



ẢNH HƯỞNG CỦA SỢI THÉP PHÂN TÁN ĐẾN KHẢ NĂNG CHỐNG NÚT DO CO NGÓT CỦA BÊ TÔNG CHẤT LƯỢNG SIÊU CAO

Nguyễn Công Thắng¹, Phạm Hữu Hanh², Nguyễn Văn Tuấn³

Tóm tắt: Biến dạng co ngót trong bê tông là sự thay đổi về kích thước hoặc thể tích của bê tông trong quá trình rắn chắc, quá trình này xảy ra ngay cả khi bê tông không chịu tác động của tải trọng cơ học. Hiện tượng này sẽ gây ra ứng suất kéo và khi ứng suất kéo này vượt quá khả năng chịu kéo của bê tông thì có thể gây ra hiện tượng nứt bê tông. Sợi thép phân tán được sử dụng để tăng khả năng chống nứt do co ngót của bê tông đồng thời giảm sự phát triển và mở rộng vết nứt. Bài báo này trình bày những kết quả nghiên cứu ban đầu về vai trò của sợi thép phân tán đến các ứng xử của bê tông chất lượng siêu cao khi co ngót của mẫu bị hạn chế bằng thí nghiệm vòng hạn chế theo tiêu chuẩn ASTM C1581-2004. Kết quả chỉ ra rằng việc sử dụng sợi thép phân tán không những nâng cao được khả năng chống nứt do co ngót mà còn hạn chế sự phát triển vết nứt trong bê tông chất lượng siêu cao.

Từ khóa: Bê tông chất lượng siêu cao; sợi thép phân tán; co ngót hạn chế; nứt.

Summary: Shrinkage of Concrete causes a change in size and volume of concrete. This process occurs even if concrete is not effected by mechanical loads. This phenomenon causes a tensile stress and once the tensile stress exceeds the tensile strength of concrete, cracks may be expected to occur. The incorporation of fibers has a potential to delay the age at cracking and to reduce the crack width development. This paper presents the preliminary results of effects of steel fibers on resistance of Ultra-High Performance Concrete to cracking due to shrinkage. The Ring Test in accordance to ASTM C1581-2004 was used to determine the age at cracking and tensile stress behavior of concrete under restrained shrinkage. The results indicate that the addition of steel fibers not only improves resistance of concrete to cracking due to shrinkage, but also decreases the development of cracks in Ultra-High Performance Concrete.

Keywords: Ultra-high performance concrete; steel fiber; restrained shrinkage; cracking.

Nhận ngày 13/3/2015, chỉnh sửa ngày 28/3/2015, chấp nhận đăng 30/6/2015



1. Giới thiệu

Bê tông chất lượng siêu cao (BTCLSC) là loại bê tông có độ chảy cao, cường độ nén rất cao (thường lớn hơn 150 MPa), cường độ uốn lớn (khi sử dụng cốt sợi), độ thấm thấp và độ bền cao [1]. Sự ra đời của BTCLSC đã đánh dấu một bước ngoặt trong công nghệ bê tông với các tính chất đặc biệt về cường độ, độ bền và độ ổn định thể tích. Các nghiên cứu phát triển và ứng dụng loại bê tông này được bắt đầu từ năm 90 của thế kỷ 20 và kể từ đó loại bê tông này đã được áp dụng ở một số nước phát triển như dùng để chế tạo các cấu kiện bê tông đúc sẵn, dầm cầu đúc sẵn, tấm lát mặt cầu, chế tạo các silô....

Vật liệu để chế tạo BTCLSC thông thường bao gồm cát quắc với kích thước khoảng 100-600μm, xi măng, silica fume, nước và phụ gia siêu dẻo. Tuy nhiên, trong BTCLSC lượng dùng chất kết dính tương đối cao, khoảng 900-1000 kg/m³, lượng silica fume thường là 150-250 kg/m³ (10-30% so với khối lượng xi măng) [2] với tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) rất thấp, (thường < 0.25) [3, 4] và điều này đã ảnh hưởng rất lớn đến tính chất của BTCLSC như độ co ngót lớn... Biến dạng co ngót của bê tông là một trong những vấn đề đã được nghiên cứu rộng rãi trên thế giới. Biến dạng co ngót của bê tông diễn ra rất phức tạp, hiện tượng

¹NCS, Khoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng. E-mail: keulas115@gmail.com.

²PGS. TS, Khoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng.

³TS, Khoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng.

này làm phát sinh ứng suất kéo và có thể gây hiện tượng nứt kết cấu, ảnh hưởng xấu đến các tính chất của bê tông như cường độ, tính thấm, độ bền...[5, 6]. Có rất nhiều phương pháp khác nhau để xác định co ngót của bê tông, tuy nhiên với phương pháp xác định co tự do của bê tông sẽ rất khó đánh giá về quá trình nứt của bê tông. Để đánh giá vấn đề nứt do co ngót trong bê tông hiện nay thường sử dụng phương pháp khác nhau như: sử dụng vòng hạn chế [7-10], phương pháp thanh vữa và được hạn chế hai đầu dọc theo trục của thanh vữa [11], phương pháp tấm [12]...

Bài báo này trình bày những kết quả thí nghiệm ban đầu về sự ảnh hưởng của sợi thép phân tán đến khả năng hạn chế nứt, sự truyền ứng suất qua vết nứt và giảm sự phát triển vết nứt do co ngót hạn chế của BTCLSC bằng phương pháp vòng hạn chế trên cơ sở tiêu chuẩn ASTM C1581-2004.

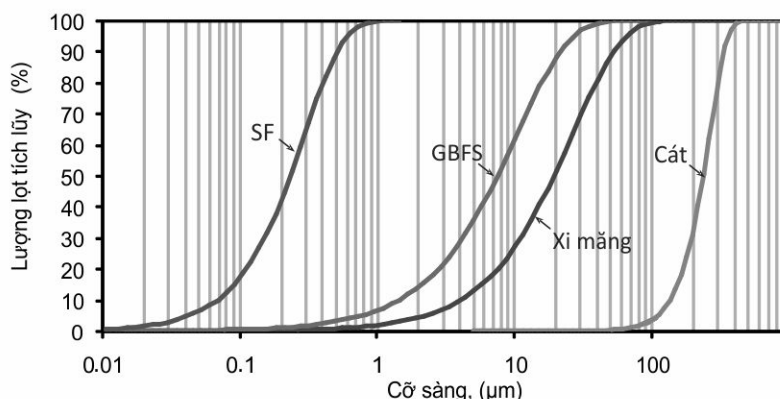
2. Vật liệu chế tạo và phương pháp nghiên cứu

2.1 Vật liệu chế tạo

Vật liệu được dùng trong nghiên cứu gồm: Xi măng Pooclang (XM) Nghi Sơn PC40 có các tính chất cơ lý trình bày ở Bảng 1, với đường kính hạt trung bình 11.4 μ m; Silica fume (SF) dạng hạt rời của hãng Elkem, có đường kính hạt trung bình 0.15 μ m, hàm lượng SiO₂ là 92.3%, chỉ số hoạt tính với xi măng là 113.5%; cốt liệu là cát quắc có đường kính cỡ hạt từ 100-600 μ m, độ rỗng khi chưa lèn chặt 45%; Sợi thép sử dụng có chiều dài 13mm đường kính 0.2mm và cường độ kéo đứt là 2750MPa; Xi lò cao hạt hóa (GBFS) được nghiền mịn với đường kính trung bình 7.2 μ m, hàm lượng các oxit (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃) là 47.6%; phụ gia siêu dẻo (SD) sử dụng của hãng BASF có gốc polycarboxylate. Thành phần hạt của các vật liệu này được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ laze, kết quả thể hiện ở Hình 1.

Bảng 1. Tính chất cơ lý của xi măng

Tính chất	Đơn vị	Giá trị	Quy phạm	Phương pháp thí nghiệm
Độ mịn Lượng sót sàng N°009 Độ mịn Blaine	% cm ² /g	0.6 3870	≤ 10 ≥ 2800	TCVN 4030-2003
Độ dẻo tiêu chuẩn	%	29.5	-	TCVN 6017-2012
Giới hạn bền nén Sau 3 ngày Sau 28 ngày	MPa	29.8 52.2	≥ 21.0 ≥ 40.0	TCVN 6016-2012



Hình 1. Thành phần hạt của vật liệu sử dụng trong nghiên cứu

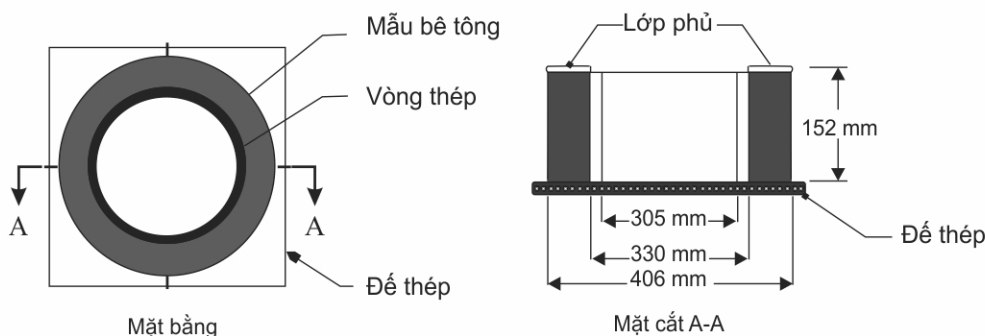
2.2 Phương pháp nghiên cứu

Trong BTCLC, việc xác định cường độ nén theo tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN3118-1993) là rất khó bởi vì cường độ nén của bê tông rất cao. Một số nghiên cứu [13, 14], đã khẳng định rằng, ảnh hưởng của kích thước khuôn đến cường độ nén của BTCLSC là không đáng kể do sự đồng nhất cao về cấu tạo của loại bê tông này. Do vậy, trong nghiên cứu này cường độ nén của bê tông được xác định với mẫu có kích thước 40×40×40 mm³.

Thí nghiệm xác định thời điểm nứt do co ngót của BTCLSC được xác định bằng thí nghiệm vòng hạn chế theo tiêu chuẩn ASTM C1581-2004, mô hình thí nghiệm được thể hiện ở Hình 2. Mẫu thí nghiệm là vòng tròn bê tông có kích thước: chiều dày 38mm, đường kính trong 330 mm, đường kính ngoài 406 mm

chiều cao 152 mm được đổ xung quanh vòng thép có chiều dày 12.5 mm. Các mẫu bê tông sau khi chế tạo 24 giờ được tháo khuôn và chuyển vào buồng khí hậu ($t=27\pm2^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=50\pm4\%$) để tiến hành thí nghiệm và thời điểm này được xác định là thời điểm bắt đầu ($t=0$) xác biến dạng của vòng thép. Bề mặt trên của mẫu bê tông được phủ một lớp silicon để đảm bảo sự bay hơi nước diễn ra theo bề mặt xung quanh của mẫu thí nghiệm.

Trong phương pháp thí nghiệm nứt do co ngót hạn chế bằng phương pháp vòng hạn chế thì vòng tròn bê tông xảy ra biến dạng co ngót sẽ tạo ra áp lực nén lên vòng thép, áp lực này gây ra biến dạng của vòng thép. Biến dạng co ngót của vòng bê tông càng lớn thì biến dạng trên vòng thép càng lớn. Mức độ biến dạng của vòng thép được xác định thông qua tenzomet điện trở (strain gages) gắn vào mặt trong của vòng thép. Biến dạng co ngót của vòng bê tông bị ngăn cản bởi vòng thép sẽ tạo ra ứng suất kéo trong vòng bê tông, khi biến dạng co ngót đạt đến một giá trị nhất định sẽ dẫn đến ứng suất kéo trong vòng bê tông vượt quá khả năng chịu kéo của bê tông, lúc này sẽ gây ra nứt trên kết cấu bê tông. Khi đó, áp lực lên vòng thép sẽ giảm đi dẫn đến biến dạng của vòng thép đo qua các tenzomet điện trở cũng giảm xuống. Căn cứ vào kết quả đo cho phép ta xác định được thời điểm xuất hiện vết nứt trên kết cấu bê tông do biến dạng co ngót và áp lực của bê tông tác dụng lên vòng thép.



Hình 2. Mô hình thí nghiệm co ngót hạn chế của BTCLSC



3. Cấp phối sử dụng và quy trình thí nghiệm bê tông chất lượng siêu cao

3.1 Cấp phối bê tông chất lượng siêu cao

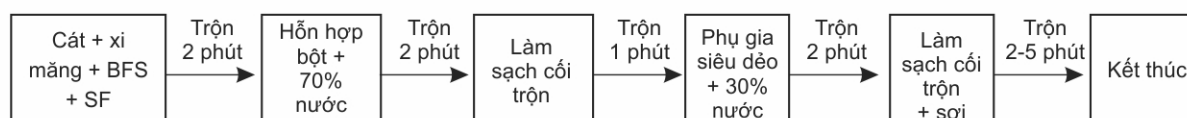
Để tài tiến hành xác định cường độ nén và co ngót hạn chế với cấp phối bê tông sử dụng trong nghiên cứu được cho ở Bảng 2. Trong nghiên cứu này, chất kết dính (CKD) bao gồm xi măng, GBFS và SF. Trong đó, lượng GBFS, SF và SD được tính theo khối lượng của CKD và khối lượng sợi thép được tính theo thể tích hỗn hợp bê tông.

Bảng 2. Tỷ lệ thành phần vật liệu sử dụng trong nghiên cứu

STT	N/CKD	Cát/CKD	BFS, %	SF, %	SD, %	Sợi thép, %
1	0.15	0.9	30	10	1.1	0
2	0.15	0.9	30	10	1.1	1
3	0.15	0.9	30	10	1.1	2
4	0.15	0.9	30	10	1.1	3

3.2 Quy trình thí nghiệm

Máy trộn sử dụng trong nghiên cứu có dung tích 20 lít. Quy trình trộn hỗn hợp bê tông được trình bày ở Hình 3. Mẫu xác định cường độ nén được đúc trong khuôn có kích thước $40\times40\times160\text{mm}^3$ trên cơ sở TCVN 3121-2003, sau đó được dưỡng hộ ở điều kiện tiêu chuẩn ($t=27\pm2^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}\geq98\%$) đến tuổi cần thí nghiệm. Cường độ nén của bê tông được xác định ở các tuổi 3, 7, 28 ngày. Thí nghiệm co ngót hạn chế của mẫu BTCLSC được xác định đến tuổi 28 ngày.



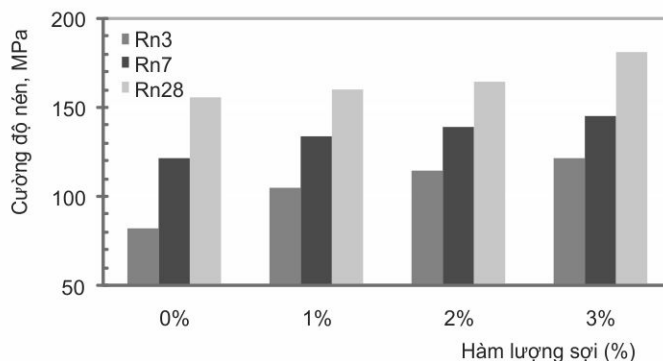
Hình 3. Quy trình trộn hỗn hợp BTCLSC



4. Kết quả và bàn luận

4.1 Ảnh hưởng của lượng dùng sợi thép đến cường độ nén của bê tông chất lượng siêu cao

Hình 4 thể hiện sự ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến cường độ nén của BTCLSC. Kết quả thí nghiệm cho thấy, việc sử dụng sợi thép đã cải thiện cường độ nén của BTCLSC. Với cấp phối đối chứng (không sử dụng sợi thép) cường độ nén của bê tông ở tuổi 28 ngày đạt 156MPa. Khi tăng hàm lượng sợi lên đến 2% thì cường độ nén tăng lên không nhiều, cường độ nén ở tuổi 28 ngày tăng 5% so với mẫu đối chứng. Tuy nhiên, khi hàm lượng sợi tăng lên 3% thì mức độ tăng cường độ nén khá lớn, cường độ nén ở tuổi 28 ngày tăng 16% so với cường độ nén của mẫu bê tông không sử dụng sợi (cấp phối đối chứng). Ở điều kiện dưỡng hộ tiêu chuẩn, tốc độ phát triển cường độ nén ở tuổi ban đầu khá chậm (ở 3 ngày và 7 ngày), cường độ nén ở 28 ngày đều đạt trên 150MPa. Cường độ nén ở tuổi 28 ngày đạt giá trị lớn nhất khi sử dụng 3% sợi tương ứng là 180MPa.



Hình 4. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến cường độ nén của BTCLSC

4.2 Ảnh hưởng của sợi thép phân tán đến khả năng chống nứt do co ngót của bê tông chất lượng siêu cao

Thí nghiệm xác định thời điểm nứt do co ngót của BTCLSC được xác định bằng thí nghiệm vòng hạn chế, sơ đồ thí nghiệm được thể hiện ở Hình 5. Kết quả thí nghiệm về biến dạng của vòng thép do co ngót của vòng bê tông tạo ra được thể hiện trên Hình 6. Kết quả thí nghiệm cho thấy:

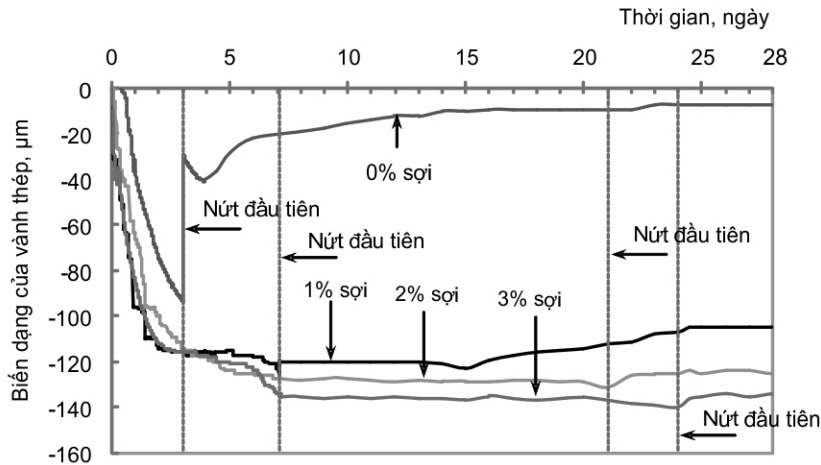


Hình 5. Mẫu thí nghiệm co ngót bị hạn chế của BTCLSC

Với mẫu BTCLSC khi không sử dụng cốt sợi thép, thời gian xuất hiện vết nứt là 3 ngày. Với mẫu BTCLSC sử dụng 1% sợi thì thời gian xuất hiện vết nứt tương ứng là 7 ngày, mẫu BTCLSC sử dụng 2% sợi thì thời gian xuất hiện vết nứt là 21 ngày, trong khi đó mẫu BTCLSC sử dụng 3% sợi thì thời gian xuất hiện vết nứt đến 24 ngày. Như vậy, sự có mặt của cốt sợi thép phân tán có vai trò rất lớn trong việc hạn chế nứt từ đó làm chậm quá trình hình thành vết nứt trên kết cấu bê tông.

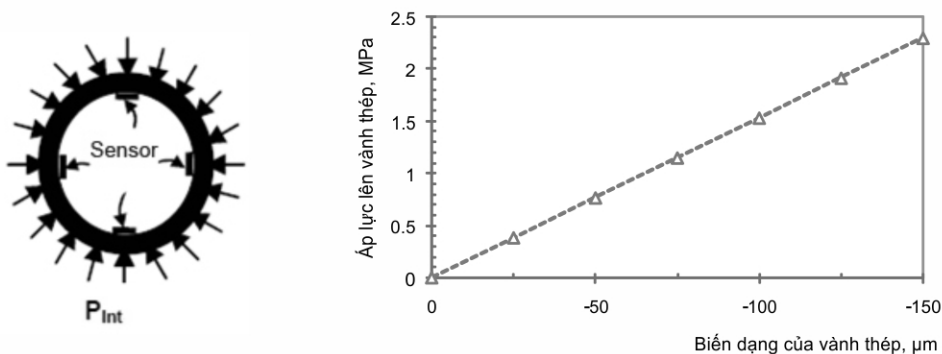
Khi so sánh về thời gian xuất hiện vết nứt giữa mẫu BTCLSC không sử dụng cốt sợi thép với mẫu bê tông thường mác M35 (35MPa) trong nghiên cứu [15] kết quả thí nghiệm cho thấy, với mẫu bê tông thường thời gian xuất hiện vết nứt là 5 ngày trong khi với mẫu BTCLSC thời gian xuất hiện vết nứt là 3 ngày. Điều này có thể giải thích do BTCLSC có độ co ngót lớn hơn, đặc biệt ở tuổi sớm ngày, so với bê tông thường. Độ co ngót BTCLSC lớn hơn này là do trong BTCLSC lượng dùng xi măng và phụ gia khoáng mịn là rất lớn đồng thời tỷ lệ N/CKD là rất nhỏ, khi lượng nước trong bê tông mất đi do quá trình thủy hóa của xi măng (hay còn gọi là quá trình tự làm khô trong hệ thống đá xi măng) và do quá trình bay hơi nước ra bên ngoài môi trường đã làm giảm độ ẩm tương đối trong bê tông. Quá trình mất nước sẽ tạo ra ứng suất trong các lỗ rỗng bên trong cấu trúc bê tông, ứng suất này được xem như là tổng sức căng bề mặt trên mặt khum của nước trong hệ thống lỗ rỗng của bê tông, từ đó gây co cho bê tông. Đối với BTCLSC thì quá trình tự làm khô xảy ra mạnh mẽ hơn ở tuổi sớm ngày so với bê tông thường và gây co lớn hơn.

Trên cơ sở các đường quan hệ giữa biến dạng của vòng thép và thời gian cho thấy (Hình 6), với mẫu bê tông không sử dụng cốt sợi sau khi nứt có sự giảm rất lớn biến dạng của vòng thép. Trong khi đó, với mẫu BTCLSC sử dụng cốt sợi thép cho thấy, sau khi xuất hiện vết nứt trên mẫu bê tông hầu như không có sự sụt giảm đáng kể của biến dạng của vòng thép. Khi đó đã có sự tương tác rất lớn giữa sợi và đá xi măng, đồng thời xuất hiện quá trình truyền tải trọng từ vật liệu nền (đá xi măng) sang sợi và tác động bắc cầu của sợi qua vết nứt khi bê tông bắt đầu nứt. Như vậy, sợi đã có vai trò rất quan trọng trong việc điều chỉnh quá trình hình thành vết nứt, chúng làm chậm quá trình phát triển vết nứt, khi bê tông tiếp tục co ngót các vết nứt tiếp tục mở rộng thì sợi càng đóng vai trò phân phối lại tải trọng trong vùng nứt qua đó hạn chế sự mở rộng của vết nứt và đảm bảo tính liên tục của kết cấu.



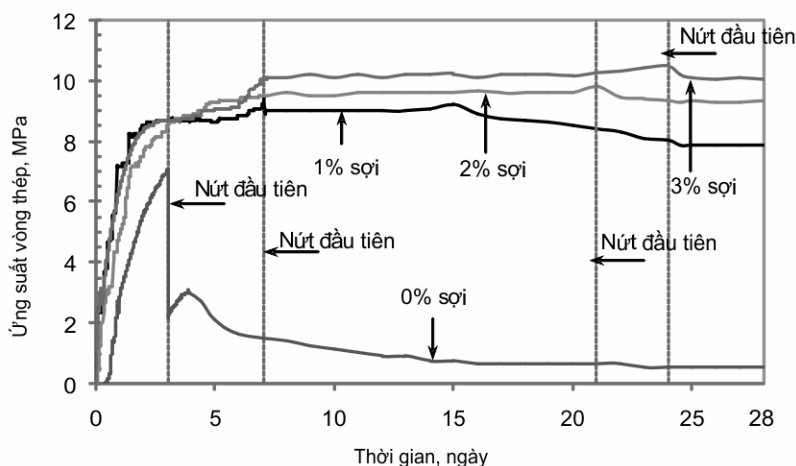
Hình 6. Biểu đồ biến dạng của vòng thép trong thí nghiệm co ngót hạn chế (Với hàm lượng sợi khác nhau)

Trên cơ sở các đường quan hệ giữa biến dạng của vòng thép và thời gian ta xác định được áp lực của bê tông lên vòng thép, kết quả quan hệ giữa biến dạng của vòng thép với áp lực của bê tông lên vòng thép thể hiện ở Hình 7. Qua kết quả thí nghiệm ta thấy khi áp lực của bê tông lên vòng thép càng lớn thì biến dạng của vòng thép tăng, kết quả thí nghiệm thể hiện ở Hình 8 cho thấy, khi áp lực của bê tông tăng thì ứng suất trong vòng thép cũng tăng. Tuy nhiên, đến một thời điểm nhất định khi áp lực của bê tông tác dụng lên vòng thép tiếp tục tăng và ứng suất kéo trong bê tông vượt quá khả năng chịu kéo của bê tông khi đó bê tông bắt đầu nứt (Hình 8, 9).

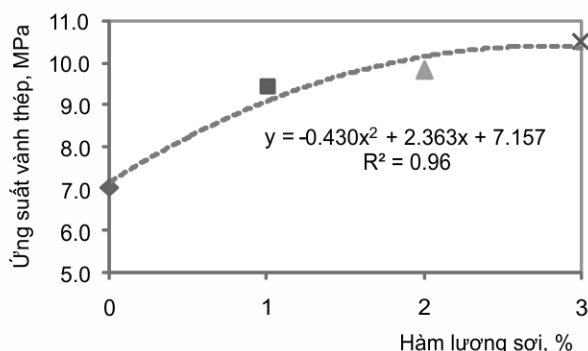
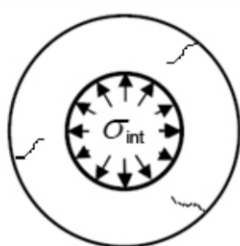


Hình 7. Áp lực của bê tông tác dụng lên vòng thép

Áp lực của bê tông tác dụng lên vòng thép khi đó sẽ gây ra ứng suất trong vòng thép và ứng suất này sẽ phân bố đều trên vòng thép (Hình 8, 9). Từ kết quả thí nghiệm cho thấy, khi tăng hàm lượng sợi thép phân tán trong BTCLSC thì ứng suất của bê tông tác dụng lên vòng thép tăng đồng thời thời điểm bắt đầu xuất hiện nứt trong bê tông tương ứng cũng tăng lên và có thể xác định được ứng suất lớn nhất của vòng thép khi bê tông nứt ứng với hàm lượng sợi thép sử dụng (Hình 9). Như vậy, sợi thép đã có vai trò rất lớn trong việc hạn chế nứt và giảm được sự phát triển bề rộng vết nứt cho BTCLSC.



Hình 8. Ứng suất của vòng thép trong thí nghiệm co ngót hạn chế



Hình 9. Ứng suất lớn nhất của vòng thép khi mẫu bê tông bắt đầu nứt tương ứng với hàm lượng sợi thép sử dụng khác nhau



5. Kết luận

Dựa trên kết quả nghiên cứu đạt được, một số kết luận có thể rút ra như sau:

- Việc sử dụng sợi thép phân tán trong bê tông chất lượng siêu cao đã cải thiện cường độ nén của bê tông đều lớn hơn 150 MPa. Tuy nhiên, khi hàm lượng sợi 1% và 2% thì mức độ tăng cường độ nén của BTCLSC không nhiều so với mẫu đối chứng. Nhưng khi tăng hàm lượng sợi lên 3% thì mức độ tăng cường độ nén khá lớn. Cường độ nén của BTCLSC ở tuổi 28 ngày khi sử dụng 3% sợi tương ứng là 180MPa.

- Kết quả thí nghiệm co ngót hạn chế cho thấy, với BTCLSC biến dạng co ngót xảy ra rất lớn và đặc biệt ở tuổi sớm ngày và điều này rất dễ gây nứt cho bê tông. Tuy nhiên, khi sử dụng cốt sợi thép phân tán trong BTCLSC đã hạn chế rất lớn về nứt do co ngót trong bê tông. Với mẫu BTCLSC khi không sử dụng cốt sợi thép thì thời gian xuất hiện vết nứt là 3 ngày, trong khi đó mẫu BTCLSC sử dụng đến 3% sợi thì thời gian xuất hiện vết nứt đến 24 ngày.

- Khi tăng hàm lượng sợi thép phân tán trong BTCLSC thì áp lực của bê tông lên vòng thép tăng đồng thời thời điểm xuất hiện nứt trong bê tông tương ứng cũng chậm hơn. Như vậy, sự có mặt của cốt sợi thép phân tán có vai trò rất lớn trong việc tăng khả năng chịu kéo và hạn chế nứt từ đó làm chậm quá trình hình thành và phát triển vết nứt trên kết cấu bê tông.

Tài liệu tham khảo

1. AFGC-SETRA (2002), *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes*, Paris, France: Interim Recommendations, AFGC publication.
2. Richard, P. and M.H. Cheyrezy (1994), "Reactive Powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength", in Mehta, P.K. (ED), *Concrete Technology: Past, Present and Future, Proceedings of the V. Mohan Malhotra Symposium, ACI SP 144-24*, 507-518, Detroit: Victoria Wieczorek.

3. Schmidt, M. and E. Fehling (2005), "Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe", *ACI*, 228: p. 51-78.
4. T. Vande Voort, M. Suleiman, and S. Sritharan (2008), *Design and Performance Verification of Ultra-High Performance Concrete Piles for Deep Foundations*, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, p. 224.
5. Holt, E.E. (2001), *Early age Autogenous Shrinkage of Concrete*, Technical research center of Finland ESPOO 2001, VTT Publications.
6. Tazawa, E.I. (1999), *Autogenous Shrinkage of Concrete*, Technical Committee Report on Autogenous Shrinkage of Concrete, Japan Concrete Institute, London, p. 409.
7. Krause, P.D. and E.A. Rogalla (1995), *Transverse Cracking in Newly Constructed Bridge Decks*, NCHRP 380, Project 12.37.
8. Shah, S.P., M.E. Karaguler, and M. Sarigaphuti (1992), "Effects of Shrinkage Reducing Admixture on Restrained Shrinkage Cracking of Concrete", *ACI Materials Journal*, 89(3): p.88-90.
9. Grzybowski, M. and S.P. Shah (1989), "Model to Predict Cracking in Fiber Reinforced Concrete due to Restrained Shrinkage", *Magazine of Concrete Research*, 41(148): p. 125-135.
10. ASTM C1581-2004 (2004), *Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage*.
11. Paillere, A.M., M. Buil, and J.J. Serrano (1989), "Effect of fiber addition on the autogenous shrinkage of silica fume concrete", *AIC Material Journal*, 86(2): p. 139-144.
12. Kraai, P.P. (1985), "Proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete", *Concrete Construction*, 30(9): p. 775-778.
13. Kollmorgen, G.A. (2004), *Impact of Age and Size on the Mechanical Behavior of an Ultra-High Performance Concrete*, in MS Thesis in Civil Engineering, Michigan Technological University, Houghton, Michigan.
14. Le, T.T. (2008), *Ultra high performance fibre reinforced concrete paving flags*, University of Liverpool: Liverpool. p. 374.
15. Nguyễn Trung Hiếu, Nguyễn Mạnh Hùng, và Trần Văn Dầu (2014), *Nghiên cứu nứt trên kết cấu bê tông do biến dạng co ngót và giải pháp sử dụng sợi thép để hạn chế nứt*, Đề tài cấp trường trọng điểm, 118-2013/TĐ, Trường Đại học Xây dựng.