thời điểm t (MPa/ngày)

### 3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

#### 3.1. Các chỉ tiêu kỹ thuật của bê tông và thép

Bảng 3 thể hiện các chỉ tiêu kỹ thuật của bê tông và thép. Nhận thấy rằng, các mẫu NC có cường độ chịu nén ở 7 ngày đạt giá trị 35,5 MPa, tức NC trong nghiên cứu này đã đạt mức thiết kế M350 và mẫu HC có cường độ chịu nén ở 7 ngày với giá trị 61,2 MPa thỏa mãn mức thiết kế M600. Trong khi đó, cường độ chịu kéo trực tiếp của bê tông nằm trong khoảng 1/13 cường độ chịu nén, không phụ thuộc vào loại bê tông. Điều này phù hợp với cơ sở lý thuyết về mối quan hệ giữa cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo của bê tông. Bên cạnh đó, mô đun đàn hồi của thép đạt giá trị  $20,9 \times 10^4$  MPa phù hợp với ASTM A370 [16] và ASTM A106 [17].

**Bảng 3.** Các chỉ tiêu kỹ thuật của bê tông và thép.

Tuổi (ngày)	Bê tông						Thép
	Bê tông thường (NC)			Bê tông cường độ cao (HC)			
	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$E_c$ (10 <sup>4</sup> MPa)	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$E_c$ (10 <sup>4</sup> MPa)	
3	30,6	2,3	30,2	53,3	2,7	36,4	20,9
7	35,5	2,7	35,8	61,2	3,5	38,6	

$f_c$ : cường độ chịu nén;  $f_t$ : cường độ chịu kéo;  $E_c$ : mô đun đàn hồi của bê tông;  $E_s$ : mô đun đàn hồi của thép

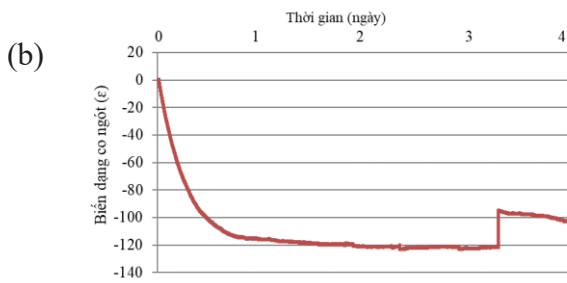
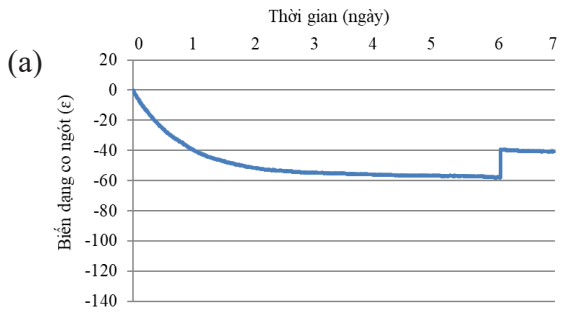
#### 3.2. Sự biến dạng của vòng thép do sự co ngót trong bê tông

Sự biến dạng của vòng thép do sự co ngót trong NC (tức bê tông mức M350) và HC (tức bê tông mức M600) được thể hiện lần lượt ở Hình 5 (a) và (b). Nhận thấy rằng hiện tượng co ngót của hai loại bê tông này có xu hướng tương tự nhau, đó là xảy ra với tốc độ rất cao ở thời gian sớm (trong khoảng 24 đến 48 giờ), tiếp tục phát triển với tốc độ chậm dần và sau đó giảm liên tục. Khi so với mẫu NC, mẫu HC có giá trị co ngót cao và tốc độ co ngót nhanh hơn trong 24 giờ đầu, và tăng rất chậm trong những ngày sau đó. Trong khi đó, mẫu NC có tốc độ co ngót chậm hơn, nhưng vẫn phát triển trong ngày đầu và giảm tốc độ liên tục vào những ngày kế tiếp. Ở thời điểm 6 ngày tuổi đối với mẫu NC và ở 3 ngày tuổi đối với mẫu HC, nhận thấy có hiện tượng giảm biến dạng co ngót đột ngột. Tại thời điểm này, quan sát được hiện tượng mẫu vòng bê tông bị nứt, và vết nứt phát triển trong vòng bê tông bị hạn chế. Điều này có thể giúp dự đoán quá trình phát triển ứng suất kéo bên trong bê tông [18], tức bê tông có cường độ càng cao sẽ có xu hướng sớm bị nứt nhanh hơn so với bê tông có cường độ thấp. Điều này tương đồng với kết quả thực nghiệm của Afroz và cộng sự [18].

#### 3.3. Khả năng nứt do co ngót của bê tông

Sự phát triển ứng suất kéo trung bình trong mẫu NC với mức M350 và HC với mức M600 được thể hiện lần lượt ở Hình 6 (a) và (b). Nhận thấy rằng, sự co ngót trong bê tông đã gây ra ứng suất kéo, hay nói cách khác, ứng suất kéo tùy thuộc vào sự phát triển của quá trình co ngót diễn ra bên trong bê tông. Kết hợp Hình 5 và 6, quan sát thấy được rằng sau khi đông kết, bê tông bắt đầu co lại, điều này đã tạo ra trong vòng thép một ứng suất nén gia tăng rất nhanh trong các ngày đầu tiên và tốc độ giảm dần cho đến khi mẫu thí nghiệm bị nứt và điều này được nhận diện từ một sự thay đổi đột ngột được ghi lại từ thiết bị đo biến dạng. Tại thời điểm đó, sự xuất hiện vết nứt đầu tiên được cân nhắc chính là thời gian nứt (tuổi nứt) của bê tông khi bị kiểm chế, điều này phù hợp với nhận định của các nghiên cứu trước [18, 19]. Tuy nhiên, sự xuất hiện và phát triển vết nứt theo thời gian ở mỗi loại bê tông khác nhau, cụ thể: đối với mẫu NC với mức M350, vết nứt xuất hiện ở độ tuổi khoảng 6 ngày; trong khi đó, đối với mẫu HC với mức M600, vết nứt xuất hiện ở độ tuổi sau 3 ngày, sớm hơn mẫu NC (xem Hình 6 (a) và (b)). Nguyên nhân một phần có thể là do thành phần cấp phối cũng như các đặc tính kỹ thuật (như cường độ, mô đun đàn hồi) của hai loại bê tông (xem Bảng 2 và Bảng 3). Sự phát triển ứng suất kéo trong mẫu vòng bê tông vượt qua mức ứng suất kéo trung bình của bê tông là nguyên nhân dẫn đến mẫu thử bị nứt. Đồng thời, giá trị ứng suất kéo thực tế lớn nhất được ghi nhận gần với tuổi nứt của mẫu vòng bê tông. Hình 7 (a) và (b) lần lượt thể hiện vết nứt có thể nhìn thấy và

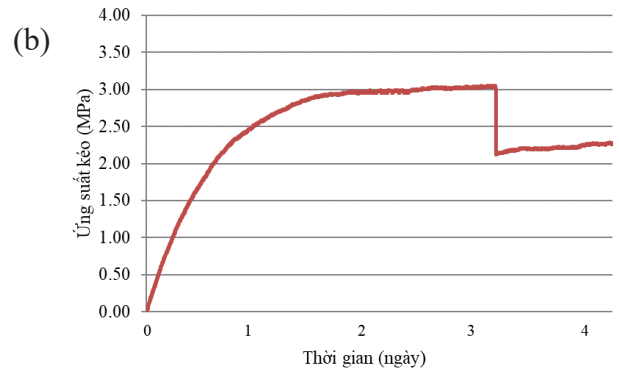
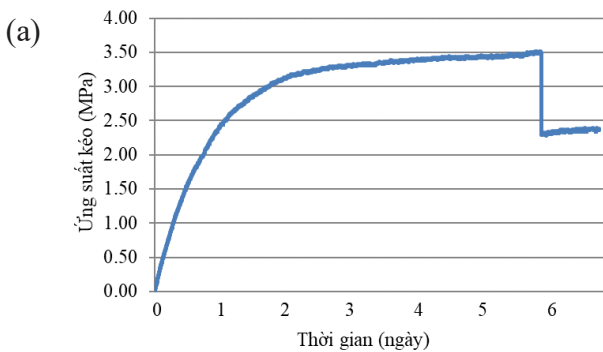
phát triển trong vòng mẫu NC với mức M350 và mẫu HC với mức M600 bị kiểm chế bởi vòng thép. Bên cạnh đó, có thể quan sát thấy được vết nứt lan truyền khắp mặt cắt ngang của cả hai loại bê tông.



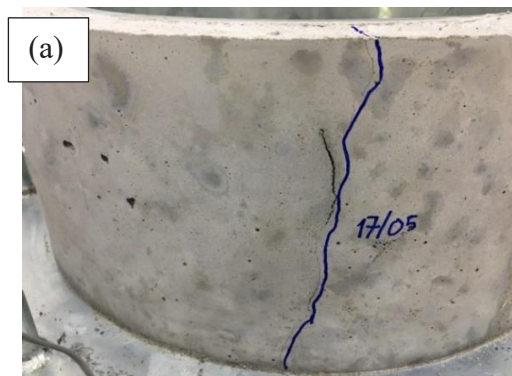
Hình 5. Sự biến dạng của vòng thép do sự co ngót trong mẫu (a) NC với mức M350 và (b) HC với mức M600.

### 3.4. Mức ứng suất kéo theo thời gian của bê tông

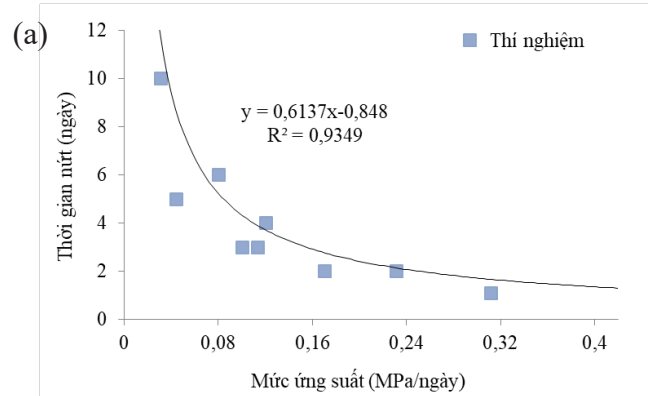
Mức ứng suất kéo theo thời gian trong mẫu NC với mức M350 và HC với mức M600 được thể hiện lần lượt ở Hình 8 (a) và (b). Nhận thấy rằng, mức ứng suất càng thấp thì thời điểm bê tông bị nứt dưới sự co ngót bị hạn chế càng dài. Từ đây, có thể thấy rằng mức ứng suất kéo có mối quan hệ chặt chẽ với thời gian bắt đầu xuất hiện vết nứt, với độ tin cậy trong trường hợp mẫu NC với mức M350 là  $R_1^2 = 0,9349$  và trong trường hợp mẫu HC với mức M600 là  $R_2^2 = 0,8707$ . Kết quả phù hợp với sự khảo sát và nghiên cứu trước đó của Attiogbe và cộng sự [20]. Nhìn chung, mức ứng suất có thể là một yếu tố cung cấp một cách rõ ràng và cơ bản hơn để đánh giá khả năng nứt của bê tông bằng phương pháp vòng kiểm chế.

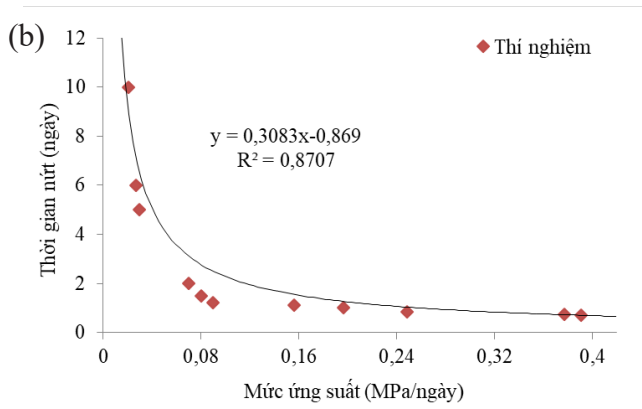


Hình 6. Ứng suất kéo của mẫu (a) NC với mức M350 và (b) HC với mức M600.



Hình 7. Vết nứt xuất hiện trong mẫu (a) NC với mức M350 và (b) HC với mức M600.





Hình 8. Mức ứng suất theo thời gian của mẫu (a) NC với mức M350 và (b) HC với mức M600.

#### 4. Kết luận

Từ những kết quả thực nghiệm hai loại mẫu bê tông (NC và HC) bằng việc sử dụng vòng kiểm chế, một số kết luận có thể được rút ra như sau:

- Hiện tượng co ngót của bê tông thường (NC) với mức M350 và bê tông cường độ cao (HC) với mức M600 có xu hướng tương tự nhau. Tuy nhiên, khi so sánh với NC, mẫu HC có tốc độ co ngót nhanh hơn trong 24 giờ đầu, và tăng rất chậm trong những ngày sau đó.
- Vết nứt xuất hiện trong mẫu HC xảy ra rất sớm khi so với mẫu NC.
- Khả năng nứt của bê tông có thể được đánh giá dựa trên thời điểm nứt hoặc tốc độ phát triển ứng suất kéo theo thời gian của bê tông, không phụ thuộc vào loại bê tông.

Tóm lại, thí nghiệm vòng kiểm chế là phương pháp hỗ trợ thích hợp trong việc dự đoán khả năng nứt thông qua việc đánh giá ứng suất kéo của từng loại bê tông trong quá trình đóng rắn, để từ đó đưa ra nhiều biện pháp thi công phù hợp khi áp dụng từng loại bê tông trong xây dựng.

#### Lời cảm ơn

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. Chúng tôi cũng xin gửi lời cảm ơn đến Trần Gia Ân – sinh viên ngành Công nghệ Kỹ thuật Vật liệu Xây dựng đã cùng hỗ trợ thực hiện nghiên cứu này.

#### Tài liệu tham khảo

[1]. H. Rong, W. Dong, X. Zhao, X. Zhou, Investigation on multi-cracks initiation and propagation of fiber reinforced concrete in restrained shrinkage ring tests, *Theor Appl Fract Mech* 111 (2021) 102856.  
 [2]. E.I. Yang, S. Morita, S.T. Yi, Effect of axial restraint on mechanical behavior of high-strength concrete beams, *Struct J* 97 (5) (2000) 751–756.  
 [3]. L. Wang, G. Li, X. Li, F. Guo, S. Tang, X. Lu, A. Hanif, Influence of reactivity and dosage of MgO expansive agent on shrinkage and crack resistance of face slab concrete, *Cem Concr Compos* 126 (2022) 104333.

[4]. D.J. Shen, J.C. Kang, X.J. Yi, L.K. Zhou, X. Shi, Effect of double hooked-end steel fiber on early-age cracking potential of high strength concrete in restrained ring specimens, *Constr Build Mater* 223 (2019) 1095–1105.  
 [5]. K. Kovler, Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage, *Mater Struct* 27 (324) (1994) 324–330.  
 [6]. W.J. Weiss, W. Yang, S.P. Shah, Shrinkage cracking of restrained concrete slabs, *J Eng Mech* 124 (7) (1998) 765–774.  
 [7]. R.W. Carlson, T.J. Reading, Model study of shrinkage cracking in concrete building walls, *ACI Struct J* 85 (1988) 395–404.  
 [8]. Hội Thử nghiệm và Vật liệu Mỹ (American Society for Testing and Materials), ASTM C1581 Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage, 2010.  
 [9]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 6260:2020 Xi măng Portland hỗn hợp – Yêu cầu kỹ thuật, 2020.  
 [10]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 7570:2006 Cốt liệu cho bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật, 2006.  
 [11]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 4506:2012 Nước cho bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật, 2012.  
 [12]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 3015:2022 Hỗn hợp bê tông nặng và bê tông nặng – Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử, 2022.  
 [13]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 3118:2022 Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ nén, 2022.  
 [14]. Hội Thử nghiệm và Vật liệu Mỹ (American Society for Testing and Materials), ASTM C469 Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression, 2017.  
 [15]. Hội Thử nghiệm và Vật liệu Mỹ (American Society for Testing and Materials), ASTM C496 Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, 2017.  
 [16]. Hội Thử nghiệm và Vật liệu Mỹ (American Society for Testing and Materials), ASTM A370 Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, 2022.  
 [17]. Hội Thử nghiệm và Vật liệu Mỹ (American Society for Testing and Materials), ASTM A106 Seamless Carbon Steel Pipe.  
 [18]. S. Afroz, Q.D. Nguyen, Y. Zhang, T. Kim, A. Castel, Evaluation of cracking potential parameters for low to high grade concrete with fly ash or slag, *Constr Build Mater*, 350 (2022) 128891.  
 [19]. S. Afroz, Q.D. Nguyen, Y. Zhang, T. Kim, A. Castel, Cracking of limestone calcined clay blended concrete and mortar under restrained shrinkage, *Constr Build Mater*, 386 (2023) 131599.  
 [20]. E.K. Attigobe, J. Weiss, H. T. See, A look at the stress rate versus time of cracking relationship observed in the restrained ring test, *International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur*, Edited by J. Weiss, K. Kovler, J. Marchand, and S. Mindess, RILEM Publications SARL, 2004.