

# Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến các tính chất của bê tông tính năng siêu cao

Trần Bá Việt, Lê Xuân Lâm\*

*Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng, Bộ Xây dựng*

Ngày nhận bài 3.4.2015, ngày chuyển phản biện 6.4.2015, ngày nhận phản biện 4.5.2015, ngày chấp nhận đăng 8.5.2015

Bê tông là vật liệu có cường độ chịu uốn thấp hơn rất nhiều so với cường độ chịu nén, nên nhiều nghiên cứu trước đây đã tìm cách đưa vào hỗn hợp bê tông các loại sợi thô như sợi polyme, sợi cacbon, sợi thép... với hàm lượng thấp (do ảnh hưởng kích thước của cốt liệu nên không thể sử dụng sợi với hàm lượng cao) để cải thiện khả năng chịu uốn của bê tông. Bê tông tính năng siêu cao (UHPC) sử dụng một hàm lượng lớn các loại hạt mịn (nhỏ hơn 0,075 mm) nên cường độ rất cao và khi thêm vào lượng lớn sợi thép có thể tăng cường độ chịu uốn và thay đổi bản chất của bê tông từ một vật liệu giòn sang vật liệu có tính dẻo dai cao. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu sử dụng các nguyên vật liệu tại phía Nam để chế tạo UHPC cốt sợi thép mảnh (sợi thép dài 13 mm, đường kính 0,2 mm) đạt cường độ chịu nén lên đến 140 MPa, cường độ chịu uốn lớn hơn 30 MPa với hàm lượng sợi thép đến 4% theo thể tích bê tông.

**Từ khóa:** bê tông bột hoạt tính, bê tông tính năng siêu cao, cốt sợi thép.

**Chỉ số phân loại 2.1**

## A STUDY ON THE EFFECTS OF MICRO STEEL FIBER CONTENT ON CHARACTERISTICS OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE (UHPC)

### Summary

Concrete is a material that has much lower flexural strength than compressive strength; therefore, previous studies have tried to find the ways to add some types of raw fibers with low contents (due to the effects of aggregate size, they could not be used with high contents) into the concrete mixture including polymer fibers, carbon fibers, steel fibers, and so on to improve the bend strength of concrete. Ultra-high performance concrete (UHPC) uses a large amount of fine particles (less than 0.075 mm), so it has a very high compressive strength and can be added with a large amount of micro steel fiber to improve the bending capacity and change the nature of concrete from a brittle material into a tough and flexible material. In this paper, the authors present the research results of using materials in the Southern Vietnam to produce ultra-high performance steel fiber concrete (UHPSFC) which can achieve the compressive strength up to 140 MPa, and the flexural strength greater than 30 MPa by using micro steel fiber (which has the length of 13 mm, and the diameter of 0.2 mm) with the content up to 4% according to the volume of concrete.

**Keywords:** activated powder concrete, steel fiber, ultra-high performance concrete UHPC.

**Classification number 2.1**

### Đặt vấn đề

Bê tông tính năng siêu cao cốt sợi thép mảnh (bê tông UHPSFC) được coi là thế hệ thứ hai của bê tông cốt sợi thép, là sản phẩm mang tính bước ngoặt của sự phát triển công nghệ xây dựng, với các đặc tính vượt trội so với bê tông thường như có tỷ lệ N/CKD < 0,25, cường độ nén lớn hơn 150 MPa, cường độ uốn đạt 15÷50 MPa, mô đun đàn hồi cao 50÷60 GPa [1, 2], độ thấm thấp và độ bền rất cao, dùng cho các cấu kiện đúc sẵn, dầm cầu bản mỏng đúc sẵn, tấm vỏ mỏng, silo [3]..., hoặc dùng để sửa chữa các kết cấu đã bị hỏng, các bể chứa phế thải hạt nhân, các cấu kiện nổi sử dụng bê tông tính năng siêu cao [4, 5]...

Tác giả đã nghiên cứu chế tạo bê tông UHPSFC, với thành phần bột mịn được sử dụng là bột quazrt có đường kính hạt trung bình từ 50÷75 µm với lượng thêm vào từ

\* Tác giả chính: Tel: 0907015562, Email: lexuanlam.cdxd2@gmail.com

0÷30%, đồng thời giảm lượng cát 0,8 mm sao cho tổng thể tích tuyệt đối của bê tông vẫn đảm bảo 1000 lít, hàm lượng sợi thép 1÷4%, hàm lượng xi măng  $\geq 950$  kg/m<sup>3</sup> cấp phối bê tông, hàm lượng silicafume tối đa là 25% theo khối lượng xi măng.

## Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

### Vật liệu nghiên cứu

- Xi măng: OPC50 của Công ty Hà Tiên (bảng 1).

Bảng 1: tính chất cơ lý của xi măng Hà Tiên OPC50

| Tính chất                                                    | Đơn vị             | Kết quả      | Phương pháp thử |
|--------------------------------------------------------------|--------------------|--------------|-----------------|
| Thời gian ninh kết:<br>- Bắt đầu<br>- Kết thúc               | Phút               | 140<br>195   | TCVN 6017-95    |
| Tỷ diện theo PP Blaine                                       | cm <sup>2</sup> /g | 3,897        | TCVN 4030-2003  |
| Lượng sót trên sàng 0,08                                     | %                  | 1,5          | TCVN 4030-2003  |
| Tính ổn định thể tích                                        | mm                 | 1,0          | TCVN 6017-95    |
| Lượng nước tiêu chuẩn                                        | %                  | 26,6         | TCVN 6017-95    |
| Tỷ trọng                                                     | g/cm <sup>3</sup>  | 3,10         | TCVN 4030-2003  |
| Cường độ chịu nén: - R <sub>n</sub> 3<br>- R <sub>n</sub> 28 | N/mm <sup>2</sup>  | 29,7<br>55,2 | TCVN 6017-95    |

- Cát nghiền: cát nghiền mịn từ quartz sạch, hàm lượng SiO<sub>2</sub>  $\geq 99\%$ , nguồn gốc từ Khánh Hòa, kích thước hạt lớn nhất là 0,075 mm.

- Cát: là cát sạch, có nguồn gốc từ Khánh Hòa, kích thước hạt lớn nhất là 0,8 mm.

- Sợi thép: loại Radmix, có khả năng chống ăn mòn, với chiều dài (13±0,5) mm, đường kính (0,2±0,008) mm, giới hạn chảy là 2400 MPa, khối lượng riêng 7,8 g/cm<sup>3</sup>, phù hợp tiêu chuẩn ASTM A820 (hình 1).



Hình 1: sợi thép thẳng mịn đồng đường kính 0,2 mm, chiều dài 13 mm của Hãng Berker

- Silicafume: sử dụng của Hãng BASF, hàm lượng SiO<sub>2</sub> > 95%, loại nén chặt để tránh ô nhiễm môi trường.

- Phụ gia siêu dẻo Glenium® ACE 388 SureTec là một phụ gia siêu dẻo gốc polycarboxylic ether (PCE) cải tiến.

## Phương pháp nghiên cứu

Tính toán thiết kế cấp phối theo phương pháp thể tích tuyệt đối kết hợp thực nghiệm.

## Kết quả nghiên cứu và thảo luận

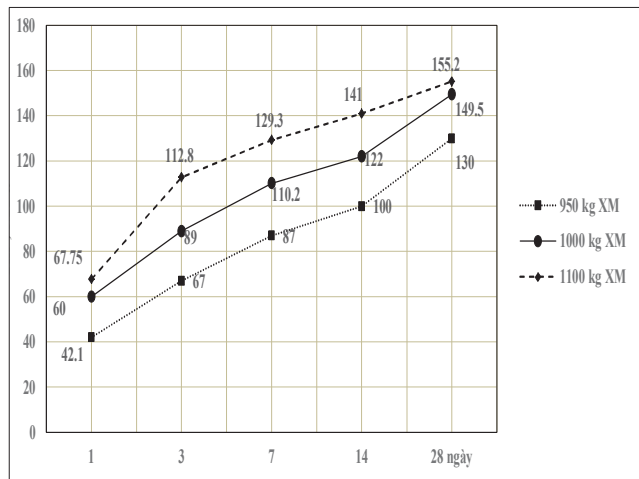
### Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng đến sự phát triển cường độ nén của bê tông UHPSFC

Cấp phối bê tông (bảng 2) với hàm lượng xi măng dao động từ 950 kg đến 1100 kg, phụ gia siêu dẻo từ 2,5÷3% so với khối lượng xi măng, hàm lượng sợi thép từ 0÷4% theo thể tích tuyệt đối của bê tông.

Bảng 2: cấp phối bê tông

| STT | Hàm lượng sợi thép | Ký hiệu | X, kg | CN, kg | C, kg | SF, kg | SD, lít | N, kg | ST  | NCKD | g <sub>o</sub> | V <sub>a</sub> |
|-----|--------------------|---------|-------|--------|-------|--------|---------|-------|-----|------|----------------|----------------|
| 1   | 0%                 | CP1     | 950   | 285    | 795   | 190    | 23,75   | 182,4 | 0   | 0,16 | 2426,2         | 999,4          |
| 2   | 0%                 | CP2     | 1000  | 250    | 665   | 250    | 25      | 200   | 0   | 0,16 | 2390           | 999,1          |
| 3   | 0%                 | CP3     | 1100  | 275    | 468   | 275    | 27,5    | 220   | 0   | 0,16 | 2365,5         | 999,6          |
| 4   | 1%                 | 1%CP3   | 1100  | 275    | 440   | 275    | 27,5    | 220   | 78  | 0,16 | 2415,5         | 999,0          |
| 5   | 2%                 | 2%CP3   | 1100  | 275    | 416   | 275    | 27,5    | 220   | 156 | 0,16 | 2469,5         | 999,9          |
| 6   | 3%                 | 3%CP3   | 1100  | 275    | 388   | 275    | 27,5    | 220   | 234 | 0,16 | 2519,5         | 999,4          |
| 7   | 4%                 | 4%CP3   | 1100  | 220    | 417   | 275    | 27,5    | 220   | 312 | 0,16 | 2571,5         | 999,6          |

Trong đó: X là xi măng (kg); CN là cát nghiền (kg); C là cát 0,8 mm (kg); SF là silicafume (kg); SD là siêu dẻo (lít); N là nước (kg); ST là sợi thép (kg); CKD là chất kết dính = X + SF; g<sub>o</sub> là trọng lượng riêng của bê tông (kg/m<sup>3</sup>); V<sub>a</sub> là thể tích tuyệt đối của bê tông

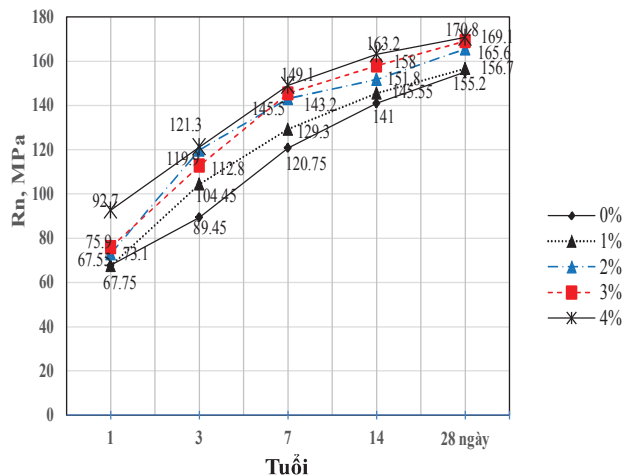


Hình 2: ảnh hưởng của hàm lượng xi măng đến sự phát triển cường độ của bê tông

Hình 2 cho thấy, cường độ nén của bê tông tăng dần khi tăng hàm lượng xi măng trong cấp phối của bê tông. Cấp phối bê tông sử dụng 950 kg xi măng đạt cường độ 130 MPa ở 28 ngày tuổi, cấp phối bê tông sử dụng 1000 kg xi măng đạt cường độ 149,5 MPa (tăng 14,9%), cấp phối bê tông sử dụng 1100 kg xi măng đạt cường độ 155,2 MPa (tăng 19%). Như vậy, cấp phối bê tông sử dụng 1100 kg xi măng cho cường độ cao nhất, do đó được chọn làm cấp phối nền để nghiên cứu ảnh của sợi thép mảnh đến tính chất cơ lý của bê tông. Các cấp phối có hàm lượng xi măng nhỏ hơn 950 kg xi măng do không đạt yêu cầu thi công 21÷23 cm và cường độ dưới 100 MPa nên sẽ không được đề cập đến trong nghiên cứu này.

#### ***Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến tốc độ phát triển cường độ nén của bê tông UHPSFC theo thời gian***

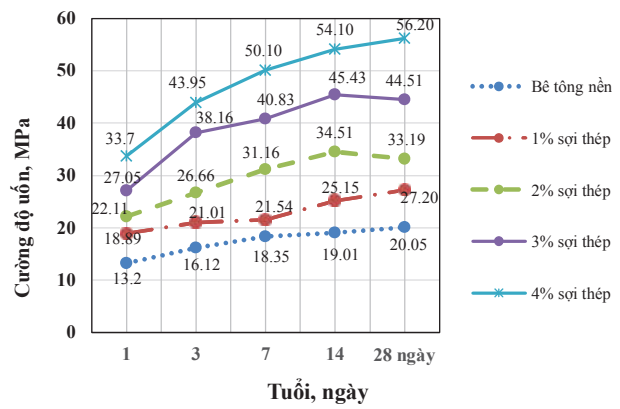
Kết quả thử cường độ nén của bê tông (hình 3) cho thấy, ở 28 ngày tuổi, bê tông nền (0% sợi thép) đạt cường độ thấp nhất 155,2 Mpa; với 4% sợi thép, bê tông đạt cường độ cao nhất là 170,8 MPa (tăng 10,1%); bê tông có 1% sợi thép đạt cường độ 156,7 MPa, tăng không đáng kể so với bê tông nền; với 2% sợi thép, cường độ bê tông đạt 165,6 MPa (tăng 6,7%) và ở 3% sợi thép, bê tông đạt 169,1 MPa (tăng 8,9%). Như vậy, kết quả cho thấy, sự có mặt của sợi thép làm tăng cường độ chịu nén của bê tông, cường độ này tăng tỷ lệ thuận với hàm lượng sợi trong bê tông.



Hình 3: ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến sự phát triển cường độ của cấp phối bê tông (CP3 - hàm lượng 1100 kg xi măng/m<sup>3</sup> bê tông)

#### ***Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến tốc độ phát triển cường độ uốn của bê tông UHPSFC theo thời gian***

Hình 4 cho thấy, khi thêm sợi thép vào bê tông, cường độ chịu uốn ở 28 ngày tuổi của bê tông tăng 24,6% (7,15 MPa) đối với bê tông có hàm lượng sợi thép 1%, tăng 65% (13,14 MPa) đối với 2% sợi thép, tăng 122% (24,46 MPa) đối với hàm lượng 3% sợi thép và tăng 180% (36,15 MPa) đối với 4% sợi thép. Kết quả này cho thấy, hàm lượng sợi thép ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu uốn của bê tông và có sự truyền ứng suất từ bê tông nền sang sợi thép.



Hình 4: ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến tốc độ phát triển cường độ chịu uốn của bê tông (CP3 - sử dụng 1100 kg xi măng)

#### ***Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến sự phát triển cường độ chịu kéo trực tiếp của bê tông UHPSFC***

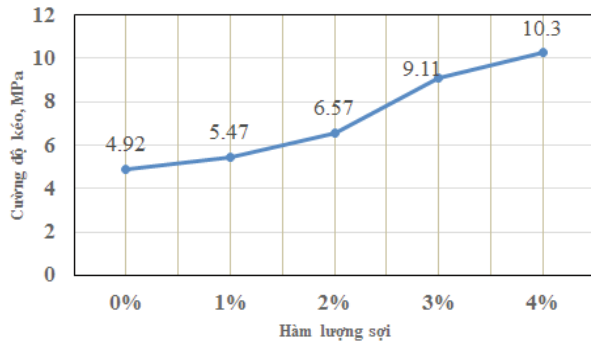
Mẫu nghiên cứu có hình chữ I (tiết diện to ở hai đầu) (hình 5), được ngâm chặt hai đầu to và gia tải kéo bởi ngàm di động của máy kéo vạn năng.



Hình 5: sơ đồ kéo trực tiếp mẫu chữ I bê tông UHPSFC

Theo kết quả thể hiện ảnh hưởng của sợi thép đến khả năng chịu kéo của bê tông (hình 6) cho thấy, khả năng chịu kéo trực tiếp của bê tông có hàm lượng sợi

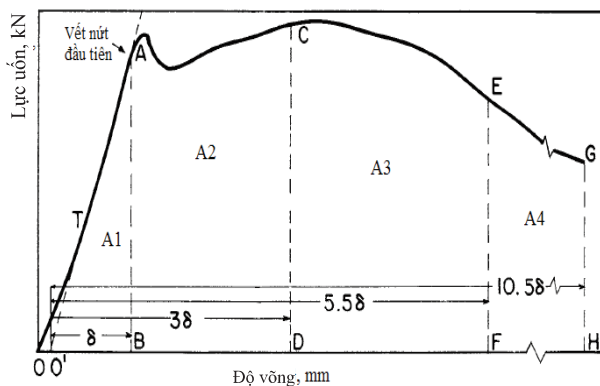
thép 1% tăng lên không đáng kể so với mẫu bê tông nền (0% sợi thép) - tăng 11,2% (tăng 0,55 MPa), mẫu 2% sợi thép tăng 33,5% (tăng 1,65 MPa), mẫu 3% sợi thép tăng 85,2% (tăng 4,19 MPa) và mẫu 4% sợi thép tăng 109% (tăng 5,38 MPa) so với bê tông nền.



Hình 6: ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến khả năng chịu kéo của bê tông (CP3 - sử dụng 1100 kg xi măng)

### Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến độ dẻo dai của bê tông

Theo tiêu chuẩn ASTM C1-018, dựa vào biểu đồ lực uốn (kN) - độ võng (mm), xác định lực uốn gây nứt đầu tiên (P) và vẽ đường tiếp tuyến với OA (vùng đàn hồi của bê tông), từ điểm P hạ đường thẳng vuông góc và cắt với trục hoành tại điểm B, khoảng cách O'B là  $\delta$  và diện tích vùng O'AB =  $A_1$ , tương tự ta có diện tích (BACD) tại độ võng  $3\delta$  là  $A_2$ , diện tích từ độ võng  $3\delta$  đến  $5,5\delta$  (DCEF) là  $A_3$ , diện tích từ độ võng  $5,5\delta$  đến  $10,5\delta$  là  $A_4$  (xem hình 7).



Hình 7: biểu đồ đánh giá chỉ số dẻo dai theo tiêu chuẩn ASTM C1-018

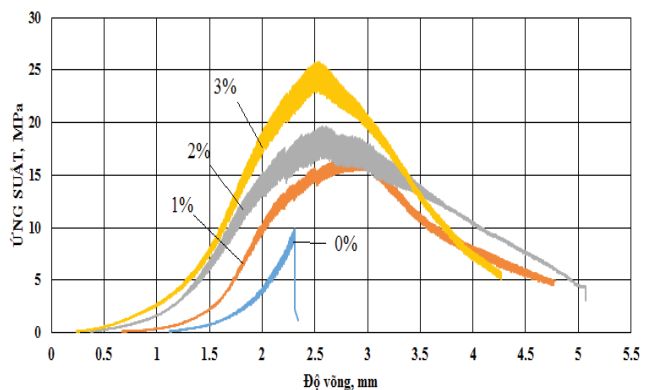
Qua đó, có thể tính các chỉ số dẻo dai như sau:  $I_3 = (A_2 + A_1) / A_1$  (1);  $I_{5,5} = (A_3 + A_2 + A_1) / A_1$  (2);  $I_{10,5} = (A_4 + A_3 + A_2 + A_1) / A_1$  (3).

Mẫu dầm bê tông kích thước 10x10x40 cm được đúc từ các cấp phối bê tông với hàm lượng sợi thép 0% (CP3-0), 1% (1% CP3), 2% (2% CP3), 3% (3% CP3), dưỡng hộ ẩm trong 28 ngày và thử uốn với sơ đồ uốn 4 điểm (hình 8) theo tiêu chuẩn ASTM C1-018, khoảng cách 2 gối cố định là 300 mm, tốc độ tăng tải là (0,05-0,1) mm/phút.



Hình 8: sơ đồ uốn dầm 4 điểm theo ASTM C1-018

Phương pháp đánh giá độ dẻo dai của bê tông dựa theo tiêu chuẩn ASTM C1-018 với cách tính ở hình 7 như sau:



Hình 9: biểu đồ ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến mối quan hệ ứng suất - độ võng của bê tông với các hàm lượng sợi 0%, 1%, 2%, 3%

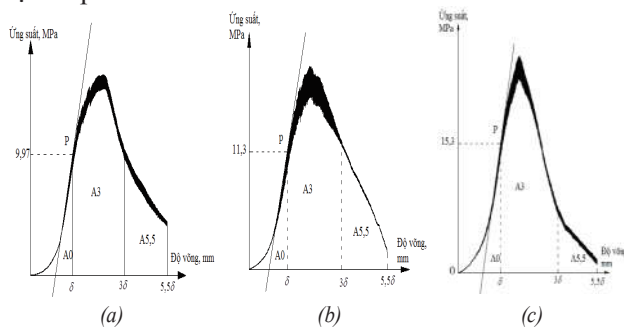
Theo kết quả uốn dầm thể hiện ở hình 9 ta thấy, biểu đồ uốn dầm 1% CP3, 2% CP3, 3% CP3 có phần thoải hơn rất nhiều (không đổ dốc thẳng đứng như dầm bê tông có 0% sợi thép). Khi tải trọng uốn vượt qua khả năng chịu lực của dầm bê tông, thân dầm bắt đầu xuất hiện vết nứt và lan rộng từ từ (hình 10), dầm không bị phá hủy ngay mà vẫn làm việc, được thể hiện ở biểu đồ đổ dốc từ từ kể từ khi tải trọng vượt quá khả năng chịu lực của dầm cho đến khi dầm bị phá hủy hoàn toàn.



Hình 10: vết nứt bắt đầu hình thành và mở rộng từ từ sang vùng lân cận

Khả năng chịu uốn của dầm bê tông tăng khi tăng hàm lượng sợi thép, mẫu dầm có 0% sợi thép có cường độ chịu uốn thấp nhất, mẫu dầm có 3% sợi thép có cường độ chịu uốn cao nhất. Với mẫu dầm có hàm lượng sợi thép 0% ở biểu đồ hình 9 cho kết quả như sau: độ võng lớn nhất là 2,33 mm, ứng suất chịu uốn lớn nhất gây phá hủy là 9,95 MPa.

Theo chỉ dẫn của ASTM C1-018, ta có sơ đồ tính toán chỉ số dẻo dai của các dầm bê tông với hàm lượng sợi thép từ 1÷3% như ở hình 11.



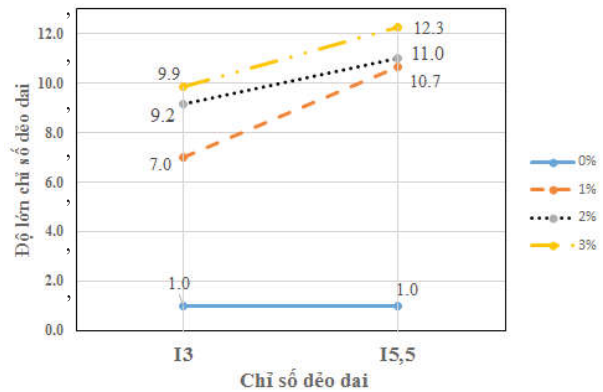
Hình 11: sơ đồ tính chỉ số dẻo dai của dầm bê tông với hàm lượng sợi thép khác nhau  
(a) 1% sợi thép; (b) 2% sợi thép; (c) 3% sợi thép

Kết quả uốn mẫu dầm có hàm lượng sợi thép 1% cho thấy, độ võng lớn nhất khi bị phá hủy là 4,78 mm và ứng suất phá hủy lớn nhất  $P_{br} = 16,67$  MPa, ứng suất gây nứt đầu tiên  $P_{fcr} = 9,97$  MPa ( $P_{fcr} = 59,8\% P_{br}$ ). Diện tích tại vị trí độ võng 1δ là  $A_0 = 133004817,9$  mm<sup>2</sup>, tại vị trí độ võng 3δ là  $A_3 = 798028907,7$  mm<sup>2</sup> và tại vị trí độ võng 5,5δ là  $A_{5,5} = 490301615,3$  mm<sup>2</sup>. Dựa vào công thức (1) và (2), tính ra chỉ số dẻo dai  $I_3 = 7$ ,  $I_{5,5} = 10,7$ .

Với mẫu dầm có hàm lượng sợi thép 2%, độ võng lớn nhất khi bị phá hủy là 5,07 mm và có ứng suất phá hủy lớn nhất  $P_{br} = 19,63$  MPa, ứng suất gây nứt đầu tiên  $P_{fcr} = 11,3$  MPa ( $P_{fcr} = 57,6\% P_{br}$ ). Diện tích tại vị trí độ võng 1δ là  $A_0 = 186040948,8$  mm<sup>2</sup>, tại vị trí độ võng 3δ là  $A_3 = 1116245692,8$  mm<sup>2</sup> và tại vị trí độ võng 5,5δ là  $A_{5,5} = 568018258,01$  mm<sup>2</sup>. Dựa vào công

thức (1) và (2) tính ra chỉ số dẻo dai là  $I_3 = 9,2$  và  $I_{5,5} = 11$ .

Với mẫu dầm có hàm lượng sợi thép 3%, độ võng lớn nhất khi bị phá hủy là 4,3 mm, ứng suất phá hủy lớn nhất  $P_{br} = 25,78$  MPa, ứng suất gây nứt đầu tiên  $P_{fcr} = 15,3$  MPa ( $P_{fcr} = 59,3\% P_{br}$ ). Diện tích tại vị trí độ võng 1δ là  $A_0 = 251312005,4$  mm<sup>2</sup>, tại vị trí độ võng 3δ là  $A_3 = 2230208062$  mm<sup>2</sup> và tại vị trí độ võng 5,5δ là  $A_{5,5} = 598011621,4$  mm<sup>2</sup>. Dựa vào công thức (1) và (2), tính ra chỉ số dẻo dai là  $I_3 = 9,9$  và  $I_{5,5} = 12,3$ .



Hình 12: ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến tính dẻo dai của bê tông

Dầm bê tông với 0% sợi thép có chỉ số dẻo dai thấp nhất ( $I_3 = I_{5,5} = 1$ ) và độ lớn của chỉ số dẻo dai tăng dần tỷ lệ thuận với hàm lượng sợi thép, ở dầm bê tông có 3% sợi thép có chỉ số dẻo dai lớn nhất (hình 12).

## Kết luận

Với các kết quả nghiên cứu như đã nêu ở trên, có thể rút ra một số kết luận như sau:

- Với nguồn nguyên liệu ở phía Nam, bước đầu đã nghiên cứu và chế tạo thành công UHPC sử dụng cốt liệu mịn và sợi thép mảnh (dài 13 mm, đường kính 0,2 mm, tròn trơn). Cường độ nén:  $R_{CP3} = 155,2$  MPa,  $R_{1\%CP3} = 156,7$  MPa,  $R_{2\%CP3} = 165,6$  MPa,  $R_{3\%CP3} = 169,1$  MPa,  $R_{4\%CP3} = 170,8$  MPa; cường độ uốn  $R_{CP3} = 20,05$  MPa,  $R_{1\%CP3} = 27,2$  MPa,  $R_{2\%CP3} = 33,19$  MPa,  $R_{3\%CP3} = 44,51$  MPa,  $R_{4\%CP3} = 56,2$  MPa.

- Hàm lượng xi măng có ảnh hưởng đến cường độ của UHPC, với hàm lượng xi măng 1100 kg/m<sup>3</sup> có thể chế tạo được bê tông có cường độ lên đến 155,2 MPa.

- Sự có mặt của sợi thép làm tăng đáng kể cường độ chịu uốn của bê tông, cấp phối bê tông sử dụng 4% sợi thép cường độ chịu uốn tăng gấp 2,8 lần (đạt 56,2

MPa) so với bê tông không sử dụng sợi thép (chỉ đạt 20,05 MPa).

- Hàm lượng sợi thép 4% cho cường độ chịu kéo của bê tông đạt giá trị tối đa 10,3 MPa.

- Sợi thép làm tăng khả năng chịu nén của bê tông lên đến 10%, đối với cấp phối sử dụng 4% sợi thép đạt cường độ nén là 170,8 Mpa, trong khi cấp phối bê tông nền (0% sợi thép) chỉ đạt 155,2 MPa.

- Sợi thép có tác dụng cải thiện tính dẻo dai của bê tông, độ dẻo dai của bê tông tăng khi tăng hàm lượng sợi thép, đầm bê tông nền (0% sợi thép) có chỉ số dẻo dai bằng 1, đầm bê tông với 3% sợi thép có chỉ số dẻo dai cao nhất ( $I_3 = 12,3$ ;  $I_{5,5} = 9,9$ ), thấp nhất là đầm bê tông với 1% sợi thép ( $I_3 = 7$ ;  $I_{5,5} = 10,7$ ) và trung bình là đầm với 2% sợi thép ( $I_3 = 9,2$ ;  $I_{5,5} = 11$ ).

---

## Tài liệu tham khảo

[1] Arnon Bentur, Sidney Mindess (2006), “Fibre reinforced cementitious composites”, *Modern concrete technology series* -

*Taylor & Francis Group*.

[2] Gary Avalos M (2013), “Ultra-High Performance Concrete: Research and developments (materials science and technologies: transportation infrastructure - roads, highways, bridges, airports and mass transit)”, *Nova Science Pub Inc*.

[3] Gustavo Parra-Montesinos J, Hans Reinhardt W (2012), “High performance fiber reinforced cement composites 6”, *Springer, Vol.2*.

[4] Schmidt M, Fehling E, Glotzbach C, Fröhlich S, Piotrowski S (2012), “Ultra - high performance concrete and nanotechnology in construction”, *Proceedings of Hipermat 2012 - 3rd international symposium on UHPC and nanotechnology for high performance construction materials*, Kassel.

[5] Ekkehard Fehling, Michael Schmidt, Joost Walraven, Torsten Leutbecher, Susanne Fröhlich (2014), “Ultra - high performance concrete UHPC: fundamentals, design, examples (Beton-Kalender Series)”, *1 edition, Ernst & Sohn*.