

Đặc tính cường độ chịu nén, uốn và kéo trực tiếp của bê tông siêu tính năng cao sử dụng cốt liệu cát nghiền

Compressive, bending and direct tensile strength characteristics of ultra-high-performance concrete using crushed sand aggregate

> PHẠM NGỌC SÁNG*, MAI LỰU

Viện xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải TP.HCM; *Email: luu.mai@ut.edu.vn.

TÓM TẮT

Sử dụng bê tông siêu tính năng cao (UHPC) với các tính năng ưu việt như cường độ, độ bền, độ chảy xòe và độ dẻo dai cao đồng thời độ thấm ion clo và độ co tự sinh thấp giúp nâng cao khả năng chịu tải và đảm bảo sự bền vững của công trình xây dựng trước tác động bất lợi của môi trường. Việc tiếp tục nghiên cứu và ứng dụng loại bê tông này với các tính năng phù hợp với các cấu kiện bê tông không ngừng được bổ sung và hoàn thiện có ý nghĩa trong việc tạo tiền đề để ứng dụng rộng rãi loại bê tông này vào thực tế xây dựng. Bài báo nghiên cứu về các đặc tính cơ học của UHPC khi sử dụng cốt liệu cát nghiền. Các tác giả đã tiến hành thực nghiệm trên cấp phối bê tông đã được thiết kế điều chỉnh trên nền cấp phối hạt mịn M30, áp dụng vào điều kiện vật liệu địa phương Việt Nam. Các tính năng cơ học của UHPC sử dụng CS được xác định như: cường độ chịu nén, modul đàn hồi, hệ số poisson, cường độ chịu kéo và cường độ chịu uốn. Căn cứ vào kết quả thí nghiệm cho thấy có thể chế tạo UHPC bằng cốt liệu CS đạt cường độ chịu nén khoảng 130MPa, cường độ chịu kéo trực tiếp trên 7MPa và cường độ chịu uốn trên 15MPa.

Từ khoá: UHPC; cát nghiền; cát quartz; sợi thép; bảo dưỡng nhiệt ẩm; độ chảy xòe; cường độ chịu nén; cường độ chịu kéo; cường độ chịu uốn; modul đàn hồi; hệ số poisson.

ABSTRACT

Using ultra-high-performance concrete (UHPC) with superior features such as strength, durability, high flow and toughness, while low chloride ion permeability and spontaneous shrinkage helps improve resistance load and ensures the sustainability of construction works against adverse environmental impacts. The continued research and application of this type of concrete with features suitable for concrete structures that are constantly being added and perfected is meaningful in creating a premise for widespread application of this type of concrete in construction reality. This article studies the mechanical properties of ultra-high-performance concrete when using crushed sand aggregate. The authors conducted experiments on concrete mixes that were designed and adjusted on the M30 fine-grained mix, applying them to local material conditions in Vietnam. The mechanical properties of UHPC using CS are determined as: compressive strength, elastic modulus, Poisson's ratio, tensile strength and bending strength. Based on the experimental results, it is possible to produce UHPC with CS aggregate to achieve a compressive strength of about 130MPa, direct tensile strength of over 7MPa and flexural strength of over 15MPa.

Keywords: UHPC; crushed sand; quartz sand; the steel rope; moist heat curing; flow; compressive strength; tensile strength; bending strength; elastic modulus; poisson coefficient.

1. GIỚI THIỆU

Bê tông siêu tính năng cao (Ultra-high performance concrete hay viết tắt là UHPC) là loại bê tông thế hệ mới được nghiên cứu và ứng dụng trên khắp thế giới hơn đến nay đã hơn 40 năm. So với bê tông thường (Normal strength concrete-NSC) và bê tông cường độ cao (High strength concrete-HSC), UHPC có nhiều ưu điểm vượt trội khi xét về mật độ cường độ cũng như độ bền. Ở mỗi quốc gia, mỗi châu lục khác nhau có những định nghĩa về UHPC khác nhau. Nhìn

chung, UHPC được xem là một loại vật liệu bê tông liên hợp gốc xi măng được tối ưu hóa sự sắp xếp của hỗn hợp hạt cốt liệu nhằm giảm thiểu lỗ rỗng và làm mật độ phân bố của các vi cấu trúc trở nên đặc sít nhất, khi đó lượng nước nhào trộn giảm đáng kể. Theo nghiên cứu của Magureanu [1], UHPC có cường độ chịu nén từ 120 đến 200MPa, cường độ chịu kéo uốn từ 8 đến 30MPa và modul đàn hồi trong khoảng 40 đến 55MPa. Ngoài ra UHPC còn được đặc trưng bởi độ cứng và độ bền cực kỳ cao.

Xét về vật liệu chế tạo, UHPC bao gồm các thành phần cơ bản như xi măng, silica fume, cát quartz, phụ gia siêu dẻo, cốt sợi và nước. Tuy nhiên, tỷ lệ giữa các vật liệu thành phần có sự khác biệt so với các loại bê tông khác. So với bê tông thường và bê tông cường độ cao, UHPC có một số đặc điểm khác biệt điển hình như tỷ lệ nước-xi măng ($\frac{W}{C}$) rất thấp (thường nhỏ hơn 0,25, tính theo khối lượng),

khi bổ sung cốt sợi có thể cải thiện độ co ngót, tăng cường độ uốn, cường độ kéo trực tiếp hay độ bền dẻo dai của bê tông. Một đặc điểm khác của UHPC là cốt liệu lớn được loại bỏ, chỉ có cát là cốt liệu duy nhất, thông thường sử dụng cốt liệu cát quartz, vì các đặc tính của nó như độ cứng lớn, độ hút nước bề mặt thấp, hình dạng hạt góc cạnh và khả năng liên kết tốt với đá xi măng. Thông thường kích thước hạt cốt liệu lớn nhất được lựa chọn nhỏ hơn 600 μ m để giảm thiểu các khuyết tật như các lỗ rỗng cũng như các vết nứt cấu trúc vùng chuyển tiếp cốt liệu và vật liệu nền. Tuy nhiên, khi sử dụng loại cát trên, tỷ diện bề mặt tăng cao dẫn đến lượng chất kết dính tương đối lớn, điều này ảnh hưởng tới giá thành sản phẩm, ảnh hưởng đến môi trường đồng thời làm tăng độ co ngót trong bê tông.

Để giải quyết những tồn tại nêu trên, việc nghiên cứu sử dụng cốt liệu có đường kính lớn hơn và giá thành thấp hơn cát truyền thống để chế tạo UHPC là hết sức cần thiết. Vì vậy, việc để xuất vật liệu cát nghiền với đường kính hạt đến 5mm làm cốt liệu trong bê tông đồng thời với việc tối ưu hóa thành phần cấp phối trong chế tạo UHPC để đạt được các tính năng phù hợp mang ý nghĩa quan trọng trong việc giảm giá thành xây dựng và góp phần ứng dụng rộng loại bê tông này trong lĩnh vực xây dựng trên địa bàn cả nước. Việt Nam có trữ lượng CS dồi dào, phân bố tập trung tại các địa bàn miền Bắc, miền Trung, Tây Nguyên, Đông Nam Bộ, An Giang và Kiên Giang. Nhìn chung, CS ở các mỏ khác nhau có thành phần hóa học, phân loại thạch học, độ cứng, độ bền, cấu trúc lỗ rỗng, khối lượng riêng khác nhau. Ngoài ra, một số đặc tính khác của CS như cấp phối hạt, modul độ lớn, hình dạng, cấu trúc bề mặt và độ hút ẩm sẽ thay đổi tùy theo công nghệ nghiền, sàng và rửa đá. Tất cả tính chất trên có ảnh hưởng quyết định đến các đặc tính của bê tông.

Việc nghiên cứu chế tạo bê tông sử dụng sản phẩm nghiền từ đá gốc đã được nghiên cứu sâu rộng ở cả trong nước và thế giới. Các nghiên cứu dựa vào các thành tựu lý thuyết trước đó kết hợp với thực nghiệm và bán thực nghiệm để tối ưu hóa thành phần hỗn hợp bê tông, trên cơ sở đó tiếp tục nghiên cứu các tính năng của hỗn hợp bê tông và bê tông đông cứng. Nhìn chung, đứng trên phương diện kích cỡ hạt cốt liệu trong hỗn hợp UHPC mà phân ra 2 xu hướng chính. Ở xu hướng thứ nhất, các nhóm nghiên cứu đã sử dụng cốt liệu lớn được nghiền từ đá gốc có đường kính hạt đến 8mm để chế tạo UHPC với pha cốt liệu được phối bởi 2 hoặc nhiều cấu tử từ các loại cát nghiền với cỡ hạt khác nhau với cát thạch anh. Mục tiêu của việc phối trộn là tìm ra độ chặt lớn nhất của pha cốt liệu, trên cơ sở đó tiếp tục nghiên cứu thực nghiệm để chế tạo UHPC với các tính năng mong muốn. Tiêu biểu có các nghiên cứu Teichmann và Schmidt [2], N.V Tuệ và K.H Hoàng [3]. Các tác giả [2] đã đánh giá ảnh hưởng của tối ưu hóa độ chặt đến tính năng và độ bền của UHPC, cường độ chịu nén của bê tông có thể đạt trên 200MPa. Theo đó, bê tông có độ chặt càng cao thì càng tăng khả năng chống xâm nhập của nước và không khí so với bê tông thường. Nhóm nghiên cứu [3] đã tối ưu hóa thành phần UHPC với thành phần cốt liệu gồm cát thạch anh và đá bazan. Xác định khả năng tự chảy cao nhất và độ nhớt dẻo thấp nhất cho 4 nhóm cấp phối bê tông có kích thước cỡ hạt lớn nhất lần lượt là 1 mm, 2.5 mm, 4 mm và 8 mm nhằm lựa chọn được tỷ lệ UHPC tối ưu, kết quả là tạo ra loại bê tông với cường độ chịu nén đạt 190MPa.

Ở xu hướng thứ 2, các tác giả đã lựa chọn trong các sản phẩm nghiền từ đá gốc loại cấp phối hạt cát nghiền với cỡ hạt cốt liệu lớn

nhất là 5mm để nghiên cứu để thay thế một phần hoặc toàn bộ cốt liệu cát truyền thống trong công nghệ chế tạo NSC, HSC hay bê tông UHPC. Đặc điểm nổi bật của cốt liệu có cỡ hạt như trên là có thể phối liên tục với các thành phần khác với cỡ hạt nhỏ hơn để tạo nên đường cong cấp phối phù hợp với các lý thuyết phối trộn các cỡ hạt liên tục như: Mô hình Arthur N. Talbot và Frank E. Richart, mô hình của Fuller và Thompson Talbot, fuller hay mô hình của Andreassen [4]. Tiêu biểu trong nhóm sử dụng CS với cỡ hạt $D_{max}=5mm$ làm cốt liệu để chế tạo bê tông NSC và HSC gồm các tác giả Donza [5], [6] và P.C.Aitcin [7]. Trong đó, nghiên cứu [5] trình bày ảnh hưởng của các loại cát nghiền khác nhau đối với bê tông thường, kết quả cho thấy cát nghiền từ đá gốc granite có thể chế tạo HSC có cường độ cao hơn cát sông và CS từ đá vôi, đồng thời hỗn hợp bê tông với cốt liệu cát nghiền từ đá gốc dolomite mất tính công tác rất nhanh. Kết quả của nghiên cứu còn cho thấy có thể chế tạo HSC đạt cường độ chịu nén trên 70MPa. Bài báo [6] đã cung cấp một góc nhìn khá đầy đủ về ảnh hưởng của hình dạng, kết cấu hạt, thành phần khoáng vật của cát nghiền. Bài báo đã trình bày nghiên cứu phối trộn cát nghiền và cát tự nhiên theo các tỷ lệ khác nhau (0%, 25%, 50%, 75% và 100%) trên cùng một cấp phối. Kết quả nghiên cứu cho thấy, cường độ chịu nén ở 90 ngày tuổi của các trường hợp đạt từ 60 đến 64MPa, modul đàn hồi trong trường hợp bê tông chứa 75% và 100% cát granite thấp hơn bê tông chứa 100% cát tự nhiên. Tác giả P.C.Aitcin trình bày ảnh hưởng của các loại cát nghiền khác nhau đối với bê tông thường. Nghiên cứu cho thấy, độ hút ẩm của cốt liệu CS lớn và hàm lượng nước dùng cho cấp phối bê tông tăng thêm so với cốt liệu cát truyền thống, kết quả thí nghiệm đã tạo ra NSC với cường độ đạt (30-40MPa).

Dựa trên ý tưởng sử dụng sản phẩm nghiền từ đá gốc có đường kính đến 5mm để chế tạo UHPC, nhóm nghiên cứu đã tuyển chọn CS từ các mỏ khác nhau trong khu vực Tây Nguyên, Đông Nam Bộ và Đồng bằng Sông Cửu Long. Với tiêu chí là CS có cường độ đá gốc trên 140MPa, cấp phối hạt có những đặc điểm tương đồng với cát truyền thống.



Hình 1. Cát nghiền tại khu vực Đông Nam Bộ.

Cát nghiền sử dụng trong nghiên cứu này thuộc khu vực Đông Nam Bộ như hình 1, có thành phần hạt nằm hoàn toàn trong miền cát thô theo tiêu chuẩn TCVN-9205:2012 [8], modul cỡ hạt 2,6 và cường độ đá gốc từ 140MPa đến 160MPa. Các tác giả đã phân tích lý thuyết kết hợp với thực nghiệm trên loại CS này để chế tạo UHPC, đồng thời làm rõ các tính năng cơ học như: cường độ nén, cường độ uốn, cường độ kéo trực tiếp, modul đàn hồi và hệ số poisson.

2. VẬT LIỆU THÀNH PHẦN

Trong nghiên cứu này, hỗn hợp UHPC được chế tạo bằng vật liệu địa phương ở Việt Nam. Các vật liệu thành phần điển hình bao gồm: xi măng, silica fume, cát nghiền, bột cát thạch anh, phụ gia siêu dẻo, như trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Thành phần nguyên vật liệu.

STT	Nguyên vật liệu	Ký hiệu	Kích cỡ hạt	Khối lượng riêng (kg/m ³)
1	Xi măng PC 50	C	1-75 μm	3050
2	Silica fume	SF	0,05-1μm	2220
3	Bột cát thạch anh	QP	1-100 μm	2630
4	Cát nghiền	CS	0,14-5 mm	2668
5	Nước	W	-	1000
6	Phụ gia siêu dẻo	AD	-	1100

Tiến hành phân tích cát nghiền CS ta được kết quả như bảng 2.

Bảng 2. Hàm lượng lọt sàng của cát nghiền

Cốt liệu	Hàm lượng lọt sàng (%)							
	>10,0	5,0-10,0	2,5-5,0	1,25-2,5	0,63-1,25	0,315-0,63	0,14-0,315	<0,14
CS	100	99,70	79,98	62,35	46,91	33,47	16,93	-

Bảng 3. Các tính chất cơ lý của CS

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả
1	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,668
2	Khối lượng thể tích xốp	g/cm ³	1,670
3	Hệ số lún chặt		0,626
4	Độ hút nước	%	0,8
5	Hàm lượng SiO ₂	%	61,5

Kết quả phân tích cho thấy thành phần hạt của cát nghiền nằm hoàn toàn trong miền cát hạt thô theo [8]. Modul cỡ hạt CSHV là 2,60. Hơn nữa, với thành phần hạt mịn nhiều và phân bố rộng qua các mắt sàng nhỏ tạo nên sự liên tục khi phối CSHV với các thành phần hạt nhỏ hơn trong cấp phối nghiền cứu.

3. CẤP PHỐI ĐÁNH GIÁ

Ý tưởng chủ đạo là dựa trên nền cấp phối tiên tiến trên thế giới, cụ thể là các cấp phối hạt mịn M3Q [9], kết hợp với quá trình thử nghiệm thăm dò trong phòng thí nghiệm với cốt liệu là cát nghiền khu vực Đông Nam Bộ và các vật liệu địa phương Việt Nam khác để lựa chọn được cấp phối phù hợp cho nghiên cứu thực nghiệm. Nhóm nghiên cứu đã lựa chọn cấp phối đánh giá như bảng 4. Trong đó, các tỷ lệ $\frac{W}{C}$, $\frac{AD}{C}$ và $\frac{CS}{C}$ trong cấp phối tương ứng là 0,238, 2,2% và 1,1.

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

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

4. THỬ NGHIỆM CÁC TÍNH NĂNG UHPC TRÊN NỀN CẤP PHỐI ĐỐI CHỨNG

4.1. Công tác đổ, bảo dưỡng và gia công mẫu

Thiết bị trộn là máy trộn cưỡng bức 4 cấp độ tại phòng thí nghiệm như hình 5. Quy trình trộn UHPC như sau:

Bước 1: Cho hỗn hợp bột gồm xi măng, cát nghiền và silicafume vào cối trộn và tiến hành trộn trong 30 giây với tốc độ số 1 để hỗn hợp bột hòa trộn vào nhau.

Bước 2: Cho 80% nước vào hỗn hợp, quay từ 30 đến 60 giây với tốc độ số 1, lượng nước cho vào từ từ và phân tán đều trong hỗn hợp. Cho tiếp từ 70 đến 80% phụ gia vào hỗn hợp và trộn từ 2 phút

đến 3 phút, xem trạng thái của hỗn hợp mà điều chỉnh lượng phụ gia và nước còn lại vào cho đến khi hỗn hợp chảy dẻo. Tăng tốc lên số 2, 3 khi đã cho hết phụ gia và nước.

Bước 4: Cho tiếp CS vào hỗn hợp và trộn từ 1 đến 2 phút. Tốc độ từ số 1 tăng lên số 2.

Bước 5: Cuối cùng cho sợi thép vào hỗn hợp đảm bảo sợi phân tán đều, trộn tối đa 1 phút và kết thúc quy trình trộn.

Tổng thời gian trộn dao động từ 5 đến 8 phút.



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

Khuôn trụ trước khi đổ phải được vệ sinh, bôi lớp chống dính bắm, kín khí và không bị cong vênh. Quá trình đổ mẫu cần có biện pháp giảm bọt khí trong mẫu. Đối với mẫu kéo và mẫu uốn để tránh hiện tượng sợi thép bị lắng xuống đáy, cần đổ bê tông thành từng lớp. Sau khi đổ mẫu tiến hành bọc bề mặt mẫu để tránh bay hơi nước và để mẫu trong môi trường tự nhiên 24h. 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. Khuôn trụ 10x20cm và công tác đổ mẫu chịu nén vào các khuôn trụ như hình 3.



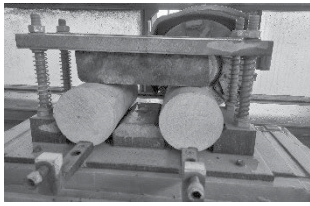
(a) Khuôn trụ 10x20.



(b) Quá trình đổ UHPC.

Hình 3. Công tác đổ mẫu trụ UHPC

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



(a) Công tác mài mẫu.

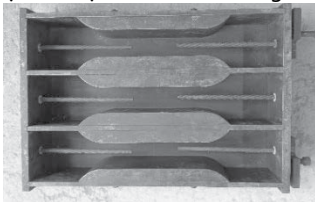


(b) Mẫu 10x20 sau khi mài phẳng.

Hình 4. Mài phẳng mẫu trụ UHPC.

Cường độ chịu nén của bê tông được thí nghiệm trên mẫu trụ D100 × H200 mm theo tiêu chuẩn ASTM C39/C39M [10]. Bộ mẫu sau khi bảo dưỡng và mài phẳng bề mặt tiến hành thí nghiệm xác định cường độ chịu nén.

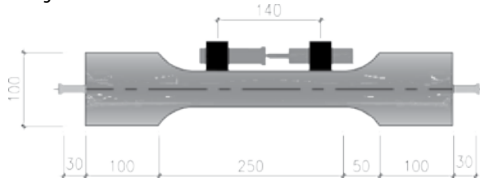
Quy cách mẫu bê tông cho thí nghiệm kéo, 2 thanh cáp có đường kính 7,1 mm được đặt đối xứng và đồng trục với mẫu xương chó, chiều dài 230 mm được đặt vào mẫu sao trục của 2 thanh đồng trục với trục của mẫu bê tông như hình 5.



(a) Khuôn mẫu kéo.



(b) Đồ mẫu kéo UHPC.

Hình 5. Công tác đổ mẫu kéo UHPC.**Hình 6.** Quy cách mẫu kéo và vị trí lắp đặt LVDT

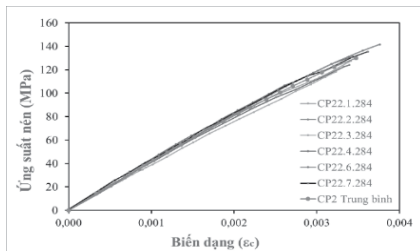
Ở 2 mặt bên của mẫu gắn thiết bị đo cảm biến chuyển vị (LVDT) với khoảng cách gối 140 mm như hình 6.

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

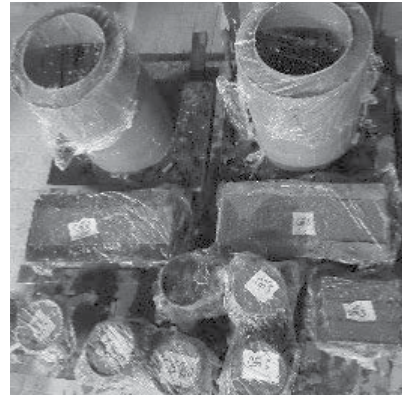
Tên mẫu	V_f (%)	Tuổi bê tông (ngày)	Cường độ chịu nén (MPa)			Modul đàn hồi (Gpa)			Hệ số poisson		
			R_{28}	R_{tb}	S	E	E_{tb}	S	ν	ν_{tb}	S
CP22.1.284	1	28	127,53			41,59			0,16		
CP22.2.284	1	28	124,07			41,38			0,2		
CP22.3.284	1	28	119,21			38,51			0,18		
CP22.4.284	1	28	131,96	129,98	8,08	42,92	41,27	1,47	0,17	0,19	0,02
CP22.6.284	1	28	141,64			41,34			0,21		
CP22.7.284	1	28	135,45			41,87			0,2		

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

Trạng thái ứng suất nén-biến dạng của UHPC được thể hiện trên hình 9.

**Hình 9.** Đường cong ứng suất nén-biến dạng thực nghiệm của UHPC

Thí nghiệm uốn được thực hiện theo hướng dẫn của ASTM C78/C78M-18 [11]. Mẫu uốn dạng dầm kích thước (100x100x400) mm được chế tạo nhằm đánh giá cường độ chịu kéo khi uốn của vật liệu.

**Hình 7.** Công tác đổ mẫu uốn

4.2. Thí nghiệm xác định các tính năng của UHPC

4.2.1. Thí nghiệm đặc tính cường độ chịu nén

4.2.1.1. Cường độ chịu nén, modul đàn hồi và hệ số poisson

Thí nghiệm nén mẫu bằng máy nén bê tông năng lực 2000KN như hình 8. Tốc độ nén 0,25 MPa/s. Kết quả thí nghiệm cho kết quả cường độ chịu nén, modul đàn hồi và hệ số poisson như bảng 5.



(a) Thí nghiệm nén mẫu.



(b) Mẫu bị phá hoại.

Hình 8. Thí nghiệm nén mẫu UHPC

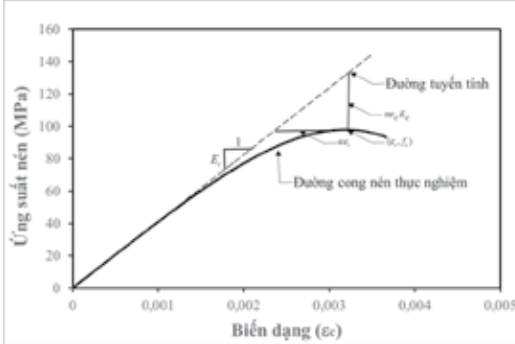
Ở biểu đồ này, các đường cong nén được cắt bớt phần giảm tải ở điểm đạt ứng suất cực đại. Trạng thái ứng suất nén-biến dạng trung bình của cấp phối đối chứng được thiết lập từ các mẫu CP22.1.284, CP22.2.284, CP22.3.284, CP22.4.284, CP22.6.284 và CP22.7.284.

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

4.2.2.1. Cơ sở lý thuyết

Trạng thái ứng suất nén-biến dạng của UHPC trước khi đạt ứng suất nén cực đại f'_c gần như tuyến tính lên tới khoảng 50% f'_c . Giai đoạn kế tiếp quan hệ ứng suất-biến dạng bắt đầu thể hiện sự mềm đi và do đó phản ứng phi tuyến. Sau đây sẽ trình bày trạng thái ứng suất-biến dạng với ứng suất nén của UHPC bằng phương pháp được

trình bày bởi Graybeal [12]. Ở đây ứng suất nén lớn nhất f_c' được xác định bằng tích của biến dạng nén với mô đun đàn hồi của UHPC trừ đi tham số độ lệch tuyến tính. Thuật ngữ đại diện cho độ lệch của đường cong ứng suất-biến dạng thực tế so với đường đàn hồi tuyến tính. Những khái niệm này được minh họa trong hình 10 và được mô tả như công thức (1), cho thấy đặc tính ứng suất nén thực tế của UHPC so với phản ứng đàn hồi tuyến tính.



Hình 10. Phân tích quan hệ ứng suất nén-biến dạng thực tế của UHPC so với ứng xử đàn hồi tuyến tính

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

Trong đó:

f_c là ứng suất nén của UHPC

ε_c là biến dạng nén của UHPC

E_c là modul đàn hồi của UHPC

α là độ lệch tuyến tính.

Biến dạng nén chuẩn hóa được xác định như công thức (2)

$$\varepsilon_n = \frac{\varepsilon_c E_c}{f_c'} \quad (2)$$

Trong đó:

f_c' là ứng suất nén cực đại của UHPC

$$\alpha = ax^b \quad (3)$$

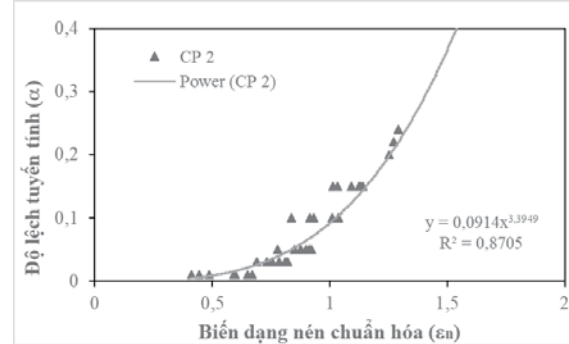
Trong đó:

x là biến dạng nén chuẩn hóa

a, b là các tham số.

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

Ứng với mỗi loại vật liệu khác nhau sẽ có một đường cong mô tả mối quan hệ giữa α và biến dạng nén chuẩn hóa ε_n , đường cong này được phân tích hồi quy từ các điểm rời rạc được thiết lập từ giá trị α 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. Kết quả nghiên cứu cho thấy, hồi quy hàm lũy thừa có mức độ phù hợp nhất để mô tả mối quan hệ giữa 2 đại lượng này. Kết quả phân tích hồi quy được mô tả như hình 11 và bảng 6.



Hình 11. Độ lệch so với của ứng xử nén đàn hồi tuyến tính của UHPC

Bảng 6. Các tham số đường cong phù hợp nhất từ phân tích hồi quy

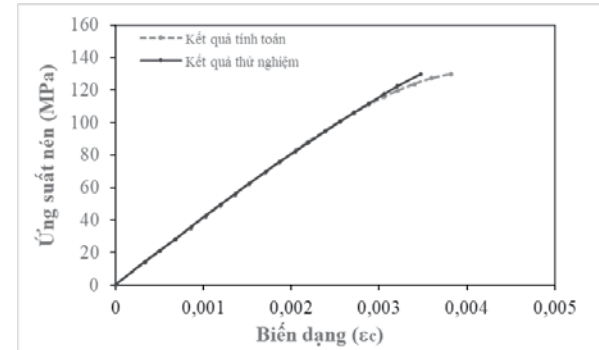
Tên cấp phối	Thông số hồi quy		
	a	b	R ²
CP 2	0,0914	3,3949	0,8705

Từ phương trình (1), (2) và (3) ta có:

$$f_c = \varepsilon_c E_c \left(1 - a \frac{\varepsilon_c^b E_c^b}{f_c'^b}\right) = \varepsilon_c E_c - a \frac{\varepsilon_c^{b+1} E_c^{b+1}}{f_c'^b} \quad (4)$$

Thay các kết quả ở bảng 6 vào (4) ta được:

$$f_c = \varepsilon_c E_c - 0,0914 \frac{\varepsilon_c^{4,3949} E_c^{4,3949}}{f_c'^{3,3949}} \quad (5)$$



Hình 12. So sánh đường cong ứng suất nén-biến dạng lý thuyết và thực nghiệm của UHPC

Từ (5) với các giá trị E_c , f_c' là các giá trị trung bình được lấy từ bảng 6, ta thiết lập được đường cong tính toán. Từ đó xác định được mối tương quan giữa đường cong tính toán và đường cong thực nghiệm với các mẫu thử UHPC 28 ngày tuổi có cường độ chịu nén trên 120 MPa như hình 12. Kết quả phân tích cho thấy, biến dạng nén tại điểm có ứng suất cực đại của đường cong lý thuyết có giá trị lớn hơn so với giá trị tương ứng từ đường cong thực nghiệm.

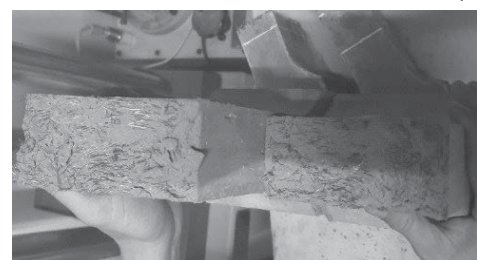
4.2.2. Cường độ chịu kéo trực tiếp

Thí nghiệm kéo mẫu bằng máy kéo dọc trục như hình 14, lực tác dụng lên mẫu được ghi nhận từ cảm biến đo lực (load cell). Tốc độ kéo từ 0,025 đến 0,04mm/phút. Ở mặt bên của mẫu gắn thiết bị LVDT để đo biến dạng dọc theo chiều dài mẫu. Các giá trị đo được ghi lại tự động bằng máy tính. Kết quả thí nghiệm như bảng 7.



(a) Lắp đặt mẫu và thiết bị đo

(b) Mẫu kéo bị phá hoại



(c) Phân bố sợi thép trên tiết diện vết nứt.

Hình 14. Thí nghiệm kéo trực tiếp

Quan sát mặt phá hoại của mẫu kéo ở hình 14 cho thấy sợi thép phân bố khá đều, hướng sợi có xu thế vuông góc với vết nứt. Sợi thép phân bố như trên là do quá trình đổ bê tông mẫu được đổ thành từng lớp mỏng khoảng 10mm.

Bảng 7. Cường độ chịu kéo của UHPC sau bảo dưỡng nhiệt ẩm.

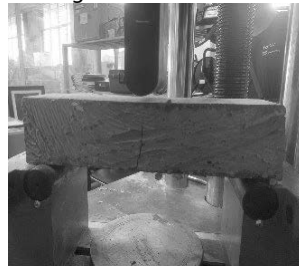
Tuổi mẫu	Đơn vị	Tên mẫu	Vết nứt đầu tiên	Giá trị phá hủy
R7	Mpa	K.CP22.1	4,97	7,01
		K.CP22.2	5,58	5,34
		K.CP22.3	5,48	7,22
	%		74,63	
R28	Mpa	K.CP22.4	5,68	7,54
		K.CP22.5	6,44	5,89
		K.CP22.6	5,56	7,85
	%		74,87	

4.2.3. Cường độ chịu uốn

Thí nghiệm uốn 3 điểm được thực hiện trên máy kéo/nén thủy lực như hình. Kết quả thí nghiệm như bảng 8.



(a) Chế tạo mẫu uốn



(b) Thí nghiệm uốn

Hình 15. Thí nghiệm uốn dầm UHPC

Bảng 8. Cường độ chịu kéo uốn của UHPC sau bảo dưỡng nhiệt ẩm.

Tuổi mẫu	Đơn vị	Tên mẫu	Vết nứt đầu tiên	Giá trị phá hủy
R7	Mpa	KU.CP22.1	11,53	15,21
		KU.CP22.2	10,87	10,76
		KU.CP22.3	9,89	14,52
	%		72,37	
R28	Mpa	KU.CP22.4	11	15,73
		KU.CP22.5	11,1	11,14
		KU.CP22.6	11,4	16,2
	%		70,03	

5. KẾT LUẬN

Cát nghiền trong nghiên cứu này thuộc khu vực Đông Nam Bộ có thành phần hạt và modul độ lớn nằm hoàn toàn trong miền cát hạt thô theo tiêu chuẩn hướng dẫn TCVN 9205:2012 - Cát nghiền cho bê tông và vữa. Với đặc điểm về cường độ đá gốc, thành phần hạt, modul cỡ hạt và một số tính chất cơ lý cho thấy loại cát nghiền này có thể sử dụng làm cốt liệu để nghiên cứu về bê tông siêu tính năng cao.

Thử nghiệm trên nền cấp phối đối chứng đã chế tạo được bê tông siêu tính năng cao với cường độ nén, kéo, uốn tương ứng 130/8/15MPa, modul đàn hồi 41,27GPa, hệ số poisson 0,19. Đồng thời qua phân tích tính năng chịu nén cho thấy, đối với loại bê tông

sử dụng cốt liệu CS và có cường độ chịu nén trên 120MPa thì biến dạng nén tại điểm có ứng suất cực đại của đường cong ứng suất-biến dạng lý thuyết lớn hơn so với giá trị tương ứng từ đường cong ứng suất-biến dạng thực nghiệm.

Có thể kết luận rằng, việc sử dụng cát nghiền để chế tạo UHPC là hoàn toàn khả thi, có cơ sở khoa học và tính thực tiễn cao. Điều này vừa đem lại hiệu quả kinh tế - kỹ thuật vừa có tác dụng bảo vệ môi trường. Tuy nhiên, do đặc tính của CS phụ thuộc vào tính chất của đá gốc và công nghệ chế tạo nên việc mở rộng nghiên cứu loại cốt liệu này từ các mỏ đá ở từng địa tầng khác nhau với những công nghệ chế tạo khác nhau trên địa bàn cả nước là hết sức cần thiết, điều này có ý nghĩa quan trọng trong việc tiếp tục hoàn thiện nghiên cứu về UHPC sử dụng cốt liệu CS và việc ứng dụng rộng rãi loại bê tông này vào thực tế xây dựng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] C. Magureanu, I. Sosa, C. Negrutiu, B. Heghes; "Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete", ACI Mater. J. 109 (2012) 177.
- [2] T. Teichmann, M. Schmidt, Influence of the packing density of fine particles on structure, strength, and durability of UHPC, in: Proc. Int. Symp. Ultra High Perform. Concr., 2004: pp. 313-323.
- [3] H. Kim, P. Hadl, V.T. Nguyen, A New Mix Design Method for UHPC based on Stepwise Optimization of Particle Packing Density, in: First Int. Interact. Symp. UHPC, First International Interactive Symposium on UHPC, 2016: pp. 1-8. <https://doi.org/10.21838/uhpc.2016.66>.
- [4] N.V. Tuấn (2017); "Bê tông chất lượng siêu cao", nhà xuất bản Xây Dựng, Hà Nội.
- [5] H. Donza*, O. Cabrera, E.F. Irassar; "High-strength concrete with different fine aggregate", Cement and Concrete Research 32 (2002).
- [6] H. Donza, O. Cabrera; "The influence of kinds of fine aggregate on mechanical properties of high strength concrete, Proceedings of 4th International Symposium of High-Strength/High-Performance Concrete" Paris, France, vol. 2, 1996, pp. 153 – 160.
- [7] P.C. Aitcin, S. Mindess; "High-performance concrete: science and applications, in: J. Skalny, S. Mindess (Eds.), Materials Science of Concrete V, The American Society Ceramic", Westerville, 1998, pp. 477 - 511.
- [8] Tiêu chuẩn TCVN-9205:2012; "Cát nghiền cho bê tông và vữa".
- [9] Schmidt, M.; Fehling, E.; Fröhlich, S.; and Thiemicke, J. (2015); "Sustainable Building with Ultra-High Performance Concrete, Results of the German Priority Programme 1182 funded by Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)", No. 22, kassel university press GmbH, Germany, 2015.
- [10] ASTM C39/C39M-01, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2012.
- [11] ASTM C78/C78M-18, Standard Test Method for Flexural strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-point Loading), ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2018.
- [12] B.A. Graybeal, Characterization of the Behavior of Ultra-High Performance Concrete Ph.D. Dissertation, University of Maryland, USA, 2005.