

Nghiên cứu khả năng kháng uốn của bê tông siêu tính năng gia cố cốt sợi thép dưới tác dụng của tải trọng động

Ngô Trí Thường*, Hoàng Văn Hải

Trường Đại học Thủy lợi

Ngày nhận bài 5/11/2020; ngày chuyển phản biện 12/11/2020; ngày nhận phản biện 14/1/2021; ngày chấp nhận đăng 29/1/2021

Tóm tắt:

Trong nghiên cứu này, khả năng kháng uốn của vật liệu bê tông siêu tính năng gia cố cốt sợi thép (ultra-high-performance fiber-reinforced concrete - UHPFRC) với các hàm lượng cốt sợi thép khác nhau, dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng động đã được khảo sát, nghiên cứu. 36 mẫu UHPFRC kích thước 0,5x0,5x210 (mm), gia cố bởi 0,5 và 1,5% thể tích (vol.%) cốt sợi thép trơn ($d=0,2$ mm, $l=19$ mm) được chế tạo và thí nghiệm uốn ba điểm, dưới tác dụng của tải trọng tĩnh (tốc độ biến dạng $0,000167$ s⁻¹) và tải trọng tốc độ cao (tốc độ biến dạng đến 210 s⁻¹). Kết quả thí nghiệm cho thấy, cường độ uốn của vật liệu UHPFRC tăng lên đáng kể khi hàm lượng cốt sợi tăng lên. Đồng thời, khi tốc độ gia tải tăng, khả năng kháng uốn của vật liệu cũng tăng lên. Cường độ kéo uốn của vật liệu UHPFRC gia cố bởi 0,5 và 1,5 vol.% cốt sợi là 17,7 và 30,0 MPa dưới tác dụng của tải trọng tĩnh, tăng lên đến 23,6 và 51,92 MPa ở tốc độ gia tải trung bình 110 s⁻¹ và tăng lên đến 28,86 và 61,04 MPa ở tốc độ gia tải trung bình là 210 s⁻¹.

Từ khóa: bê tông siêu tính năng, cốt sợi thép, cường độ kéo uốn, tải trọng động.

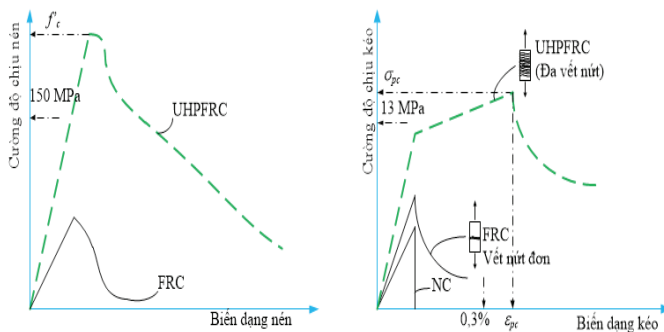
Chỉ số phân loại: 2.1

Đặt vấn đề

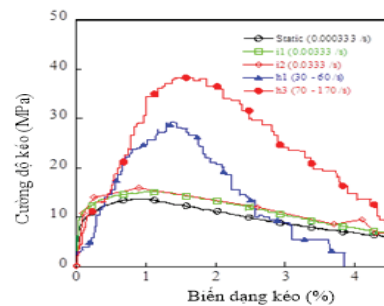
Bê tông siêu tính năng gia cố cốt sợi thép (ultra-high-performance fiber-reinforced concrete - UHPFRC) đã và đang được biết đến như một loại bê tông đặc biệt so với bê tông cốt sợi thông thường (fiber-reinforced concrete - FRC) hay bê tông thông thường (normal concrete - NC): cường độ chịu nén rất cao (>150 MPa), cường độ chịu kéo tốt khi được gia cố một hàm lượng cốt sợi thép vừa phải (>10 MPa), khả năng hấp thụ năng lượng tốt khi bị phá hủy (>30 kJ) [1-9], như thể hiện trong hình 1A. Hơn nữa, nhiều nghiên cứu cho thấy loại bê tông này còn có khả năng tiếp

tục tăng cường độ sau khi vết nứt đầu tiên xuất hiện (strain-hardening response) và khả năng tăng sức kháng khi tốc độ gia tải tăng (strain-rate dependent), như thể hiện trong hình 1B [4, 10].

Nhờ những đặc tính trên, loại bê tông này được kỳ vọng khi áp dụng vào thực tiễn sẽ giúp giảm kích thước hình học, tăng khả năng chịu lực cho các công trình xây dựng như cầu đường, các công trình hạ tầng kỹ thuật, các công trình quân sự như tường bê tông chịu các tác dụng của tải trọng cực đoan (va đập, nổ) hoặc tường, bia chịu đạn bắn. Tuy nhiên, việc áp dụng loại vật liệu này vào các công trình thực tế còn



(A) Ứng xử kéo - nén của UHPFRC so với FRC và NC



(B) Ứng xử kéo của UHPFRC dưới các tốc độ tải khác nhau

Hình 1. Tính chất kéo, nén của vật liệu UHPFRC [10].

* Tác giả liên hệ: Email: trithuong@tlu.edu.vn

Flexural behaviour of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates

Tri Thuong Ngo*, Van Hai Hoang

Thuyloi University

Received 5 November 2020; accepted 29 January 2021

Abstract:

In this study, the flexural resistance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRCs) containing different fiber volume content, under static and dynamic flexural loading was investigated. Thirty-six specimens of UHPFRCs, size 0.5x0.5x210 (mm), reinforced with 0.5%, and 1.5% volume of smooth steel fiber ($d=0.2$ mm, $l=19$ mm) were cast and tested by three-point bending test, under the static load (strain rate $1.67 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) and high acceleration load (strain rate up to 210 s^{-1}). Experimental results show that the flexural strength of UHPFRCs increases significantly when the fiber reinforcement content increases. In addition, as the loading speed increases, the flexural resistance of the material also increases. The flexural strength of UHPFRC material reinforced with 0.5 and 1.5% of fiber volume content was 17.7 and 30.0 MPa at static loads, increased to 23.6 and 51.92 MPa at a loading rates of 110 s^{-1} and 28.86 and 61.04 MPa at loading rate of 210 s^{-1} .

Keywords: bending behaviour, high strain rates, smooth steel fiber, ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC).

Classification number: 2.1

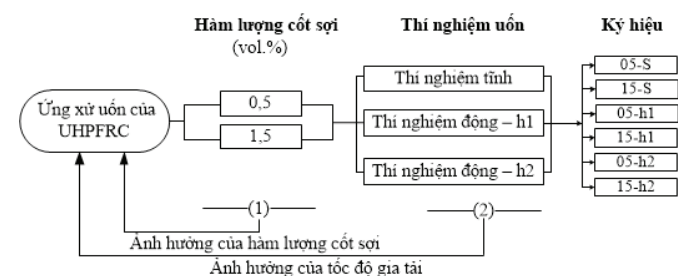
hiều hạn chế, do giá thành sản xuất còn cao, quy trình trộn và bảo dưỡng khắt khe, đặc biệt là các tính chất cơ học của nó khá phức tạp (phụ thuộc nhiều vào loại, hàm lượng cốt sợi, phụ thuộc vào tải trọng tác động - kéo, nén, uốn hoặc cắt), chưa có quy trình thí nghiệm, kiểm tra và đánh giá chất lượng. Đặc biệt, dưới tác dụng của tải trọng có tốc độ gia tải cao, cấu kiện thường bị phá hủy bởi trạng thái phá hủy tổng hợp bao gồm cắt, uốn và phá hủy cục bộ.

Một số tác giả đã tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi và tốc độ gia tải đến khả năng kháng uốn của UHPFRC [11-16]. Các nghiên cứu cho thấy, khả năng kháng uốn của bê tông siêu cường độ (ultra-high-performance matrix - UHPC) tăng đáng kể khi được gia cố

bởi cốt sợi thép và trong giới hạn hàm lượng nghiên cứu, khả năng kháng uốn tăng khi hàm lượng cốt sợi tăng lên. Tuy nhiên, rất ít các nghiên cứu về ứng xử uốn của vật liệu UHPFRC dưới tác dụng của tải trọng động [17-20] và các nghiên cứu này chỉ dừng lại ở tốc độ gia tải vừa phải. Meng và cộng sự [17] nghiên cứu khả năng kháng uốn của UHPFRC dưới tác dụng của các tốc độ gia tải khác nhau (0,05, 0,50, 1,25, 2,50 và 5,00 mm/phút) cho thấy cường độ uốn tăng khi tốc độ gia tải tăng lên. Habel và Gauvreau [19] nghiên cứu khả năng kháng uốn của UHPFRC ở tốc độ cao cho thấy cường độ uốn của UHPFRC ở tốc độ biến dạng 2 s^{-1} cao hơn 25% so với trường hợp tĩnh tải. Parant và cộng sự [20] báo cáo rằng, cường độ kháng uốn của UHPFRC tăng bốn lần ở tốc độ gia tải là 500 GPa/s.

Trong nghiên cứu này, các tác giả nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi và tốc độ gia tải cao (va đập) đến khả năng chịu uốn của vật liệu UHPFRC, một trong những đặc tính quan trọng, phổ biến khi kết cấu chịu tác dụng của lực kéo uốn như dầm cầu, nhà hay các công trình quân sự chống sự phá hoại của vật liệu nổ, đạn bắn. Mục tiêu cụ thể là: 1) Nghiên cứu sự ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi đến khả năng kháng uốn của vật liệu UHPFRC; 2) Nghiên cứu sự ảnh hưởng của tốc độ gia tải đến khả năng kháng uốn của vật liệu UHPFRC. Thí nghiệm kháng uốn được thực hiện bằng thí nghiệm uốn ba điểm dưới tải trọng tĩnh của máy thí nghiệm đa năng (universal test machine - UTM) và tải trọng động bằng hệ thống thiết bị thí nghiệm khung năng lượng (strain energy frame impact machine - SEFIM).

Chương trình thí nghiệm



Hình 2. Chương trình thí nghiệm.

Một chương trình thí nghiệm được thiết kế để khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi và tốc độ gia tải đến khả năng kháng uốn của vật liệu UHPFRC (hình 2) gồm sáu loạt mẫu (kích thước 50x50x210 (mm)), được đúc và thử nghiệm. Ký hiệu của từng loạt mẫu được đặt theo hàm lượng cốt sợi (05, 15 tương ứng với hàm lượng cốt sợi là 0,5 và 1,5 vol.%); tốc độ gia tải ("S" tương ứng với tải trọng tĩnh, "h1" và "h2" tương ứng với tốc độ gia tải cao mức 1 và mức 2).

Vật liệu và mẫu thí nghiệm


Thành phần cấp phối của UHPC được thể hiện trong bảng 1 và đặc tính của cốt sợi thép được thể hiện trong bảng

2. Cường độ chịu nén trung bình của mẫu nén lập phương (50x50x50 mm) là 184 MPa theo kết quả thí nghiệm của Ngo và cộng sự [21]. Cốt sợi gia cố là loại cốt sợi thép trơn, đường kính $d=0,2$ mm, chiều dài $l=19$ mm, hàm lượng cốt sợi là 0,5 và 1,5 vol.%.

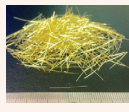
Quá trình trộn và chuẩn bị mẫu có thể tham khảo trong các tài liệu của [5, 22]. Máy trộn công suất 20 l có thể điều chỉnh tốc độ quay được dùng để trộn hỗn hợp UHPC. Đầu tiên, muối silic (silica fume) và cát quartz (silica sand) được trộn khô với nhau trong khoảng 5 phút. Sau đó, xi măng loại I (cement - type I) và bột khoáng (silica powder) được cho vào trộn tiếp trong khoảng 5 phút (với tốc độ quay của máy trộn khác nhau). Khi hỗn hợp khô đã đồng đều, nước và phụ gia siêu dẻo (superplasticizer) được cho vào từ từ và trộn tiếp cho đến khi hỗn hợp đạt được độ dẻo cần thiết. Độ dẻo của hỗn hợp được kiểm tra bằng thí nghiệm độ chảy theo tiêu chuẩn ASTM C1437 [23]. Cuối cùng, cốt sợi thép được rải đều vào hỗn hợp bằng tay và tiếp tục trộn thêm khoảng 2 phút. Hỗn hợp được cho vào khuôn chuẩn bị sẵn mà không cần phải đầm lèn. Mẫu và khuôn được để trong phòng thí nghiệm khoảng 48 h trước khi tháo khuôn và bảo dưỡng trong tểc nước nóng $90\pm 2^\circ\text{C}$ trong vòng 72 h để đạt 100% cường độ.

Bảng 1. Thành phần cấp phối UHPC theo tỷ lệ khối lượng.

Xi măng (loại I)	Muối silic	Cát quartz	Bột khoáng	Phụ gia siêu dẻo	Nước
1,00	0,25	1,10	0,30	0,067	0,2

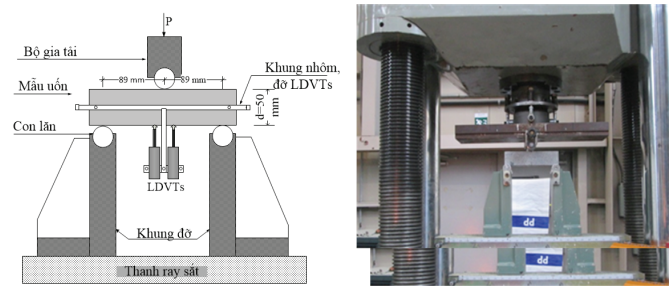


Bảng 2. Tính chất của cốt sợi thép.

Loại cốt sợi	Đường kính, d_f (mm)	Chiều dài, l_f (mm)	Mật độ, ρ (g/cc)	Cường độ kéo, σ_u (MPa)	Mô đun đàn hồi, E (GPa)	Hình ảnh cốt sợi
Cốt sợi trơn	0,2	19	7,90	2580	200	

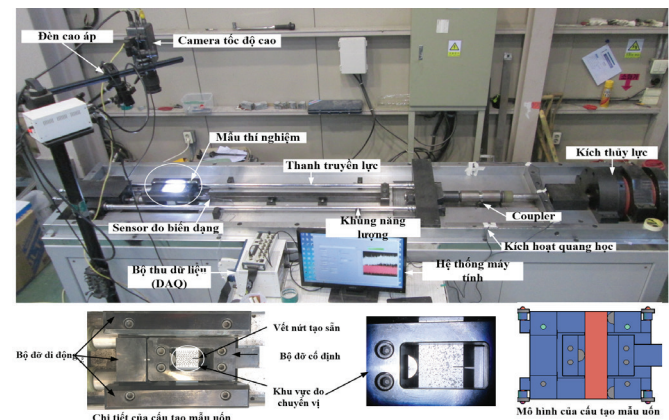
Thí nghiệm

Thí nghiệm uốn ba điểm được vận hành bằng máy nén đa năng (universal test machine - UTM) với chế độ kiểm soát chuyển vị (hình 3). Tải trọng tác dụng được đo bằng cảm biến lực cài đặt trong UTM, trong khi dịch chuyển thẳng đứng (δ) của mẫu được đo bằng hai biến áp vi sai tuyến tính (linear variable differential transformer - LDVT) được gắn vào đáy mẫu bằng khung nhôm. Tốc độ ghi dữ liệu của máy là 1 Hz.



Hình 3. Thí nghiệm uốn ba điểm dưới tải trọng tĩnh.

Hệ thống thí nghiệm động bằng khung năng lượng (improved - strain elastic frame impact machine - I-SEFIM) được đề xuất bởi Tran và cộng sự [24], nâng cấp bởi Park và cộng sự [4] tại Đại học Sejong (Hàn Quốc), đã và đang được dùng hữu hiệu để thí nghiệm kéo mẫu UHPFRC dưới tác dụng của tải trọng động. Trong nghiên cứu này, một bộ thí nghiệm uốn ba điểm được chế tạo để cài vào máy I-SEFIM phục vụ thí nghiệm uốn ở tốc độ gia tải siêu cao, như thể hiện trong hình 4. Kích thước mẫu, điều kiện biên của thí nghiệm động được chế tạo, cài đặt giống với thí nghiệm uốn ba điểm ở tải trọng tĩnh để loại trừ ảnh hưởng của kích thước mẫu, điều kiện biên đến kết quả thí nghiệm.



Hình 4. Thí nghiệm uốn động (I-SEFIM).

Nguyên lý hoạt động cơ bản của I-SEFIM là tạo ra lực gia tải với tốc độ cao bằng khung năng lượng. Khi khung năng lượng làm bằng sắt hoặc hợp kim cường độ cao được kéo dẫn bởi hệ thống kích thủy lực, năng lượng đàn hồi sẽ được tạo ra và tích lũy trong khung. Khi lực kéo dẫn đạt đến một giá trị nhất định, vượt qua giới hạn chảy của hệ thống khớp nối (coupler) làm bằng kim loại và được tạo sẵn mặt cắt phá hoại, hệ thống coupler sẽ bị đứt, năng lượng đàn hồi trong khung kim loại sẽ được giải phóng đột ngột, dẫn tới cả hệ thống khung năng lượng sẽ được di chuyển với một tốc độ rất cao, kéo theo mẫu thí nghiệm bị phá hủy. Tốc độ gia tải có thể được điều chỉnh, kiểm soát bằng cách điều chỉnh vật liệu và đường kính thanh của khung năng lượng hoặc điều chỉnh giới hạn chảy của hệ thống coupler. Trong thí nghiệm này đã sử dụng 2 tổ hợp giữa khung năng lượng và bộ coupler: 1) Coupler loại 800 kN và khung năng lượng bằng thép cường độ cao; 2) Coupler loại

400 kN và khung năng lượng làm bằng titan. Vận tốc va chạm lý thuyết được ước tính là 13,8 và 13,1 m/s bằng cách sử dụng phương trình (1) tương ứng với các tổ hợp trên.

$$V = C \times \varepsilon_f \tag{1}$$

trong đó, C là tốc độ sóng của khung năng lượng ($C = \sqrt{E/\rho}$), E là mô đun đàn hồi của khung năng lượng, ρ là khối lượng riêng của vật liệu làm khung, và ε_f là biến dạng của khung tại thời điểm coupler bị phá hủy.

Lực kháng của mẫu được đo gián tiếp thông qua độ biến dạng đàn hồi của thanh truyền lực (transmitter bar) bằng 2 bộ đo biến dạng động (dynamic strain gauges) được gắn trên bề mặt. Trong khi đó, biến dạng của mẫu được đo thông qua chuyển động của các điểm được đánh dấu trên bề mặt mẫu bằng hệ thống camera tốc độ cao và bộ thu thập dữ liệu tần suất cao. Lực và chuyển vị của mẫu ở thí nghiệm động được tính toán bằng công thức (2) và (3) tương ứng. Chi tiết về nguyên lý và cách phân tích dữ liệu đo chuyển vị được diễn giải chi tiết trong Ngo và cộng sự [6]:

$$P = \varepsilon_{tr} \times A_{tr} \times E_{tr} \tag{2}$$

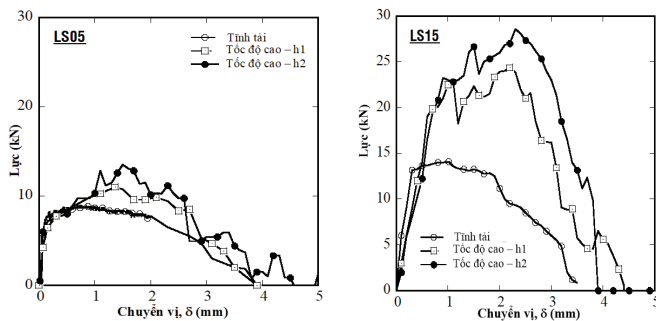
$$\delta = d_1 - d_2 \tag{3}$$

trong đó, ε_{tr} , A_{tr} và E_{tr} là biến dạng đàn hồi, diện tích mặt cắt ngang và mô đun đàn hồi của thanh truyền lực; d_1, d_2 là chuyển vị của điểm 1 và điểm 2 trên bề mặt bộ đỡ di động và bộ đỡ cố định (hình 4).

Kết quả thí nghiệm và nhận xét

Mối quan hệ giữa lực và chuyển vị của mẫu UHPFRC dưới tác dụng của các tốc độ gia tải khác nhau được thể hiện trong hình 5 và kết quả cụ thể của từng mẫu được liệt kê trong bảng 3.

Hình 5 cho thấy, lực và chuyển vị của mẫu UHPFRC tăng khi hàm lượng cốt sợi và tốc độ gia tải tăng lên. Như được liệt kê trong bảng 3, lực lớn nhất (P_{max}) của mẫu UHPFRC tăng từ 8,32 kN lên đến 14,05 kN khi hàm lượng cốt sợi tăng từ 0,5 đến 1,5 vol.%. Đồng thời, khi tốc độ gia tải tăng, P_{max} của UHPFRC gia cố bởi 0,5 vol.% tăng từ 8,32 kN ở tĩnh tải (tốc độ biến dạng $1,67 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) lên 11,03 kN ở tốc độ biến dạng $108,10 \text{ s}^{-1}$ và 13,51 kN ở tốc độ biến dạng $214,05 \text{ s}^{-1}$. Tương tự, P_{max} của UHPFRC gia cố bởi 1,5 vol.% tăng từ 14,05 đến 24,31 và 28,58 kN.



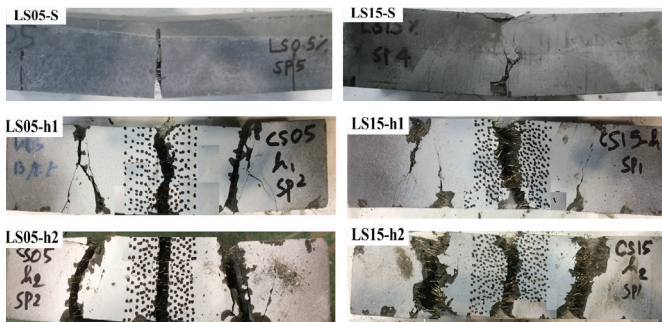
Hình 5. Đường cong lực - chuyển vị của UHPFRC dưới tốc độ gia tải khác nhau.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm uốn.

Đợt thí nghiệm	Số hiệu mẫu	Tốc độ biến dạng (s ⁻¹)	Lực lớn nhất, P _{max} (kN)	Chuyển vị, δ (mm)	Mô men uốn, R _t (MPa)
05-S	SP1	1,67x10 ⁻⁵	7,35	0,87	15,71
	SP2		8,92	0,81	19,05
	SP3		9,28	0,69	19,82
	SP4		7,75	0,71	16,55
	SP5		7,65	0,85	16,35
	SP6		8,97	0,68	19,16
	TB*		8,32	0,77	17,77
	SD**		0,8	0,1	4,9
05-h1	SP1	107,90	10,10	1,90	21,57
	SP2	110,45	10,33	1,15	22,06
	SP3	111,54	11,04	1,30	23,59
	SP4	101,25	11,77	1,30	25,14
	SP5	111,66	11,47	1,30	24,50
	SP6	105,78	11,47	1,30	24,50
	TB*	108,10	11,03	1,38	23,56
	SD**	4,6	0,7	0,3	1,4
05-h2	SP1	222,96	11,97	1,10	25,57
	SP2	209,93	14,12	1,50	30,16
	SP3	198,68	14,19	1,20	30,30
	SP4	232,61	14,36	1,50	30,67
	SP5	217,27	12,93	1,67	27,62
	SP6	202,87	13,50	1,77	28,83
	TB*	214,05	13,51	1,46	28,86
	SD**	14,8	0,9	0,3	2,0
15-S	SP1	1,67x10 ⁻⁵	13,24	0,88	28,28
	SP2		13,38	0,90	28,57
	SP3		14,27	1,04	30,49
	SP4		14,86	1,03	31,75
	SP5		14,61	1,25	31,20
	SP6		13,92	1,04	29,73
	TB*		14,05	1,02	30,00
	SD**		0,66	0,13	1,40
15-h1	SP1	119,13	24,78	2,25	52,92
	SP2	125,02	22,27	2,40	47,56
	SP3	101,98	26,62	2,04	56,86
	SP4	110,20	24,62	2,20	52,58
	SP5	105,82	23,27	2,00	49,71
	SP6	101,44	24,29	2,30	51,89
	TB*	110,60	24,31	2,20	51,92
	SD**	9,6	1,5	0,2	3,2
15-h2	SP1	214,44	29,73	2,03	63,51
	SP2	212,53	28,95	2,35	61,83
	SP3	207,86	27,41	2,34	58,54
	SP4	201,11	28,37	2,77	60,61
	SP5	209,14	28,29	1,98	60,43
	SP6	217,12	28,71	2,40	61,33
	TB*	210,37	28,58	2,31	61,04
	SD**	5,9	0,8	0,3	1,7

Ghi chú: TB*: giá trị trung bình; SD**: độ lệch chuẩn.

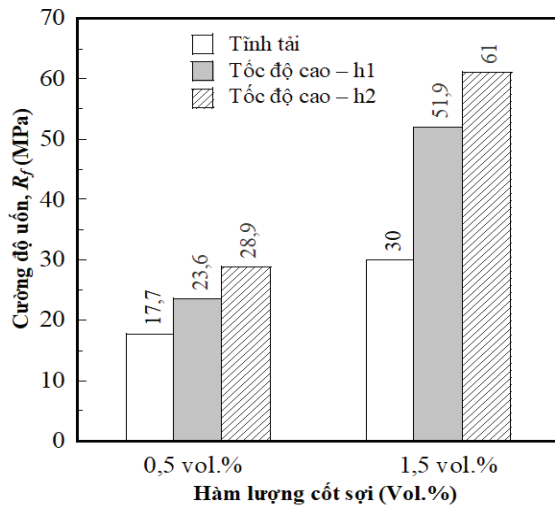
Hình 6 thể hiện vết nứt mẫu dưới tác dụng của thí nghiệm uốn. Từ hình 6 có thể thấy UHPFRC gia cố bởi 0,5 vol.% bị phá hủy với vết nứt đơn, trong khi UHPFRC gia cố bởi 1,5 vol.% xuất hiện thêm nhiều vết nứt nhỏ bên cạnh vết nứt phá hủy do uốn. Điều này cũng giải thích thêm rằng, hàm lượng cốt sợi tăng lên cũng dẫn tới cường độ uốn của vật liệu tăng, nhờ vào khả năng hạn chế vết nứt của cốt sợi. Mặt khác, dưới tác dụng của tốc độ gia tải cao, mẫu thí nghiệm bị phá hủy thành những phần riêng biệt. Trong đó, vết nứt giữa là phá hủy do lực uốn tác dụng, còn các vết nứt 2 bên là do sự phản hồi của bộ kẹp thí nghiệm gây ra bởi năng lượng dư của máy.



Hình 6. Ứng xử nứt của mẫu bê tông chịu uốn.

Hình 7 thể hiện mô men uốn (R_f) của các mẫu UHPFRC gia cố bởi hàm lượng cốt sợi khác nhau và các trường hợp tốc độ gia tải khác nhau. Trong đó, mô men uốn của mẫu được tính toán theo công thức (4). Trong công thức (4), P_{max} (kN) là lực tác dụng lớn nhất đo được từ máy thí nghiệm; L (mm): chiều dài nhịp, là khoảng cách giữa hai gối đỡ mẫu thí nghiệm; b và d (mm) lần lượt là bề rộng và chiều cao mẫu.

$$R_f = \frac{3xP_{max} \cdot xL}{2xbxd^2} = \frac{3xP_{max} \cdot x1000 \cdot x178}{2 \cdot x50 \cdot x50^2} \quad (4)$$



Hình 7. Cường độ chịu uốn của mẫu dưới các tốc độ gia tải khác nhau.

Từ hình 7 có thể thấy, cường độ uốn của vật liệu (R_f) tăng khi hàm lượng cốt sợi gia cố tăng và tốc độ gia tải tăng lên. R_f của UHPFRC tăng từ 17,7 lên đến 30 MPa khi hàm lượng cốt sợi tăng từ 0,5 lên 1,5 vol.%. Việc cường độ uốn của mẫu UHPFRC tăng khi hàm lượng cốt sợi tăng được ghi nhận ở một số tác giả trước như [11-16] và được giải thích bởi khả năng hạn chế xuất hiện và phát triển vết nứt trong mẫu bê tông của các cốt sợi thép tăng lên. Từ hình 7 cũng cho thấy, cường độ uốn của vật liệu UHPFRC tăng lên khi tốc độ gia tải tăng cho cả trường hợp gia cố 0,5 và 1,5 vol.% cốt sợi thép. Sự gia tăng cường độ khi tốc độ gia tải tăng được giải thích như sau: cường độ chịu kéo uốn của bê tông gia cố cốt sợi chủ yếu được hình thành bởi lực dính kết giữa bề mặt cốt sợi và lớp vữa xung quanh (interfacial bond strength) do quá trình co ngót của bê tông khi đông cứng và ma sát giữa hai bề mặt tiếp xúc; khi vữa bê tông xung quanh cốt sợi chuyển động có gia tốc bởi gia tải tốc độ cao, lực quán tính xuất hiện ở các hạt vữa làm gia tăng lực dính kết giữa cốt sợi và vữa xung quanh nó. Lực dính kết giữa cốt sợi và vữa tăng góp phần làm tăng cường độ của vật liệu UHPFRC khi tốc độ gia tải tăng lên. Xu hướng tăng cường độ khi tốc độ gia tải tăng cũng đã được nghiên cứu và ghi nhận bởi một số tác giả ở tốc độ gia tải thấp như [18, 20].

Kết luận

Từ kết quả thí nghiệm cho thấy, ngoài cường độ chịu nén cao, bê tông siêu tính năng gia cố cốt sợi có cường độ chịu uốn cũng rất cao nhưng phụ thuộc nhiều vào hàm lượng cốt sợi được gia cố. Cường độ chịu uốn của UHPFRC đạt được trung bình 30,0 MPa khi gia cố bởi 1,5 vol.% cốt sợi thép trơn. Khi tốc độ gia tải tăng, cường độ chịu uốn của UHPFRC được tăng lên đến 61,04 MPa ở tốc độ biến dạng trung bình 210 s⁻¹. Những tính chất này hứa hẹn việc áp dụng vật liệu UHPFRC vào công trình thực tế, không chỉ làm tăng tính thẩm mỹ, cường độ, kích thước hình học công trình mà còn phù hợp cho các cấu kiện, công trình chịu tải trọng động như động đất, va chạm, phá nổ.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (NAFOSTED) thông qua đề tài mã số: 107.01-2019.03. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. Wille, S. El-Tawil, A.E. Naaman (2014), "Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under direct tensile loading", *Cem. Concr. Compos.*, **48**, pp.53-66.
- [2] N.T. Tran, T.K. Tran, and D.J. Kim (2015), "High rate response of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension", *Cem. Concr. Res.*, **69**, pp.72-87.
- [3] N.T. Tran, T.K. Tran, J.K. Jeon, J.K. Park, and D.J. Kim (2016), "Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates", *Cem. Concr. Res.*, **79**, pp.169-184.
- [4] S.H. Park, D.J. Kim, and S.W. Kim (2016), "Investigating the

impact resistance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete using an improved strain energy impact test machine”, *Constr. Build. Mater.*, **125**, pp.145-159.

[5] T.T. Ngo, J.K. Park, S. Pyo, and D.J. Kim (2017), “Shear resistance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete”, *Constr. Build. Mater.*, **151**, pp.246-257.

[6] T.T. Ngo and D.J. Kim (2018), “Shear stress versus strain responses of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes at high strain rates”, *Int. J. Impact Eng.*, **111**, pp.187-198.

[7] H. Wu, Q. Zhang, F. Huang, and Q. Jin (2005), “Experimental and numerical investigation on the dynamic tensile strength of concrete”, *Int. J. Impact Eng.*, **32**, pp.605-617.

[8] Z. Wu, C. Shi, W. He, and D. Wang (2017), “Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements”, *Cem. Concr. Compos.*, **79**, pp.148-157.

[9] L. Mao, S. Barnett, D. Begg, G. Schleyer, and G. Wight (2014), “Numerical simulation of ultra high performance fibre reinforced concrete panel subjected to blast loading”, *Int. J. Impact Eng.*, **64**, pp.91-100.

[10] N.T. Tran (2016), *Direct Tensile Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Subjected to Impact Loading*, Doctoral Thesis, Sejong Univ., 163pp.

[11] D.Y. Yoo, S.W. Kim, and J.J. Park (2017), “Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers”, *Constr. Build. Mater.*, **132**, pp.219-229.

[12] D.J. Kim, A.E. Naaman, and S. El-Tawil (2009), “High performance fiber reinforced cement composites with innovative slip hardening twisted steel fibers”, *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, **3**, pp.119-126.

[13] D.J. Kim, S.H. Park, G.S. Ryu, and K.T. Koh (2011), “Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers”, *Constr. Build. Mater.*, **25**, pp.4144-4155.

[14] D.Y. Yoo, S.T. Kang, and Y.S. Yoon (2016), “Enhancing the flexural performance of ultra-high-performance concrete using long steel fibers”, *Compos. Struct.*, **147**, pp.220-230.

[15] D.Y. Yoo, S. Kim, G.J. Park, J.J. Park, and S.W. Kim (2017), “Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites”, *Compos. Struct.*, **174**, pp.375-388.

[16] Trần Bá Việt, Lê Xuân Lâm (2015), “Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến các tính chất của bê tông tính năng siêu cao”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, **2(7)**, tr.1-6.

[17] W. Meng, Y. Yao, B. Mobasher, and K.H. Khayat (2017), “Effects of loading rate and notch-to-depth ratio of notched beams on flexural performance of ultra-high-performance concrete”, *Cem. Concr. Compos.*, **83**, pp.349-359.

[18] S.G. Millard, T.C.K. Molyneaux, S.J. Barnett, and X. Gao (2010), “Dynamic enhancement of blast-resistant ultra high performance fibre-reinforced concrete under flexural and shear loading”, *Int. J. Impact Eng.*, **37**, pp.405-413.

[19] K. Habel and P. Gauvreau (2008), “Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) to impact and static loading”, *Cem. Concr. Compos.*, **30**, pp.938-946.

[20] E. Parant, P. Rossi, E. Jacquelin, and C. Boulay (2007), “Strain rate effect on bending behavior of new ultra-high-performance cement-based composite”, *ACI Mater. J.*, **104**, pp.458-463.

[21] T.T. Ngo and D.J. Kim (2018), “Synergy in shear response of ultra-high-performance hybrid-fiber-reinforced concrete at high strain rates”, *Compos. Struct.*, **195**, pp.276-287.

[22] J.J. Park, S.T. Kang, K.T. Koh, and S.W. Kim (2008), “Influence of the ingredients on the compressive strength of UHPC as a fundamental study to optimize the mixing proportion”, *Proceeding Second Int. Symp. Ultra High Perform. Concr. Kassel, Ger.*, pp.102-105.

[23] ASTM International (2001), *ASTM C 1437 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*, pp.1-2.

[24] T.K. Tran and D.J. Kim (2012), “Strain energy frame impact machine (SEFIM)”, *J. Adv. Concr. Technol.*, **10**, pp.126-136.