

Khả năng ứng xử uốn của bê tông tính năng siêu cao sử dụng nguyên vật liệu địa phương

Nguyễn Ngọc Thành^{1,2*}

¹Bộ môn Vật liệu Xây Dựng, Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa Tp.HCM

²Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

TỪ KHOẢ

Cường độ chịu nén
Cường độ chịu kéo khi uốn
Mô đun đàn hồi
Độ dẻo dai
Độ võng

TÓM TẮT

Bê tông tính năng siêu cao (UHPC) là loại bê tông đặc biệt với các tính năng vượt trội hơn so với bê tông truyền thống. Do đó, nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá khả năng ứng xử của dầm UHPC khi chịu uốn tại phòng thí nghiệm nhằm cung cấp dữ liệu thực nghiệm về khả năng ứng xử kết cấu của vật liệu UHPC. Hệ nguyên vật liệu địa phương để chế tạo UHPC bao gồm xi măng Portland, silica fume, bột cát silic, cát thạch anh, phụ gia siêu dẻo, nước và 3 % sợi thép theo thể tích bê tông. Các thông số được nghiên cứu để đánh giá khả năng ứng xử của ba dầm UHPC khi chịu uốn bao gồm lực uốn gây phá hủy mẫu, độ dẻo dai và độ bền vết nứt đầu tiên. Kết quả thu được UHPC có cường độ chịu nén đạt 120,6 MPa, mô đun đàn hồi đạt 55,7 GPa và hệ số poisson có giá trị 0,21. Việc kết hợp 3 % sợi thép theo thể tích của bê tông đã cải thiện cường độ chịu kéo của UHPC với giá trị đạt 19,81 MPa và chỉ số dẻo dai của UHPC với $I_5 = 5,29$; $I_{10} = 11,25$; $I_{20} = 24,40$ và $I_{30} = 36,97$.

KEYWORDS

Compressive strength
Flexural strength
Young's modulus
Toughness
Deflection

ABSTRACT

Ultra high-performance concrete (UHPC) is a special concrete with superior properties as compared with traditional concrete. Therefore, this study focused on evaluating structural behavior of UHPC beam subjected to bending test to provide experimental data regarding structural behaviors of UHPC. Local raw materials used to produce UHPC included Portland cement, silica fume, quartz powder, quartz sand, superplasticizer, water, and steel fiber at a level of 3 % by volume of concrete. The studied parameters to assess flexural behavior of UHPC beam subjected to bending test consisted of maximum load, toughness, and first-crack deflection. Experimental results obtained the UHPC had a compressive strength of 120.6 MPa, Young's modulus of 55.7 GPa, and poisson's ratio of 0.21. The use of 3 % steel fiber improved flexural strength (19.81 MPa) and toughness indexes with $I_5 = 5.29$, $I_{10} = 11.25$, $I_{20} = 24.40$, and $I_{30} = 36.97$.

1. Giới thiệu

Nhu cầu xã hội ngày càng cao kéo theo sự phát triển của công nghệ và kỹ thuật của các lĩnh vực, trong đó có ngành công nghiệp xây dựng. Kết quả là, các loại bê tông đặc biệt như bê tông cường độ cao, bê tông chất lượng cao, bê tông tính năng siêu cao (UHPC)... được nghiên cứu và phát triển với các đặc tính kỹ thuật vượt trội hơn so với bê tông truyền thống. Trong số đó, UHPC là loại bê tông có cường độ chịu nén rất cao trên 100 MPa [1] và cường độ chịu kéo tối thiểu 8 MPa theo AFGC [2]. Cấu trúc của UHPC đặc chắc cao nhờ sự phối trộn bởi hệ nguyên vật liệu dạng hạt mịn như xi măng Portland, silica fume, bột cát silic, cát thạch anh ... nên UHPC có khả năng chống thấm nước cao và độ bền lâu [3-5]. Bên cạnh đó, UHPC có cường độ chịu kéo khi uốn, độ dẻo dai và độ va đập cao hơn so với các loại bê tông truyền thống khác; điều này là do sự kết hợp của sợi thép gia cường vào trong hệ nền [6-10]. Với việc sử dụng tỷ lệ nước/chất kết dính thấp (khoảng 0,20) cùng với phụ gia siêu dẻo, UHPC có độ bền

cao, có khả năng chống lại các tác động từ môi trường xâm thực hơn so với bê tông chất lượng cao [11].

Tỷ lệ thành phần hệ nguyên vật liệu trong UHPC là một trong những chủ đề mà các nhà nghiên cứu trên thế giới và trong nước quan tâm do đặc điểm khu vực của từng vùng khác nhau dẫn đến các tính chất kỹ thuật và chất lượng nguyên vật liệu đầu vào khác nhau [12]. Zhou và cộng sự [12] đã đề nghị việc xác định tỷ lệ thành phần tối ưu trong UHPC thông qua thực nghiệm ở từng khu vực, từng quốc gia là điều rất cần thiết nhằm tránh việc sử dụng trực tiếp các dữ liệu có sẵn ảnh hưởng đến việc chế tạo UHPC. Công nghệ chế tạo khác nhau cũng là yếu tố góp phần chi phối đến tỷ lệ thành phần tối ưu trong UHPC [12]. Các yếu tố chính ảnh hưởng đến đặc tính kỹ thuật (cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo và độ bền) của UHPC bao gồm điều kiện dưỡng hộ, thời gian dưỡng hộ, hàm lượng sợi, tốc độ gia tải, hình dáng kích thước mẫu [12]. Nhìn chung, cường độ của UHPC được dưỡng hộ ở nhiệt độ thường thấp hơn từ 10 đến 30 % so với việc dưỡng hộ ở nhiệt độ cao (90 °C) [12]. Tuy nhiên, việc áp dụng dưỡng hộ nhiệt độ cao lại bị hạn chế trong thực tế. Vì thế, việc

*Liên hệ tác giả: nnthanh@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 03/11/2023, sửa xong ngày 27/12/2023, chấp nhận đăng ngày 12/01/2024

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2024.591>

ngiên cứu chế tạo UHPC với đủ cường độ được dưỡng hộ ở nhiệt độ thường sẽ có ý nghĩa thực tế hơn khi đưa vào ứng dụng rộng rãi cho công trình xây dựng. Bên cạnh đó, chi phí sản xuất UHPC cao cũng được xem là một trong những trở ngại ứng dụng trong thực tế. Tại Việt Nam, Trần và Lê [13] đã sử dụng nguyên vật liệu tại phía Nam để chế tạo UHPC cốt sợi thép mảnh với chiều dài 13 mm và đường kính 0,2 mm và đạt cường độ chịu nén trên 140 MPa, cường độ chịu kéo khi uốn lớn hơn 30 MPa khi sử dụng hàm lượng sợi thép đến 4 % theo thể tích của bê tông. Gần đây, loại UHPC bền vững với chi phí ban đầu thấp hơn đang được đề xuất bởi một số nhà nghiên cứu [14-17] nhằm thúc đẩy ứng dụng UHPC trong thực tiễn. Meng và cộng sự [18] đã thành công trong việc thiết kế tối ưu cấp phối UHPC với cường độ chịu nén 125 MPa được dưỡng hộ trong điều kiện tiêu chuẩn với chi phí sản xuất là 4,1-4,5 USD/m³/MPa. Hơn thế, Ngô và Hải [19] đã nghiên cứu khả năng kháng uốn của UHPC gia cố sợi thép dưới tác dụng của tải trọng động và kết luận rằng cường độ chịu kéo khi uốn của UHPC tùy thuộc vào hàm lượng cốt sợi được gia cố và tốc độ gia tải.

Nhìn chung, hầu hết các nghiên cứu trên đều tập trung vào các đặc trưng kỹ thuật của UHPC và thiết kế tỷ lệ thành phần hệ nguyên vật liệu tối ưu. Trong khi, các nghiên cứu về khả năng ứng xử kết cấu khi chịu uốn của UHPC sử dụng nguyên vật liệu địa phương và được dưỡng hộ ở nhiệt độ thường vẫn còn hạn chế ở Việt Nam. Do đó, nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá khả năng ứng xử của dầm UHPC khi chịu uốn tại phòng thí nghiệm nhằm cung cấp dữ liệu thực nghiệm về khả năng ứng xử kết cấu của loại vật liệu UHPC này.

2. Vật liệu và phương pháp thí nghiệm

2.1. Vật liệu thí nghiệm

Hệ nguyên vật liệu để chế tạo UHPC bao gồm xi măng Portland PC40, silica fume, bột cát silic, cát thạch anh, sợi thép, nước và phụ gia siêu dẻo. Xi măng Portland phù hợp TCVN 2682:2020 [20]. Trong khi, silica fume chứa SiO₂ vô định hình, cỡ hạt phân bố từ 0,1-1 μm với hàm lượng SiO₂ 94 %, tức lớn hơn 85 % thỏa mãn TCVN 8827:2011 [21]. Các tính chất kỹ thuật của xi măng và silica fume được mô tả ở Bảng 1. Bột cát silic với khối lượng riêng 2,63 g/cm³, hàm lượng SiO₂ không nhỏ hơn 99 % và đường kính trung bình từ 3-4 μm. Cát thạch anh có màu trắng ngà, dạng hạt, đều, nhiều góc cạnh với kích thước đa dạng từ 0,1-0,3 mm, 0,3-0,7 mm và 1-2 mm, khối lượng riêng 2,68 g/cm³ và chứa 98,92 % SiO₂. Sợi thép có hình dáng tròn, trơn, chiều dài 15 mm và đường kính 0,15 mm, lực kéo đứt 2750 MPa phù hợp TCVN 12392-1:2018 [22]. Nước được sử dụng trong nghiên cứu này là nước thủy cục phù hợp với TCVN 4560:2012 [23]. Phụ gia siêu dẻo sử dụng là phụ gia Sika ViscoCrete với thông số kỹ thuật được trình bày ở Bảng 2 nhằm mục đích tạo độ nhớt phù hợp cho hỗn hợp UHPC và giúp sợi thép phân bố đồng đều trong hệ nền UHPC.

Bảng 1. Các tính chất kỹ thuật của xi măng.

Chỉ tiêu	Xi măng	Silica fume
Cường độ chịu nén (MPa)		
+ 3 ngày	33,7	-
+ 28 ngày	64,7	-
Chỉ số hoạt tính trong xi măng theo cường độ (%)	-	125
Lượng nước tiêu chuẩn (%)	29,5	-
Thời gian ninh kết (phút)		
+ bắt đầu	195	-
+ kết thúc	225	-
% lượng sót lại trên sàng 0,09 mm	0,1	-
Khối lượng riêng	3,1	2,3

∴ không thí nghiệm

Bảng 2. Thông số kỹ thuật của phụ gia Sika ViscoCrete.

Chỉ tiêu	Phụ gia Sika ViscoCrete
Gốc hóa học	Hỗn hợp của polycarboxylate cải tiến hệ nước
Ngoại quan/màu sắc	Chất lỏng màu nâu
Khối lượng thể tích	1,076-1,116 kg/L (ở 20°C)
Độ pH	3,50-5,50 (ở 25°C)
Liều lượng	0,5-2 L/100kg xi măng

2.2. Thành phần cấp phối

Thành phần cấp phối theo khối lượng của 1 m³ UHPC được trình bày ở Bảng 3 với tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) là 0,2 và hàm lượng sợi thép 3 % theo thể tích của UHPC được tham khảo từ nghiên cứu trước [11, 24], và các tỷ lệ cát/chất kết dính (C/CKD), tỷ lệ bột cát/xi măng (BC/X), tỷ lệ silica fume/xi măng (SF/X) và lượng phụ gia siêu dẻo (SP) thu được từ các nghiên cứu trước [11, 24] và thí nghiệm thử tại phòng thí nghiệm.

Bảng 3. Thành phần cấp phối (theo khối lượng) của UHPC.

Cấp phối	X	N/CKD	C/CKD	BC/X	SF/X	%SP	% sợi thép
UHPC	1	0,2	1	0,1	0,25	0,05	3

X: xi măng; N/CKD: tỷ lệ nước/chất kết dính; C/CKD: tỷ lệ cát/chất kết dính; BC/X: tỷ lệ bột cát/xi măng; SF/X: tỷ lệ silica fume/xi măng; SP: phụ gia siêu dẻo.

2.3. Quy trình nhào trộn, chuẩn bị mẫu thử và dưỡng hộ

Sau khi định lượng nguyên vật liệu của cấp phối theo Bảng 3, việc nhào trộn bê tông và chuẩn bị mẫu thử được thực hiện theo quy trình được tham khảo từ [1], cụ thể như sau: (1) cho xi măng, silica fume, bột cát silic và cát thạch anh vào cối trộn của máy trộn trong phòng thí nghiệm và tiến hành nhào trộn cho đến khi thu được hỗn hợp khô đồng nhất; (2) cho dung dịch (bao gồm phụ gia siêu dẻo và nước đã được hòa tan trước đó) từ từ vào cối trộn và tiến hành nhào trộn cho đến khi thu được hỗn hợp đồng nhất; (3) rải sợi thép đồng đều vào

hỗn hợp và tiến hành nhào trộn nhằm để đảm bảo sự đồng nhất và không bị kết tụ.

Sau khi nhào trộn đồng nhất, hỗn hợp bê tông được đổ vào các khuôn đã được làm sạch và bôi dầu. Sau đó, các mẫu được dưỡng hộ trong khuôn trong 24 giờ và được tháo khỏi khuôn để được dưỡng hộ nước ở nhiệt độ thường ($27 \pm 2^\circ\text{C}$) cho đến đủ ngày tuổi xác định các chỉ tiêu kỹ thuật và khả năng ứng xử kết cấu của UHPC.

2.4. Kiểm tra các chỉ tiêu kỹ thuật của UHPC

Các chỉ tiêu kỹ thuật của UHPC được kiểm tra bao gồm tính công tác của hỗn hợp bê tông, cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi khi nén, hệ số poisson và cường độ chịu kéo khi uốn của mẫu đầm UHPC. Tính công tác hay độ lưu động của hỗn hợp UHPC được đánh giá thông qua thí nghiệm thử độ chảy xòe côn mini theo ASTM C1437 [25]. Trong khi đó, cường độ chịu nén của mẫu UHPC ở 28 ngày tuổi là giá trị trung bình của ba mẫu hình trụ với đường kính 100 mm và chiều cao 200 mm được xác định thông qua TCVN 3118:1993 [26]. Hơn thế, mô đun đàn hồi khi nén và hệ số poisson của mẫu UHPC là giá trị trung bình của ba mẫu hình trụ với đường kính 100 mm và chiều cao 200 mm được xác định thông qua ASTM C649 [27], xem Hình 1.

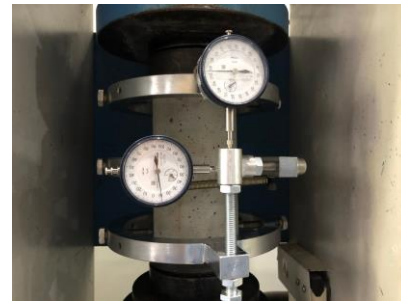
Để đánh giá khả năng ứng xử kết cấu của mẫu UHPC khi chịu uốn, cường độ chịu kéo khi uốn của mẫu UHPC ở 28 ngày tuổi là giá trị trung bình của ba mẫu đầm kích thước $100 \times 100 \times 400$ mm được đặt vào thiết bị uốn theo ASTM C78/C78M [28] với tốc độ gia tải 0.6 ± 0.4 N/mm² trong 1 giây, xem Hình 2. Để thiết lập mối quan hệ giữa lực uốn và độ võng, thiết bị biến áp vi sai tuyến tính (LVDT) được gắn vào vị trí giữa chiều dài của mẫu UHPC và kết nối với laptop để ghi nhận dữ liệu như được thể hiện ở Hình 2. Hơn thế, chỉ số dẻo dai và độ bền vết nứt đầu tiên của ba mẫu đầm UHPC cũng được xác định thông qua ASTM C1609/C1609M [29].

Bảng 4. Các chỉ tiêu kỹ thuật của UHPC.

Chỉ tiêu	Đơn vị	Mẫu/Lần 1	Mẫu/Lần 2	Mẫu/Lần 3	Trung bình
Độ lưu động với đường kính	mm	176	189	187	184
Cường độ chịu nén	MPa	119,9	114,6	127,3	120,6
Mô đun đàn hồi khi nén	GPa	54,5	56,9	55,8	55,7
Hệ số poisson		0,21	0,21	0,21	0,21

3.2. Khả năng ứng xử của mẫu đầm UHPC khi chịu uốn

Mối quan hệ giữa lực uốn và độ võng của ba mẫu đầm UHPC được trình bày ở Hình 3. Nhận thấy rằng, khả năng ứng xử của ba mẫu đầm này khi chịu uốn đều tương tự nhau, chứng tỏ hỗn hợp UHPC trong quá trình nhào trộn mang tính đồng nhất. Từ Hình 3, có thể quan sát thấy được rằng trong giai đoạn OA, tải trọng uốn và độ võng của các mẫu UHPC đều tỷ lệ thuận với nhau, tức tải trọng tăng đã dẫn đến độ võng của mẫu UHPC tăng. Tiếp đó, quan sát thực nghiệm nhận thấy rằng khi tải trọng uốn vượt qua khả năng chịu lực của mẫu UHPC, mẫu



Hình 1. Thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi khi nén và hệ số poisson của mẫu UHPC.



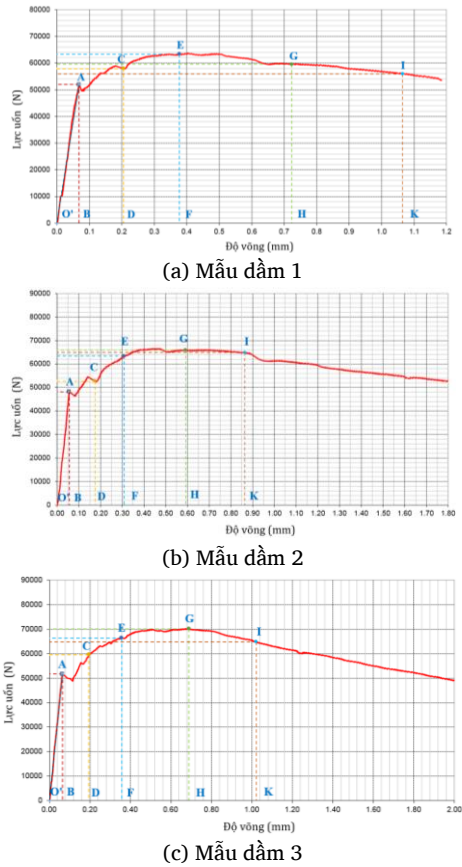
Hình 2. Thí nghiệm xác định cường độ chịu kéo khi uốn của mẫu đầm UHPC.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Các chỉ tiêu kỹ thuật của UHPC

Bảng 4 thể hiện các chỉ tiêu kỹ thuật của UHPC trong nghiên cứu này. Nhận thấy rằng, UHPC với tỷ lệ thành phần cấp phối ở Bảng 3 có độ lưu động cao với đường kính chảy trung bình là 184 mm, cường độ chịu nén trung bình đạt 120,6 MPa, tức lớn hơn 100 MPa theo [1], mô đun đàn hồi khi nén trung bình là 55,7 GPa và hệ số poisson trung bình là 0,21. Do đó, cấp phối này được đánh giá phù hợp để chế tạo UHPC và được chọn làm cấp phối để đánh giá khả năng ứng xử uốn của mẫu đầm UHPC được trình bày tương ứng ở mục 3.2.

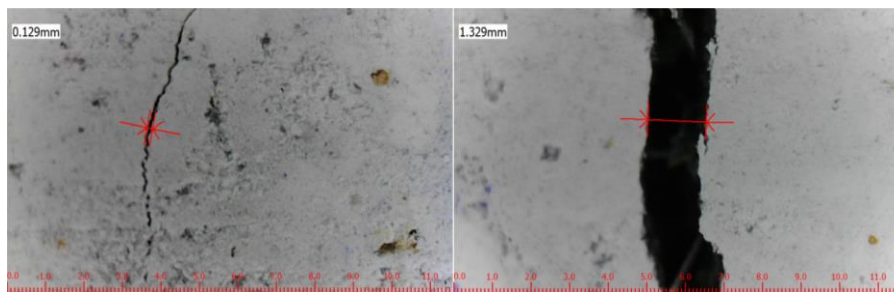
mẫu bắt đầu xuất hiện vết nứt (tại vị trí A) và khi tiếp tục tăng tải, độ võng của mẫu phát triển từ từ đến khi mẫu bị phá hủy và tải trọng bắt đầu giảm dần. Đối với ba mẫu UHPC này, quan sát thấy rằng không có hiện tượng mẫu bị phá hủy đột ngột như trường hợp của bê tông truyền thống. Điều này được quan sát từ đồ thị thoải dần kể từ khi tải trọng vượt quá khả năng chịu lực của mẫu UHPC cho đến khi mẫu bị phá hủy hoàn toàn. Xu hướng này cũng được quan sát trong nghiên cứu của Trần và Lê [13].



Hình 3. Mối quan hệ giữa lực uốn và độ võng của ba mẫu đầm UHPC.

Bảng 5. Các thông số kỹ thuật của ba mẫu đầm UHPC khi chịu uốn.

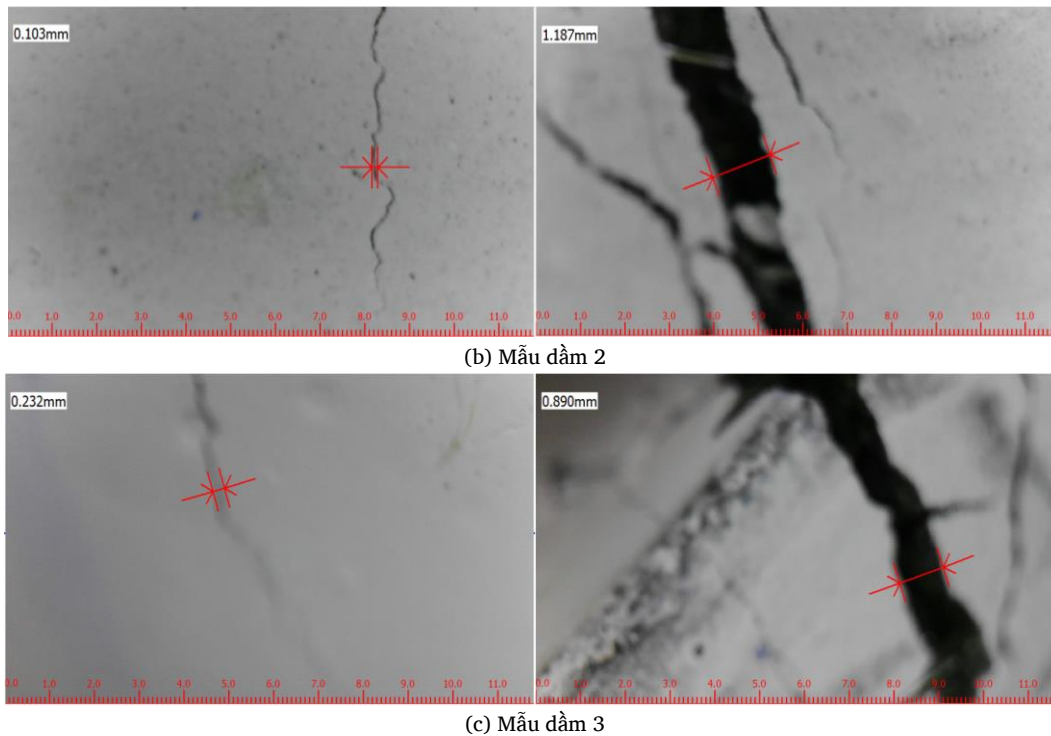
Chỉ tiêu	Đơn vị	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Trung bình
Lực uốn tương ứng vết nứt đầu tiên xuất hiện	kN	51,97	48,14	51,72	50,61
Cường độ kéo khi uốn tương ứng vết nứt đầu tiên xuất hiện	MPa	15,50	14,20	15,25	14,98
Độ võng khi vết nứt đầu tiên xuất hiện	mm	0,0687	0,0560	0,0650	0,0632
Lực uốn gây phá hủy mẫu	kN	63,68	66,89	70,22	66,93
Cường độ chịu kéo khi uốn	MPa	18,99	19,73	20,70	19,81
Độ dẻo dai tương ứng vết nứt đầu tiên xuất hiện	N.m	1,78	1,35	1,68	1,60
Chỉ số dẻo dai					
I_5		5,25	5,43	5,18	5,29
I_{10}		11,22	11,31	11,23	11,25
I_{20}		23,20	25,10	24,89	24,40
I_{30}		34,30	38,35	38,27	36,97



(a) Mẫu đầm 1

Từ Hình 3, các chỉ số dẻo dai và độ bền vết nứt đầu tiên của mẫu đầm UHPC cũng được xác định thông qua ASTM C1609/C1609M [29] và kết quả cụ thể của từng mẫu được liệt kê trong Bảng 5. Kết quả uốn của ba mẫu đầm UHPC cho thấy, cường độ chịu kéo khi uốn gây nứt đầu tiên trung bình đạt 14,98 MPa, độ võng khi vết nứt đầu tiên xuất hiện đạt trung bình 0,0632 mm và độ dẻo dai tương ứng trung bình 1,6 N.m. Trong khi đó, cường độ chịu kéo khi uốn tới hạn đạt trung bình 19,81 MPa, tức cao hơn khoảng 32,6 % cường độ khi vết nứt đầu tiên xuất hiện và các chỉ số dẻo dai $I_5 = 5,29$; $I_{10} = 11,25$; $I_{20} = 24,40$ và $I_{30} = 36,97$, chứng tỏ rằng mẫu UHPC trong nghiên cứu này có khả năng chịu kéo khi uốn và độ dẻo dai cao. Trần và Lê [13] cũng đã kết luận rằng đầm UHPC với 3 % sợi thép có chỉ số dẻo dai cao nhất ($I_3 = 12,3$ và $I_{5,5} = 9,9$) so với các đầm UHPC với 0, 1 và 2 % sợi thép. Sự khác biệt về giá trị chỉ số dẻo dai của nghiên cứu này và nghiên cứu của Trần và Lê [13] có thể là do hệ nguyên vật liệu sử dụng chế tạo UHPC và tỷ lệ thành phần khác nhau.

Hình 4 thể hiện các vết nứt phát triển trên ba mẫu đầm khi chịu uốn tương ứng khi đạt độ võng δ (ứng với vị trí xuất hiện vết nứt đầu tiên) và $15,5\delta$ (ứng với vị trí uốn đạt giá trị lớn nhất). Ứng với độ võng δ , bề rộng vết nứt của mẫu đầm UHPC 1, 2 và 3 lần lượt là 0,129 mm; 0,103 mm và 0,232 mm, tức bề rộng vết nứt của mẫu đầm UHPC trung bình đạt 0,155 mm. Trong khi đó, ứng với độ võng $15,5\delta$, bề rộng vết nứt của mẫu đầm UHPC 1, 2 và 3 lần lượt là 1,329 mm; 1,187 mm và 0,890 mm, tức bề rộng vết nứt của mẫu đầm UHPC trung bình đạt 1,135 mm, lớn gấp hơn 7 lần bề rộng vết nứt xuất hiện đầu tiên.



Hình 4. Các vết nứt phát triển trên ba mẫu dầm UHPC khi chịu uốn.

4. Kết luận

Từ những kết quả thực nghiệm trong phòng thí nghiệm về UHPC sử dụng nguyên vật liệu địa phương và được dưỡng hộ trong nhiệt độ thường, một số kết luận được rút ra như sau:

- Với nguyên vật liệu địa phương tại Việt Nam, UHPC đã được chế tạo với cường độ chịu nén đạt 120,6 MPa, mô đun đàn hồi đạt 55,7 GPa và hệ số Poisson có giá trị 0,21.

- Việc kết hợp sợi thép 3 % theo thể tích của bê tông đã cải thiện cường độ chịu kéo của UHPC với cường độ chịu kéo khi uốn gây nứt đầu tiên đạt 14,98 MPa và cường độ chịu kéo khi uốn tới hạn đạt 19,81 MPa.

- Việc kết hợp sợi thép 3 % theo thể tích của bê tông đã cải thiện chỉ số dẻo dai của UHPC với các chỉ số dẻo dai cao, cụ thể $I_5 = 5,29$; $I_{10} = 11,25$; $I_{20} = 24,40$ và $I_{30} = 36,97$.

- Bề rộng vết nứt xuất hiện đầu tiên của mẫu dầm UHPC trung bình đạt 0,155 mm. Trong khi đó, bề rộng vết nứt của mẫu dầm UHPC khi chịu lực uốn tới hạn trung bình đạt 1,135 mm.

Lời cảm ơn

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

[1]. H. Xu, Z. Deng, Mechanical properties of a new kind of Ultra-high performance concrete, *Concrete* 4 (4) (2014) 20–23, <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-3550.2014.04.006>.

[2]. French association of civil engineering (AFGC/SETRA), French interim recommendations of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRFC), Paris, France, 2002.

[3]. D. Wang, C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, Z. Huang, Z. Fang, A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. *Constr Build Mater* 96 (2015) 368–377.

[4]. B. A. Tayeh, A. S. Aadi, N. N. Hilal, B. A. Bakar, M. M. Al-Tayeb, W. N. Mansour, Properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPRFC) - a review paper. In AIP Conference Proceedings 2157 (2019) 020040.

[5]. M. G. Sohail, R. Kahraman, N. Al Nuaimi, B. Gencturk, W. Alnahhal, Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes. *J Build Engineer* 33 (2021) 101669.

[6]. Z. Wu, C. Shi, W. He, D. Wang, Static and dynamic compressive properties of ultrahigh performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements, *Cem Concr Compos* 79 (2017) 148–157.

[7]. M. Amin, B. A. Tayeh, I. S. Agwa Effect of using mineral admixtures and ceramic wastes as coarse aggregates on properties of ultrahigh-performance concrete, *J Clean Product* 273 (2020) 123073.

[8]. A. S. Faried, S. A. Mostafa, B. A. Tayeh, T. A. Tawfik, Mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporated with various nano waste materials under different curing conditions, *J Build Engineer* 43 (2021) 102569.

[9]. P. Yan, B. Chen, S. Afgan, M. A. Haque, M. Wu, J. Han, Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fiber, polypropylene fiber and glass fibre, *Constr Build Mater* 279 (2021) 122489.

[10]. M. Amin, A. M. Zeyad, B. A. Tayeh, I. S. Agwa Effect of ferrosilicon and silica fume on mechanical, durability, and microstructure characteristics of ultra high-performance concrete, *Constr Build Mater* 320 (2022) 126233.

- [11]. J. Li, Z. Wu, C. Shi, Q. Yuan, Z. Zhang, Durability of ultra-high performance concrete – A review, *Constr Build Mater* 255 (2020) 119296.
- [12]. M. Zhou, W. Lu, J. Song, G. C. Lee, Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering, *Constr Build Mater* 186 (2018) 1256–1267.
- [13]. B. V. Trần, X. L. Lê, Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép đến các tính chất của bê tông tính năng siêu cao, *Tạp chí Khoa học & Công nghệ Việt Nam* 2 (2015) 1–6.
- [14]. S. L. Yang, S. G. Millard, M. N. Soutsos, S. J. Barnett, T. T. Le, Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC), *Constr Build Mater* 23 (2009) 2291–2298.
- [15]. S. H. Park, D. J. Kim, G. S. Ryu, K. T. Koh, Tensile behaviour of ultra-high performance hybrid fibre reinforced concrete, *Cem Concr Compos* 34 (2012) 172–184.
- [16]. W. Wang, J. Liu, F. Agostini, C. A. Davy, F. Skoczylas, D. Corvez, Durability of an ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) under progressive aging, *Cem Concr Res* 55 (2014) 1–13.
- [17]. R. Yu, P. Spiesz, H. J. H. Brouwers, Development of an eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses, *Cem Concr Compos* 55 (2015) 383–394.
- [18]. W. Meng, M. Valipour, K. H. Khayat, Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete, *Mater Struct* 50 (2017) 29.
- [19]. T. T. Ngô, V. H. Hoàng, Nghiên cứu khả năng kháng uốn của bê tông siêu tính năng gia cố cốt sợi thép dưới tác dụng của tải trọng động, *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật và Công nghệ Việt Nam* 63 (2021) 40–45.
- [20]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 2682:2020 Xi măng Portland – Yêu cầu kỹ thuật, 2020.
- [21]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 8827:2011 Phụ gia khoáng hoạt tính cao dung cho bê tông và vữa - Silica fume và tro trấu nghiền mịn, 2011.
- [22]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 12392-1:2018 Sợi cho bê tông cốt sợi – Phần 1: Sợi thép, 2018.
- [23]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 4506:2012 Nước cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật, 2012.
- [24]. M. Elsayed, S. Badawy, B. A. Tayeh, M. Elymany, M. Salem, M. ElGawady, Shear behaviour of ultra-high performance concrete beams with openings, *Struct.* 43 (2022) 546–558.
- [25]. Hội Thử nghiệm và Vật liệu Mỹ (American Society for Testing and Materials, ASTM C1437 Standard test method for flow of hydraulic cement mortar, 2020.
- [26]. Bộ Khoa học và Công nghệ, TCVN 3118:1993 Bê tông nặng - Phương pháp xác định cường độ nén, 1993.
- [27]. Hội Thử nghiệm và Vật liệu Mỹ (American Society for Testing and Materials, ASTM C649 Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression, 2020.
- [28]. Hội Thử nghiệm và Vật liệu Mỹ (American Society for Testing and Materials, ASTM C78/78M Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading), 2022.
- [29]. Hội Thử nghiệm và Vật liệu Mỹ (American Society for Testing and Materials, ASTM C1609/C1609M Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading), 2020.