



ẢNH HƯỞNG CỦA KÍCH THƯỚC MẪU ĐẾN KHẢ NĂNG CHỊU UỐN CỦA BÊ TÔNG CHẤT LƯỢNG SIÊU CAO

Lê Trung Thành^{1*}

Tóm tắt: Bê tông chất lượng siêu cao (Ultra High Performance Concrete - UHPC) thường có cường độ chịu nén lớn hơn 150 MPa và cường độ chịu uốn trong khoảng 15 - 40 MPa là một loại bê tông thế hệ mới có tính năng vượt trội so với các loại bê tông cường độ cao. Tuy nhiên, việc ứng dụng UHPC trong thực tế cần phải tính đến độ sai khác về khả năng chịu uốn khi hàm lượng sợi thép sử dụng và kích thước kết cấu thay đổi. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu về ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép và kích thước mẫu thử đến khả năng chịu uốn của UHPC. Ba nhóm UHPC với hàm lượng sợi khác nhau, tương ứng là 0%, 1% và 2% theo thể tích đã được thử nghiệm với các mẫu thí nghiệm hình dầm (hai loại kích thước khác nhau là 40×40×160 mm và 100×100×350 mm), chịu tải trọng tác động theo sơ đồ thí nghiệm uốn 3 điểm và uốn 4 điểm. Kết quả thử nghiệm khẳng định khi tăng hàm lượng sợi lên thì cường độ uốn của bê tông tăng và khi tăng kích thước mẫu lên thì cường độ uốn của UHPFRC giảm.

Từ khóa: Bê tông chất lượng siêu cao (UHPC); ảnh hưởng của kích thước mẫu.

Effect of specimen size on flexural behaviour of UHPC

Abstract: Ultra High Performance Concrete (UHPC) having over 150 MPa compressive strength and 15-40 MPa flexural strength is considered as the latest generation of concrete technology and highly advanced performance compared with high strength concrete. However, the application of UHPC in reality needs to consider the change of flexural behaviour when the fibre content and structures' size are varied. This research is to investigate the effect of fibre content and specimen size on the flexural behaviour of UHPC. Three series of UHPC with different fibre content varied from 0%, 1% to 2% in volume are experimented with beam specimens (two different sizes of 40×40×160 mm and 100×100×350 mm) under 3 point and 4 point bending loads. The experimental results confirm that increasing fibre content increases the flexural strength and increasing specimen size reduces the flexural strength.

Keywords: Ultra-High Performance Concrete (UHPC); size effect.

Nhận ngày 15/6/2017; sửa xong 11/8/2017; chấp nhận đăng 26/9/2017

Received: June 15th, 2017; revised: August 11th, 2017; accepted: September 26th, 2017



1. Giới thiệu

Bê tông chất lượng siêu cao (UHPC) là loại bê tông có độ chảy cao, cường độ nén rất cao (thường lớn hơn 150 MPa), cường độ uốn lớn có giá trị trong khoảng 15 - 40 MPa (khi sử dụng cốt sợi thép), độ thấm thấp và độ bền cao [1-6]. Sự ra đời của UHPC đã đánh dấu một bước phát triển mới mang tính đột phá cả về lý thuyết và thực tiễn áp dụng trong công nghệ bê tông hiện đại. Các nghiên cứu phát triển và ứng dụng loại bê tông này được bắt đầu từ năm 90 của thế kỷ XX và kể từ đó loại bê tông này đã được áp dụng ở một số nước phát triển để chế tạo các cấu kiện dầm cầu đúc sẵn, tấm lát mặt cầu, kết cấu bền vững với môi trường biển, bể chứa phế thải hạt nhân...

Khả năng chịu uốn của UHPC là đặc điểm cơ học quan trọng bậc nhất để phân biệt UHPC với các loại bê tông khác. Khả năng chịu uốn của UHPC không chỉ đánh giá tức thời tại một thời điểm như là cường độ chịu uốn mà nó được đánh giá thông qua một số chỉ số cơ học thể hiện quá trình chịu tác động của tải trọng uốn. Các chỉ số này bao gồm cường độ chịu uốn, năng lượng nứt và độ bền dẻo dai.

¹ TS, Vụ Khoa học Công nghệ & Môi trường, Bộ Xây dựng.

* Tác giả chính. E-mail: letrungthanh.moc@gmail.com.

Ứng xử cơ học điển hình của UHPC khi chịu uốn được minh họa tại Hình 1, đường cong ứng suất uốn có thể chia ra làm ba giai đoạn đánh dấu tại các điểm O, A, B và C.

Giai đoạn 1 (O-A) có quan hệ ứng suất uốn - biến dạng (võng giữa nhịp) là tuyến tính, ứng suất uốn tại điểm A gọi là cường độ uốn tại vết nứt đầu tiên.

Giai đoạn 2 (A-B) là giai đoạn đàn hồi - dẻo, khi tăng tải trọng ứng suất kéo tại vùng dưới bụng dầm tăng nhanh và đạt ứng suất kéo uốn lớn nhất chính là thời điểm tính cho cường độ chịu uốn của UHPC. Ứng suất uốn tại điểm B gọi là cường độ uốn lớn nhất. Sau điểm B, tải trọng tăng sẽ làm cho các sợi bị kéo tuột, ứng suất kéo giảm dần.

Giai đoạn 3 (B-C) là giai đoạn mềm, các sợi bị kéo tuột ra do cường độ bám dính của bê tông vào sợi bị suy giảm dưới tác dụng của tải trọng uốn. Các vết nứt lớn xuất hiện, tăng nhanh và làm cho mẫu dầm bị phá hoại hoàn toàn, không còn khả năng chịu lực.

Một số nghiên cứu trước đây (liệt kê tại Bảng 1) đã chỉ ra cường độ chịu uốn (lớn nhất) của UHPC phụ thuộc đáng kể vào thành phần cấp phối, hình dạng và kích thước mẫu thử, sơ đồ gia tải.

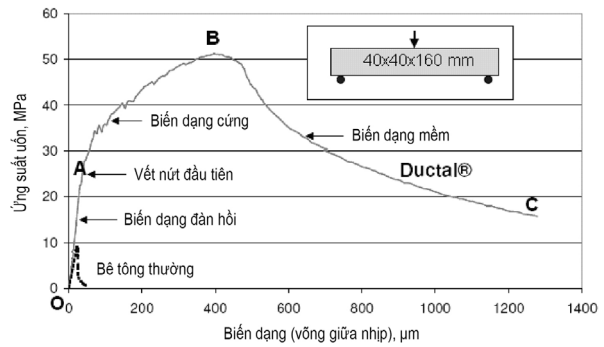
Bảng 1. Cường độ chịu uốn của UHPC trong một số nghiên cứu

Tác giả	Năm	Kích thước mẫu	Sơ đồ gia tải	Cường độ chịu uốn
Richard và các cộng sự [7]	1994	40×40×160 mm cắt khía bụng dầm	Uốn 3 điểm	25 - 50 MPa
		70×70×280 mm cắt khía bụng dầm	Uốn 3 điểm	25 - 50 MPa
Chanvillard và các cộng sự [8]	2003	70×70×280 mm	Uốn 4 điểm	46.0 MPa
		70×70×280 mm, cắt khía sâu 10 mm	Uốn 3 điểm	36.0 MPa
Orgass và các cộng sự [9]	2004	40×40×160 mm	Uốn 3 điểm	21.3 MPa
		100×100×500 mm	Uốn 4 điểm	16.4 MPa
		150×150×700 mm	Uốn 4 điểm	12.1 MPa
Fehling và các cộng sự [10]	2004	40×40×160 mm	Uốn 3 điểm	34.0 MPa
		150×150×700 mm	Uốn 4 điểm	22.1 MPa
Reineck và các cộng sự [11]	2004	100×100×530 mm	Uốn 4 điểm	16 - 26 MPa

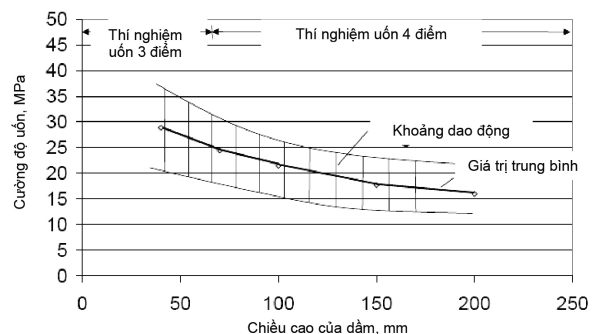
Cường độ chịu uốn của UHPC dường như đạt được giá trị lớn hơn đối với mẫu có kích thước nhỏ. Lý giải ở đây được cho là có ảnh hưởng của kích thước mẫu thử và sơ đồ gia tải [8-11], ví dụ các kết quả của Reineck [11] minh họa tại Hình 2.

Đồng thời, các kết quả thử nghiệm cũng cho thấy khả năng chịu uốn của UHPC có sự biến động khá lớn. Fehling [10] cho rằng các giá trị đo khả năng chịu uốn của UHPC biến động là do hướng của sợi thép phân bố trong bê tông nền là ngẫu nhiên.

Các hiện tượng về ảnh hưởng của kích thước mẫu và biến động về giá trị đo khả năng chịu uốn của UHPC vẫn đang là vấn đề khoa học chưa thống nhất. Vì vậy, bài báo này trình bày về một số kết quả nghiên cứu để làm rõ hơn về sự ảnh hưởng của kích thước mẫu và sơ đồ chịu tải đến khả năng chịu uốn của UHPC.



Hình 1. Ứng xử cơ học của UHPC khi chịu uốn



Hình 2. Ảnh hưởng của kích thước mẫu trong nghiên cứu của Reineck [11]



2. Vật liệu sử dụng, thành phần cấp phối và phương pháp thí nghiệm

2.1 Vật liệu sử dụng

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu bao gồm: xi măng pooc lăng loại 42.5N, xỉ lò cao hạt hóa (GGBS) và silicafume có thành phần hóa thể hiện ở Bảng 2. Silicafume dạng hạt rời với khối lượng thể tích từ 250 đến 300kg/m³. Cát sử dụng trong nghiên cứu có đường kính cỡ hạt trung bình là 270 μ m, độ rỗng của cát ở trạng thái tự nhiên là 37%, lượng nước bão hòa khô bề mặt là 1.1%; phụ gia siêu dẻo gốc polycarboxylate với hàm lượng chất khô đạt 25%. Sợi thép sử dụng trong nghiên cứu là loại thép các bon cường độ cao với đường kính trung bình khoảng 0.2 mm, chiều dài 13 mm và cường độ kéo trên 2000 MPa.

2.2 Thành phần cấp phối

Trong nghiên cứu này, ba cấp phối UHPC với lượng sợi khác nhau tương ứng là 0%, 1% và 2% theo thể tích, được sử dụng. Vật liệu thành phần được lựa chọn với hàm lượng SF sử dụng chiếm 10%, lượng GGBS sử dụng chiếm 35% theo khối lượng CKD, tỷ lệ N/CKD = 0.15 (Bảng 3).

Bảng 2. Thành phần hóa của vật liệu

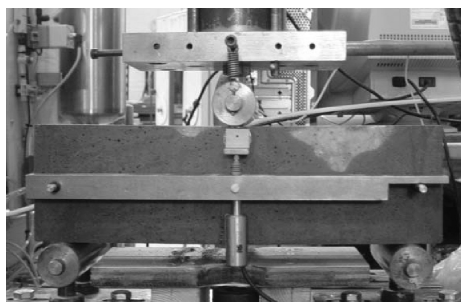
Oxit	Hàm lượng các oxit, %		
	XM	SF	Cát
CaO	64.1		
SiO ₂	20.64	90	97.02
Al ₂ O ₃	4.92		1.19
Fe ₂ O ₃	2.24		0.24
MgO	1.25		
N ₂ O	0.19		
K ₂ O	0.76		0.7
SO ₃	3.66		
Vôi tự do	1.5		
MKN		< 3	0.24

Bảng 3. Thành phần cấp phối sử dụng trong nghiên cứu

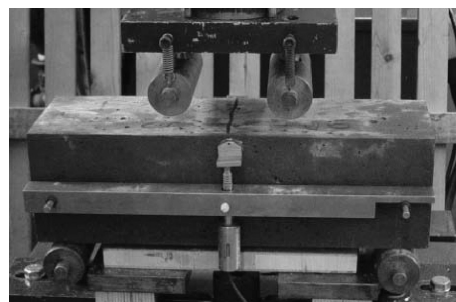
Vật liệu sử dụng	F0	F1.0	F2.0
Xi măng, (kg/m ³)	657	650	644
Silicafume, (kg/m ³)	119	118	117
GGBS, (kg/m ³)	418	414	410
CKD, (kg/m ³)	1194	1182	1171
Cát, (kg/m ³)	1051	1041	1030
Lượng nước hấp phụ trong cát, (kg/m ³)	11.6	11.5	11.4
Phụ gia siêu dẻo, (kg/m ³)	50	50	49
Lượng nước sử dụng, (kg/m ³)	179.4	177.6	175.9
Tỷ lệ N/CKD, theo khối lượng	0.15	0.15	0.15
Hàm lượng sợi thép, % theo thể tích bê tông	0	1.0	2.0

2.3 Phương pháp thí nghiệm

Thí nghiệm xác định cường độ chịu uốn và độ bền dẻo dai của mẫu UHPC được thực hiện theo tiêu chuẩn của Anh BS 4551-1:1998 với sơ đồ thử nghiệm uốn 3 điểm và tiêu chuẩn Nhật Bản JSCE-SF4 với sơ đồ uốn 4 điểm. Các mẫu thí nghiệm hình dầm, với 2 loại kích thước khác nhau là 40×40×160 mm và 100×100×350 mm. Sơ đồ thí nghiệm uốn 3 và 4 điểm được thể hiện ở Hình 3 và 4.

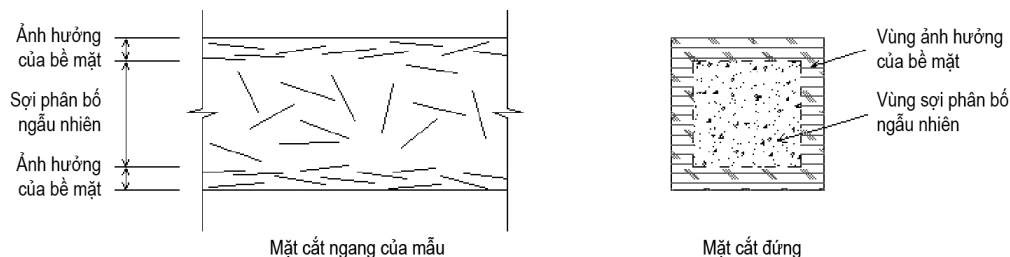


Hình 3. Thí nghiệm uốn 3 điểm



Hình 4. Thí nghiệm uốn 4 điểm

Thử nghiệm về mức độ ảnh hưởng của lớp vỏ (boundary layer) đến khả năng chịu uốn của mẫu UHPFRC. Trong đó, nghiên cứu về ảnh hưởng của kích thước mẫu đến cường độ chịu uốn tại lớp vỏ UHPFRC, mẫu bê tông với kích thước 100×100×350mm được cắt thành các mẫu có kích thước 40×40×160mm (Hình 5) và được thí nghiệm theo các hướng khác nhau.

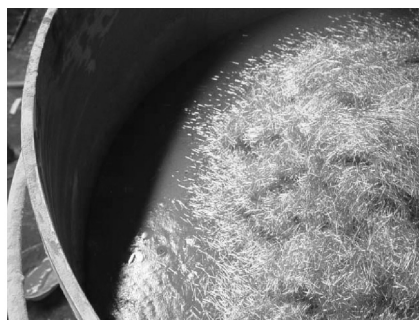


Hình 5. Mô tả về ảnh hưởng của lớp vỏ của mẫu dầm UHPFRC

2.4 Quá trình trộn và đúc mẫu

Vật liệu được định lượng và cho vào máy trộn trục đứng theo thứ tự: xi măng, silicafume, GGBS và cát. Đầu tiên hỗn hợp vật liệu được trộn khô trong thời gian 1 phút, sau đó cho hỗn hợp nước và phụ gia vào thùng trộn. Vật liệu được trộn đến khi hỗn hợp bê tông chuyển từ trạng thái khô sang trạng thái chảy. Tổng thời gian trộn khoảng 10 đến 15 phút và đảm bảo hỗn hợp bê tông được đồng nhất. Sau đó sợi được đưa vào và tiếp tục trộn trong khoảng thời gian trên 5 phút để đảm bảo sợi được phân tán đều trong hỗn hợp bê tông (Hình 6 và 7).

Hỗn hợp bê tông đảm bảo độ đồng nhất sẽ được đúc và dưỡng hộ ở điều kiện tiêu chuẩn ($20 \pm 2^\circ\text{C}$, $\text{RH} \geq 95\%$) và ở điều kiện nhiệt ẩm ($90 \pm 5^\circ\text{C}$, $\text{RH} \geq 95\%$), trong thời gian $24\text{h} \pm 3\text{h}$, mẫu được tháo ra khỏi khuôn và tiếp tục dưỡng hộ ở điều kiện chuẩn đến tuổi xác định cường độ uốn.



Hình 6. Sợi được đưa vào hỗn hợp bê tông



Hình 7. Hỗn hợp bê tông đã đồng nhất

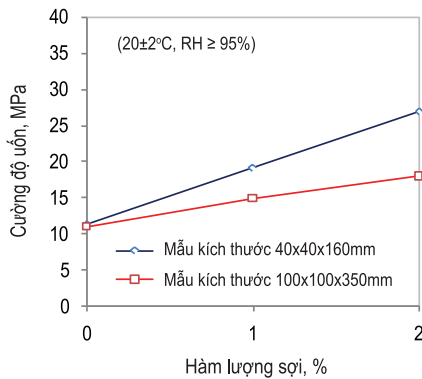
3. Kết quả và bàn luận

3.1 Ảnh hưởng của kích thước mẫu đến cường độ uốn của UHPC

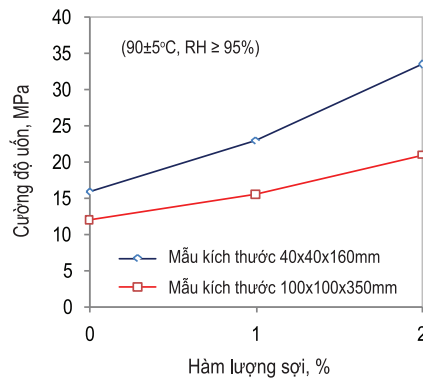
Kết quả nghiên cứu về ảnh hưởng của kích thước mẫu và hàm lượng sợi đến cường độ uốn (4 điểm) của UHPC được thể hiện ở Hình 8. Kết quả thí nghiệm cho thấy khi tăng hàm lượng sợi sử dụng, cường độ uốn của UHPC tăng với cả 2 nhóm kích thước mẫu 40×40×160mm và 100×100×350mm ở cả hai điều kiện dưỡng hộ tiêu chuẩn và điều kiện dưỡng hộ nhiệt ẩm. Ở điều kiện dưỡng hộ tiêu chuẩn, khi sử dụng 1% và 2% sợi theo thể tích giúp tăng 68.4% và 136.8% cường độ chịu uốn của UHPC với kích thước mẫu 40×40×160mm và tăng 36.4% và 63.6% với mẫu có kích thước 100×100×350mm. Cường độ uốn của mẫu ở điều kiện dưỡng hộ nhiệt ẩm cao hơn so với mẫu ở điều kiện dưỡng hộ tiêu chuẩn.

Cường độ chịu uốn của UHPC đạt được tùy thuộc vào kích thước của mẫu. Với mẫu có kích thước nhỏ hơn (40×40×160mm) sẽ cho cường độ uốn lớn hơn so với mẫu có kích thước lớn hơn (100×100×350mm) (Hình 8 và 9). Cường độ chịu uốn của nhóm UHPC kích thước 40×40×160 mm có giá trị lần lượt là 11.4, 19.2 và 27 MPa tương ứng với hàm lượng sợi sử dụng 0.1% và 2%. Trong khi, cường độ chịu uốn của nhóm UHPC kích thước 100×100×350 mm có giá trị lần lượt là 11, 15.2 và 18.4 MPa tương ứng với hàm lượng sợi sử dụng 0.1% và 2%.

Điều này có thể lý giải là do: (1) sự phân bố của tải trọng trong mẫu, (2) do lớp vỏ tại vị trí này các sợi bắt buộc phải liên kết trên bề mặt của mẫu và (3) do sự giải phóng năng lượng hấp thụ của mẫu trước khi bị phá hoại.



Hình 8. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi và kích thước mẫu đến cường độ uốn 4 điểm của UHPC, ($20 \pm 2^\circ\text{C}$, $\text{RH} \geq 95\%$)



Hình 9. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi và kích thước mẫu đến cường độ uốn 4 điểm của UHPC, ($90 \pm 5^\circ\text{C}$, $\text{RH} \geq 95\%$)

Kết quả nghiên cứu về ảnh hưởng của kích thước mẫu với mô hình uốn 3 điểm và uốn 4 điểm đến cường độ uốn của UHPC được thể hiện ở Hình 10 và 11.

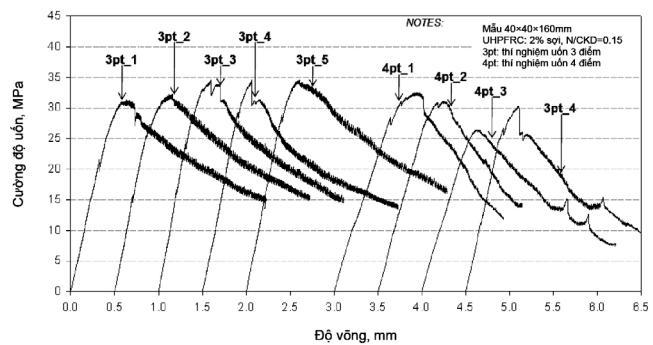
Kết quả thí nghiệm cho thấy, với hàm lượng sợi sử dụng trong hỗn hợp là 2%, có sự khác biệt giữa kết quả thí nghiệm khi sử dụng hai trạng thái phân bố tải trọng trong cả hai trường hợp kích thước mẫu khác nhau. Với mẫu có kích thước 40x40x160mm, có sự giảm rất nhỏ về cường độ uốn của thí nghiệm uốn 4 điểm so với mẫu thí nghiệm uốn 3 điểm. Đối với mẫu có kích thước 100x100x350mm, thí nghiệm uốn 3 điểm có cường độ uốn lớn nhất đạt được ở độ võng nhỏ hơn so với thí nghiệm uốn 4 điểm.

Khi sử dụng 2 nhóm mẫu UHPC với kích thước khác nhau vẫn có sự khác biệt đáng kể về các ứng xử cơ học của bê tông. Với mẫu có kích thước 40x40x160mm, cường độ uốn đạt từ 27 đến 35 MPa, trong khi đó với mẫu có kích thước 100x100x350mm cường độ uốn chỉ đạt từ 22 đến 27 MPa, nhỏ hơn tương ứng từ 23% đến 30%.

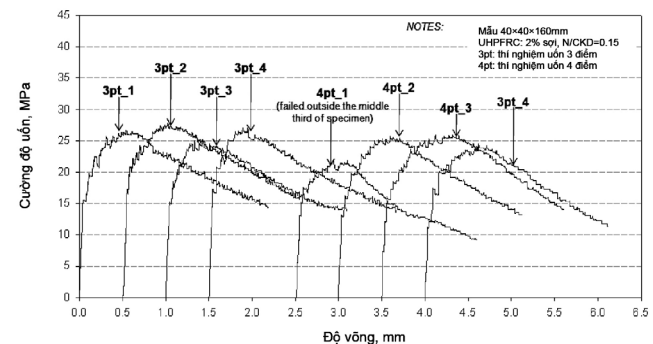
3.2 Ảnh hưởng của lớp vỏ đến cường độ uốn của UHPC

Trong nghiên cứu về mức độ ảnh hưởng của lớp vỏ (boundary layer) đến khả năng chịu uốn của mẫu UHPC, mẫu UHPC với kích thước 40x40x160 mm được cắt ra từ mẫu 100x100x350 mm, vị trí cắt và mẫu cắt được thể hiện ở Hình 12 và 13.

Khi sử dụng cốt sợi thép thì ảnh hưởng của kích thước mẫu đến các ứng xử cơ học có thể do lớp vỏ bên ngoài của bê tông UHPC. Tại vùng này các sợi buộc phải liên kết với nhau trên bề mặt phẳng của mẫu và do đó sẽ cải thiện cường độ kéo cho bê tông. Độ dày của lớp vỏ được giả định bằng ít nhất một nửa chiều dài của sợi, tức là trong trường hợp này là 6.5mm. Với mẫu có kích thước nhỏ thì lớp vỏ bao bọc trên bề mặt sẽ chiếm một tỷ lệ lớn hơn của diện tích mặt cắt ngang so với mẫu có kích thước lớn hơn. Do vậy, giá trị của cường độ uốn của mẫu nhỏ hơn sẽ có ưu thế cao hơn so với mẫu có kích thước lớn hơn.



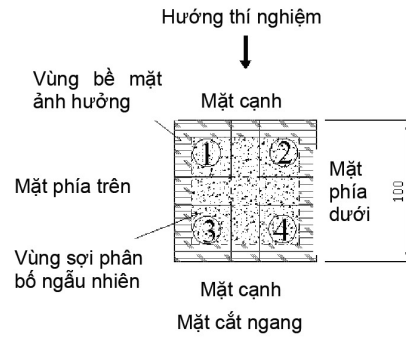
Hình 10. Quan hệ giữa độ võng và cường độ uốn của UHPC Mẫu UHPFRC có kích thước 40x40x160 mm



Hình 11. Quan hệ giữa độ võng và cường độ uốn của UHPC Mẫu UHPFRC có kích thước 100x100x350 mm



Hình 12. Các mẫu 40×40×160 mm được cắt ra từ mẫu 100×100×350 mm

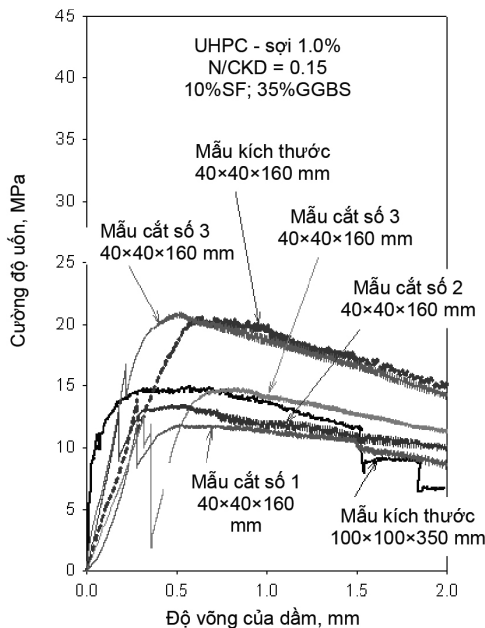


Hình 13. Mặt cắt ngang và vị trí cắt mẫu

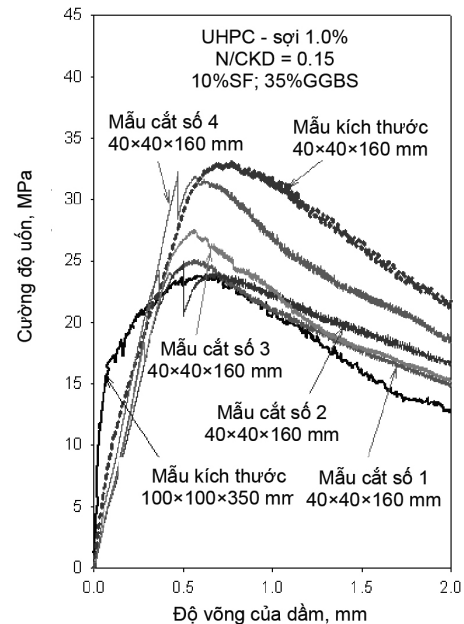
Kết quả thí nghiệm được thể hiện ở Hình 14 và 15 cho thấy các mẫu được cắt ra sẽ cho cường độ uốn thấp hơn so với mẫu 40×40×160mm ban đầu với cả hai trường hợp hàm lượng sợi sử dụng 1% và 2%. Điều này có thể giải thích là do diện tích của lớp vỏ của các mẫu cắt bị giảm đi. Trên Hình 11 thể hiện vị trí cắt mẫu cho thấy, với mẫu cắt 3 và 4 sẽ cho cường độ uốn cao hơn so với mẫu cắt 1 và 2 là do diện tích lớp vỏ của mẫu 3 và 4 nằm ở vị trí chịu uốn lớn hơn so với mẫu 1 và 2.

Mẫu cắt 4 khi đó sẽ có vùng chịu uốn nằm trên bề mặt của mẫu 100×100×350 mm, tại vùng bề mặt này thường sẽ tập trung hàm lượng sợi lớn hơn đồng thời các sợi cũng liên kết với nhau trên cùng mặt phẳng bề mặt của mẫu, do vậy sẽ cho cường độ uốn lớn hơn so với mẫu 1 và 2.

Ảnh hưởng của lớp vỏ là yếu tố gây ra sự khác biệt về cường độ uốn của UHPC khi có sự khác nhau về kích thước mẫu. Tỷ lệ diện tích lớp vỏ của mẫu 40×40×160 mm sẽ lớn hơn so với mẫu 100×100×350 mm. Do vậy, mẫu 40×40×160 mm sẽ cho cường độ uốn lớn hơn so với mẫu 100×100×350 mm.



Hình 14. Quan hệ giữa cường độ uốn và độ võng với kích thước mẫu khác nhau (Hàm lượng sợi 1%)



Hình 15. Quan hệ giữa cường độ uốn và độ võng với kích thước mẫu khác nhau (Hàm lượng sợi 2%)



5. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu thực nghiệm trên, một số kết luận có thể rút ra như sau:

- Khả năng chịu uốn của UHPC tăng lên khi tăng hàm lượng sợi đối với cả hai nhóm mẫu có kích thước khác nhau (40×40×160 mm và 100×100×350 mm) ở cả điều kiện dưỡng hộ tiêu chuẩn và dưỡng



hệ nhiệt ẩm. Ở điều kiện dưỡng hộ tiêu chuẩn, khi sử dụng 1% và 2% sợi theo thể tích giúp tăng 68.4% và 136.8% cường độ chịu uốn của UHPC với kích thước mẫu 40×40×160mm và tăng 36.4% và 63.6% với mẫu có kích thước 100×100×350mm. Cường độ uốn của mẫu ở điều kiện dưỡng hộ nhiệt ẩm cao hơn so với mẫu ở điều kiện dưỡng hộ tiêu chuẩn.

- Tuy nhiên, khi tăng kích thước mẫu lên thì cường độ uốn của UHPC giảm. Mẫu có kích thước nhỏ hơn (40×40×160 mm) có tỷ lệ lớp vỏ (nơi tập trung sợi thép nằm ngang nhiều) cao hơn và sẽ hỗ trợ chịu lực uốn tốt hơn nên đã cho kết quả cường độ chịu uốn lớn hơn so với mẫu có kích thước lớn (100×100×350 mm). Với mẫu có kích thước 40×40×160 mm, cường độ uốn đạt từ 27 đến 35 MPa, trong khi đó với mẫu có kích thước 100×100×350 mm cường độ uốn chỉ đạt từ 22 đến 27 MPa, nhỏ hơn tương ứng từ 23% đến 30%.

- Sơ đồ chịu tải uốn 3 hay 4 điểm không làm thay đổi đáng kể giá trị cường độ chịu uốn của UHPC đối với cả hai nhóm mẫu kích thước 40×40×160 mm và 100×100×350 mm.

Tài liệu tham khảo

1. Richard P., Cheyrezy M.H. (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.
2. AFGC-SETRA (2002), *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes*, Paris, France: Interim Recommendations, AFGC publication.
3. Acker P., Behloul M. (2004), "Ductal Technology: A Large Spectrum of Properties, A Wide Range of Applications", *In Proceedings of Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 13-23.
4. Buitelaar P. (2004), "Ultra High Performance Concrete: Developments and Applications during 25 years", *In Proceedings of 1st International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany.
5. Collepardi M. (2003), "Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC", *Workshop on New Technologies and Materials in Civil Engineering*, Milan, 1-8.
6. Schmidt and Fehling (2005), "Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe", *Seventh International Symposium on the Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete*, Washington, D.C., USA, SP-228-4:54-78.
7. Richard P., Cheyrezy M. (1994), "Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength", Concrete Technology Past, Present and Future, *ACI Material Journal*. Detroit, Michigan: American Concrete Institute, 144(3):507-518
8. Chanvillard G., Rigaud S. (2003), "Complete Characterisation of tensile Properties of Ductal UHPFRC", According to The French Recommendations, *High Performance Fibre Reinforced Cement Composites (HPRFCC4)*, Ann Arbor, USA, 95-113.
9. Orgass M., Klug Y. (2004), "Fibre Reinforced Ultra High Strength Concretes, Ultra High Performance Concrete", *In Proceedings of 1st International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany, 637-647.
10. Fehling E., Bunje K., Leutbecher T. (2004), "Design Relevant Properties of Hardened Ultra High Performance Concrete", *In Proceedings of 1st International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany, 327-338.
11. Reineck K.-H., Greiner S. (2004), "Tests on UHPFRC Designing Hot-Water Tanks and UHPFRC-Shells, Ultra High Performance Concrete", *In Proceedings of 1st International Symposium on UHPC*, Kassel, Germany, 361-374.