

Nghiên cứu quan hệ giữa cường độ nén, kéo, uốn và Modul đàn hồi của bê tông siêu tính năng - UHPC

Research of the relationship between compression, tensile, bending strength and modulus of UHPC

> TS TRẦN BÁ VIỆT¹, KS LƯƠNG TIẾN HÙNG²

¹Hội Bê tông Việt Nam - VCA; Email: vietbach57@yahoo.com; Tel: 0903406501

²Công ty Cp Sáng tạo và Chuyển giao công nghệ Việt Nam.

TÓM TẮT:

Bài báo trình bày về quan hệ, các yếu tố ảnh hưởng đến việc quy đổi, đánh giá các chỉ tiêu cơ lý: cường độ nén, cường độ kéo trực tiếp, cường độ uốn 4 điểm, cường độ uốn 3 điểm và modul đàn hồi của bê tông siêu tính năng - UHPC.

Từ khoá: Bê tông siêu tính năng - UHPC; sợi thép; Nano SiO₂; bảo dưỡng nhiệt ẩm, nén, kéo, uốn; modul đàn hồi; ứng suất - biến dạng.

ABSTRACT:

The article has presented the relationship and factors affecting the conversion and evaluation of physical and mechanical criteria: compressive strength, direct tensile strength, flexural strength and elastic modulus of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete - UHPC.

Keywords: Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete - UHPC; steel fiber; nano SiO₂; heat moisture curing; compressive strength, tensile strength, flexural strength; elastic modulus; stress - strain.

I. TỔNG QUAN

1. Bê tông siêu tính năng - UHPC

Hiện tại, UHPC đã được sử dụng rộng rãi trong ngành Xây dựng ở nhiều quốc gia khác nhau, bao gồm Úc, Áo, Canada, Trung Quốc, Cộng hòa Séc, Pháp, Đức, Ý, Nhật Bản, Ấn Độ, Malaysia, Hà Lan, New Zealand, Slovenia, Hàn Quốc, Thụy Sĩ, Việt Nam và Hoa Kỳ.

UHPC là một thế hệ tiên tiến của bê tông dựa trên nền xi măng được điều chỉnh để có độ dẻo cao, cường độ nén và tính bền vững rất cao. Kết quả kiểm tra cho thấy, UHPC được chế tạo tại Việt Nam đã đạt được cường độ chịu nén khoảng 40 ÷ 90 MPa tại 1 ngày tuổi

và khoảng 130 ÷ 200 MPa tại 28 ngày tuổi. Cường độ chịu kéo trực tiếp và chịu uốn tại 28 ngày tuổi lần lượt nằm trong khoảng 7 ÷ 16 MPa và 20 ÷ 45 MPa. Modul đàn hồi của UHPC trung bình khoảng 40 ÷ 60 GPa. Tuy vậy, mối quan hệ giữa các chỉ tiêu cơ lý, các hệ số quy đổi vẫn chưa được nghiên cứu cụ thể, rõ ràng. Vì vậy, nghiên cứu này là để làm rõ những vấn đề trên.

2. Vật liệu thành phần và phương pháp nghiên cứu

Chất kết dính trong UHPC chủ yếu là xi măng Poóc lăng, việc tăng hàm lượng của nó làm tăng cường độ chịu nén UHPC. Tuy nhiên khi vượt qua quá giới hạn tối ưu cường độ chịu nén có xu hướng giảm do khi đó khả năng tham gia của cốt liệu bị hạn chế. Đồng thời với một lượng nước trộn thấp dẫn đến hỗn hợp UHPC có tính công tác kém và xuất hiện sự co ngót rất lớn. Việc bổ sung phụ gia khoáng làm chất kết dính có thể cải thiện khả năng làm việc của UHPC bằng cách lấp đầy khoảng trống giữa các hạt thô hơn nhờ kích thước hạt mịn hơn nhiều và có dạng hình cầu tối ưu. Ngoài hiệu ứng microfiller này, phụ gia khoáng còn tăng cường các đặc tính cường độ của UHPC thông qua các phản ứng pozzolanic. Các kết quả nghiên cứu trước đó, bổ sung phụ gia khoáng giúp độ chảy xoè của hỗn hợp UHPC lớn hơn khoảng 30 ÷ 40% so với việc không sử dụng thêm nó khi mà cấp phối có cùng tỷ lệ N/CKD.

Cát thạch anh được sử dụng trong UHPC có nhiều loại với các kích thước hạt khác nhau. Thông thường sự hư hỏng trong bê tông được bắt đầu bởi phá hoại tại vùng chuyển giao thoa (ITZ) giữa matrix xi măng và cốt liệu lớn. Do đó, việc loại bỏ các cốt liệu lớn mà chỉ sử dụng cát thạch anh trong hỗn hợp UHPC là hoàn toàn hợp lý. Ngoài ra, với hình dạng góc cạnh cát thạch anh giúp làm giảm thiểu các lỗ rỗng ITZ dẫn đến độ xốp tổng thể thấp hơn trong matrix, đó đó độ bền cơ học tăng cao.

Khi có sợi thép, UHPC tăng vượt trội về đặc tính cường độ chịu kéo - uốn, sự tăng này là tuyến tính với hàm lượng sợi thép (150 ÷ 300% so với việc không sử dụng). Để cải thiện thêm về đặc tính dẻo dai (đường cong ứng suất biến dạng, hiệu chỉnh phần Soft Strain - chảy dẻo) của UHPC, đặc biệt giá trị R_{kéo} max, thường sử dụng sợi lai - hybrid, tức là sử dụng hai hoặc ba loại sợi khác nhau trong UHPC.

Các vật liệu chính trên cấu thành nên hỗn hợp UHPC đều đáp ứng các tiêu chuẩn Việt Nam hay các tài liệu tham khảo khác của nước ngoài về vật liệu như:

- TCVN 6282:2009 Xi măng Poóc lăng - Yêu cầu kỹ thuật;
- TCVN 10302:2014 Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng;
- TCVN 11586:2016 Xi hạt lò cao nghiền mịn dùng cho bê tông và vữa;

- TCVN 9036:2011 Nguyên liệu để sản xuất thủy tinh - Cát - Yêu cầu kỹ thuật;
- TCVN 8826:2011 Phụ gia hoá học cho bê tông và vữa;
- ASTM A820/A820M-16 Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete.

Nghiên cứu này được đánh giá trên 2 loại mẫu cấp phối UHPC và có cùng hàm lượng sợi là 3,5% (chủng loại sợi - hybrid):

- **UHPC:** thông thường, sử dụng đầy đủ các thành phần chính bao gồm: xi măng, phụ gia khoáng, cát thạch anh, sợi thép và phụ gia siêu dẻo;
- **UHPC-PLUS:** sử dụng bổ sung 3% Nano SiO₂ vào thành phần hỗn hợp;

Các mẫu thí nghiệm tính chất cơ lý có kích thước như sau:

- Cường độ nén: mẫu trụ d10xh20 cm;
- Cường độ kéo: mẫu xương 5x10x50 cm;
- Cường độ uốn:
 - mẫu **A** uốn 4 điểm (10x10x40 cm)
 - mẫu **B** uốn 4 điểm (3x10x40 cm)
 - mẫu **C** uốn 3 điểm (10x10x40 cm - khía sâu giữa mẫu 3 cm)
 - mẫu **D** uốn 3 điểm (3x10x40 cm)

Các chỉ tiêu tính chất cơ lý thực hiện theo các tiêu chuẩn sau:

- NF P18-470 Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete - Specifications, performance, production and conformity;
- TCCS 02:2017/IBST Bê tông tính năng siêu cao UHPC - hướng dẫn thiết kế kết cấu;

- ASTM C1856/C1856M-17 Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete;
- ASTM C469/C469M-14e1 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression;
- ASTM C1609/C1609M - 19a Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third - Point Loading);
- ASTM C78 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete;

Các mẫu UHPC cùng được bảo dưỡng ở điều kiện như nhau, sau khi đúc và làm phẳng mặt, mẫu được bảo dưỡng ẩm tự nhiên trong điều kiện phòng thí nghiệm. Sau 24 giờ, mẫu tiếp tục được bảo dưỡng nhiệt ẩm tại điều kiện 80°C bão hoà ẩm trong thời gian 72 giờ tiếp theo. Kết thúc, mẫu được bảo dưỡng ẩm tại điều kiện phòng thí nghiệm đến đủ tuổi 7 ngày.

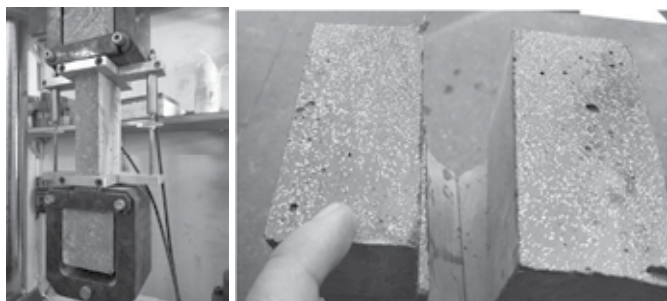
Sử dụng keo Epoxy để capping mẫu, giá trị thí nghiệm ngay sau khi kết thúc bảo dưỡng nhiệt và capping là kết quả tại 5 ngày tuổi. Tương quan giữa cường độ nén và các cường độ uốn, kéo cũng như modul đàn hồi nghiên cứu làm rõ, để thuận lợi cho lựa chọn các thông số trong thiết kế kết cấu UHPC. Nghiên cứu này được thực hiện chỉ với UHPC cường độ nén khoảng 150MPa với hàm lượng sợi thép hybrid 3,5%.

II. NỘI DUNG KỸ THUẬT

1. Mẫu cấp phối UHPC

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm mẫu cấp phối UHPC ở các tuổi khác nhau

Thông tin mẫu		Kết quả thí nghiệm, (MPa)						
Chỉ tiêu thử nghiệm	Tuổi mẫu	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4	Mẫu 5	Mẫu 6	Trung bình
Cường độ nén	R1	48,2	51,3	51,0	46,9	53,7	51,7	50,5
	R5	146,9	149,2	150,4	150,8	147,5	152,1	149,5
	R28	146,3	153,3	154,1	147,7	147,8	152,6	150,3
Modul đàn hồi (GPa)	R1	-	-	-	-	-	-	-
	R5	48,3	49,2	49,5	49,0	50,1	47,3	48,9
	R28	47,1	50,4	51,0	50,6	50,9	48,4	49,7
Cường độ kéo trực tiếp	R1	3,4	4,0	5,1	3,9	4,7	4,6	4,3
	R5	10,5	9,6	10,9	11,0	10,3	10,5	10,5
	R28	10,7	10,5	11,4	11,4	9,9	10,1	10,8
Cường độ uốn (mẫu A)	R1	11,3	10,7	9,2	10,6	12,8	10,5	10,9
	R5	27,7	25,0	28,4	28,5	26,3	26,9	27,1
	R28	29,1	26,2	26,6	28,4	28,8	28,9	28,0
Cường độ uốn (mẫu B)	R1	-	-	-	-	-	-	-
	R5	45,6	42,3	44,7	44,1	43,9	44,4	44,2
	R28	46,8	46,7	46,8	45,3	45,0	47,1	46,3
Cường độ uốn (mẫu C)	R1	13,6	11,4	12,7	12,9	13,3	13,4	12,9
	R5	30,6	29,2	28,5	31,7	30,8	30,9	30,3
	R28	30,3	30,7	32,8	33,4	32,7	32,7	32,1
Cường độ uốn (mẫu D)	R1	-	-	-	-	-	-	-
	R5	39,8	40,5	38,4	40,7	40,1	40,0	39,9
	R28	42,7	42,2	42,0	40,8	42,6	42,6	42,2



Hình 1. Thí nghiệm ứng suất kéo - biến dạng mẫu UHPC

a) Đánh giá mối quan hệ giữa cường độ nén với các chỉ tiêu khác:

Lấy mẫu kết quả thí nghiệm cường độ nén làm mẫu chuẩn với hệ số 1,00, có được bảng thể hiện mối quan hệ - hệ số quy đổi mẫu như sau:

Bảng 2. Kết quả tính toán, phân tích với cường độ nén là giá trị tham chiếu

Tuổi mẫu	Hệ số quy đổi mẫu					
	Cường độ nén	Cường độ kéo trực tiếp	Cường độ uốn (mẫu A)	Cường độ uốn (mẫu B)	Cường độ uốn (mẫu C)	Cường độ uốn (mẫu D)
R1	1,00	0,09	0,22	-	0,26	-
R5	1,00	0,07	0,18	0,30	0,20	0,27
R28	1,00	0,07	0,19	0,31	0,21	0,28
TB	1,00	0,07	0,19	0,31	0,21	0,28

Nhận xét:

- Đối với mẫu được bảo dưỡng ẩm tự nhiên, thí nghiệm tại tuổi 1 ngày, khi sử dụng cường độ nén làm mẫu chuẩn, ta có:
 - Cường độ kéo trực tiếp bằng: $R_{kéo} = 0,09 \cdot R_{nén}$
 - Cường độ uốn mẫu A bằng: $R_{uốn A} = 0,22 \cdot R_{nén}$
 - Cường độ uốn mẫu C bằng: $R_{uốn C} = 0,26 \cdot R_{nén}$
- Đối với mẫu sau bảo dưỡng nhiệt ẩm, khi sử dụng cường độ nén làm mẫu chuẩn, ta có:
 - Cường độ kéo trực tiếp bằng: $R_{kéo} = 0,07 \cdot R_{nén}$
 - Cường độ uốn mẫu A bằng: $R_{uốn A} = 0,19 \cdot R_{nén}$
 - Cường độ uốn mẫu B bằng: $R_{uốn B} = 0,31 \cdot R_{nén}$
 - Cường độ uốn mẫu C bằng: $R_{uốn C} = 0,21 \cdot R_{nén}$
 - Cường độ uốn mẫu D bằng: $R_{uốn D} = 0,28 \cdot R_{nén}$

b) Đánh giá mối quan hệ giữa cường độ kéo và cường độ uốn các loại

Lấy mẫu kết quả thí nghiệm cường độ kéo làm mẫu chuẩn, có được bảng thể hiện mối quan hệ - hệ số quy đổi mẫu như sau:

Bảng 3. Kết quả tính toán, phân tích với cường độ kéo là giá trị tham chiếu

Tuổi mẫu	Hệ số quy đổi mẫu				
	Cường độ kéo	Cường độ uốn (mẫu A)	Cường độ uốn (mẫu B)	Cường độ uốn (mẫu C)	Cường độ uốn (mẫu D)
R1	1,00	2,53	-	3,00	-
R5	1,00	2,58	4,21	2,89	3,69
R28	1,00	2,59	4,29	2,97	3,91
TB	1,00	2,59	4,25	2,93	3,80

Nhận xét:

- Đối với mẫu được bảo dưỡng ẩm tự nhiên, thí nghiệm tại tuổi 1 ngày, khi sử dụng cường độ kéo làm mẫu chuẩn để quy đổi các loại cường độ uốn, ta có:

- Cường độ uốn mẫu A bằng: $R_{uốn A} = 2,53 \cdot R_{kéo}$
- Cường độ uốn mẫu C bằng: $R_{uốn C} = 3,00 \cdot R_{kéo}$

- Đối với mẫu sau bảo dưỡng nhiệt ẩm, khi sử dụng cường độ kéo làm mẫu chuẩn để quy đổi các loại cường độ uốn, ta có:

- Cường độ uốn mẫu A bằng: $R_{uốn A} = 2,59 \cdot R_{kéo}$
- Cường độ uốn mẫu B bằng: $R_{uốn B} = 4,25 \cdot R_{kéo}$
- Cường độ uốn mẫu C bằng: $R_{uốn C} = 2,93 \cdot R_{kéo}$
- Cường độ uốn mẫu D bằng: $R_{uốn D} = 3,80 \cdot R_{kéo}$

c) Đánh giá mối quan hệ giữa các loại cường độ uốn

Lấy mẫu kết quả thí nghiệm cường độ uốn (4 điểm - A) làm mẫu chuẩn, có được bảng thể hiện mối quan hệ - hệ số quy đổi mẫu như sau:

Bảng 4. Kết quả tính toán, phân tích với cường độ uốn (4 điểm - A) là giá trị tham chiếu

Tuổi mẫu	Hệ số quy đổi mẫu			
	Cường độ uốn (mẫu A)	Cường độ uốn (mẫu B)	Cường độ uốn (mẫu C)	Cường độ uốn (mẫu D)
R1	1,00	-	1,18	-
R5	1,00	1,63	1,12	1,47
R28	1,00	1,65	1,15	1,51
TB	1,00	1,64	1,14	1,49

Nhận xét:

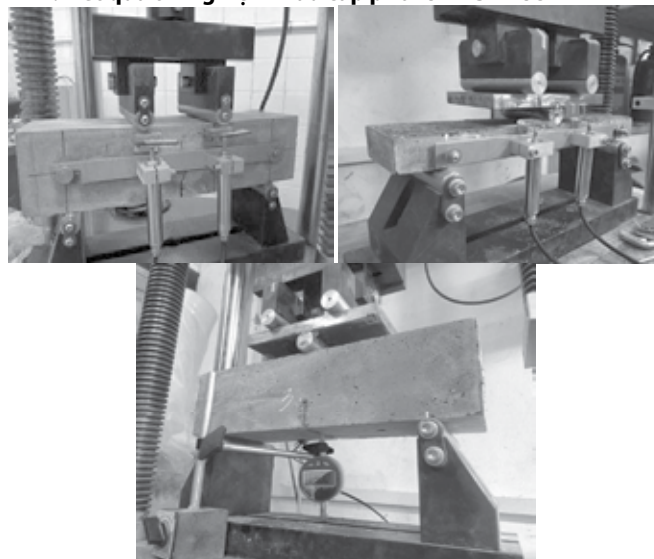
- Đối với mẫu được bảo dưỡng ẩm tự nhiên, thí nghiệm tại tuổi 1 ngày, khi sử dụng cường độ uốn mẫu A làm mẫu chuẩn để quy đổi các loại cường độ uốn còn lại, ta có:

- Cường độ uốn mẫu C bằng: $R_{uốn C} = 1,18 \cdot R_{uốn A}$

- Đối với mẫu sau bảo dưỡng nhiệt ẩm, khi sử dụng cường độ uốn mẫu A làm mẫu chuẩn để quy đổi các loại cường độ uốn còn lại, ta có:

- Cường độ uốn mẫu B bằng: $R_{uốn B} = 1,64 \cdot R_{uốn A}$
- Cường độ uốn mẫu C bằng: $R_{uốn C} = 1,14 \cdot R_{uốn A}$
- Cường độ uốn mẫu D bằng: $R_{uốn D} = 1,49 \cdot R_{uốn A}$

2. Kết quả thí nghiệm mẫu cấp phối UHPC-PLUS



Hình 2. Thí nghiệm ứng suất uốn - biến dạng mẫu UHPC

Bảng 5. Kết quả thí nghiệm mẫu cấp phối UHP-CPLUS ở các tuổi khác nhau

Thông tin mẫu		Kết quả thí nghiệm, (MPa)						
Chỉ tiêu thử nghiệm	Tuổi mẫu	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4	Mẫu 5	Mẫu 6	Trung bình
Cường độ nén	R1	46,2	48,4	49,7	47,1	49,3	49,0	48,3
	R5	159,5	155,6	160,4	160,8	161,2	157,1	159,1
	R28	162,7	165,8	160,3	158,4	158,9	162,5	161,4
Modul đàn hồi (GPa)	R1	-	-	-	-	-	-	-
	R5	51,2	51,6	49,7	48,3	52,4	52,3	50,9
	R28	51,2	51,1	53,1	53,4	52,7	52,8	52,4
Cường độ kéo trực tiếp	R1	4,3	4,6	3,7	5,5	4,0	4,6	4,5
	R5	12,7	9,9	9,8	12,4	11,6	11,9	11,4
	R28	10,9	11,3	11,8	12,0	13,0	12,7	12,0
Cường độ uốn (mẫu A)	R1	9,7	9,6	11,5	11,8	10,7	12,4	11,0
	R5	26,3	25,8	26,1	25,4	24,1	25,6	25,6
	R28	30,0	30,8	30,8	27,5	27,6	29,4	29,4
Cường độ uốn (mẫu B)	R1	-	-	-	-	-	-	-
	R5	48,5	46,7	49,3	48,2	48,3	47,0	48,0
	R28	47,3	49,6	49,5	49,8	50,0	50,8	49,5
Cường độ uốn (mẫu C)	R1	12,7	12,2	14,1	14,5	13,2	12,6	13,2
	R5	32,8	33,6	31,0	33,9	33,5	34,2	33,2
	R28	31,7	34,5	34,1	30,8	33,2	34,7	33,2
Cường độ uốn (mẫu D)	R1	-	-	-	-	-	-	-
	R5	43,8	45,7	42,9	44,5	43,2	45,7	44,3
	R28	46,3	47,1	45,5	46,1	46,2	46,8	46,3

a) Đánh giá mối quan hệ giữa cường độ nén với các chỉ tiêu khác:

Lấy mẫu kết quả thí nghiệm cường độ nén làm mẫu chuẩn, ta có được bảng thể hiện mối quan hệ - hệ số quy đổi mẫu như sau:

Bảng 6. Kết quả tính toán, phân tích với cường độ nén là giá trị tham chiếu

Tuổi mẫu	Hệ số quy đổi mẫu					
	Cường độ nén	Cường độ kéo trực tiếp	Cường độ uốn (mẫu A)	Cường độ uốn (mẫu B)	Cường độ uốn (mẫu C)	Cường độ uốn (mẫu D)
R1	1,00	0,09	0,23	-	0,27	-
R5	1,00	0,07	0,16	0,30	0,21	0,28
R28	1,00	0,07	0,18	0,31	0,21	0,29
TB	1,00	0,07	0,17	0,31	0,21	0,29

Nhận xét:

• Đối với mẫu được bảo dưỡng ẩm tự nhiên, thí nghiệm tại tuổi 1 ngày, khi sử dụng cường độ nén làm mẫu chuẩn, ta có:

- Cường độ kéo trực tiếp bằng: $R_{kéo} = 0,09 * R_{nén}$
- Cường độ uốn mẫu A bằng: $R_{uốn A} = 0,23 * R_{nén}$
- Cường độ uốn mẫu C bằng: $R_{uốn C} = 0,27 * R_{nén}$

• Đối với mẫu sau bảo dưỡng nhiệt ẩm, khi sử dụng cường độ nén làm mẫu chuẩn, ta có:

- Cường độ kéo trực tiếp bằng: $R_{kéo} = 0,07 * R_{nén}$

- Cường độ uốn mẫu A bằng: $R_{uốn A} = 0,17 * R_{nén}$
- Cường độ uốn mẫu B bằng: $R_{uốn B} = 0,31 * R_{nén}$
- Cường độ uốn mẫu C bằng: $R_{uốn C} = 0,21 * R_{nén}$
- Cường độ uốn mẫu D bằng: $R_{uốn D} = 0,29 * R_{nén}$

b) Đánh giá mối quan hệ giữa cường độ kéo và cường độ uốn các loại

Lấy mẫu kết quả thí nghiệm cường độ kéo làm mẫu chuẩn, ta có được bảng thể hiện mối quan hệ - hệ số quy đổi mẫu như sau:

Bảng 7. Kết quả tính toán, phân tích với cường độ kéo trực tiếp là giá trị tham chiếu

Tuổi mẫu	Hệ số quy đổi mẫu				
	Cường độ kéo	Cường độ uốn (mẫu A)	Cường độ uốn (mẫu B)	Cường độ uốn (mẫu C)	Cường độ uốn (mẫu D)
R1	1,00	2,44	-	2,93	-
R5	1,00	2,45	4,21	2,91	3,89
R28	1,00	2,45	4,13	2,77	3,86
TB	1,00	2,45	4,17	2,84	3,88

Nhận xét:

• Đối với mẫu được bảo dưỡng ẩm tự nhiên, thí nghiệm tại tuổi 1 ngày, khi sử dụng cường độ kéo làm mẫu chuẩn để quy đổi các loại cường độ uốn, có:

- Cường độ uốn mẫu A bằng: $R_{uốn A} = 2,44 * R_{kéo}$

- Cường độ uốn mẫu C bằng: $R_{uốn C} = 2,93 \cdot R_{kéo}$
- Đối với mẫu sau bảo dưỡng nhiệt ẩm, khi sử dụng cường độ kéo làm mẫu chuẩn để quy đổi các loại cường độ uốn, có:
 - Cường độ uốn mẫu A bằng: $R_{uốn A} = 2,45 \cdot R_{kéo}$
 - Cường độ uốn mẫu B bằng: $R_{uốn B} = 4,17 \cdot R_{kéo}$
 - Cường độ uốn mẫu C bằng: $R_{uốn C} = 2,84 \cdot R_{kéo}$
 - Cường độ uốn mẫu D bằng: $R_{uốn D} = 3,88 \cdot R_{kéo}$

c) Đánh giá mối quan hệ giữa các loại cường độ uốn

Lấy mẫu kết quả thí nghiệm cường độ uốn mẫu A làm mẫu chuẩn, ta có được bảng thể hiện mối quan hệ - hệ số quy đổi mẫu như sau:

Bảng 8. Kết quả tính toán, phân tích với cường độ uốn (4 điểm - A) là giá trị tham chiếu

Tuổi mẫu	Hệ số quy đổi mẫu			
	Cường độ uốn (mẫu A)	Cường độ uốn (mẫu B)	Cường độ uốn (mẫu C)	Cường độ uốn (mẫu D)
R1	1,00	-	1,20	-
R5	1,00	1,88	1,30	1,73
R28	1,00	1,68	1,13	1,57
TB	1,00	1,78	1,22	1,65

Nhận xét:

- Đối với mẫu được bảo dưỡng ẩm tự nhiên, thí nghiệm tại tuổi 1 ngày, khi sử dụng cường độ uốn mẫu A làm mẫu chuẩn để quy đổi các loại cường độ uốn còn lại, ta có:
 - Cường độ uốn mẫu C bằng: $R_{uốn C} = 1,20 \cdot R_{uốn A}$
- Đối với mẫu sau bảo dưỡng nhiệt ẩm, khi sử dụng cường độ uốn mẫu A làm mẫu chuẩn để quy đổi các loại cường độ uốn còn lại, ta có:
 - Cường độ uốn mẫu B bằng: $R_{uốn B} = 1,78 \cdot R_{uốn A}$
 - Cường độ uốn mẫu C bằng: $R_{uốn C} = 1,22 \cdot R_{uốn A}$
 - Cường độ uốn mẫu D bằng: $R_{uốn D} = 1,65 \cdot R_{uốn A}$

3. So sánh 2 loại cấp phối (UHPC và UHPC-PLUS)



Hình 3. Thí nghiệm ứng suất nén - biến dạng mẫu UHPC

Bảng 9. So sánh 2 loại cấp phối khi cường độ nén là giá trị tham chiếu

Loại mẫu	Mức sai lệch giữa 2 loại cấp phối về cường độ (Sau bảo dưỡng nhiệt ẩm)					
	Cường độ nén	Cường độ kéo trực tiếp	Cường độ uốn (mẫu A)	Cường độ uốn (mẫu B)	Cường độ uốn (mẫu C)	Cường độ uốn (mẫu D)
UHPC	1,00	0,07	0,19	0,31	0,21	0,28
UHPC-PLUS	1,00	0,07	0,17	0,31	0,21	0,29
Sai lệch	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,01

Bảng 10. So sánh 2 loại cấp phối khi cường độ kéo trực tiếp là giá trị tham chiếu

Loại mẫu	Mức sai lệch giữa 2 loại cấp phối				
	Cường độ kéo trực tiếp	Cường độ uốn (mẫu A)	Cường độ uốn (mẫu B)	Cường độ uốn (mẫu C)	Cường độ uốn (mẫu D)
UHPC	1,00	2,59	4,25	2,93	3,80
UHPC-PLUS	1,00	2,45	4,17	2,84	3,88
Sai lệch	0,00	0,14	0,08	0,09	0,08

Bảng 11. So sánh 2 loại cấp phối khi cường độ uốn (4 điểm - A) là giá trị tham chiếu

Loại mẫu	Mức sai lệch giữa 2 loại cấp phối			
	Cường độ uốn (mẫu A)	Cường độ uốn (mẫu B)	Cường độ uốn (mẫu C)	Cường độ uốn (mẫu D)
UHPC	1,00	1,64	1,14	1,49
UHPC-PLUS	1,00	1,78	1,22	1,65
Sai lệch	0,00	0,14	0,08	0,16

Bảng 12. So sánh kết quả thí nghiệm modul đàn hồi của 2 loại cấp phối

Tuổi mẫu	Modul đàn hồi, (GPa)		Mức tăng khi có Nano SiO ₂ , %
	UHPC	UHPC-PLUS	
R5	48,9	50,9	4,1
R28	49,7	52,4	5,4

Nhận xét:

- Đối với quy đổi hệ số các loại cường độ, khi sử dụng bổ sung Nano SiO₂:
 - Mức sai lệch của hệ số quy đổi từ cường độ nén tới các chỉ tiêu cơ lý khác là < 10%;
 - Mức sai lệch của hệ số quy đổi từ cường độ kéo trực tiếp tới các loại cường độ uốn là ≈ 10%;
 - Mức sai lệch của hệ số quy đổi từ cường độ uốn mẫu A tới các loại cường độ uốn còn lại là > 10%;
- Đối với modul đàn hồi, khi sử dụng bổ sung Nano SiO₂, Modul tăng lên 4,1% (tại 5 ngày tuổi) và 5,4% (tại 28 ngày tuổi);

III. KẾT LUẬN

1. Hệ số quy đổi cường độ mẫu đối với mẫu cấp phối UHPC thông thường:

• Đối với mẫu được bảo dưỡng ẩm tự nhiên, thí nghiệm tại tuổi 1 ngày:

- $R_{nén} = 11,11 \cdot R_{kéo} = 4,55 \cdot R_{uốn A} = 3,85 \cdot R_{uốn C}$

• Đối với mẫu được bảo dưỡng nhiệt ẩm:

- $R_{nén} = 14,29 \cdot R_{kéo} = 5,26 \cdot R_{uốn A} = 3,23 \cdot R_{uốn B} = 4,76 \cdot R_{uốn C} = 3,57 \cdot R_{uốn D}$

2. Hệ số quy đổi mẫu đối với mẫu cấp phối UHPC-PLUS có bổ sung nano SiO₂ trong thành phần:

• Đối với mẫu được bảo dưỡng ẩm tự nhiên, thí nghiệm tại tuổi 1 ngày:

- $R_{nén} = 11,11 \cdot R_{kéo} = 4,35 \cdot R_{uốn A} = 3,70 \cdot R_{uốn B}$

• Đối với mẫu được bảo dưỡng nhiệt ẩm:

- $R_{nén} = 14,28 \cdot R_{kéo} = 5,88 \cdot R_{uốn A} = 3,23 \cdot R_{uốn B} = 4,76 \cdot R_{uốn C} = 3,45 \cdot R_{uốn D}$

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. FHWA TechNote HRT-11-038: Ultra-High Performance Concrete: Properties of Field-Cast UHPC-Class Materials
2. FHWA-HRT-18-036: Properties and Behavior of UHPC-Class Material
3. NF P18-470 Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete - Specifications, performance, production and conformity;
4. TCCS 02:2017/IBST Bê tông tính năng siêu cao UHPC - Hướng dẫn thiết kế kết cấu;
5. ASTM C1856/C1856M-17 Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete;
6. ASTM C469/C469M-14e1 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression;
7. ASTM C1609/C1609M-19a Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third - Point Loading);
8. ASTM C78 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete;