

ĐÁNH GIÁ RẠN NỨT BAN ĐẦU CỦA BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO SỬ DỤNG VÒNG THÍ NGHIỆM BỊ KIỂM CHẾ

NGUYỄN QUANG PHÚ¹⁾²⁾, JIANG LINHUA²⁾, LIU JIAPING³⁾; ĐỖ VIỆT THẮNG⁴⁾

1) Bộ môn Vật liệu Xây dựng - Khoa Công trình, trường Đại học Thủy lợi, Việt Nam

e-mail: phuvlxd@wru.edu.vn

2) Khoa Vật liệu Xây dựng, trường Đại học Hồ Hải,
Số 1, đường Xikang, TP. Nam Kinh, 210098, P. R. Trung Quốc

e-mail: lhjiang@hhu.edu.cn

3) Viện nghiên cứu vật liệu mới
Số 12, đường Beijing, TP. Nam Kinh, 210008, P. R. Trung Quốc

e-mail: ljp@cnsjck.cn

4) Phòng Kế hoạch Tài chính - Viện Thủy công

Tóm tắt: Bê tông tính năng cao (HPC) có những tính năng vượt trội về cường độ và tính bền so với bê tông thường. Các hỗn hợp bê tông tính năng cao luôn luôn được sản xuất với các tỷ lệ nước/chất kết dính thấp trong khoảng 0.2 đến 0.4 và có sự kết hợp cao với các thành phần hoạt tính pozzolan như silica fume (SF), fly ash (FA) và slag. Do đó nó không thể tránh khỏi sự thay đổi thể tích trong bê tông bởi hiện tượng co khô, tự co, phản ứng hóa học và sự thay đổi nhiệt độ. Biến dạng co ngót là một tính chất thường xuyên xảy ra đối với bê tông hiện trường và rạn nứt do co ngót, đặc biệt là rạn nứt sớm trong bê tông tính năng cao trở thành hiện tượng nổi cộm cần được xem xét. Bài báo đã đánh giá co ngót ban đầu của bê tông tính năng cao cho hai tỷ lệ nước/chất kết dính ($W/B = 0.22$ và 0.40) bằng cách sử dụng thí nghiệm vòng bị kiểm chế.

1 Đặt vấn đề

Vật liệu kết dính thay đổi thể tích là do sự thay đổi độ ẩm, thay đổi nhiệt độ và phản ứng hóa học, đó là kết quả của hiện tượng tự co, co khô và giãn nở nhiệt. Khi những sự thay đổi thể tích này bị kiểm chế bởi các kết cấu xung quanh công trình, ứng suất dư có thể sẽ phát triển bên trong vật liệu. Nếu ứng suất dư này vượt quá cường độ kháng nứt của bê tông, rạn nứt có thể xuất hiện. Nhiều năm qua, các kỹ sư đã cố gắng tìm kiếm những phương pháp đánh giá đơn giản mà nhạy bén và sát với các hỗn hợp bê tông đã có để đánh giá rạn nứt cho bê tông. Phương pháp ASTM C157-04^[1] thường dùng để xác định co ngót tự do của bê tông, mà co ngót tự do của bê tông thì không đủ để dự đoán khi nào rạn nứt xuất hiện. Hơn nữa, khả năng gây nên rạn nứt của bê tông có liên quan đến một vài nhân tố, như: độ lớn co ngót tự do, tốc độ co ngót, mô đun đàn hồi, độ bị kiểm chế, từ biến và độ bền đứt gãy của bê tông (Weiss et al., 2000)^[2].

Một vài các nhà nghiên cứu đã phát triển các quy trình thí nghiệm để dự đoán ảnh hưởng của các tính chất vật liệu đến khả năng co ngót rạn nứt của bê tông (Swamy and Stavrides, 1979; Carlson and Reading, 1998; Weigrink et al., 1996)^[3,4,5]. Những quy trình thí nghiệm này đã đánh giá ứng suất dư phát triển trong bê tông khi co ngót của bê tông bị kiểm chế. Ví dụ các thí nghiệm đánh giá bằng cách sử dụng vòng kiểm chế: “restrained ring test” (Grzybowski and Shah, 1990; Hossain and Weiss, 2004)^[6,7], thí nghiệm tuyến tính thụ động kiểm chế (Springenschmidt et al., 1985; Weiss et al., 1998)^[8,9] và thí nghiệm tuyến tính chủ động kiểm chế (Kovler, 1994; Toma et al., 1999; Altoubat and Lange, 2002)^[10,11,12].

Thí nghiệm vòng kiểm chế gần đây đã trở thành một phương pháp phổ biến để đánh giá co ngót rạn nứt của bê tông (Krause et al., 1995; AASHTO PP 34-89; Shah et al., 1992; Grzybowski 1989a; Lim et al., 1999)^[13,14,15,16,17]. Thí nghiệm bao gồm một vòng rỗng bê tông được đúc quanh một vòng thép. Khi vòng bê tông khô, do bê tông bị co ngót nên vòng bê tông đẩy vòng thép bị co vào. Vòng thép kiểm chế lại co ngót của bê tông và gây nên ứng suất kéo phát triển trong bê tông. Nếu ứng suất này đủ lớn, rạn nứt có thể sẽ xuất hiện trong bê tông.

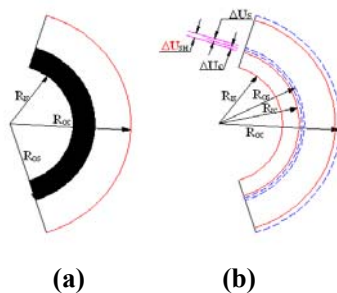
Sự phát triển ứng suất dư và rạn nứt trong vòng bê tông bị kiểm chế phụ thuộc vào điều kiện co khô của bê tông. Ứng suất trong tường vòng dày với điều kiện co khô đẳng hướng đạt giá trị lớn nhất tại vị trí bán kính trong và ứng suất là hàm số của r^2 (Dally and Riley, 1991)^[18], trong khi vòng bê tông co khô từ bề mặt ngoài vòng (không đẳng hướng) cho thấy rằng ứng suất dư lớn nhất ở tại điểm ngoài cùng của vòng bê

tông (Weiss and Shah, 2001)^[19]. Sự khác nhau này là rất quan trọng cho việc xuất hiện vết nứt, sự phát triển và lan truyền vết nứt. Thí nghiệm dùng sự bức xạ âm thanh cho thấy rằng, trong trường hợp co khô đẳng hướng, vết nứt bắt đầu xuất hiện tại nơi tiếp giáp giữa vòng bê tông và vòng thép (chu vi bên trong của vòng bê tông), trong khi đó trong các mẫu vòng bê tông co khô từ bề mặt ngoài của vòng thì vết nứt bắt đầu từ rìa ngoài và phát triển truyền vào phía trung tâm (Kim and Weiss, 2003; Hossain and Weiss, 2005)^[20, 21]. Vì vậy phương pháp phân tích cần được mô tả trường ứng suất cho sự mô phỏng khả năng phá hoại trong vòng bê tông. Bài báo này tập trung vào việc đánh giá sự phát triển ứng suất trong vòng bê tông co khô đẳng hướng (co khô từ trên và dưới của mẫu vòng) và bị kiểm chế bởi vòng thép, chỉ sử dụng các giá trị biến dạng trong vòng thép để tính toán ứng suất dư trong bê tông, và liên tục quan sát biến dạng phát triển trong vòng thép từ sau khi đúc mẫu đảm bảo việc có xét tới các ảnh hưởng của hiện tượng tự co ngót và co khô. Từ kết quả đó có thể cung cấp thông tin để đánh giá khả năng bị rạn nứt và thời gian bị rạn nứt ban đầu trong các mẫu vòng bê tông bị kiểm chế.

2 Ứng suất dư phát triển trong mẫu vòng bê tông với điều kiện co khô đẳng hướng

Weiss and Shah, 2002^[22]; Hossain and Weiss, 2003a^[23] đề nghị rằng các vòng bê tông cho phép co khô từ trên và dưới của mẫu. Như thế độ ẩm mất đi trở thành đẳng hướng dọc theo bán kính của các mẫu vòng bê tông. Do đó phân tích và tính toán ứng suất dư phát triển trong mẫu vòng bê tông bị kiểm chế là do sự co ngót khô theo hướng bán kính của mẫu vòng.

Sự kiểm chế từ vòng thép có thể được mô phỏng bằng cách chia tách vòng thép và vòng bê tông, dùng phương pháp co ngót thích hợp (“shrink-fit”). Vòng bê tông cho phép co một độ lớn ΔU_{SH} được cân bằng với độ co tạo ra bởi sự co ngót khô và tự co của bê tông (drying shrinkage và autogenous shrinkage). Khi bê tông co khô sẽ tạo ra một áp lực tác dụng vào bề mặt ngoài của vòng thép, áp lực này cân bằng với áp lực tác dụng vào bề mặt bên trong của vòng bê tông, nhưng ngược chiều. Áp lực được điều chỉnh tới khi vòng thép bị nén một giá trị ΔU_{Steel} và vòng bê tông bị kéo giãn là $\Delta U_{concrete}$ để bù lại cho phần co ngót như thể hiện trong hình 1 dưới đây.



Hình 1 Mô phỏng hình học hiện tượng co ngót trong mẫu vòng bê tông

(a) Trước khi bê tông xuất hiện co ngót; (b) Di chuyển sự kiểm chế và cho phép bê tông co ngót

Dally và Riley (1991)^[18] cung cấp cách giải quyết cho sự dịch chuyển dọc theo bán kính của vòng trụ rỗng chịu áp lực bên ngoài đẳng hướng có thể dùng để mô tả vòng thép. Khi biến dạng hướng vòng trong vòng thép có thể được tính toán tách rời bởi các bán kính của vòng thép (Weiss et al. 2000)^[2], áp lực dư thực tế tại bề mặt ($p_{Residual}$) được tính toán như là áp lực yêu cầu gây nên biến dạng mà cân bằng với biến dạng đo được trong vòng thép và được thể hiện ở công thức 1 (Weiss et al. 2000 and Weiss and Furgeson 2001)^[24].

$$p_{Residual}(t) = -\epsilon_{steel}(t) \cdot E_s \cdot \frac{R_{OS}^2 - R_{IS}^2}{2R_{OS}^2} \quad (1)$$

trong đó: $\epsilon_{steel}(t)$ là biến dạng trong thép có thể nhận được bằng việc sử dụng đầu đo biến dạng được gắn vào bề mặt trong của vòng thép sử dụng hệ thống máy thu nhận dữ liệu (data acquisition system); E_s là mô đun đàn hồi của thép; R_{OS} và R_{IS} tương ứng là bán kính ngoài và trong của vòng thép.

Áp lực đó tác dụng lên vòng thép và liên quan tới áp lực bên trong tác dụng lên vòng bê tông, kết quả là sự phân bố ứng suất trong vòng bê tông có thể được xác định theo công thức 2 (Hossain and Weiss, 2003a; Timoshenko and Goodier, 1987)^[23, 25]:

$$\sigma_{\theta}(r) = P_{\text{Residual}} \cdot \frac{R^2_{OS}}{R^2_{OC} - R^2_{OS}} \left(1 + \frac{R^2_{OC}}{r^2} \right) \Rightarrow \sigma_{\theta}(r) = -\varepsilon_{\text{steel}}(t) \cdot E_s \cdot \frac{R^2_{OS} - R^2_{IS}}{2(R^2_{OC} - R^2_{OS})} \left(1 + \frac{R^2_{OC}}{r^2} \right) \quad (2)$$

trong đó: R_{OC} và R_{IC} tương ứng là bán kính ngoài và trong của vòng bê tông.

3 Xác định sự phát triển của ứng suất dư và rạn nứt trong các mẫu vòng bị kiểm chế

3.1 Vật liệu dùng trong thí nghiệm

3.1.1. Xi măng

Xi măng Pooclang sản xuất từ nhà máy Jiangnan - Nam Kinh - Trung Quốc. Cường độ nén xác định theo tiêu chuẩn GB/T 17671-1999^[26] đạt tại 7 ngày và 28 ngày tương ứng là 49.7 MPa và 60.1 MPa. Thành phần hóa học và vật lý của xi măng được thể hiện ở bảng 1.

Bảng 1 Thành phần hóa học và vật lý của xi măng

Ký hiệu	Thành phần hoá học chính, (%)							Khối lượng riêng (g/cm^3)	Diện tích bề mặt (m^2/kg)
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	SO_3	Loss		
C	20.60	5.03	64.11	1.46	4.38	1.72	1.18	3.15	450

3.1.2. Phụ gia khoáng

Phụ gia khoáng được sử dụng cho hỗn hợp bê tông bao gồm Silica fume (SF), Fly ash (FA), and Slag. Thành phần hóa học và vật lý của phụ gia khoáng được thể hiện ở bảng 2.

Bảng 2 Thành phần hóa học và vật lý của Silica fume, Fly ash, and Slag

Đại lượng	Silica fume	Fly ash	Slag
SiO_2 (%)	93.15	49.39	33.12
Al_2O_3 (%)	0.97	33.36	11.80
Fe_2O_3 (%)	1.01	4.92	1.17
CaO (%)	0.43	4.13	34.95
MgO (%)	0.88	0.85	10.75
SO_3 (%)	0.5	1.96	0.69
Loss (%)	1.50	2.49	1.23
Khối lượng riêng (g/cm^3)	2.10	2.20	2.89
Diện tích bề mặt (m^2/kg)	24000	615	439

3.1.3. Cát liệu mịn (cát)

Cát tự nhiên có cấp phối tốt, độ sạch đạt yêu cầu; các tính chất của cát được thể hiện ở bảng 3 dưới đây:

Bảng 3 Các tính chất của cát

Khối lượng riêng (g/cm^3)	Khối lượng đơn vị (g/cm^3)	Độ ẩm (%)	Mô đun độ lớn
2.66	1.65	1.5	2.92

3.1.4 Cát liệu thô (đá)

Đá dăm nghiền được dùng trong thí nghiệm bao gồm: 60% đá cỡ (10-20) mm và 40% đá cỡ (5-10) mm; các tính chất của đá được thể hiện ở bảng 4.

Bảng 4 Các tính chất của đá

Khối lượng riêng (g/cm^3)	Khối lượng đơn vị (g/cm^3)	Độ ẩm (%)
2.76	1.70	0.50

3.1.5. Phụ gia hoá học

Phụ gia giảm nước bậc cao (high-range water-reducing admixture, HRWR) ký hiệu PCA (I) được dùng cho tất cả các mẫu thí nghiệm; các tính chất của HRWR được thể hiện ở bảng 5.

Bảng 5 Các tính chất của phụ gia giảm nước

Tên	Thành phần chính	Màu	Khối lượng riêng (g/cm^3)
PCA (I)	Poly-naphthalene sulfonates	Dark brown	1.04

Tất cả các loại vật liệu và phụ gia dùng cho thí nghiệm đều được cung cấp tại phòng thí nghiệm của Viện nghiên cứu Vật liệu mới, thành phố Nam Kinh, tỉnh Giang Tô - Trung Quốc (Jiangsu Bote Advanced Materials - SBT).

3.2. Phương pháp và kết quả thí nghiệm mẫu bê tông

Các mẫu thí nghiệm được thực hiện với hai tỷ lệ nước/chất kết dính: $W/B = 0.22$ và 0.40 . Ba loại phụ gia khoáng được dùng trong thí nghiệm như sau: 15% SF, 25% FA cho mẫu $W/B = 0.22$ và 25% FA, 25% Slag cho mẫu $W/B = 0.40$. Thành phần hỗn hợp bê tông được thể hiện ở bảng 6.

Bảng 6 Thành phần hỗn hợp bê tông

W/B	FA (kg/m^3)	SF (kg/m^3)	Slag (kg/m^3)	Xi măng (kg/m^3)	Đá dăm (kg/m^3)	Cát (kg/m^3)	Nước (kg/m^3)	HRWR (kg/m^3)
0.40	100	0	100	200	1110	740	160	2.80
0.22	155	93	0	372	1150	630	136.4	15.5

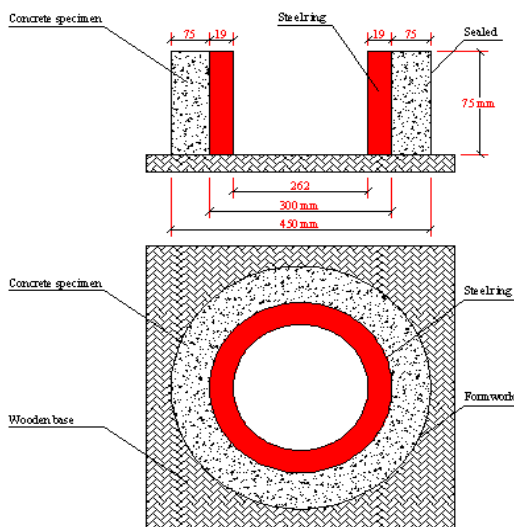
3.3 Kết quả thí nghiệm trong các mẫu vòng

Trong phần này nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày vòng thép và tường bê tông đến ứng suất dư trong các mẫu vòng bị kiểm chế trong điều kiện bê tông co khô từ trên và dưới của mẫu vòng. Biến dạng phát triển trong vòng thép được xác định bằng máy đo, ứng suất dư kháng nứt lớn nhất được tính toán từ công thức 2, từ đó thời gian mẫu vòng bê tông bị nứt sẽ được xác định.

Các thông số chiều dày vòng thép và vòng bê tông cho các thí nghiệm được thể hiện ở bảng 7. Hình vẽ biểu hiện mẫu vòng bê tông được thể hiện trên hình 2.

Bảng 7 Kích thước chiều dày vòng thép và tường bê tông cho các trường hợp tính toán

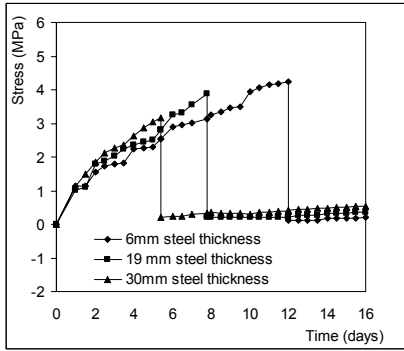
	Tổ 1			Tổ 2		
Chiều dày thép (mm)	6	19	30	19	19	19
Chiều dày bê tông (mm)	75	75	75	37.5	75	112.5



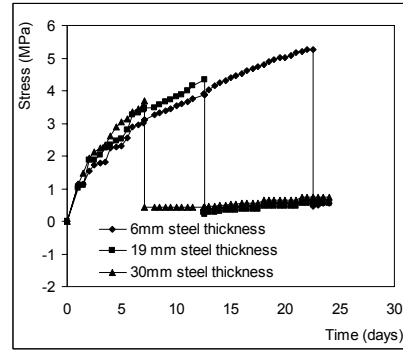
Hình 2 Kích thước hình học của các mẫu vòng bê tông

Trong tất cả các trường hợp tính toán, các mẫu vòng bê tông có kích thước đường kính trong là 300 mm và chiều cao 75 mm. Trong tổ 1, kích thước tường bê tông cố định dày 75 mm, còn các chiều dày tường thép thay đổi (6 mm, 19 mm, và 30 mm, tương ứng). Trong tổ 2, kích thước tường thép cố định dày 19 mm, còn các chiều dày tường bê tông thay đổi (37.5 mm, 75 mm, và 112.5 mm, tương ứng).

Kết quả tính toán sự phát triển ứng suất trong bê tông của các mẫu vòng bị kiểm chế được thể hiện ở hình 3 (tổ 1) và hình 4 (tổ 2).

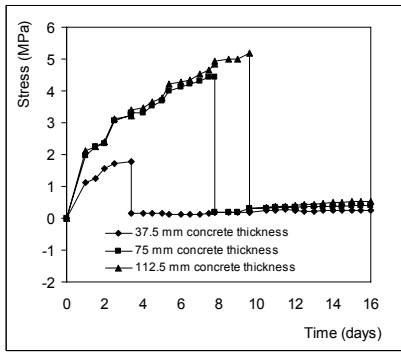


(a) W/B = 0.22

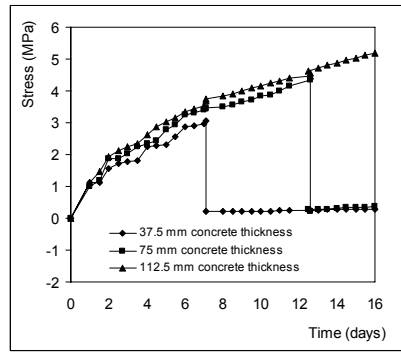


(b) W/B = 0.40

Hình 3 Ứng suất phát triển trong các mẫu vòng bị kiềm chế (tổ 1)



(a) W/B = 0.22



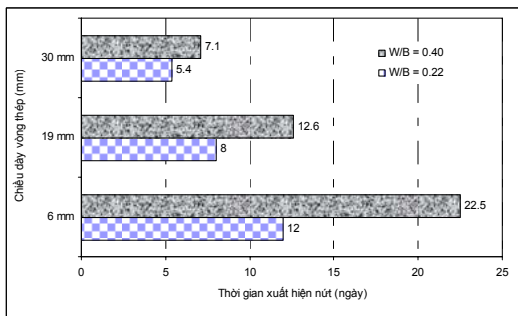
(b) W/B = 0.40

Hình 4 Ứng suất phát triển trong các mẫu vòng bị kiềm chế (tổ 2)

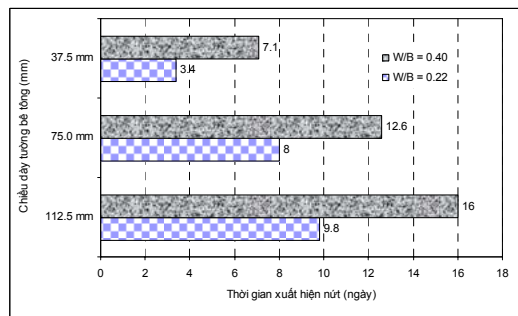
Khi ứng suất trong bê tông giảm một cách đột biến (có thể giảm tới 0), tại thời điểm đó bắt đầu xuất hiện vết nứt trong bê tông. Qua đó xác định được thời gian bắt đầu xuất hiện vết nứt cho các mẫu vòng bê tông (kể từ khi đúc mẫu đến khi bắt đầu xuất hiện vết nứt). Kết quả cho ở bảng 8 và hình vẽ 5 dưới đây:

Bảng 8 Thời gian bắt đầu xuất hiện vết nứt trong các mẫu vòng bê tông bị kiềm chế, (ngày)

	Tổ 1			Tổ 2		
Chiều dày thép (mm)	6	19	30	19	19	19
Chiều dày bê tông (mm)	75	75	75	37.5	75	112.5
Thời gian xuất hiện vết nứt (ngày) (W/B = 0.22)	12.0	8.0	5.4	3.4	8.0	9.8
Thời gian xuất hiện vết nứt (ngày) (W/B = 0.40)	22.5	12.6	7.1	7.1	12.6	16.0



(a) Tổ 1



(b) Tổ 2

Hình 5 Thời gian xuất hiện vết nứt trong các mẫu vòng bê tông bị kiềm chế, (ngày)

4 Kết luận

Với cùng kích thước tường bê tông, những mẫu vòng có chiều dày vòng thép dày hơn sẽ có độ kiềm chế cao hơn và dẫn đến áp lực tiếp giáp giữa bề mặt bê tông và thép cao hơn; ứng suất phát triển trong bê tông sẽ cao hơn và bê tông sẽ bị rạn nứt sớm hơn. Trong trường hợp cùng chiều dày vòng thép chỉ ra rằng những mẫu vòng bê tông dày hơn, rạn nứt xuất hiện muộn hơn.

Từ kết quả cho ở bảng 8 và hình vẽ 3, 4 nhận thấy rằng, những mẫu bê tông có tỷ lệ W/B nhỏ, vết nứt xuất hiện sớm hơn rất nhiều và vùng phát triển của các vết nứt gần bề mặt trong của vòng bê tông.

Từ kết quả biến dạng trung bình của vòng thép đo được bằng các đầu đo biến dạng (strain gages) và máy thu nhận dữ liệu (data requisition system), chúng ta có thể sử dụng làm kết quả đầu vào để mô phỏng mẫu vòng theo phương pháp phần tử hữu hạn (finite element modeling) phân tích rạn nứt của bê tông trong các mẫu vòng bị kiềm chế.

Ngoài ra, với kết quả dự đoán rạn nứt trong bê tông của các mẫu vòng bị kiềm chế, chúng ta có thể áp dụng cho các công trình bê tông thực tế và kết nối với phần mềm sử dụng phân tích theo phương pháp phần tử hữu hạn (ANSYS) để kết quả đánh giá rạn nứt của bê tông được chính xác hơn, nhanh chóng và đơn giản hơn.

Tài liệu tham khảo

1. American Society for Testing and Materials (ASTM) Committee C09. (2003). Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete (ASTM C157/C 157M-03). West Conshohocken: ASTM International.
2. Weiss, W. J., Yang, W., and Shah, S. P., (2000). "Influence of Specimen Size and Geometry on Shrinkage Cracking", *Journal of Engineering Mechanics Div., ASCE*, 126(1), pp. 93-101
3. Swamy, R. N., and Stavrides, H., (1979), "Influence of Fiber Reinforced on Restrained Shrinkage Cracking", *ACI Journal*, Vol. 76, No. 3, pp. 443-460.
4. Carlson, R. W. and Reading, T. J., (1988). "Model Study of Shrinkage Cracking in Concrete Building Walls." *ACI Structural Journal*, Vol. 85, No. 4, Jul.-Aug., pp. 395-404.
5. Weigrink, K., Mari kunte, S., Shah, S.P. (1996). "Shrinkage Cracking of High-Strength Concrete," *ACI Journal*, Vol.93, No.5, pp.409-415
6. Grzybowski, M., and Shah S., P., (1990). "Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No.2, March/April, pp. 138-148.
7. Hossain A. B, Weiss J, (2004). "Assessing Residual Stress Development and Stress Relaxation in Restrained Concrete Ring Specimens", Vol. 26, Issue 5, July, pp. 531-540.
8. Springenschmidt, R., Geirlinger, E., and Kermozycki, W., (1985). "Thermal Stress in Mass Concrete: A new Testing Method and the Influence of Different Cements", *Proceeding of the 15th International Congress for Large Dams, Lausanne, R4*, pp. 57-72.
9. Weiss, W. J., Yang, W., and Shah, S. P., (1998). "Shrinkage Cracking of Restrained Concrete Slabs," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No. 7, pp. 765-774.
10. Kovler, K., (1994). "Testing System for Determining the Mechanical Behavior of Early Age Concrete Under Restrained and free Uniaxial Shrinkage", *Materials and Structures, RILEM, London, U.K.*, Vol. 27 (170), pp. 324-330.
11. Toma, G., Pigeon, M., Marchand, J., and Bercelo, L., (1999). "Early Age Autogenous Restrained Shrinkage: Stress Build Up and Relaxation:, Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology, eds. Persson, B., and Fagerlund, G., pp. 61-72.
12. Altoubat, S. A., and Lange, D., (2002). "Grip-Specimen Interaction in Uniaxial Restrained Test", *ACI-SP 206, "Concrete: Material Science to Application: A Tribute to Surendra P. Shah"*, Detroit, pp. 189-204
13. Krause, P. D., Rogalla, E. A., Sherman, M. R., McDonald, D. B., Osborn, A. E. N., and Pfeifer, D. W., (1995). "Transverse Cracking in Newly Constructed Bridge Decks", *NCHRP 380, Project 12.37*.
14. AASHTO PP34-89 (1989). "Standard Practice for Estimating the Crack Tendency of Concrete," *AASHTO Provisional Standards*, pp. 179-182.
15. Shah, S. P., Karaguler, M. E., and Sarigaphuti, M., (1992). Effects of Shrinkage Reducing Admixture on Restrained Shrinkage Cracking of Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 3, pp. 88-90
16. Grzybowski, M., (1989a). "Determination of Crack Arresting Properties of Fiber Reinforced Cementitious Composites," *Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden*.

17. Lim, Y. M., H. C. Wu and V. C. Li (1999). "development of Flexural Composite Properties and Dry Shrinkage Behavior of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites at Early Age", Journal of Materials, American Concrete Institute, Vol. 96, No. 1, pp. 20-26.
18. Dally, J. W., and Riley, W. F., "Experimental Stress Analysis, Third Edition", McGraw-Hill, Inc, 1991.
19. Weiss, W. J., Shah, S. P., (2001). "Restrained Shrinkage Cracking: the Role of Shrinkage Reducing Admixtures and Specimen Geometry", RILEM International Conference on Early Age Cracking in Cementitious System (EAC'01), eds. K., Kovler and A. Bentur, Haifa Israel, pp. 145-158.
20. Kim, B., and Weiss, W. J., (2003). "Using Acoustic Emission to Quantify Damage in Restrained Fiber Reinforced Cement Mortars", Cement and Concrete Research, Feb., Vol. 33, No. 2, pp. 207-214.
21. Hossain, A. B., and Weiss, W. J., (2005). "The Role of Specimen Geometry and Boundary Conditions on Stress Development and Cracking in the Restrained Ring Test", Cement and Concrete Research Journal
22. Weiss, W. J., Shah, S. P., (2002). "Restrained Shrinkage Cracking: the Role of Shrinkage Reducing Admixtures and Specimen Geometry", Materials and Structures, Vol. 35, No. 246, pp. 85-91.
23. Hossain, A. B., and Weiss, J., (2003a), "Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens", Cement and Concrete Composites, Vol. 25.
24. Weiss, W. J., and Furgeson, S., (2001). "Restrained Shrinkage Testing: The Impact of Specimen Geometry on Quality Control Testing for Material Performance Assessment," Creep, Shrinkage, and Durability Mechanic of Concrete and other Quasi-Brittle Materials, ed., Ulm, F. J., Bazant, Z. P., and Wittman, F. H., Elsevier, August 22-24 Cambridge MA, pp. 645-651.
25. Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N., (1987). "Theory of elasticity," McGraw-Hill Inc
26. China Building Materials Industries Association (CBMIA). (1999). Method of Testing Cements - Determination of Strength (GB/T 17671-1999). Beijing: Standards Press of China. (in Chinese)

ASSESS EARLY-AGE CRACKING OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE USING THE RESTRAINED RING TEST

Abstract: High performance concrete (HPC) has specific performance advantages over conventional concrete in strength and durability. HPC mixtures are always produced with water/binder (W/B) ratios in the range of 0.2 - 0.4, and incorporate with highly-active pozzolans such as silica fume (SF), fly ash (FA), and slag; so it cannot avoid the volume changes occur in concrete as a result of drying, self-desiccation, chemical reactions, and temperature change. Shrinkage deformation is always one of the frequent properties in the research field-concrete and the crack phenomenon due to shrinkage has become prominent nowadays in the HPC engineering, particularly early-age cracking is considered. This paper assessed early-age cracking of HPC for two mixtures (W/B = 0.22 and 0.40) by using the restrained ring test.

Keywords: High performance concrete (HPC); shrinkage; early-age cracking, restrained ring test.