

# XÂY DỰNG

TẠP CHÍ ĐIỆN TỬ CỦA BỘ XÂY DỰNG  
JOURNAL OF CONSTRUCTION

TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

## Nghiên xây dựng đường cong ứng suất-biến dạng của bê tông siêu tính năng sử dụng cốt liệu cát sông

Research on constructing stress-strain curves of Ultra-High-Performance Concrete using river sand aggregate

➤ **Bùi Thị Ninh<sup>1</sup>; Nguyễn Khánh Lâm<sup>1</sup>; Phạm Ngọc Sáng<sup>1</sup>; Vũ Việt Hưng<sup>2</sup>; Nguyễn Trọng Tâm<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Trường Đại học GTVT TP Hồ Chí Minh

<sup>2</sup>Phân hiệu tại TP Hồ Chí Minh Trường Đại học GTVT

\*Email: trongtam.nguyen@ut.edu.vn.

### THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 01/4/2026

Ngày sửa bài: 12/4/2026

Ngày chấp nhận đăng: 17/4/2026

Ngày xuất bản Online: 28/4/2026

Tác giả liên hệ:

Email: trongtam.nguyen@ut.edu.vn

### TÓM TẮT

Bê tông siêu tính năng (UHPC) là loại vật liệu có các đặc tính nổi trội về tính công tác, cường độ, độ bền và độ dẻo dai nên góp phần nâng cao khả năng chịu lực của kết cấu, qua đó góp phần tăng cường độ bền của công trình khi chịu các tác động bất lợi và quá trình xâm thực từ môi trường.

Sự biến thiên cường độ chịu nén của bê tông được khảo sát khi cốt liệu hoàn toàn là cát sông (RS) hay cát thạch anh (QS). Kết quả phân tích và thí nghiệm cho thấy rằng, với nguồn cát sông sẵn có, khi áp dụng quy trình phối trộn hợp lý cùng phương pháp bảo dưỡng phù hợp có thể chế tạo được bê tông UHPC với cường độ chịu nén trên 120 MPa.

Bên cạnh đó, nghiên cứu còn thiết lập phương trình mô tả ứng xử ứng suất-nén-biến dạng dọc trục của UHPC với cốt liệu là RS, dựa trên phương pháp của B.A. Graybeal và C.A. Richter. Các kết quả từ mô hình lý thuyết được đánh giá và cho thấy phương trình đường cong được thiết lập phù hợp với đường cong thu được từ thí nghiệm.

**Từ khoá:** UHPC; cát sông; cát quartz; ứng suất nén; biến dạng dọc trục; cường độ chịu nén; modul đàn hồi; bảo dưỡng nhiệt ẩm.

## ABSTRACT

Ultra-High Performance Concrete (UHPC) is a material distinguished by its exceptional strength, durability, workability, and ductility, which collectively enhance the load-bearing capacity of structures and improve the long-term resilience of constructions to mitigate negative environmental effects.

In this research, the variation in the compressive strength of UHPC was investigated when the aggregate was entirely river sand (RS) or quartz sand (QS). The research results indicate that, with the available river sand source, ultra-high-performance concrete can still be successfully produced with compressive strength exceeding 120 MPa when an appropriate mix design and curing regime are applied.

In addition, the study established an equation describing the compressive stress–axial strain relationship of UHPC with river sand (RS) as the aggregate, based on the method proposed by B.A. Graybeal and C.A. Richter. The results obtained from the theoretical model were evaluated and showed that the regression equation is consistent with the curve obtained from the experimental results.

**Keywords:** UHPC; river sand; quartz sand; the steel fibers; compressive stress; axial strain; compressive strength; elastic modulus moist heat curing.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông siêu tính năng cao (UHPC) là vật liệu xi măng chất lượng cao được nghiên cứu và phát triển mạnh từ thập niên 1990. Vật liệu này có cường độ chịu nén rất cao, thường đạt 120 đến 200 MPa, đồng thời có khả năng chịu kéo, chịu uốn, chịu va chạm và tải trọng lặp tốt hơn bê tông thông thường. Nhờ cấu trúc đặc chắc và độ bền lâu cao, UHPC được xem là vật liệu phù hợp cho các kết cấu yêu cầu khả năng chịu lực lớn và tuổi thọ khai thác dài.

Thành phần cơ bản của UHPC gồm xi măng, muội silic, cốt liệu mịn, phụ gia siêu dẻo, sợi gia cường và nước, với tỷ lệ nước trên chất kết dính thường nhỏ hơn 0.25. Trong đó, cát thạch anh thường được sử dụng làm cốt liệu mịn do góp phần cải thiện vùng chuyển tiếp liên pha ITZ và nâng cao cường độ vật liệu. Tuy nhiên, nguồn cát thạch anh có trữ lượng hạn chế, phân bố không đồng đều, trong khi việc khai thác cát tự nhiên quy mô lớn gây ra nhiều tác động bất lợi đến môi trường. Từ thực tế đó, việc nghiên cứu sử dụng RS thay thế QS trong chế tạo UHPC là cần thiết. Hướng nghiên cứu này nhằm tận dụng nguồn vật liệu sẵn có trong nước, giảm phụ thuộc vào cát thạch anh và đánh giá khả năng ứng dụng thực tế của UHPC trong điều kiện Việt Nam.

Tại Việt Nam, RS được khai thác và ứng dụng rộng rãi trong xây dựng và đã được hướng dẫn theo tiêu chuẩn TCVN 7570:2006-cốt liệu cho bê tông và vữa [1]. Các nghiên cứu trước đây về việc sử dụng RS chủ yếu tập trung vào bê tông thường (NSC) và bê tông cường độ cao (HSC) và đã cung cấp một nền tảng lý thuyết khá đầy đủ. Tuy nhiên, việc nghiên cứu và ứng dụng RS trong UHPC ở cả trong nước và quốc tế vẫn còn những hạn chế nhất định.

Nghiên cứu của Hussam Ali Mohammed [2] đã đánh giá ảnh hưởng của việc sử dụng cát sông làm cốt liệu trong bê tông thường NSC. Kết quả thí nghiệm cho thấy

bê tông sử dụng 100% cát sông đạt cường độ nén khoảng 28-30 MPa sau 28 ngày, giá trị này cao hơn so với cấp phối sử dụng cốt liệu hoàn toàn là cát mỏ thông thường hoặc cốt liệu phối trộn từ 2 loại cốt liệu trên. Điều này cho thấy cát sông có thể được sử dụng hiệu quả để chế tạo bê tông NSC với các đặc tính cơ học đạt yêu cầu kỹ thuật cần thiết.

Al-Thairy [3] đã nghiên cứu sử dụng RS để chế tạo bê tông NSC và đánh giá ảnh hưởng của loại cốt liệu này đến các đặc tính cơ học của bê tông. Kết quả cho thấy bê tông sử dụng RS đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật với cường độ chịu nén ở 28 ngày tuổi đạt khoảng 30-35 MPa và cường độ chịu kéo đạt từ 2,5-3,0 MPa. Bên cạnh đó, hỗn hợp bê tông có tính công tác tương đối tốt khi cấp phối được thiết kế hợp lý. Những kết quả này khẳng định khả năng sử dụng cát sông trong chế tạo NSC.

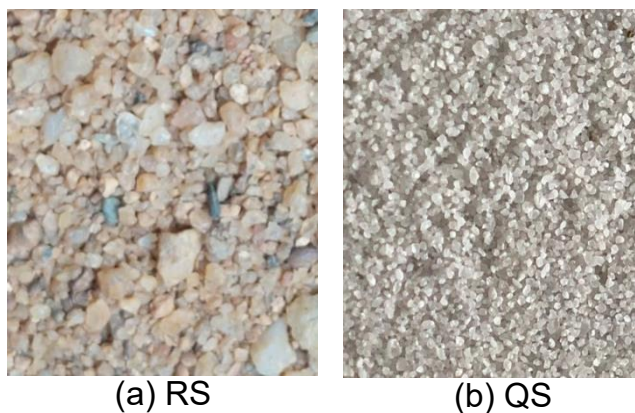
Chijioke và các cộng sự [4] đã nghiên cứu đặc tính cơ học của bê tông chế tạo từ RS và bê tông sử dụng cát nghiền làm cốt liệu. Kết quả cho thấy, cường độ nén của bê tông đạt khoảng 32-36 MPa ở 28 ngày tuổi, cường độ chịu kéo trực tiếp vào khoảng 2,8-3,2 MPa, trong khi cường độ chịu uốn đạt 4,0-4,5 MPa.

Nghiên cứu của Nagpal [5] đã khảo sát ảnh hưởng của việc thay thế cát mỏ thông thường bằng cát sông trong sản xuất bê tông NSC và HSC. Thí nghiệm được thực hiện với 4 tỷ lệ thay thế: 0%, 25%, 50% và 75%. Kết quả cho thấy, NSC sử dụng cát sông với tỷ lệ  $\leq 25\%$  vẫn đạt cường độ nén và uốn tương đương với bê tông đối sánh với cường độ nén khoảng 20-30 MPa. Như vậy, RS có thể được ứng dụng làm cốt liệu mịn thay thế một phần, đặc biệt trong các vùng khan hiếm cát mỏ mà không làm ảnh hưởng đến đặc tính cơ học của bê tông.

Tác giả Hawi [6] đã khảo sát việc sử dụng RS để thay thế cát mỏ. Các tỷ lệ thay thế được lựa chọn gồm 0%, 25%, 50% và 75%. Kết quả cho thấy, tại 28 ngày tuổi với mức thay thế 75% RS cho cường độ chịu nén, kéo và uốn cao nhất.

Ngoài ra, Donza và các cộng sự [7] đã tiến hành nghiên cứu nhằm đánh giá ảnh hưởng của cát nghiền và cát sông đến tính năng của bê tông. Kết quả cho thấy, việc sử dụng cát nghiền từ đá granite giúp nâng cao cường độ nén của bê tông khoảng 10-15%.

Từ các phân tích trên cho thấy, các nghiên cứu hiện tại đã chế tạo bê tông NSC và HSC, việc nghiên cứu chế tạo UHPC với cốt liệu hoàn toàn là RS, đồng thời phân tích đường cong nén cho loại bê tông này vẫn chưa hoàn chỉnh từ lý thuyết đến thực nghiệm.



Hình 1. Vật liệu cát sông và cát thạch anh.

Trong nghiên cứu này, RS được thu thập từ lưu vực sông Đồng Nai như Hình 1a, Hình 1b là QS có nguồn gốc từ mỏ Cam Ranh được sử dụng làm cốt liệu so sánh. Phân tích thành phần hạt cho thấy cả hai loại cát đều thuộc nhóm cát mịn theo phân

loại của TCVN 7570:2006. Kết quả thí nghiệm cho thấy UHPC sử dụng hoàn toàn cát sông làm cốt liệu mịn vẫn có khả năng đạt cường độ nén lớn hơn 120 MPa.

## 2. VẬT LIỆU VÀ QUY TRÌNH CHẾ TẠO BÊ TÔNG SIÊU TÍNH NĂNG

### 2.1. Thành phần nguyên vật liệu

Nguyên vật liệu trong nghiên cứu này bao gồm: xi măng, silica fume, cát sông, cát thạch anh, bột cát thạch anh và phụ gia siêu dẻo như Bảng 1. Chỉ tiêu cơ lý và thành phần hạt như Bảng 2 và Bảng 3.

Bảng 1. Thành phần nguyên vật liệu.

STT	Nguyên vật liệu	Ký hiệu	Kích cỡ hạt	Khối lượng riêng (kg/m <sup>3</sup> )
1	Xi măng PC 50	C	1-75 $\mu$ m	3050
2	Silica fume	SF	0,05-1 $\mu$ m	2220
3	Bột cát thạch anh	QP	1-100 $\mu$ m	2630
4	Cát sông	RS	0,14-5 mm	2700
5	Cát thạch anh	QS	0,14-1,25 mm	2650
6	Nước	W	-	1000
7	Phụ gia siêu dẻo	AD	-	1100

Bảng 2. Các tính chất cơ lý của QS và RS.

Cốt liệu	Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả
QS	Khối lượng riêng	g/cm <sup>3</sup>	2650
	Khối lượng thể tích xốp	g/cm <sup>3</sup>	1670
	Hệ số lèn chặt	-	0,621
	Độ hút nước	%	0,60
	Hàm lượng SiO <sub>2</sub>	%	98,55
RS	Khối lượng riêng	g/cm <sup>3</sup>	2700
	Khối lượng thể tích xốp	g/cm <sup>3</sup>	1480
	Hệ số lèn chặt	-	0,629
	Độ hút nước	%	1,04
	Hàm lượng SiO <sub>2</sub>	%	91,45

Bảng 3. Hàm lượng lọt sàng của cát sông và cát thạch anh.

Cỡ sàng	Cát sông		Cát thạch anh		Giới hạn theo ASTM C33	
	Tích lũy	Lượng lọt sàng	Tích lũy	Lượng lọt sàng	Min	Max
(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)		
9,5 (3/8 in.)	0	100	0	100	100	100
4,75 (số. 4)	0	100	0	100	100	95
2,36 (số. 8)	1,21	98,79	0	100	100	80
1,18 (số. 16)	6,35	93,65	0,6	99,4	85	50
0,6 (số. 30)	35,57	64,43	51,6	48,4	60	25
0,3 (số. 50)	80,76	19,24	99,46	0,54	30	10
0,15 (số. 100)	94,99	5,01	99,76	0,24	10	2
0,075 (số. 200)	100	0	100	0	5	0
< 0,075	100	0	100	0	-	-
Mô đun cỡ hạt	2,19		2,51			
Hình dạng	Tròn cạnh		Tròn cạnh			
Tình trạng bề mặt	Nhẵn		Nhẵn			

Tính năng của bê tông phụ thuộc chủ yếu vào mức độ sắp xếp của các hạt cốt liệu. Vì vậy, việc lựa chọn thành phần hạt hợp lý, có độ lèn chặt tối ưu là một trong những yếu tố rất quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến tính chất của bê tông.

## 2.2. Cấp phối đánh giá

Cơ sở xây dựng cấp phối trong nghiên cứu này được tham khảo từ các mô hình thiết kế UHPC tiên tiến đã được áp dụng trên thế giới, tiêu biểu là hỗn hợp hạt mịn M2Q [8]. Trên nền tảng đó, các thí nghiệm khảo sát trong phòng thí nghiệm đã được thực hiện với cát sông Đồng Nai cùng một số vật liệu địa phương khác tại Việt Nam. Kết quả phân tích cho cấp phối đối chứng được trình bày ở Bảng 4.

Bảng 4. Cấp phối dùng trong nghiên cứu thực nghiệm.

STT	Thành phần	Đơn vị	Kích thước hạt	Khối lượng các thành phần
1	Xi măng PC50	kg	1-75 $\mu$ m	850
2	Silicafume	kg	0,05-1 $\mu$ m	170
3	Bột cát thạch anh	kg	1-100 $\mu$ m	200
5	Nước	kg	-	202
6	Sợi thép	kg	-	78,5
7	Phụ gia siêu dẻo	kg	-	18,7
8	Agg	kg	0,14-5 mm	946

### 2.3. Công tác đổ, bảo dưỡng và gia công mẫu

Để xác định cường độ chịu nén, nhóm nghiên cứu tiến hành đúc 65 mẫu trụ chịu nén có đường kính 100 mm, chiều cao 200 mm theo tiêu chuẩn ASTM C39/C39M [11].

Quá trình trộn được thực hiện bằng máy trộn cưỡng bức 4 cấp độ tại phòng thí nghiệm, như Hình 2. Tổng thời gian thực hiện quá trình trộn nằm trong khoảng từ 5 đến 8 phút.



Hình 2. Thiết bị trộn cưỡng bức 4 cấp độ tại phòng thí nghiệm.

Sau khi đổ mẫu tiến hành bọc bề mặt mẫu để tránh bay hơi nước và để mẫu trong môi trường tự nhiên 24 giờ. Sau đó, các mẫu tiếp tục được bảo dưỡng nhiệt ẩm ở điều kiện nhiệt độ 80°C và bảo hòa ẩm trong 48 giờ tiếp theo, cuối cùng ngâm mẫu đến thời điểm cần nén. Công tác đổ mẫu như Hình 3.



(a) Khuôn 100x200 mm



(b) Đổ bê tông vào mẫu trụ.

Hình 3. Chế tạo mẫu nén 100 x 200 mm.

Sau bảo dưỡng, tiến hành mài phẳng mẫu bằng máy mài chuyên dụng như Hình 4.



(a) Công tác mài mẫu.



(b) Mẫu 100x200mm sau mài phẳng.

Hình 4. Mài phẳng mẫu trụ UHPC.

Mỗi mẫu nén hình trụ được gắn 4 strain gauges. Trong đó, 2 strain gauges được gắn dọc mẫu để đo biến dạng theo phương dọc trục, 2 strain gauges còn lại dán theo

chu vi mẫu để đo biến dạng chu vi. Giá trị modul đàn hồi và hệ số poisson được xác định từ ứng suất nén và 2 loại biến dạng trên.

### 3. THỬ NGHIỆM TÍNH NĂNG CHỊU NÉN

#### 3.1. Xác định cường độ chịu nén



(a) Bộ mẫu thử nghiệm

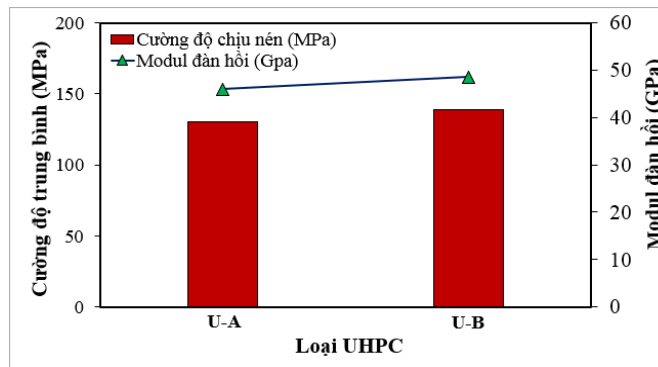


(b) Nén mẫu UHPC

Hình 5. Xác định đặc tính chịu nén UHPC.

Thí nghiệm xác định cường độ nén của bê tông được tiến hành trên các mẫu trụ kích thước 100×200 mm, tuân thủ theo tiêu chuẩn ASTM C39/C39M. Sau khi hoàn tất quá trình bảo dưỡng và mài phẳng bề mặt, các mẫu được thử nghiệm nhằm đánh giá khả năng chịu nén của bê tông.

Dựa trên dữ liệu ứng suất nén cùng với biến dạng dọc trục và chu vi, các giá trị modul đàn hồi và hệ số Poisson của UHPC sử dụng cốt liệu cát sông được xác định.



Hình 6. Tương quan cường độ chịu nén, modul đàn hồi của UHPC.

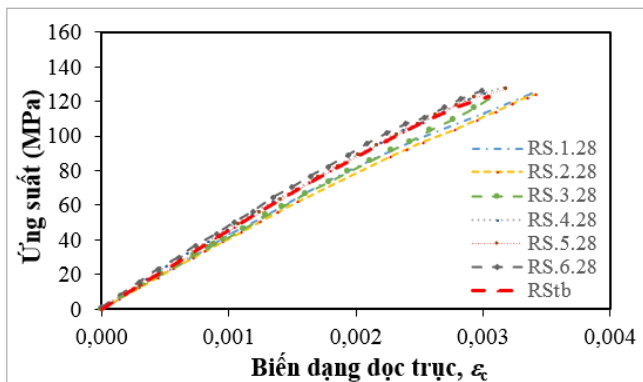
Thí nghiệm nén mẫu được thực hiện trên máy nén bê tông có năng lực 2000 kN, như minh họa trong Hình 5, với tốc độ nén 0,25 MPa/s. Kết quả thử nghiệm bao gồm cường độ chịu nén và modul đàn hồi của các mẫu, được tổng hợp trong Bảng 5 và Hình 6. Trên biểu đồ này, các đường cong ứng suất nén chỉ hiển thị đến điểm đạt ứng suất cực đại, phần giảm tải sau đó đã được loại bỏ. Trạng thái ứng suất nén - biến dạng dọc trục trung bình của cấp phối đánh giá được thiết lập từ các mẫu bê tông với cốt liệu hoàn toàn là RS hoặc QS, các mẫu này được ký hiệu tương ứng là U-A và U-B.

Kết quả thí nghiệm cho thấy cường độ chịu nén trung bình của mẫu UHPC cốt liệu hoàn toàn là RS tại 28 ngày tuổi đạt 125,28 MPa, giá trị này bằng khoảng 76% so với cường độ của UHPC với cốt liệu QS là 165,37 MPa. Như vậy, đặc tính hạt RS với các vết nứt âm đã ảnh hưởng đến cường độ chịu nén của bê tông.

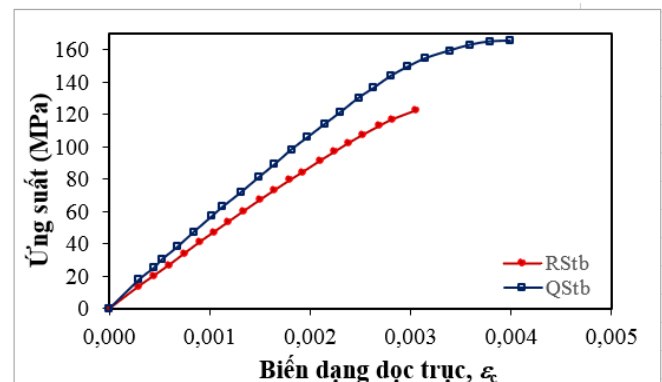
Bảng 5. Kết quả cường độ chịu nén, modul đàn hồi và hệ số poisson.

Tên mẫu	Cường độ chịu nén (MPa)			Modul đàn hồi (GPa)			Hệ số poisson		
	R <sub>28</sub>	R <sub>tb</sub>	S	E	E <sub>tb</sub>	S	v	v <sub>tb</sub>	S
RS.1.28	124,06	125,28	2,45	47,83	46,01	1,71	0,1638	0,1732	0,01
RS.2.28	126,33			47,16			0,1776		
RS.3.28	121,35			43,30			0,1716		
RS.4.28	128,37			45,21			0,1944		
RS.5.28	124,78			45,34			0,1710		
RS.6.28	126,76			47,22			0,1610		
QS.1.28	162,77	165,37	5,71	50,59	53,27	1,72	0,1745	0,2013	0,01
QS.2.28	163,05			55,1			0,2198		
QS.3.28	171,32			51,76			0,2056		
QS.4.28	172,99			53,92			0,1999		
QS.5.28	164,19			53,95			0,2031		
QS.6.28	157,88			54,31			0,2049		

3.2. Đường cong ứng suất nén-biến dạng thực nghiệm của UHPC



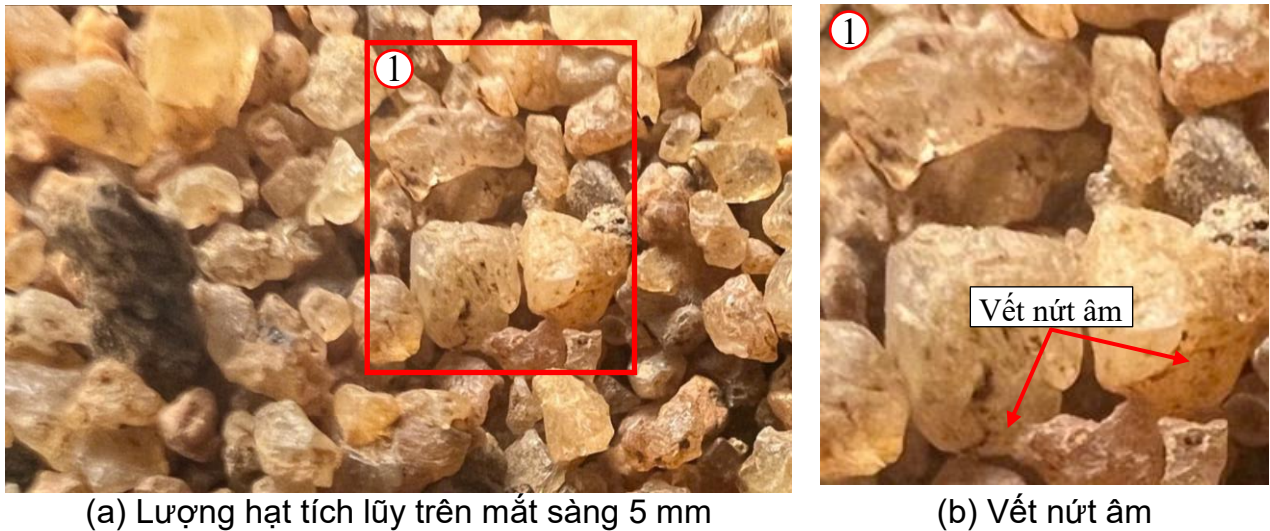
(a) Đường cong ứng suất-biến dạng của UHPC cốt liệu RS



(b) Đường cong ứng suất-biến dạng trung bình của UHPC cốt liệu RS và QS

Hình 7. Đường cong ứng suất nén-biến dạng dọc trục thực nghiệm của UHPC.

Trạng thái ứng suất nén-biến dạng của UHPC với cốt liệu RS được thể hiện trên Hình 7a, đường cong ứng suất-biến dạng trung bình của UHPC với cốt liệu RS và QS được thể hiện ở Hình 7b. Ở biểu đồ này, các đường cong nén được cắt bớt phần giảm tải ở điểm đạt ứng suất cực đại.



(a) Lượng hạt tích lũy trên mắt sàng 5 mm

(b) Vết nứt âm

Hình 8. Đặc tính hạt cốt liệu cát sông.

Từ Hình 7 cho thấy, khi UHPC với cốt liệu hoàn toàn là RS thì giá trị ứng suất tại đỉnh đường cong và hệ số góc ở nhánh đường cong ứng suất nén-biến dạng dọc trục thấp hơn so với UHPC có cốt liệu QS. Điều này được lý giải là tồn tại một số đặc điểm trong UHPC khi sử dụng cốt liệu RS như tăng lượng hạt bất lợi về hình dạng và cấu trúc như thể hiện trong Hình 8 đã ảnh hưởng đến cấu trúc của bê tông.

### 3.3. Xây dựng đường cong ứng suất nén-biến dạng của UHPC

#### 3.3.1. Cơ sở lý thuyết

Phương trình mô tả trạng thái ứng suất nén-biến dạng dọc trục đã được xây dựng bằng phương pháp gần đúng bởi nhiều tác giả khác nhau, tiêu biểu có các tác giả B.A. Graybeal [9] và C.A. Richer [10]. Trong đó, quan hệ ứng suất nén-biến dạng dọc trục thực tế so với ứng xử đàn hồi tuyến tính của tác giả C.A. Richter dựa trên nền nghiên cứu của Graybeal như Hình 9, ứng suất nén và biến dạng dọc trục được thiết lập như công thức (7).

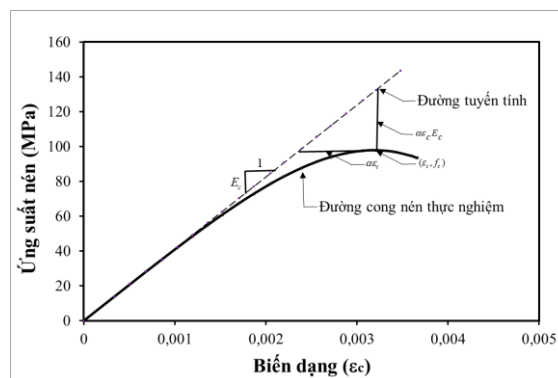
$$f_c = \varepsilon_c E_c (1 - \alpha) \quad (7)$$

Trong đó:  $f_c$  là ứng suất nén của UHPC;

$\varepsilon_c$  là biến dạng của UHPC;

$E_c$  là modul đàn hồi của UHPC;

$\alpha$  là độ lệch tuyến tính.



Hình 9. Phân tích quan hệ ứng suất nén-biến dạng thực tế của UHPC so với ứng xử đàn hồi tuyến tính.

Biến dạng nén chuẩn hóa được xác định như công thức (8)

$$\varepsilon_n = \frac{\varepsilon_c E_c}{f_c'} \quad (8)$$

Trong đó:  $\varepsilon_n$  là biến dạng nén chuẩn hóa;

$f_c'$  là ứng suất nén cực đại của UHPC.

Quan hệ giữa độ lệch tuyến tính và biến dạng nén chuẩn hóa được tác giả [11] xây dựng dưới dạng hàm mũ như phương trình (9).

$$\alpha = ae^{\frac{x}{b}} - a \quad (9)$$

Quan hệ giữa độ lệch tuyến tính và biến dạng nén chuẩn hóa được tác giả [11] xây dựng dưới dạng hàm lũy thừa như phương trình (10).

$$\alpha = ax^b \quad (10)$$

Trong đó, ở (9) và (10):  $x$  là biến dạng nén chuẩn hóa;  $a$ ,  $b$  là các tham số.

Trong nghiên cứu này, các tác giả đã thực nghiệm phân tích hồi quy và kết quả cho thấy phương trình (10) có tương quan tốt hơn giữa độ lệch tuyến tính  $\alpha$  và biến dạng nén chuẩn hóa  $x$  nên đã sử dụng phương trình này của tác giả [11] kết hợp với các phương trình (7) và (8) để xây dựng phương trình mô tả quan hệ ứng suất nén-biến dạng dọc trục như biểu thức (11).

$$f_c = \varepsilon_c E_c \left(1 - a \frac{\varepsilon_c^b E_c^b}{f_c'^b}\right) = \varepsilon_c E_c - a \frac{\varepsilon_c^{b+1} E_c^{b+1}}{f_c'^b} \quad (11)$$

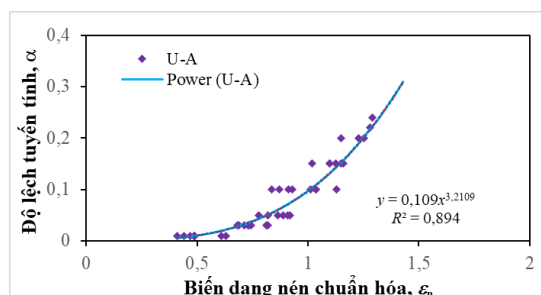
Theo nghiên cứu [11] các hệ số  $a$ ,  $b$  tương ứng là 0,106 và 2,754, phương trình 11 được thiết lập như (12)

$$f_c = E_c \varepsilon_c - 0,106 \frac{E_c^{3,754} \varepsilon_c^{3,754}}{f_c'^{2,754}} \quad (12)$$

### 3.3.2. Thiết lập phương trình ứng suất-biến dạng dọc trục của UHPC sử dụng cốt liệu cát sông

Dựa trên các cấp phối UHPC với cốt liệu là QS hay RS, có thể xây dựng được các đường cong mô tả mối quan hệ giữa hệ số  $\alpha$  và biến dạng nén chuẩn hóa  $\varepsilon_n$ . Các đường cong này được thiết lập thông qua phân tích hồi quy, sử dụng các điểm rời rạc thu được từ giá trị  $\alpha$  lần lượt là 0,01, 0,03, 0,05, 0,1 và 0,15 với các giá trị biến dạng nén chuẩn hóa tương ứng.

#### Đường cong ứng suất nén-biến dạng dọc trục của U-A



Hình 10. Độ lệch so với của ứng xử nén đàn hồi tuyến tính của U-A.

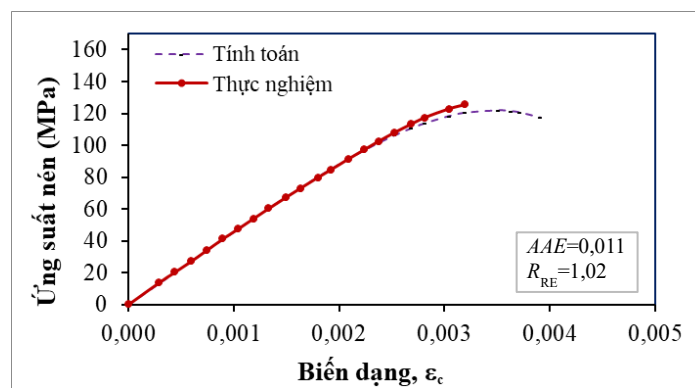
Bảng 6. Các hệ số từ kết quả hồi quy U-A.

Loại UHPC	Thông số hồi quy		
	a	b	R <sup>2</sup>
U-A	0,109	3,2109	0,894

Mô tả đường cong nén U-A đi qua các điểm là phương trình hồi quy dưới dạng hàm lũy thừa, phương trình này có hệ số tương quan đạt 0,894 như Hình 10 và Bảng 6, phương trình mô tả tương quan ứng suất nén-biến dạng dọc trục của U-A được thiết lập như (13):

$$f_c = 46.01\varepsilon_c - 0,109 \frac{46.01^{4,2109} \varepsilon_c^{4,2109}}{125,28^{3,2109}} \quad (13)$$

Hình 11 mô tả tương quan giữa đường cong từ thí nghiệm là U-A tại thời điểm 28 ngày tuổi và đường cong được hồi quy của loại bê tông này.



Hình 11. Tương quan đường cong ứng suất nén-biến dạng dọc trục hồi quy và thực nghiệm của U-A.

Để đánh giá độ chính xác của dự đoán bằng phương pháp giải tích, chỉ số thống kê cũng được thể hiện trên hình, bao gồm hệ số sai số tuyệt đối trung bình (AAE) được tính theo công thức (14), đồng thời tỷ số của giá trị cực đại bằng từ hồi quy với giá trị cực đại từ thực nghiệm tương ứng là (RRE). Hệ số sai số tuyệt đối trung bình được mô tả như sau:

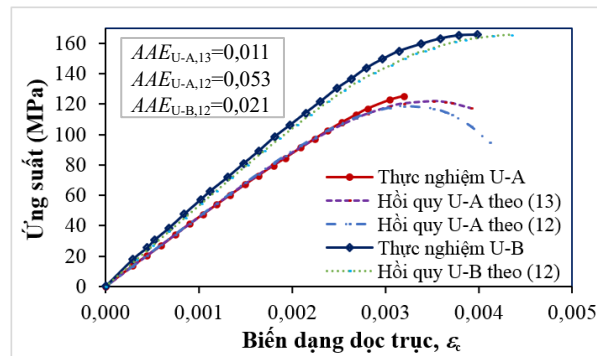
$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{p_{exp,i} - p_i}{p_{exp,i}} \right| \quad (14)$$

Trong đó, n là số lượng điểm dữ liệu;  $p_{exp,i}$  và  $p_i$  là giá trị thử nghiệm và giá trị lý thuyết từ hồi quy tương ứng.

Phân tích trên biểu đồ tương quan trên cho thấy đường cong ứng suất nén-biến dạng dọc trục theo phân tích hồi quy tiệm cận với đường cong tương ứng từ thực nghiệm với hệ số  $AAE = 0,011$  và hệ số  $RRE = 1,02$ . Như vậy, phương trình đường cong hồi quy được xây dựng của U-A đã mô tả được trạng thái làm việc của loại vật liệu này.

### 3.3.3. So sánh đường cong ứng suất-biến dạng dọc trục theo phương trình (12) và thực nghiệm

Biểu đồ đường cong ứng suất nén-biến dạng dọc trục được phân tích hồi quy và thực nghiệm được thể hiện như Hình 12.



Hình 12. Tương quan đường cong ứng suất nén-biến dạng dọc trục theo phương trình (12) và thực nghiệm của UHPC với cốt liệu cát sông.

Hình 12 thể hiện đường cong hồi quy mô tả quan hệ giữa ứng suất và biến dạng dọc trục của UHPC sử dụng hoàn toàn cốt liệu cát sông theo phương trình (12), (13) và đường cong thu được từ thực nghiệm. Kết quả phân tích cho thấy, đường cong từ hồi quy theo phương trình (12) từ nghiên cứu [11] và thực nghiệm có hệ số  $AAE = 0,053$ , trong khi đó đường cong thu từ phương trình (13) tiệm cận hơn so với thực nghiệm với hệ số  $AAE = 0,011$ . Tuy nhiên, khi áp dụng phương trình (12) trong nghiên cứu trên cho U-B thì hệ số  $AAE = 0,021$ , điều này được lý giải là trong nghiên cứu của C.A. Richter với cốt liệu sử dụng là cát thạch anh truyền thống, các thông số hồi quy đã dựa trên bộ mẫu này nên cho kết quả phân tích hồi quy phù hợp với U-B. Đối với U-A, cốt liệu là RS có cấu trúc hạt tồn tại những vết nứt âm được xác định như Hình 8, dẫn đến độ cứng của cấu trúc bê tông giảm xuống, từ đó dưới tác dụng của một giá trị tải trọng thì biến dạng tại U-A lớn hơn so với giá trị tương ứng từ U-B. Như vậy, đường cong từ hồi quy mô tả quan hệ ứng suất-biến dạng của UHPC sử dụng cốt liệu cát sông cần được khảo sát và phân tích riêng biệt so với nghiên cứu [11]. Như vậy, phương trình (13) được thiết lập phù hợp, có thể sử dụng để mô tả ứng xử của UHPC sử dụng hoàn toàn là cốt liệu cát sông.

#### 4. KẾT LUẬN

Kết quả phân tích cho thấy cát thạch anh và cát sông được sử dụng trong nghiên cứu này có cấp phối hạt và mô đun độ lớn nằm trong phạm vi quy định của TCVN 7570:2006 - Cốt liệu cho bê tông và vữa. Với những ưu điểm về thành phần hạt, modul cỡ hạt và một số tính chất cơ lý của 2 loại cát này cho thấy có thể sử dụng cốt liệu từ cát sông để chế tạo bê tông UHPC.

Nghiên cứu đã thử nghiệm trên nền cấp phối đối chứng với cốt liệu hoàn toàn là cát sông có thể chế tạo được bê tông siêu tính năng với cường độ nén đạt 125,28MPa, modul đàn hồi đạt 46,01 GPa. Như vậy, để tiết kiệm kinh phí và giảm thiểu tác động môi trường thì có thể sử dụng loại cát sông với các chỉ tiêu cơ bản như trong Bảng 1, 2, 3 và thành phần cấp phối như trong Bảng 4 và phương pháp chế tạo trình bày trong nghiên cứu này.

Ngoài ra, đường cong nén của UHPC với cốt liệu hoàn toàn là RS được thiết lập trên cơ sở hàm hồi quy trung gian mô tả tương quan độ lệch tuyến tính  $\alpha$  và biến dạng nén chuẩn hóa  $\epsilon_n$  với các kết quả đo đạc của bê tông. Kết quả cho thấy, các phương trình đường cong mô tả quan hệ ứng suất nén-biến dạng dọc trục tiệm cận với đường

cong tương ứng từ thí nghiệm. Như vậy, phương trình đường cong mô tả quan hệ ứng suất nén-biến dạng dọc trục trong nghiên cứu này phù hợp với trạng thái làm việc thực tế của bê tông siêu tính năng sử dụng cốt liệu cát sông.

Hơn nữa, từ những kết quả đạt được có thể kết luận rằng, cốt liệu RS để chế tạo UHPC hoàn toàn khả thi, điều này giúp giải quyết tình trạng khan hiếm cát thạch anh và những tác động liên quan tới môi trường do khai thác loại vật liệu này gây ra trong chế tạo UHPC. Việc mở rộng phạm vi nghiên cứu với những chủng loại cát sông khác nhau trên nền cấp phối đối chứng sẽ cung cấp góc nhìn toàn diện hơn về tiềm năng khai thác và ứng dụng rộng rãi loại vật liệu này trong chế tạo bê tông cường độ cao và bê tông siêu tính năng cao, góp phần ứng dụng rộng rãi UHPC vào thực tế xây dựng trên địa bàn cả nước.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] TCVN 7570:2006. Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật. Hà Nội, Việt Nam, 2006.
- [2] H. A. Mohammed and H. Alaa, "Assessment of Compressive Strength of Concrete Utilizing River Sand as Fine Aggregate," *American Journal of Engineering, Mechanics and Architecture*, 2024.
- [3] Al Thairy, H. "Effect of Using River Sand on the Strength of Normal and High Strength Concrete." *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 7, no. 4.20, pp. 222–228, 2018.
- [4] Chijioke, C., Nwaiwu, C. M. O., Aginam, C. H., and Anyadiegwu, P. C. "Comparing the Flexural Strength of Concrete Made with River Sand with That Made with Quarry Dust as Fine Aggregate." *International Journal of Research - GRANTHAALAYAH*, vol. 6, no. 6, pp. 453 - 460, Jun. 2018. doi: 10.29121/granthaalayah.v6.i6.2018.1390.
- [5] Nagpal, L., Dewangan, A., Dhiman, S., and Kumar, S. "Evaluation of Strength Characteristics of Concrete Using Crushed Stone Dust as Fine Aggregate." *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 2, no. 6, pp. 102–104, May 2013.
- [6] Hawi, K. H. "Influence of Using Ungraded Sand on Some Concrete Properties." *Journal of Kerbala University*, vol. 11, no. 2, pp. 165-173, 2013.
- [7] Donza, H., Cabrera, O., and Irassar, E. F. "High-Strength Concrete with Different Fine Aggregate." *Cement and Concrete Research*, vol. 32, no. 11, pp. 1755–1761, Nov. 2002. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00860-8.
- [8] Schmidt, M., Fehling, E., Fröhlich, S., and Thiemicke, J. *Sustainable Building with Ultra-High Performance Concrete: Results of the German Priority Programme 1182 Funded by Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)*. Kassel, Germany: Kassel University Press GmbH, 2015.
- [9] Graybeal, B. A. *Characterization of the Behavior of Ultra-High Performance Concrete*. Ph.D. dissertation, University of Maryland, College Park, MD, USA, 2005.
- [10] C.A. Richter, "Properties and Behavior of UHPC-Class Materials", Publication FHWA-HRT-18-036.
- [11] ASTM C39/C39M-12. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2012.

