

Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của cấp độ bền đến biến dạng co ngót trong bê tông ở độ tuổi sớm

Experimental research on the effect of strength grade on early-age concrete shrinkage

> PGS.TS PHẠM THANH TÙNG¹, THS NGUYỄN KHÁNH HÙNG^{2*},
THS NGUYỄN TRẦN TIẾN³, PGS.TS NGUYỄN TUẤN TRUNG¹

¹Khoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội;
Email: tungpt@huce.edu.vn, trungnt2@huce.edu.vn

^{2*}Khoa Kỹ thuật Công trình, Trường Đại học Lạc Hồng; Email: nguyengkhanhhung@lhu.edu.vn

³Khoa Doanh trại, Học viện Hậu cần, Bộ Quốc phòng

TÓM TẮT

Bài báo khảo sát ảnh hưởng của cấp độ bền đến biến dạng co ngót trong bê tông ở giai đoạn tuổi sớm. Các thí nghiệm đo co ngót trên mẫu lăng trụ và Ring test được tiến hành với hai cấp phối bê tông B1 (cường độ chịu nén 33.5 Mpa) và B2 (cường độ chịu nén 65.7 Mpa). Các kết quả thí nghiệm cho thấy, trong thời điểm 0-3 ngày tuổi và 3-28 ngày tuổi, mẫu cấp phối B1 đều có biến dạng co ngót lớn hơn mẫu cấp phối B2. Đối với thí nghiệm Ring test, giá trị biến dạng vành thép cực đại của mẫu cấp phối B2 lớn hơn mẫu cấp phối B1, thời điểm vành thép biến dạng cực đại và thời điểm biến dạng vành thép trở về 0 của mẫu cấp phối B2 đều dài hơn mẫu cấp phối B1. Bài báo đã cung cấp bộ số liệu về biến dạng co ngót bê tông ở tuổi sớm, làm cơ sở để tìm giải pháp cho phép hạn chế tình trạng nứt trên kết cấu bê tông và bê tông cốt thép.

Từ khóa: Bê tông tuổi sớm; co ngót; cấp bền

ABSTRACT

This article investigates the influence of strength grade on the shrinkage of concrete at an early age. Shrinkage tests on prismatic samples and restrained shrinkage ring tests were conducted with two concrete grades, B1 (compressive strength 33.5 MPa) and B2 (compressive strength 65.7 MPa). Experimental results showed that, at 0-3 days and 3-28 days, the B1 sample had a greater shrinkage strain than the B2 sample. For the ring test, the maximum strain value of the steel rim of the B2 sample is greater than that of the B1 sample; the time when the steel rim has the maximum deformation and the time when the steel rim deformation returns to 0 of the grade B2 sample are both more prolonged than the B1 sample. The article has provided a data set on the shrinkage and deformation of concrete at an early age as a basis for finding solutions to limit cracking in concrete and reinforced concrete structures.

Keywords: Early-age concrete; shrinkage; strength Grade

1. GIỚI THIỆU

Biến dạng co ngót trong bê tông có thể được chia thành các loại khác nhau theo các yếu tố ảnh hưởng: thành phần hóa học của hỗn hợp bê tông, sự thay đổi độ ẩm và thay đổi nhiệt (Acker và Ulm, 2001) [1]. Bên cạnh việc gây co ngót ba thành phần này cũng sẽ dẫn đến trương nở bê tông trong điều kiện thâm nhập của hơi nước vào bê tông. Dưới ảnh hưởng của ba nguồn gốc cơ bản, có thể tiếp tục phân loại co ngót thành: co ngót khô, co ngót mao dẫn, co ngót tự sinh, co ngót cacbonat và co ngót nhiệt. Năm loại co ngót này thường được biết đến là những nguyên nhân chủ yếu gây ra biến dạng bê tông. Các yếu tố co ngót thường được phân loại thành các yếu tố bên trong và các yếu tố bên ngoài. Các yếu tố bên trong là những đặc trưng của vật liệu chế tạo bê tông, bao gồm: thành phần hỗn hợp, tính chất và chất lượng vật liệu (Karagüler, Yatağan, 2018) [2]. Tác động bên ngoài đề cập đến các

yếu tố có thể thay đổi sau khi đúc bê tông như ảnh hưởng của môi trường đến kết cấu bê tông (Safiuddin, Kaish, Woon, Raman, 2018) [3].

Các nhà khoa học trên thế giới và Việt Nam đã có nhiều nghiên cứu biến dạng co ngót trong bê tông và đạt được nhiều kết quả quan trọng. Yếu tố độ ẩm tương đối của môi trường (RH) là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất. Khi chênh lệch nhiệt độ không lớn thì ảnh hưởng của yếu tố biến dạng nhiệt không đáng kể và hầu như không ảnh hưởng đến kết quả đo biến dạng co ngót. Trong phạm vi nghiên cứu, các thí nghiệm được tiến hành trong phòng thí nghiệm chuẩn (có nhiệt độ gần như không đổi) nên biến dạng nhiệt được bỏ qua.

Qua phân tích biến dạng co ngót có thể nhận thấy các thông số chính ảnh hưởng đến biến dạng co ngót của vật liệu bê tông bao gồm: cấp phối của vật liệu bê tông (loại xi măng, tỷ lệ hạt mịn,

tỷ lệ nước trên xi măng...), hình dạng kích thước của kết cấu, độ ẩm tương đối của môi trường. Việc lựa chọn một thành phần cấp phối vật liệu hợp lý sẽ có vai trò quan trọng trong việc hạn chế biến dạng co ngót của vật liệu bê tông. Cùng với đó là cấp độ bền cũng có ảnh hưởng nhất định đến biến dạng co ngót, nhất là ở độ tuổi sớm. Hiện nay có rất ít nghiên cứu về co ngót ở độ tuổi sớm, vì vậy bài báo này nghiên cứu về ảnh hưởng của cấp độ bền đến biến dạng co ngót bê tông ở độ tuổi sớm.

2. CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu và cấp phối

Vật liệu dùng chế tạo bê tông: xi măng, đá dăm, cát vàng, nước và phụ gia. Xi măng do công ty Vissai Ninh Bình sản xuất khối lượng riêng 3.1 g/cm³. Cốt liệu nhỏ sử dụng là cát vàng sông Lô và đá dăm Kiện Khê (Việt Nam) được sử dụng làm cốt liệu lớn. Nước sử dụng trộn vật liệu thỏa mãn tiêu chuẩn nước dùng trong bê tông TCVN 4506:1987 [4]. Phụ gia siêu dẻo (SP) sử dụng ROADCON - SSA 3000 gốc Polyethylene Glycol Methacrylate hoạt tính đảm bảo theo tiêu chuẩn ASTM 494 D&G.

Các cấp phối chế tạo B1 và B2 được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Cấp phối chế tạo B1 và B2.

Mix	Xi măng (kg)	Cát (kg)	Đá (kg)	Nước (l)	SF (kg)	Siêu dẻo (%)
B1	450	650	1120	190	0	0
B2	520	620	1120	185	50	3

2.2. Phương pháp thí nghiệm

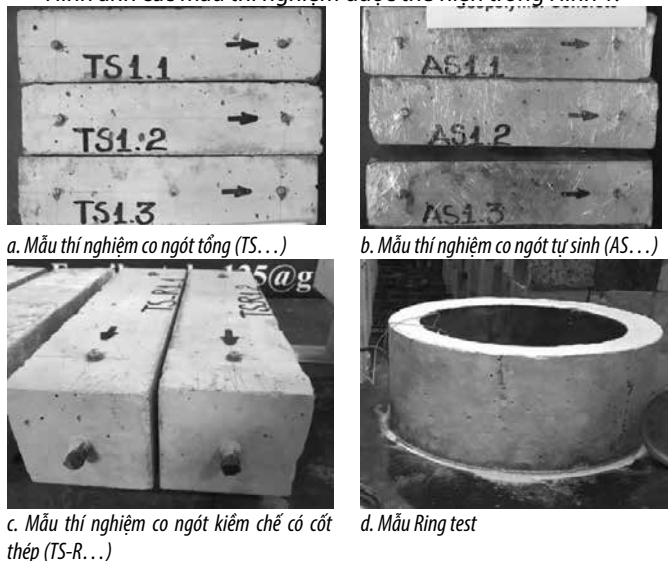
Thí nghiệm đo biến dạng được tiến hành trên 01 cấp phối B1 có cường độ chịu nén 30MPa và 01 cấp phối B2 có cường độ chịu nén 60 MPa. Mỗi cấp phối tiến hành chế tạo 03 tổ mẫu lăng trụ kích thước 10x10x40 cm để đo co ngót với các loại thí nghiệm như i) Co ngót tổng (TS); ii) Co ngót tự sinh (AS); iii) Co ngót kiểm chế có cốt thép (TS-R); iv) co ngót kiểm chế với Ring test (RT). Các tổ mẫu được lưu giữ trong tủ khí hậu khống chế ở nhiệt độ 27 ± 2 °C và độ ẩm $80 \pm 5\%$ tại Phòng thí nghiệm và kiểm định - Trường Đại học Xây dựng Hà Nội. Đồng thời tiến hành thí nghiệm Ring test để xác định thời điểm hình thành vết nứt do co ngót đối với cấp phối trên. Các thí nghiệm đặc trưng cơ học như cường độ chịu nén (CĐCN), mô đun đàn hồi (MĐH) cũng được đồng thời thực hiện.

Chi tiết các mẫu thí nghiệm được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Các mẫu thí nghiệm.

STT	Loại thí nghiệm	Kí hiệu mẫu	Kích thước mẫu (mm)	Số lượng mẫu /01 Cấp phối	Ngày tuổi
1	Thí nghiệm co ngót tổng không cốt thép	TS -	100x100x400	03	Liên tục từ 0 ngày tuổi đến 28 ngày
2	Thí nghiệm co ngót tự sinh không cốt thép	AS -	100x100x400	03	Liên tục từ 0 ngày tuổi đến 28 ngày
3	Thí nghiệm co ngót có cốt thép	TS-R -	100x100x400 Cốt thép gai (Ø12)	03	Liên tục từ 0 ngày tuổi đến 28 ngày
4	Thí nghiệm cường độ chịu nén	C -	Trụ 150x300	03	28
5	Thí nghiệm mô đun đàn hồi	Eb -	Trụ 150x300	03	28
6	Thí nghiệm Ring test	RT		02	

Hình ảnh các mẫu thí nghiệm được thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Một số hình ảnh chế tạo mẫu thí nghiệm.

2.3. Thí nghiệm xác định giá trị cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của bê tông

Thí nghiệm xác định giá trị cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của bê tông theo thời gian được xác định ở 28 ngày tuổi.

Thí nghiệm ở 2 loại cấp phối. Mỗi cấp phối tương ứng một tổ mẫu. Mỗi tổ mẫu bao gồm 03 mẫu cơ bản. Mẫu thí nghiệm xác

định giá trị cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi theo thời gian là mẫu hình trụ tròn có kích thước 15x30 cm và được xác định theo Tiêu chuẩn TCVN 5276:1993 [5].

2.4. Thí nghiệm đo biến dạng co ngót trên mẫu lăng trụ

2.4.1. Thiết bị thí nghiệm

Tủ khí hậu (khống chế nhiệt độ và độ ẩm theo yêu cầu thí nghiệm). Thông số kỹ thuật Tủ khí hậu: Hãng sản xuất: Matest. Model: LHS - 250 SC (H). Dung tích tủ: ~ 250 lít. Trọng lượng: 140 kg. Thang nhiệt độ làm việc: 5 ± 2 °C đến 50 ± 2 °C. Thang độ ẩm: 50% đến 95%. Công suất nóng: 150 W. Công suất nén: 180 W. Nguồn điện: 220V. Kích thước trong: 600x500x830 mm.

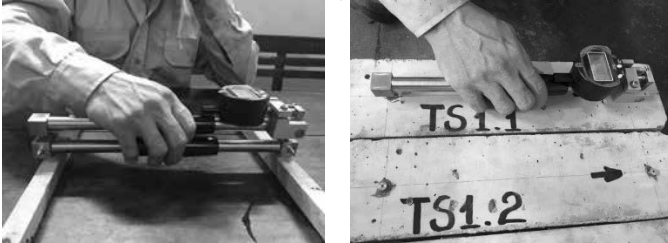
Thiết bị đo biến dạng co ngót của bê tông. Biến dạng tự do của mẫu được đo bằng thiết bị đo Comparator do hãng MATEST (Italia) chế tạo; Model: C363 KIT. Để tạo chuẩn đo biến dạng, các chốt bằng thép không gỉ được đặt cố định vào khuôn tạo mẫu bê tông trước khi tiến hành đổ sao cho khoảng cách giữa các chốt bằng 300mm (là chiều dài chuẩn đo). Các chốt này được đặt ở hai mặt đối diện của mẫu thí nghiệm, cho phép đo được 02 kết quả đo ứng với mỗi mẫu thí nghiệm. Đồng hồ đo co ngót chính xác tới 0.001 mm (1/1000). Trong quá trình đo đồng thời xác định khối lượng mẫu bằng cân đo trọng lượng tại mỗi thời điểm đo.

2.4.2. Quy trình thí nghiệm

Các mẫu thí nghiệm sau khi đúc bê tông được bảo dưỡng theo Tiêu chuẩn TCVN 3117:1993 và TCVN 3015:1993 [6]. Các mẫu sau khi chế tạo. Các mẫu thí nghiệm được tháo khuôn sau 24 giờ kể từ khi đúc bê tông và được bảo dưỡng giữ ẩm 1 ngày, sau đó được đưa vào ngâm nước 2 ngày tiếp theo. Mẫu sẽ được lau khô sau khi

lấy khỏi thùng ngâm và đưa vào lưu giữ trong Tủ khí hậu (Phòng thí nghiệm chuẩn) và Phòng thí nghiệm môi trường. Tiến hành đo lấy số liệu đầu tiên. Mỗi 01 mẫu sau khi chế tạo được dán giấy có ghi các thông số để phục vụ công tác thí nghiệm sau này.

Mẫu thí nghiệm co ngót tự sinh được bọc ni-lông để tránh mất nước ngay tại thời điểm tháo mẫu, việc này diễn ra trong suốt quá trình thí nghiệm. Mẫu đo co ngót kiểm chế được chế tạo bằng cách đặt thanh thép (Ø 12) vào chính giữa mẫu thí nghiệm. Chi tiết các mẫu thí nghiệm được trình bày trong Hình 1.



a). Lấy số đọc về giá trị 0 bằng chuẩn đo

b). Đo các giá trị biến dạng tại các ngày tuổi khác nhau

Hình 2. Đo co ngót mẫu thử lăng trụ.

2.5. Thí nghiệm đo biến dạng co ngót bằng Ring test

Thiết bị thí nghiệm Ring test xác định khả năng gây nứt và thời điểm nứt của bê tông non tuổi phù hợp với tiêu chuẩn ASTM C1581/ C1581M – 18a [7]. Thiết bị gồm các bộ phận: Vòng tròn thép bên trong có chiều cao 152 mm, đường kính ngoài 330 mm, dày 12.5 mm, độ nhẵn mặt trong và mặt ngoài đạt 1.6 µm; Vòng tròn ngoài có đường kính trong 406 mm, chiều dày 3 mm; Hai vòng tròn thép được đặt trên tấm đáy hình vuông (450 x 450 mm) thép phẳng dày 3 mm phủ sơn epoxy nhờ các chốt định vị; Bốn cảm biến (ký hiệu: CB1, CB2, CB3 và CB4) loại SGT-2DD/350-SY11 OMEGA® được gắn vào mặt trong của vòng tròn thép trong ở vị trí giữa chiều cao cách đều nhau theo đường kính để ghi nhận biến dạng của vòng tròn thép bên trong (do co ngót của vòng bê tông xung quanh) bằng loại keo gắn chuyên dùng Extra 4000; Số liệu của thí nghiệm được đo bằng thiết bị thu nhận dữ liệu NI9237 kết nối với máy tính thông qua cổng giao tiếp NI USB9162. Sau khi lắp đặt thiết bị theo thiết kế, một hệ thống thiết bị Ring test hoàn chỉnh thể hiện trong Hình 3.



Hình 3. Hệ thống thiết bị Ring test thực tế

Trước khi đổ mẫu vào khuôn cần dùng dầu (dầu thoa khuôn thí nghiệm) thoa đều mặt ngoài của vòng thép bên trong, mặt trong của vòng thép ngoài và tấm đáy tại vị trí bê tông tiếp xúc. Mẫu được đổ thành hai lớp có chiều cao tương đương nhau, mỗi lớp đổ được đầm 75 lần xung quanh bằng thanh sắt tròn trơn đường kính 10 mm và tiến hành rung sau mỗi lớp đổ. Quá trình đo biến dạng được thực hiện trong vòng 10 phút sau khi công việc đổ mẫu thực hiện xong, sau 24 giờ thì vòng tròn ngoài được tháo dỡ. Tần suất lấy kết quả biến dạng là 30 phút và đo đến khi vòng bê tông bị nứt

thể hiện trên bề mặt mẫu và đi cùng sự giảm đột ngột giá trị biến dạng của vòng tròn thép. Mỗi cấp bê tông thí nghiệm được thực hiện trên ba mẫu đồng thời hoặc trong điều kiện thí nghiệm tương tự nhau.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

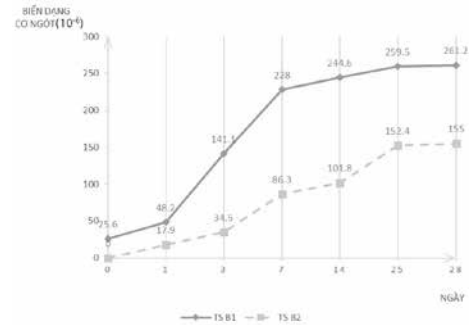
3.1. Giá trị cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của bê tông

Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén (CDCN) và mô đun đàn hồi (MĐH) của cấp phối B1 và B2 được nêu trong Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của mẫu thí nghiệm.

Cấp phối	CDCN từng mẫu (MPa)	CDCN trung bình (MPa)	MĐH từng mẫu (Gpa)	MĐH trung bình (MPa)
B1	33.2	33.5	28.3	27.7
	33.5		27.6	
	33.9		27.1	
B2	65.9	65.7	41.3	41.4
	65.7		41.4	
	65.5		41.6	

3.2. Kết quả đo biến dạng co ngót mẫu lăng trụ 3.2.1. Biến dạng co ngót tổng (TS)



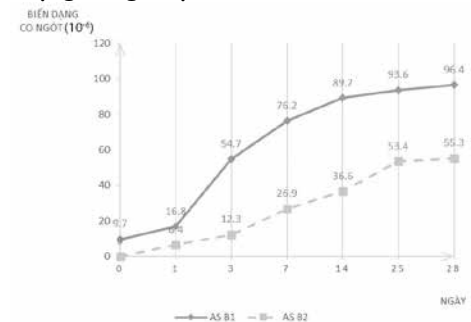
Hình 4. Biểu đồ biến dạng co ngót tổng của mẫu cấp phối B1 và B2.

Thời điểm 0-3 ngày: TS của mẫu cấp phối B1 phát triển theo đường gấp khúc tăng dần từ giá trị từ 25.6 x 10⁻⁶ đến 141.1 x 10⁻⁶. TS của mẫu cấp phối B2 phát triển theo đường gấp khúc tăng dần từ giá trị từ 0 đến 34.5 x 10⁻⁶. Tại thời điểm 3 ngày, giá trị TS của mẫu cấp phối B2 bằng 24.5% giá trị TS của mẫu cấp phối B1.

Thời điểm 3-28 ngày: TS của mẫu cấp phối B1 phát triển theo đường gấp khúc tăng dần từ giá trị từ 141.1 x 10⁻⁶ đến 261.2 x 10⁻⁶. TS của mẫu cấp phối B2 phát triển theo đường gấp khúc tăng dần từ giá trị từ 34.5 x 10⁻⁶ đến 155 x 10⁻⁶. Tại thời điểm 28 ngày, giá trị TS của mẫu cấp phối B2 bằng 59.3% giá trị TS của mẫu cấp phối B1.

TS của mẫu cấp phối B1 và B2 ở 3 ngày tuổi lần lượt đạt giá trị 54.0% và 22.5% so với thời điểm 28 ngày tuổi. Tại 28 ngày tuổi, TS của mẫu cấp phối B2 nhỏ hơn TS của mẫu cấp phối B1 (~60%).

3.2.2. Biến dạng co ngót tự sinh (AS)



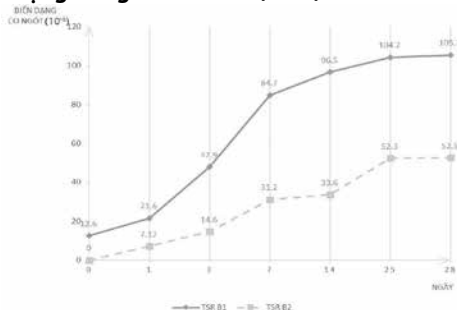
Hình 5. Biểu đồ biến dạng co ngót tự sinh của mẫu cấp phối B1 và B2.

Thời điểm 0-3 ngày: AS của mẫu cấp phối B1 phát triển theo đường gấp khúc tăng dần từ giá trị từ 9.7×10^{-6} đến 54.7×10^{-6} . AS của mẫu cấp phối B2 phát triển theo đường gấp khúc từ giá trị từ 0 đến 12.3×10^{-6} . Tại thời điểm 3 ngày, AS của mẫu cấp phối B2 bằng 22.5% AS của mẫu cấp phối B1.

Thời điểm 3-28 ngày: AS của mẫu cấp phối B1 phát triển theo đường gấp khúc tăng dần từ giá trị từ 54.7×10^{-6} đến 96.4×10^{-6} . AS của mẫu cấp phối B2 phát triển theo đường gấp khúc tăng dần từ giá trị từ 12.3×10^{-6} đến 55.3×10^{-6} . Tại thời điểm 28 ngày, AS của mẫu cấp phối B2 bằng 57.4% AS của mẫu cấp phối B1.

AS của mẫu cấp phối B1 và B2 ở 3 ngày tuổi lần lượt đạt giá trị 56.7% và 22.2% so với thời điểm 28 ngày tuổi. Tại 28 ngày tuổi, AS của mẫu cấp phối B2 nhỏ hơn AS của mẫu cấp phối B1 (~57%).

3.2.3. Biến dạng co ngót kiểm chế (TS-R)



Hình 6. Biểu đồ biến dạng co ngót kiểm chế của mẫu cấp phối B1 và B2.

Thời điểm 0-3 ngày: TS-R của mẫu cấp phối B1 phát triển theo đường gấp khúc tăng dần từ giá trị từ 12.6×10^{-6} đến 47.9×10^{-6} . TS-R của mẫu cấp phối B2 phát triển theo đường gấp khúc từ giá trị từ 0 đến 14.6×10^{-6} . Tại thời điểm 3 ngày, TS-R của mẫu cấp phối B2 bằng 30.5% TS-R của mẫu cấp phối B1.

Thời điểm 3-28 ngày: TS-R của mẫu cấp phối B1 phát triển theo đường gấp khúc tăng dần từ giá trị từ 47.9×10^{-6} đến 105.3×10^{-6} . TS-R của mẫu cấp phối B2 phát triển theo đường gấp khúc tăng dần từ giá trị từ 14.6×10^{-6} đến 52.5×10^{-6} . Tại thời điểm 28 ngày, TS-R của mẫu cấp phối B2 bằng 49.9% TS-R của mẫu cấp phối B1.

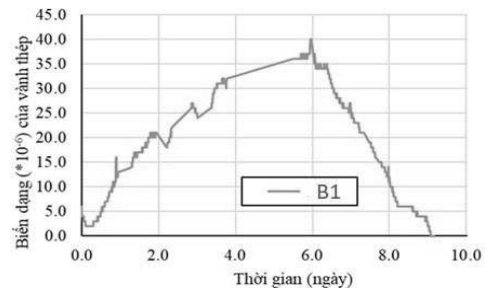
TS-R của mẫu cấp phối B1 và B2 ở 3 ngày tuổi lần lượt đạt giá trị 45.4% và 27.8% so với thời điểm 28 ngày tuổi. Tại 28 ngày tuổi, TS-R của mẫu cấp phối B2 nhỏ hơn TS-R của mẫu cấp phối B1 (~50%).

3.3. Kết quả đo biến dạng co ngót bằng Ring test

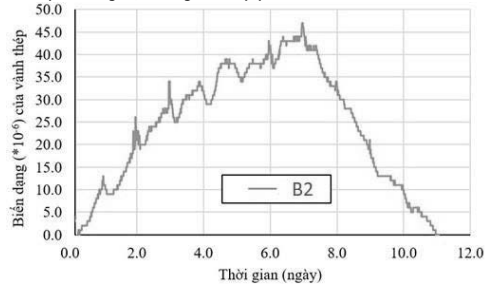
Biến dạng của vành thép của mẫu cấp phối B1 có chiều hướng tăng dần theo thời gian, trong đó có xuất hiện nhiều đoạn biến thiên do xuất hiện vết nứt nhỏ làm giãn bê tông, giảm áp lực nền vành thép, sau đó vành thép đạt biến dạng cực đại vào thời gian 6 ngày, tại đó xuất hiện vết nứt lớn, vết nứt to dần làm giảm biến dạng của vành thép. Cuối cùng, tại thời điểm 9 ngày xuất hiện vết nứt dọc xuyên mẫu 0.16 mm, biến dạng của vành thép trở về 0.

Biến dạng của vành thép của mẫu cấp phối B2 có chiều hướng tăng dần theo thời gian, trong đó có xuất hiện nhiều đoạn biến thiên do xuất hiện vết nứt nhỏ làm giãn bê tông, giảm áp lực nền vành thép, sau đó vành thép đạt biến dạng cực đại vào thời gian 7 ngày, tại đó xuất hiện vết nứt lớn, vết nứt to dần làm giảm biến dạng của vành thép. Cuối cùng, tại thời điểm 11 ngày xuất hiện vết nứt dọc xuyên mẫu 0.17 mm, biến dạng của vành thép trở về 0.

Giá trị biến dạng cực đại vành thép của mẫu cấp phối B2 lớn hơn mẫu cấp phối B1 là 18.75%, thời điểm vành thép biến dạng cực đại của mẫu cấp phối B2 dài hơn mẫu cấp phối B1 là 1 ngày, thời điểm biến dạng vành thép trở về 0 của mẫu cấp phối B2 dài hơn mẫu cấp phối B1 là 2 ngày.



Hình 7. Kết quả thí nghiệm Ring test cấp phối B1.



Hình 8. Kết quả thí nghiệm Ring test cấp phối B2.

4. KẾT LUẬN

Từ các kết quả thí nghiệm, có thể thấy những đặc điểm căn bản của hiện tượng co ngót ở bê tông có cấp độ bền khác nhau. Phần co ngót tự sinh và co ngót kiểm chế nhỏ hơn co ngót tổng ở cả 2 cấp phối B1 và B2. Phần co ngót tổng, co ngót tự sinh và co ngót kiểm chế tăng lên rõ rệt theo thời gian phát triển của bê tông.

Biến dạng do áp lực bê tông tác dụng lên vành thép của mẫu cấp phối B2 lớn hơn của mẫu cấp phối B1 là 17.5% theo kết quả thí nghiệm. Thời điểm biến dạng do áp lực bê tông tác dụng lên vành thép cực đại và thời điểm xuất hiện vết nứt dọc xuyên mẫu của mẫu cấp phối B2 hơn có thời gian lâu hơn mẫu cấp phối B1.

Bài báo đã cung cấp bộ số liệu về biến dạng co ngót của bê tông ở tuổi sớm, làm cơ sở cho việc tìm giải pháp cho phép hạn chế tình trạng nứt trên kết cấu bê tông và bê tông cốt thép.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Bộ Giáo dục và Đào tạo, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho đề tài khoa học cấp Bộ, mã số B2022-XDA-10

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Acker, P. A. and Ulm, F. J. (2001), "Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements", Nuclear Engineering and Design, vol. 203, no. 2-3, pp. 143-158.
- [2]. Karagüler, M. E. and Yatağan M. S. (2018), "Effect of Aggregate Size on the Restrained Shrinkage of the Concrete and Mortar", MOJ Civil Eng, 4 (1), 2018, pp. 16-22.
- [3]. Safiuddin, M., Kaish, A. B. M. A., Woon, Chin-Ong, Raman, Sudharshan. N. (2017), Early-Age Cracking in Concrete: Causes, Consequences, Remedial Measures, and Recommendations, Appl. Sci., 2018, 8, 1730.
- [4]. Tiêu chuẩn Việt Nam (2012), TCVN 4506:2012, Nước trộn bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật.
- [5]. Tiêu chuẩn Việt Nam (1993), TCVN 5276:1993, Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ lăng trụ và mô đun đàn hồi khi nén tĩnh.
- [6]. Tiêu chuẩn Việt Nam (1993), TCVN 3015:1993, Hỗn hợp bê tông nặng và bê tông nặng - Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử.
- [7]. American Society for Testing and Materials (2005), ASTM C 1581-04.05, Standard test method for metermining of cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage, 2005.