

Thí nghiệm kéo trực tiếp xác định quan hệ giữa ứng suất kéo và độ mở rộng vết nứt của bê tông siêu tính năng cao

Direct tension tests for determining the relationship between tensile stress and crack opening of ultra-high performance concrete

Lê Hoàng An

Nhóm nghiên cứu Phát triển bền vững trong xây dựng và giao thông vận tải (SDCT), Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Email liên hệ: hoangan.le@ut.edu.vn

Tóm tắt:

Nghiên cứu này thực hiện thí nghiệm chịu kéo trực tiếp của bê tông siêu tính năng cao không sợi (UHPC) và có sợi (UHPFRC). Mô hình đường cong lý tưởng biểu thị quan hệ giữa ứng suất kéo và độ mở rộng vết nứt của bê tông siêu tính năng cao được mô tả để dự đoán ứng xử kéo trực tiếp. Cấp phối thiết kế cho UHPC và UHPFRC có cường độ nén khoảng 200 MPa. Các mẫu hình lăng trụ kích thước 40 x 40 x 80 mm có khắc khắc 5 x 5 mm ở giữa mẫu được sử dụng cho thí nghiệm kéo trực tiếp. Dựa trên quan sát sự phá hoại mẫu và kết quả thí nghiệm đo được, UHPC phá hoại giòn với đường cong giảm tải dốc xuống đột ngột sau khi đạt ứng suất kéo cực đại, trong khi đó, UHPFRC phá hoại dẻo với ứng xử tăng cứng khi bắt đầu nứt và mềm hóa sau khi đạt ứng suất kéo cực đại. Độ mở rộng vết nứt của UHPFRC lớn hơn rất nhiều so với UHPC. Hàm lượng sợi thép tăng 1 - 2%, các giá trị ứng suất kéo khi nứt, ứng suất kéo cực đại và độ mở rộng vết nứt tương ứng tăng đáng kể. Phương pháp thí nghiệm kéo trực tiếp trong nghiên cứu này sử dụng các mẫu có kích thước nhỏ nên dễ áp dụng và giảm được chi phí thí nghiệm.

Từ khóa: UHPC; UHPFRC; Bê tông siêu tính năng cao; Sợi thép; Thí nghiệm chịu kéo trực tiếp; Ứng suất kéo; Độ mở rộng vết nứt.

Abstract:

This study reports the test results of direct tension tests of ultra-high performance concrete (UHPC) and ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). The idealized model of tensile stress versus crack opening was described for the prediction of tensile behavior. The mixtures of UHPC and UHPFRC were designed to achieve a compressive strength of 200 MPa. The direct tension tests were conducted on the prisms of 40x40x80 mm with notches of 5x5 mm in the middle of the prisms. The test results indicated that UHPC prisms failed in a brittle manner with a sudden drop of load in the descending branch, while UHPFRC prisms failed in a ductile manner with a strain hardening stage after the cracking stress and with a softening stage after the ultimate stress. The crack opening of UHPFRC prisms was much higher than that of UHPC prisms. The values of cracking stress, ultimate stress, and crack opening were significantly improved by increasing the volume of steel fibers from 1% to 2%. The prisms with small dimensions were adopted for the direct tension tests in this study, thus leading to the feasibility of testing and reducing the cost.

Keywords: UHPC; UHPFRC; Steel fibers; Direct tension tests; Tensile behavior; Tensile stress; Crack opening.

1. Giới thiệu

Bê tông siêu tính năng cao (ultra-high performance concrete – UHPC) là một loại bê tông đặc biệt có cường độ chịu nén (mẫu hình trụ tròn) lớn hơn 150 MPa và ứng suất kéo sau khi bắt đầu nứt cao hơn 5 MPa [1]. Một đặc điểm quan trọng của UHPC đó là cốt sợi được thêm vào để hạn chế tính giòn vốn có của UHPC do cường độ cơ học siêu cao, đồng thời tăng tính dẻo dai cũng như năng lượng phá hủy [2], [3]. Khả năng chịu kéo cao là một đặc tính quan trọng của bê tông UHPC khi có cốt sợi phân tán gia cường (ultra-high performance fiber-reinforced concrete – UHPFRC), dựa vào đó các kết cấu bê tông mới khác biệt so với việc sử dụng bê tông thông thường có thể được thiết kế. Hiện nay có hai phương pháp chính để đo cường độ kéo của UHPFRC đó là phương pháp kéo trực tiếp (direct tension test) và phương pháp gián tiếp (indirect tension test) [4], [5]. Phương pháp kéo trực tiếp thường phức tạp hơn phương pháp kéo gián do cần có máy móc chuyên dụng, thiết bị phức tạp, và vị trí tại hai đầu kéo yêu cầu cấu tạo riêng biệt để tăng mức độ chính xác khi thí nghiệm [5]. Ngược lại, phương pháp gián tiếp (ép chèn, uốn ba điểm, và uốn bốn điểm) sử dụng mẫu thí nghiệm đơn giản hơn, dễ thực hiện. Khác với phương pháp kéo trực tiếp cho giá trị ứng suất kéo đo được từ thí nghiệm, kết quả từ phương pháp gián tiếp phải được tính toán thông qua các công thức theo tiêu chuẩn để xác định được cường độ chịu kéo [3], [4], [5]. Theo nghiên cứu của Naaman và Reinhardt [6], ứng xử kéo trực tiếp của UHPFRC được chia làm 02 dạng chính sau giai đoạn ứng xử tuyến tính bao gồm giai đoạn mềm hóa (strain softening) và giai đoạn tăng cứng (strain hardening). Hiện nay chưa có tiêu chuẩn nào ban hành cho UHPFRC để quy định rõ phương pháp thí nghiệm, đặc điểm hình học của mẫu, kích thước mẫu và trình tự phân tích để xác định được toàn bộ ứng xử kéo khi mềm hóa hoặc khi tăng cứng [7], [8]. Theo Wille và cộng sự [7], Fehling và cộng sự [8], phương pháp kéo trực tiếp trên mẫu không có khắc khác hoặc tiết diện không thay đổi chỉ phù hợp với việc đo ứng suất kéo, trong khi đó phương pháp kéo trực tiếp trên các mẫu có khắc khác (hình lăng trụ hoặc hình trụ tròn) và mẫu có hình dạng “xương

chó” thường hay được sử dụng để xác định đường cong quan hệ giữa ứng suất kéo và độ mở rộng vết nứt. Theo các kết quả nghiên cứu ở Đức, UHPC có ứng suất chịu kéo trung bình trong khoảng 7 – 10 MPa, UHPFRC có ứng suất chịu kéo cao hơn trong khoảng 7 – 15 MPa [2], [3], [8], [9].

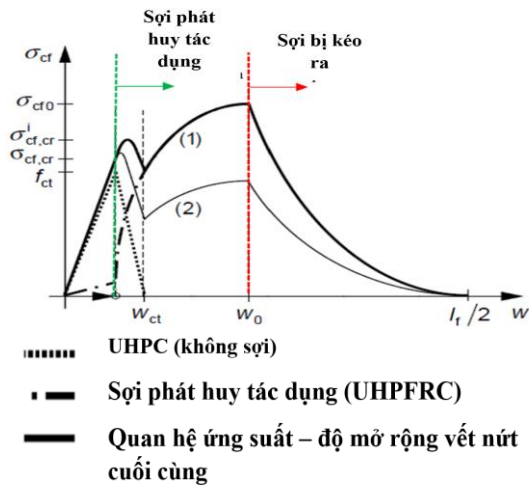
Trong khi đó, tiêu chuẩn của Nhật Bản chỉ quy định giá trị cường độ chịu kéo của UHPC là 5 MPa và UHPFRC sử dụng 2% sợi thép là 9 MPa [10], tiêu chuẩn của Pháp SETRA/AFGC, quy định cường độ chịu kéo của UHPC và UHPFRC là 8 MPa khi thiết kế kết cấu [11]. Như vậy, có sự khác biệt lớn về giá trị cường độ chịu kéo của bê tông siêu tính năng cao giữa các tiêu chuẩn quốc tế khác nhau. Thí nghiệm kéo trực tiếp cho kết quả phụ thuộc vào nhiều yếu tố như hình dạng và kích thước mẫu, sự phân bố sợi, loại sợi, hàm lượng sợi, kích thước hình học sợi, phương pháp đổ bê tông mẫu và thiết bị thí nghiệm [3].

Trên cơ sở các vấn đề đã được thảo luận ở trên, nghiên cứu này thực hiện thí nghiệm kéo trực tiếp các mẫu có hình lăng trụ kích thước 40 x 40 x 80 mm và có khắc khác 5 x 5 mm tại vị trí giữa mẫu để xác định đường cong quan hệ giữa ứng suất kéo và độ mở rộng vết nứt của UHPC không sợi và UHPFRC sử dụng 1% và 2% sợi thép.

Đây là phương pháp kéo trực tiếp được phát triển ở Viện bê tông thuộc trường Đại Học Kassel – Đức [8], [12]. Phương pháp này sử dụng mẫu có kích thước khá nhỏ và chế tạo đơn giản hơn các phương pháp khác trên thế giới. Ứng xử chịu kéo của UHPC và UHPFRC, cũng như ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép được làm rõ thông qua nghiên cứu thực nghiệm này.

2. Mô hình lý tưởng của đường cong quan hệ giữa ứng suất kéo và độ mở rộng vết nứt

Theo kết quả nghiên cứu của Leutbecher [12], Fehling và cộng sự [8], [9] tại trường Đại học Kassel – Đức, mô hình lý tưởng cho đường cong ($\sigma_{cf}-w$) thể hiện quan hệ giữa ứng suất kéo (σ_{cf}) và độ mở rộng vết nứt (w) được chia thành các giai đoạn quan trọng như sau (hình 1).



Hình 1. Mô hình lý tưởng đường cong ($\sigma_{cf}-w$) trong nghiên cứu [8], [12].

• Giai đoạn 1 là giai đoạn tuyến tính ở trạng thái chưa nứt được xác định bởi độ cứng khi kéo cho đến khi đạt ứng suất bắt đầu chuyển dịch sang trạng thái nứt là $\sigma_{cf,cr}$.

• Giai đoạn 2 là giai đoạn sợi phát huy tác dụng trong việc kiểm chế các vết nứt. Khi mẫu UHPFRC có hàm lượng sợi cao thì xuất hiện sự tăng ứng suất từ $\sigma_{cf,cr}$ đến $\sigma_{cf,cr}^i$ khi sợi làm việc kiểm chế các vết nứt nhỏ trước khi đạt đến ứng suất kéo cực hạn σ_{cf0} ở trạng thái nứt. Có hai dạng đường cong ($\sigma_{cf}-w$) tùy thuộc vào giá trị của $\sigma_{cf,cr}^i$ và σ_{cf0} : (i) ứng xử tăng cứng sau khi vết nứt xuất hiện tại $\sigma_{cf0} > \sigma_{cf,cr}^i$; (ii) ứng xử mềm hóa sau khi xuất hiện vết nứt tại $\sigma_{cf0} < \sigma_{cf,cr}^i$. Giai đoạn này được tính toán xấp xỉ theo phương trình sau:

$$\sigma_{cf} = \sigma_{cf0} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{w}{w_0}} - \frac{w}{w_0} \right) \quad (1)$$

Trong đó, w_0 là độ mở rộng vết nứt tại ứng suất kéo cực hạn σ_{cf0} .

• Giai đoạn 3 là giai đoạn sợi bị kéo ra được xác định bằng giá trị ứng suất có hiệu σ_{cf0} đánh dấu sự chuyển dịch từ giai đoạn sợi phát huy tác dụng đến giai đoạn sợi bị kéo ra. Quá trình sợi bị kéo ra phụ thuộc hình dáng, kích thước của sợi, và độ bám dính của sợi với bê tông [3], [8]. Giá trị lớn nhất của bề rộng vết nứt khi sợi không còn ảnh hưởng được lấy bằng một nửa chiều dài sợi ($l_f/2$). Giai đoạn này được tính toán xấp xỉ theo phương trình sau:

$$\sigma_{cf} = \sigma_{cf0} \cdot \left(1 - \frac{2w}{l_f} \right) \quad (2)$$

Mô hình lý tưởng của đường cong ($\sigma_{cf}-w$) chỉ chính xác nhất khi sợi có phương dọc theo phương của lực kéo.

3. Chương trình thí nghiệm

3.1. Chế tạo mẫu

Cấp phối được sử dụng là cấp phối M3Q do trường Đại học Kassel nghiên cứu. Cấp phối M3Q được thiết kế để đạt cường độ chịu nén 200 MPa và độ chảy xèo cao. Đặc điểm tiêu biểu của cấp phối này là sử dụng cốt liệu mịn, tỉ lệ nước/bột là 0.21 (bột bao gồm xi măng và phụ gia khoáng) và đường kính hạt cốt liệu lớn nhất là 0.5 mm. Mật độ hạt được sắp xếp tối ưu với việc không chế đường kính lớn nhất của cốt liệu, kết hợp thêm vào phụ gia khoáng silicafume (loại Sika® Silicoll) và sử dụng phụ gia siêu dẻo (loại Sika® ViscoCrete 2810).

Bảng 1. Cấp phối bê tông UHPC và UHPFRC.

Thành phần	Đơn vị	UHPC	UHPFRC-SF1%	UHPFRC-SF2%
Nước	kg/m ³	188	186	184
Xi măng	kg/m ³	795	788	778
Silica fume	kg/m ³	169	167	165
Phụ gia siêu dẻo	kg/m ³	24.1	23.9	23.6
Cát nghiền	kg/m ³	198	196	194
Cát hạt mịn	kg/m ³	971	961	952
Sợi thép	kg/m ³	-	78.5	157

Sợi thép được sử dụng là loại sợi có chiều dài $l_f = 13$ mm, đường kính $d_f = 0.175$ mm, cường độ chịu kéo là 2500 MPa, và có bề mặt phẳng được mạ đồng màu vàng. Hai hàm lượng sợi là 1% và 2% thể tích bê tông được sử dụng cho UHPFRC để khảo sát. Bê tông UHPC và UHPFRC được trộn thành ba mẻ tương ứng với hàm lượng sợi bằng máy trộn cường bức chuyên dụng có dung tích 150 lít. Hình 2 mô tả máy trộn, độ xòe và loại sợi thép. Bê tông tươi UHPC và UHPFRC được đổ vào các khuôn thép đúc mẫu hình lăng trụ để thí nghiệm kéo kích thước 40 x 40 x 160 mm (hình 3a) và mẫu hình trụ tròn để thí nghiệm nén kích thước 100 x 200 mm. Đối với mẫu kéo, đổ

bê tông theo phương vuông góc với phương chịu kéo của mẫu. Sau khi đúc, các mẫu được bảo dưỡng ở điều kiện nhiệt độ trong phòng (khoảng 20°C đến 23°C), tháo mẫu sau 48 tiếng bê tông đông cứng và tiếp tục được bảo dưỡng trong điều kiện nhiệt độ bình thường trong phòng cho đến ngày thí nghiệm. Mẫu để thí nghiệm kéo 40 x 40 x 160 mm sau đó được cắt làm đôi thành kích thước 40 x 40 x 80 mm để chuẩn bị cho thí nghiệm. Mẫu 40 x 40 x 80 mm được tạo khắc hình chữ U kích thước 5 x 5 mm ở giữa (hình 3b). Ứng với mỗi hàm lượng sợi chế tạo 06 mẫu thí nghiệm kéo trực tiếp và 03 mẫu thí nghiệm chịu nén.



Hình 2. Máy trộn, độ xòe, và sợi thép.



(a) Mẫu 40 x 40 x 160 mm sau khi đúc

(b) Mẫu 40 x 40 x 80 mm có khắc 5 x 5 mm ở giữa

Hình 3. Chế tạo mẫu thí nghiệm kéo trực tiếp.

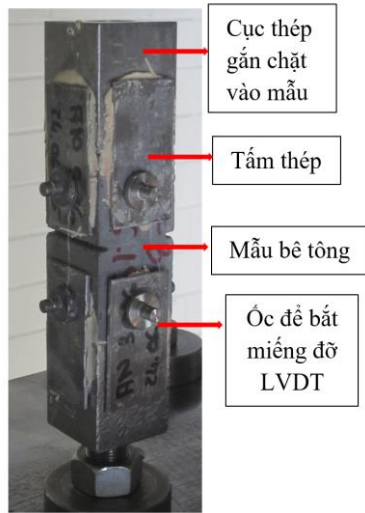
3.2. Thí nghiệm kéo trực tiếp

Thí nghiệm kéo trực tiếp mẫu lăng trụ 40 x 40 x 80 mm có khắc, thí nghiệm đo cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi mẫu hình trụ tròn 100 x 200 mm được tiến hành trong cùng một khoảng thời gian. Khắc 5 x 5 mm ở giữa có tác dụng phát sinh vết nứt tại vị trí này khi mẫu chịu lực kéo để phá hoại mẫu xảy ra ở giữa, làm tăng mức độ chính xác của kết quả đo đạc. Mẫu kéo được chuẩn bị như sau: (i) hai khối thép hình lập phương 40 x 40 x 40 mm có khoét lỗ ren đường kính D20 được gắn chặt vào hai đầu của mẫu kéo thông bốn tấm

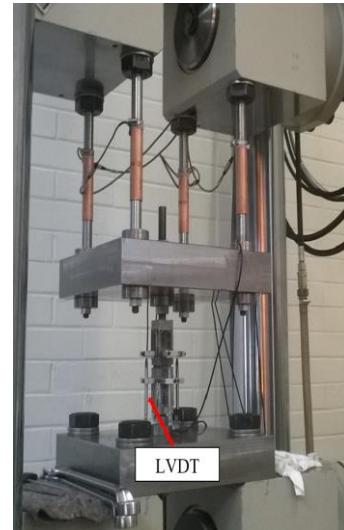
thép gắn vào mẫu bằng loại keo dính chuyên dụng; (ii) trên bốn tấm thép này gắn ốc để liên kết vào miếng đỡ cảm biến chuyển vị LVDT (Linear Variable Differential Transducers). Hình 4a mô tả chi tiết mẫu chuẩn bị cho thí nghiệm kéo trực tiếp. Giá trị của độ mở rộng vết nứt được đo bằng giá trị trung bình của 04 cảm biến chuyển vị đứng LVDT như trong hình 4. Phạm vi chiều dài đo của LVDT là 40 mm. Thí nghiệm kéo được thực hiện bằng máy kéo chuyên dụng (RBO 2000) có lực kéo tối đa là 1.6 MN. Hình 4b mô tả thí nghiệm kéo trực tiếp, trong đó hai đầu của

mẫu được liên kết với máy kéo thông qua bu lông D20. Tải trọng kéo tác dụng lên mẫu thông qua chuyển vị với tốc độ 0.01 mm/s. Khi độ mở rộng vết nứt bắt đầu vượt quá 2 mm, tăng tốc độ gia tải lên 0.05 mm/s để đẩy nhanh thời gian thí

nghiệm. Thí nghiệm kéo kết thúc khi mẫu có chuyển vị lớn và bị tách rời thành hai phần đối với UHPC và sợi ở giữa bị đứt đối với UHPFRC (hình 4c).



(a) Mẫu 40x40x80 mm chuẩn bị trước khi thí nghiệm



(b) Thí nghiệm kéo trực tiếp



(c) Mẫu kéo bị phá hoại

Hình 4. Thí nghiệm kéo trực tiếp.

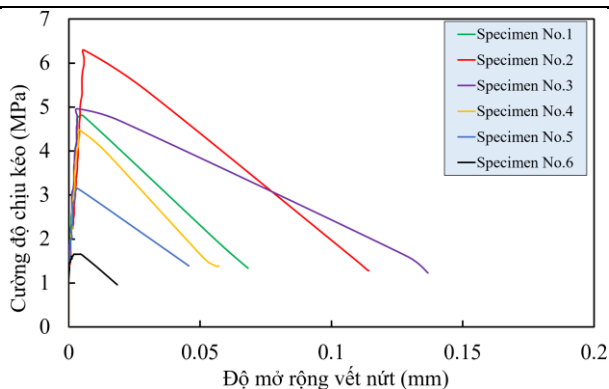
4. Phân tích kết quả thí nghiệm

Trên cơ sở đường cong lý tưởng ($\sigma_{cf}-w$) đã trình bày ở phần 2, kết quả thí nghiệm đo được ứng suất kéo cực hạn f_{ct} và bề rộng vết nứt tương ứng w_{fet} cho bê tông UHPC không cốt sợi như trong bảng 2. Cường độ chịu nén trung bình của UHPC đo được là 179 MPa và mô đun đàn hồi trung bình tương ứng là 48.37 GPa. Đường cong ($\sigma_{cf}-w$) của 06 mẫu UHPC được thể hiện trong hình 5. Cường độ chịu kéo của UHPC trung bình là

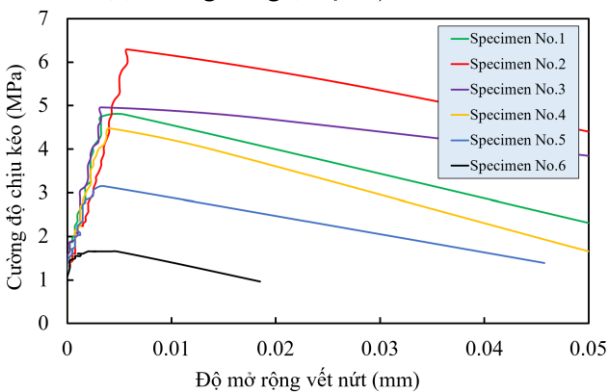
4.22 MPa tại vết nứt có chiều rộng rất nhỏ 0.002 mm. Các mẫu có giá trị có độ lệch khác nhau nhiều so với giá trị trung bình như mẫu 5 và 6, điều này được giải thích bằng việc vết nứt không xuất hiện tại vị trí khác ở giữa mẫu mà tại vị trí khác khiến cho tải giảm nhanh khi vết nứt bắt đầu xuất hiện. Đối với UHPC thì phá hoại mẫu rất dòn với việc mẫu bị tách ra làm hai khi cường độ kéo cực hạn. Giai đoạn sau khi đạt cường độ kéo cực hạn thì mẫu bị phá hoại và lực kéo giảm rất nhanh, đường cong có dạng tuyến tính.

Bảng 2. Kết quả f_{ct} và w_{fct} của UHPC.

Số hiệu mẫu	f_{ct} (MPa)	w_{fct} (mm)
1	4.80	0.005
2	6.29	0.006
3	4.96	0.003
4	4.48	0.004
5	3.15	0.003
6	1.65	0.005
Trung bình	4.22	0.002



(a) Đường cong ($\sigma_{cf} - w$) toàn bộ



(b) Đường cong ($\sigma_{cf} - w$) phóng to

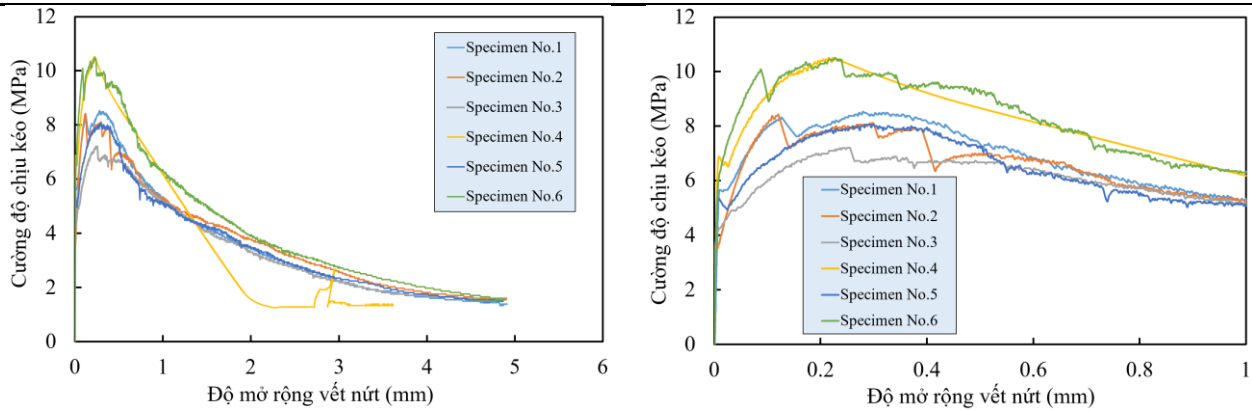
Hình 5. Đường cong ($\sigma_{cf} - w$) của UHPC.

Cường độ chịu nén trung bình của UHPFRC 1% sợi thép đo được là 188 MPa và mô đun đàn hồi trung bình tương ứng là 48.42 GPa, trong khi đó cường độ chịu nén trung bình của UHPFRC 2% sợi thép là 195 MPa và mô đun đàn hồi trung bình tương ứng là 49.65 GPa. Đối với bê tông UHPFRC có hàm lượng sợi 1% và 2%, đường cong thí nghiệm như trong hình 5 đo được giống xu hướng của đường cong lý tưởng ($\sigma_{cf} - w$) trong phần 2 bao gồm ứng suất bắt đầu chuyển dịch sang trạng thái nứt là $\sigma_{cf,cr}$ và độ mở rộng vết nứt tương ứng w_{cr} , ứng suất kéo cực đại σ_{cf0} và độ mở rộng vết nứt tương ứng w_0 (bảng 3 và 4). Hình 6 và 7 thể hiện toàn bộ đường cong ($\sigma_{cf} - w$) và một phần phóng to cho UHPFRC 1% và 2% sợi thép tương ứng. Mẫu UHPFRC cho phá hoại dẻo với sự tham gia của sợi trong việc hạn chế vết nứt nên giai đoạn sau khi bắt đầu nứt khi đạt $\sigma_{cf,cr}$, sợi phát huy tác dụng nhiều nhất đến khi đạt σ_{cf0} . Giá trị trung bình σ_{cf0} lớn hơn $\sigma_{cf,cr}$, vì vậy, nhìn chung các mẫu UHPFRC có ứng xử tăng cứng. Giai đoạn sau khi đạt cường độ kéo cực hạn σ_{cf0} được quan sát rõ và độ mở rộng vết nứt được duy trì cho đến khi các sợi bị kéo đứt. Mẫu UHPFRC 2% cho giá trị σ_{cf0} và $\sigma_{cf,cr}$ lớn hơn mẫu UHPFRC 1%. Giá trị w_0 lớn hơn rất nhiều so với w_{cr} chứng tỏ mẫu bị phá hoại dẻo và đường cong sau khi đạt σ_{cf0} được quan sát khá rõ ràng với độ dốc giảm từ từ. Mẫu UHPFRC 1% sợi thép bắt đầu nứt tại ứng suất kéo trung bình là 7.66 MPa và đạt ứng suất kéo cực đại trung bình là 8.77 MPa, trong khi đó mẫu UHPFRC 2% bắt đầu nứt tại ứng suất kéo trung bình là 10.30 MPa và đạt ứng suất kéo cực đại trung bình là 11 MPa.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm cho UHPFRC 1%.

Số hiệu mẫu	$\sigma_{cf,cr}$ (MPa)	w_{cr} (mm)	σ_{cf0} (MPa)	w_0 (mm)
1	8.32	0.126	8.53	0.280
2	8.43	0.120	8.11	0.293
3	7.20	0.237	6.88	0.261
4	6.83	0.032	10.51	0.215
5	5.17	0.033	8.05	0.284

Số hiệu mẫu	$\sigma_{cf,cr}$ (MPa)	w_{cr} (mm)	σ_{cf0} (MPa)	w_0 (mm)
6	10.03	0.087	10.51	0.227
Trung bình	7.66	0.106	8.77	0.260



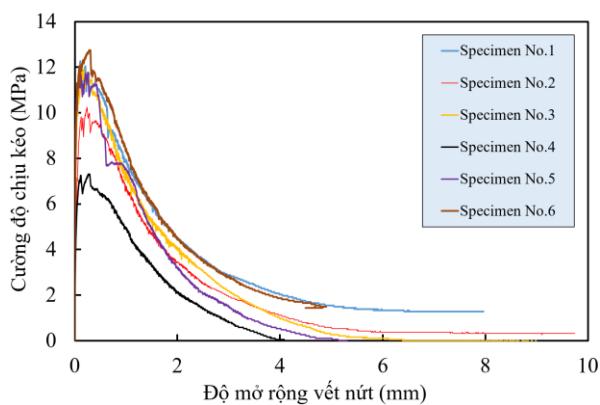
(a) Đường cong ($\sigma_{cf}-w$) toàn bộ

(b) Đường cong ($\sigma_{cf}-w$) phóng to

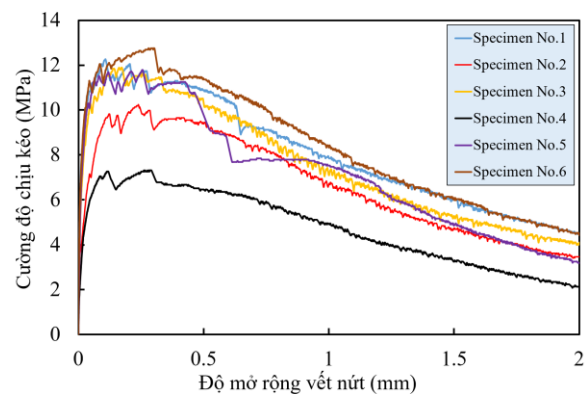
Hình 6. Đường cong ($\sigma_{cf}-w$) của UHPFRC 1% sợi thép.

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm cho UHPFRC 2%.

Số hiệu mẫu	$\sigma_{cf,cr}$ (MPa)	w_{cr} (mm)	σ_{cf0} (MPa)	w_0 (mm)
1	12.27	0.108	12.00	0.280
2	9.44	0.103	10.24	0.293
3	10.18	0.045	11.89	0.261
4	7.25	0.120	7.31	0.215
5	11.36	0.063	11.78	0.284
6	11.31	0.063	12.75	0.227
Trung bình	10.30	0.084	11.00	0.260



(a) Đường cong ($\sigma_{cf}-w$) toàn bộ



(b) Đường cong ($\sigma_{cf}-w$) phóng to

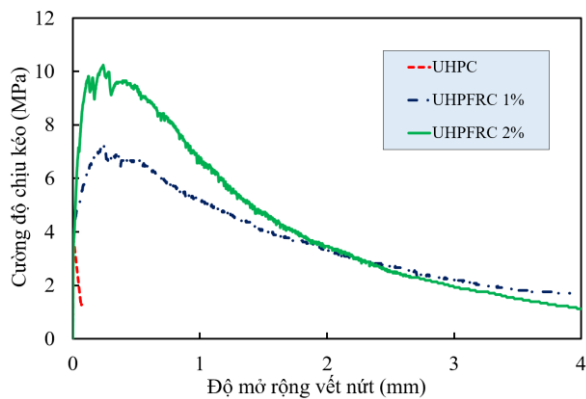
Hình 7. Đường cong ($\sigma_{cf}-w$) của UHPFRC 2% sợi thép.

So với mẫu UHPC, UHPFRC 1% sợi thép có cường độ chịu kéo cực hạn trung bình cao hơn khoảng 52%, trong khi đó, UHPFRC 2% sợi thép

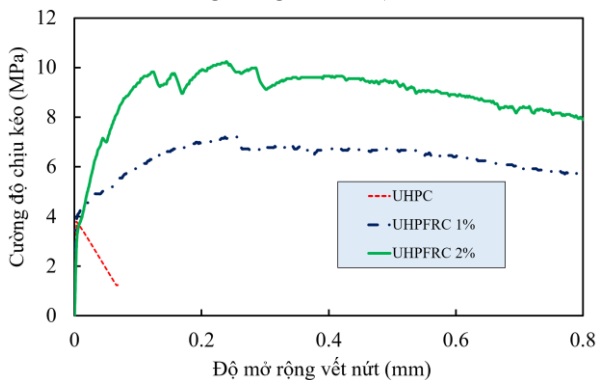
cao hơn khoảng 62%. Mẫu UHPFRC có độ mở rộng vết nứt lớn hơn rất nhiều so với mẫu UHPC. Hình 8 thể hiện so sánh giữa đường cong ($\sigma_{cf}-$

w) của ba loại mẫu UHPC, UHPFRC 1%, và UHPFRC 2%. Ứng xử chịu kéo giữa mẫu có sợi thép và không có sợi thép hoàn toàn khác biệt. Mẫu UHPC khi đạt ứng suất kéo lớn nhất f_{ct} , đường cong giảm tải đi xuống rất nhanh, trong khi đó mẫu UHPFRC 1% và 2% sợi, khi bắt đầu nứt tại ứng suất $\sigma_{cf,cr}$, đường cong bắt đầu tăng cứng (sợi phát huy vai trò kiềm chế vết nứt) cho đến khi đạt ứng suất kéo cực đại σ_{cf0} , đường cong bắt đầu mềm hóa với độ dốc xuống.

Như vậy, ứng xử của các loại mẫu có sợi và không sợi hoàn toàn giống với mô hình được mô tả ở hình 1.



(a) Đường cong ($\sigma_{cf}-w$) toàn bộ



(b) Đường cong ($\sigma_{cf}-w$) phóng to

Hình 8. So sánh đường cong trung bình ($\sigma_{cf}-w$) giữa ba loại mẫu UHPC, UHPFRC 1%, và UHPFRC 2% sợi thép.

4. Kết luận

Kết quả thí nghiệm kéo trực tiếp trên mẫu hình lăng trụ 40 x 40 x 80 mm có tạo khắc 5x5 mm được giới thiệu và phân tích trong bài báo này. Một số kết luận quan trọng như sau:

- Mô hình đường cong lý tưởng ($\sigma_{cf}-w$) được đề xuất bởi Leutbecher [12], Fehling và

cộng sự [8] phản ánh đúng hình dạng của đường cong đo từ thí nghiệm, do đó mô hình này có thể sử dụng để dự đoán ứng xử chịu kéo của bê tông siêu tính năng cao.

- Toàn bộ ứng xử kéo của mẫu có thể được quan sát rõ ràng thông qua phương pháp thí nghiệm kéo trực tiếp đã trình bày ở trên.

- Mẫu UHPC phá hoại giòn với đường cong rớt tải dốc xuống đột ngột sau khi đạt ứng suất kéo cực đại f_{ct} , trong khi đó, mẫu UHPFRC phá hoại dẻo với ứng xử tăng cứng khi bắt đầu nứt tại ứng suất $\sigma_{cf,cr}$ và mềm hóa sau khi đạt ứng suất kéo lớn nhất σ_{cf0} . Bề rộng vết nứt w của UHPFRC lớn hơn rất nhiều so với UHPC.

- Khi hàm lượng sợi thép sử dụng tăng từ 1% lên 2%, các giá trị $\sigma_{cf,cr}$ và σ_{cf0} của mẫu thí nghiệm kéo đều tăng đáng kể.

- Các mẫu sử dụng cho thí nghiệm kéo trực tiếp trong bài báo này có kích thước nhỏ, chế tạo đơn giản hơn so với các nghiên cứu trước đây cho nên dễ áp dụng và giảm chi phí thí nghiệm.

Tài liệu tham khảo

- [1] B. A. Graybeal; “Tensile Mechanical Response of Ultra-High-Performance Concrete”. *Advances in Civil Engineering Materials*. 2014; 4(2):20140029. DOI:10.1520/ACEM20140029.
- [2] L. H. An; “Behavior of circular steel tube confined UHPC and UHPFRC columns under axial compression”. Kassel, Germany:Kassel University Press. 2018.
- [3] L.H. An, E. Fehling; “Influence of steel fiber content and type on the uniaxial tensile and compressive behavior of UHPC”. *Construction and Building Materials*. 2017; 153:790-806. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.07.130.
- [4] H. A. Goaziz, N. A. Farhan, M. N. Sheikh, T. Yu, M. N. S. Hadi; “Experimental Evaluation of Tensile Strength Test Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete”. *Magazine of Concrete Research*. 2018; 71(8):1-42. DOI:10.1680/jmacr.17.00516.
- [5] B. L. Bae, M. S. Lee, H. K. Choi, C. S. Choi; “Indirect tensile strength of UHSC reinforced with steel fibres and its correlation with compressive

- strength”. Magazine of Concrete Research. 2017; 69(15):772-786. DOI:10.1680/jmacr.15.00545.
- [6] A. E. Naaman, H. W. Reinhardt; “Setting the stage: Toward performance based classification of FRC composites”; in Proc. of 4th RILEM symposium on high performance fiber reinforced cement, composites (HPFRCC4); 15-18 June 2003; Michigan, USA. 2003; pp.1-4.
- [7] K. Wille, S. El-Tawil, A. E. Naaman; “Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading”. Cement and Concrete Composites. 2014; 48:53-66. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015.
- [8] E. Fehling, M. Schmidt, J. Walraven, T. Leutbecher, S. Fröhlich; “Ultra-High Performance Concrete: Fundamental – Design – Example”. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn. 2014.
- [9] M. Schmidt, E. Fehling, S. Fröhlich, J. Thiemicke; “Sustainable Building with Ultra-High Performance Concrete, Results of the German Priority Programme 1182 funded by Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)”. Kassel, Germany: Kassel University Press. 2015.
- [10] Japan Society of Civil Engineers; “JSCE Guidelines for concrete No.9: Recommendation for design and construction of ultra high strength fiber reinforced concrete structures”; Tokyo, Japan. 2008.
- [11] French Association of Civil Engineering (AFGC); “Ultra high performance fibre-reinforced concretes”; Paris, France. 2002.
- [12] T. Leutbecher; “Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Fasern und Stabstahl bewehrtem Ultrahochfesten Beton (UHPC) ”. PhD Dissertation; University of Kassel, Kassel, Germany; 2008.