



MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE USING MANUFACTURED SAND AND NATURAL FINE SAND IN BRIDGE CONSTRUCTION

Nguyen Duc Dung*, Nguyen Duy Tien, Thai Khac Chien

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 14/07/2021

Revised: 23/08/2021

Accepted: 23/09/2021

Published online: 15/02/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.2.1>

* *Corresponding author*

Email: nguyenducdung@utc.edu.vn; Tel: +84983418480

Abstract. A large amount of particles whose size is less than 0.075 mm in crushed sand is called rock powder. The content of rock powder in crushed sand has a direct influence on the mechanical properties of concrete. A sufficient amount of stone powder has a positive effect on filling the voids between aggregate particles and cement particles, increasing the strength of concrete, but the content of rock powder exceeds the limit value, the strength tends to decrease. Therefore, it is necessary to determine the appropriate stone powder content in concrete mixes using crushed sand. In the content of this paper, we present experimental results on concrete samples using crushed sand (CN) from Andesite rock mixed with fine sand (CM) in the Mekong Delta according to ratio CN/CM=60/40 and stone powder content varied from 2% to 7%. Research results show that, concrete mix has the highest value of compressive strength, tensile strength in bending, split compressive strength and elastic modulus when the content of rock powder in crushed sand is 3.5%.

Keywords: rock powder content, concrete, fine sand, crushed sand.



NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA BỘT ĐÁ ĐẾN CÁC ĐẶC TRƯNG CƠ HỌC CỦA BÊ TÔNG SỬ DỤNG CÁT MỊN PHỐI TRỘN CÁT NGHIÊN TRONG XÂY DỰNG CẦU

Nguyễn Đức Dũng¹, Nguyễn Duy Tiến¹, Thái Khắc Chiến¹

¹Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 14/07/2021

Ngày nhận bài sửa: 23/08/2021

Ngày chấp nhận đăng: 23/09/2021

Ngày xuất bản Online: 15/02/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.2.1>

* Tác giả liên hệ

Email:nguyenducdung@utc.edu.vn; Tel: +84983418480

Tóm tắt. Cát nghiền chứa một lượng lớn các hạt có kích thước nhỏ hơn 0,075mm gọi là bột đá. Hàm lượng bột đá trong cát nghiền có ảnh hưởng trực tiếp đến các tính chất cơ học của bê tông. Một lượng vừa đủ bột đá có tác dụng tích cực lấp đầy các lỗ rỗng giữa các hạt cốt liệu và các hạt xi măng làm cường độ của bê tông tăng lên, nhưng hàm lượng bột đá vượt quá giá trị giới hạn thì cường độ có xu hướng giảm. Do đó, việc xác định hàm lượng bột đá thích hợp trong các cấp phối bê tông có sử dụng cát nghiền là rất cần thiết. Trong nội dung bài báo này, chúng tôi trình bày các kết quả nghiên cứu thực nghiệm trên các mẫu bê tông có sử dụng cát nghiền (CN) từ đá Andesite phối trộn với cát mịn (CM) khu vực đồng bằng sông Cửu Long theo tỉ lệ CN/CM=60/40 và hàm lượng bột đá thay đổi từ 2% đến 7%. Kết quả nghiên cứu cho thấy, cấp phối bê tông có giá trị cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo khi uốn, cường độ ép chẻ và mô đun đàn hồi lớn nhất khi hàm lượng bột đá trong cát nghiền là 3,5%.

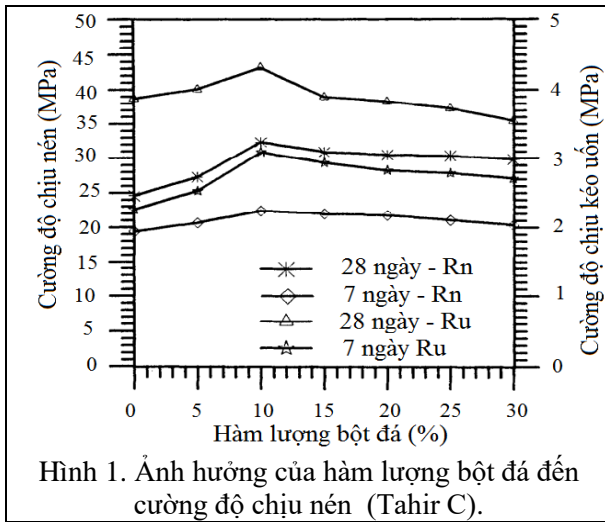
Từ khóa: hàm lượng bột đá, bê tông, cát mịn, cát nghiền.

© 2022 Trường Đại học Giao thông vận tải

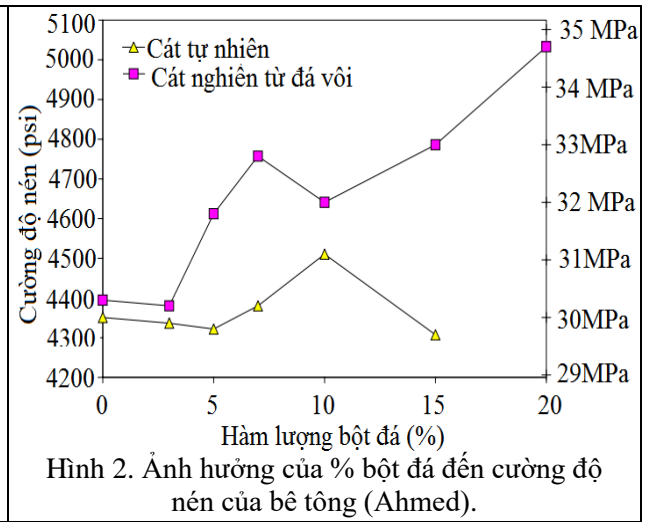
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sử dụng cát nghiền để thay thế cho cát tự nhiên tại đồng bằng sông Cửu Long nói riêng hay trên toàn thế giới nói chung đã và đang được tiến hành [1]. Cát nghiền có thể điều chỉnh được cấp phối hạt cho phù hợp với yêu cầu chế tạo bê tông. Việc tận dụng vật liệu địa phương bằng cách trộn cát nghiền với cát sông, được tiến hành ở nhiều nơi, đặc biệt ở khu vực Trung Đông và Nam Mỹ[2]. Khi sử dụng cát nghiền thì tồn tại hàm lượng lớn bột đá có thể làm ảnh hưởng đến chất lượng của bê tông.

Nghiên cứu của tác giả Tahir Celik và cộng sự, 1996 [3] kết quả cho thấy cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo uốn tăng lên tối đa tương ứng với 10% hàm lượng bột đá. Khi hàm lượng bột vượt quá giá trị của 10% các giá trị cường độ trên đều giảm [hình 1], [hình 2].



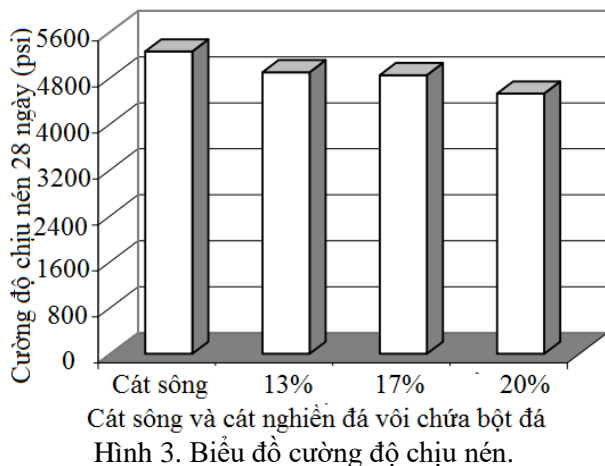
Hình 1. Ảnh hưởng của hàm lượng bột đá đến cường độ chịu nén (Tahir C).



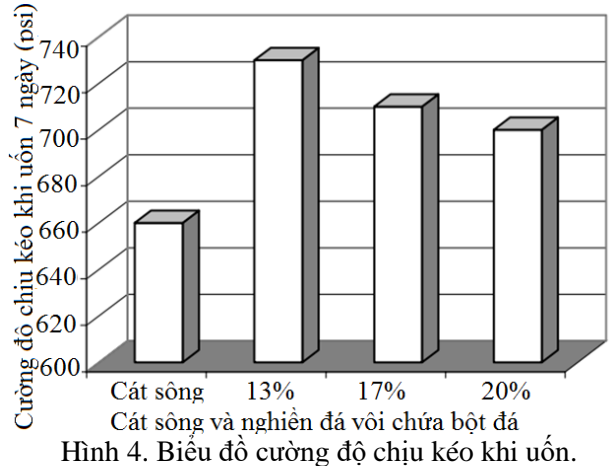
Hình 2. Ảnh hưởng của % bột đá đến cường độ nén của bê tông (Ahmed).

Năm 1989 Ahmed và El Kour [4] Thí nghiệm cho thấy nhu cầu nước tăng lên nhanh chóng khi có quá 5% bột đá đối với cát tự nhiên và 15% bột đá đối với cát nghiền đá. Để có cùng một độ sụt thì bê tông có hàm lượng bột đá đá tăng đòi hỏi lượng nước tăng lớn hơn.

Nhóm tác giả Nam-Shik năm 2001 [5], đã nghiên cứu thực nghiệm với hàm lượng bột đá cao để chế tạo bê tông xi măng, kết quả cho thấy bột đá chiếm lớn hơn 13% thì cường độ chịu nén của bê tông cát nghiền thấp hơn so với bê tông cát sông và cường độ nén tỉ lệ nghịch với hàm lượng bột đá, cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông dùng cát nghiền cũng giảm khi gia tăng hàm lượng bột đá từ 13% lên 20% nhưng vẫn lớn hơn so với cường độ chịu kéo khi uốn của cát sông [hình 3], [hình 4].



Hình 3. Biểu đồ cường độ chịu nén.



Hình 4. Biểu đồ cường độ chịu kéo khi uốn.

Fenglan Li [6] năm 2011 thí nghiệm bê tông cường độ cao sử dụng cát nghiền cho thấy, khi hàm lượng bột đá từ 7% trở lên cường độ nén của bê tông dùng cát nghiền bằng hoặc cao hơn cường độ chịu nén của bê tông cát tự nhiên, cường độ nén tăng tỉ lệ thuận với hàm lượng bột đá. Trước 28 ngày tuổi, gia tăng cường độ nén của bê tông có xu hướng chậm hơn với sự gia tăng hàm lượng bột đá, do ở tuổi sớm, bột đá có nhiệm vụ làm đầy những khoảng trống, cường độ bê tông có thể giảm vì cần nhiều sản phẩm thủy hóa để bao quanh các hạt bột đá. Sau 28 ngày tuổi, cường độ nén bê tông rõ ràng bị ảnh hưởng bởi hàm lượng bột đá, được thể

hiện bằng sự gia tăng hàm lượng bột đá, cơ chế này có thể giải thích rằng bột đá trực tiếp tham gia vào quá trình thủy hóa, các hạt bột đá giúp phân phối đồng đều các hạt của xi măng chưa phản ứng dễ dàng tiếp tục trong điều kiện thích hợp.

Năm 2010 **Vũ Quốc Vương** [7] nghiên cứu tính chất chủ yếu của bê tông tự đầm dùng cát nghiền. Kết quả cho thấy hàm lượng bột đá vôi chiếm từ 12% đến 18% không có lợi cho bê tông thường nhưng có lợi cho bê tông tự đầm vì có thể nâng cao tính dẻo của bê tông. Kết quả cho thấy tỉ lệ bột đá pha trộn 18% cho tính công tác và cường độ nén của bê tông tự đầm tốt nhất, tỉ lệ bột đá 0%, 12% và 24% đều cho giá trị cường độ thấp hơn.

Các kết quả nghiên cứu đều cho rằng với một lượng vừa đủ bột đá có tác dụng tích cực cho bê tông, lượng bột đá tăng cao sẽ ảnh hưởng đến tính chất của bê tông cũng như cường độ của bê tông. Theo tiêu chuẩn ASTM C33[8] và tiêu chuẩn AASHTO M6 [9] đều giới hạn lượng bột đá tối đa là 5%.

2. KHẢO SÁT THÍ NGHIỆM/ĐÁNH GIÁ PHÂN TÍCH

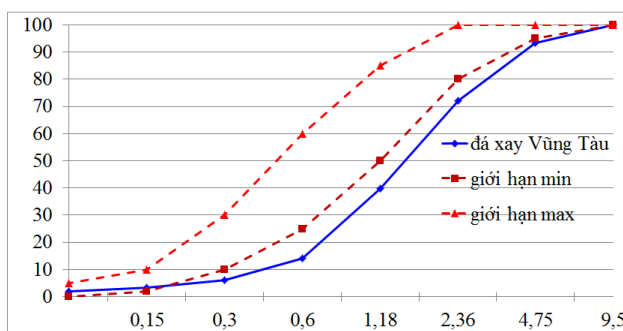
Tác giả đã tiến hành khảo sát và thí nghiệm một số mỏ cát mịn và cát nghiền có trữ lượng lớn, chất lượng được đánh giá tốt ở khu vực đồng bằng sông Cửu Long và hiện đang cung cấp cho các dự án giao thông lớn như cầu Bình Khánh, cầu Thủ Thiêm 2 . . .

2.1. Cát nghiền

Mỏ đá 3B – xã Châu Pha – huyện Tân Thành – tỉnh Bà Rịa Vũng Tàu. Cát được nghiền từ đá gốc Andesite, cát hạt thô có mô đun độ lớn 3,69, hàm lượng hạt lọt qua sàng 0.075mm là 2,07%.



Hình 5. Cát nghiền được sàng ướt.



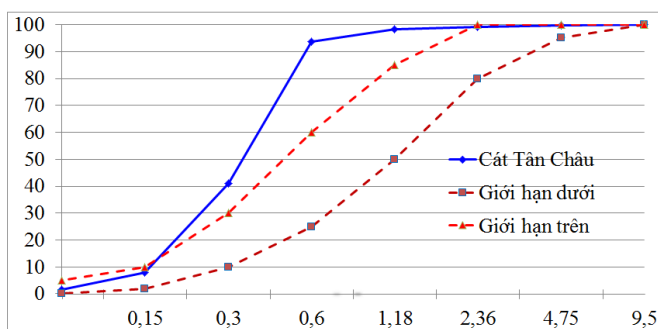
Hình 6. Biểu đồ thành phần hạt cát Vũng Tàu.

2.2. Cát mịn

Mỏ cát Tân Châu thuộc huyện Tân Châu tỉnh An Giang, thí nghiệm cho thấy mô đun độ lớn dao động từ 1,6 đến 1,8, hàm lượng hạt lọt qua sàng 0,075mm 1,62%.



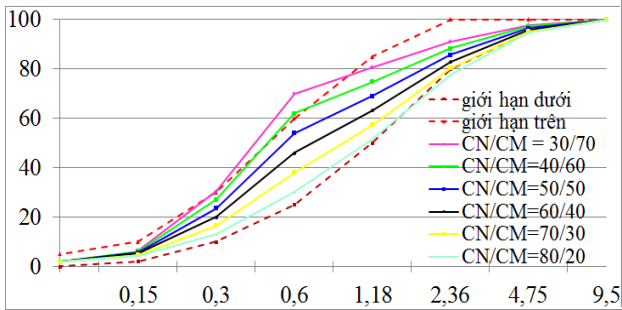
Hình 7. Cát Tân Châu.



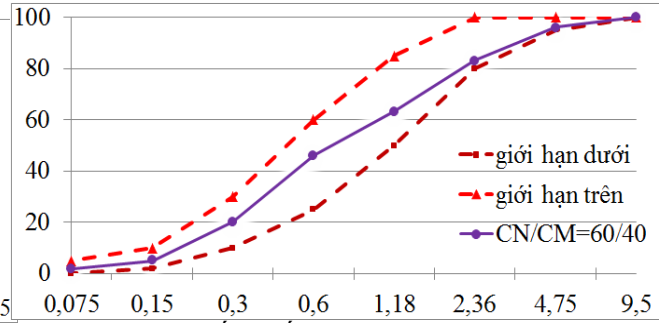
Hình 8. Biểu đồ thành phần hạt cát Tân Châu.

2.3. Trộn cát mịn với cát nghiền

Trộn cát mịn Tân Châu với cát nghiền Vũng Tàu theo các tỉ lệ khác nhau, kết quả thí nghiệm cho thấy, cát nghiền chiếm từ 50% đến 70% cho thành phần cấp phối hạt phù hợp với tiêu chuẩn AASHTO M6 và ASTM C33. Tính toán theo cấp phối lý tưởng Fuller cho thấy hỗn hợp cát trộn 60% cát nghiền với 40% cát mịn cho đường cong cấp phối sát nhất với đường cong cấp phối lý tưởng.



Hình 9. Biểu đồ cấp phối cát hỗn hợp.



Hình 10. Cấp phối cát trộn CN/CM=60/40.

2.4. Tính toán thành phần bê tông C40

Áp dụng tiêu chuẩn ACI 211.R4-08 [10] và tiêu chuẩn ACI318 [11] tính toán cấp phối cho 1m^3 bê tông. Kết quả trong bảng 1.

Bảng 1. Khối lượng vật liệu cho 1m^3 bê tông.

Vật liệu	Đơn vị	ĐX/CM=60/40	Cát sông
Xi măng	kg	460	460
Nước	kg	163	163
Phụ gia	kg	5,52	5,52
Cát nghiền	kg	485	805 (cát vàng sông Hồng)
Cát mịn	kg	323,5	
Đá 5x20	kg	1048	1048
Tổng khối lượng	kg	2486	2481

2.5. Thí nghiệm bê tông xi măng

Thí nghiệm 5 tổ hợp mẫu lần lượt thay đổi hàm lượng bột đá bao gồm:

CP-2%BD: chứa 2% bột đá;

CP-3,5%BD: chứa 3,5% bột đá;

CP-5%BD: chứa 5% bột đá;

CP-7%BD: chứa 7% bột đá

Các nhà máy cát nghiền ở khu vực đồng bằng sông Cửu Long đang sản xuất theo công nghệ sàng ướt, hàm lượng bột đá trong cát nghiền chiếm khoảng 1,8 đến 2,5%, trong bài báo này tác giả khảo sát hàm lượng bột đá từ 2% tương ứng với mức trung bình có sẵn trong cát

nguyên, đến tối đa là 7% để khi phối trộn với cát mịn thì tổng hàm lượng hạt mịn nhỏ hơn hoặc bằng 5% theo tiêu chuẩn ASTM C33.

CP-cát sông: để so sánh.

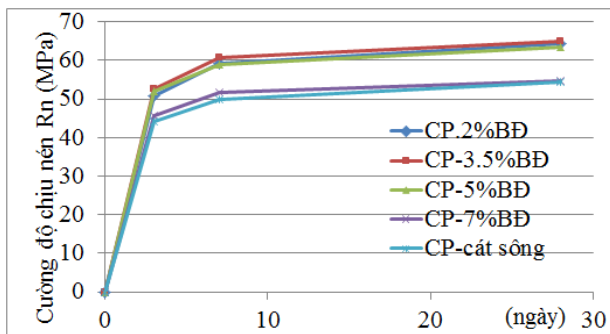
Công tác đúc mẫu và thí nghiệm được thực hiện tại phòng thí nghiệm bộ môn Vật liệu Xây dựng và Trung tâm KHCN GTVT Trường ĐH Giao thông Vận Tải.



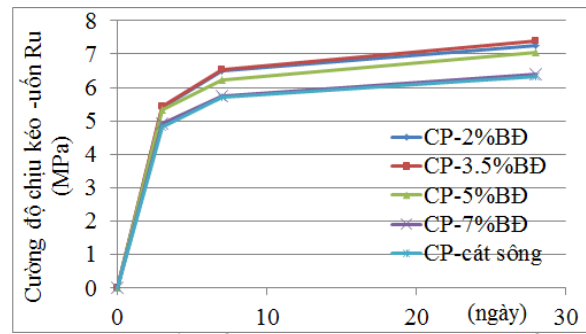
Hình 11. Hình ảnh công tác thí nghiệm.

2.6. Kết quả thí nghiệm

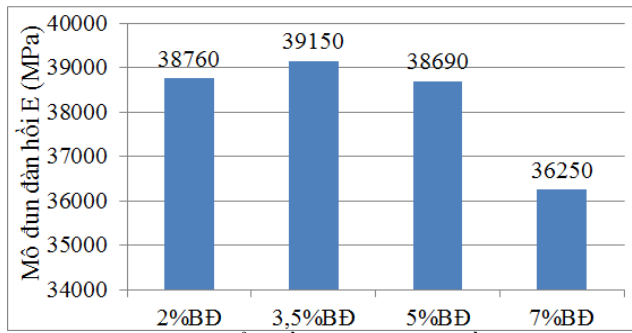
Kết quả thí nghiệm cường độ chịu nén R_n và cường độ chịu kéo uốn R_u theo thời gian; mô đun đàn hồi, cường độ ép chế được trình bày trong các biểu đồ: [hình 12], [hình 13], [hình 14], [hình 15].



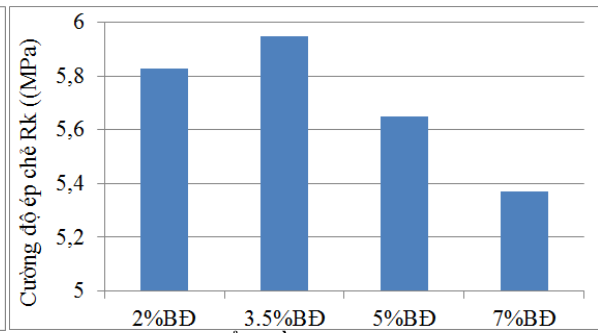
Hình 12. Biểu đồ cường độ chịu nén trung bình theo thời gian.



Hình 13. Biểu đồ cường độ chịu kéo khi uốn theo thời gian.



Hình 14. Biểu đồ mô đun đàn hồi E.



Hình 15. Biểu đồ cường độ ép chế.

2.7. Phân tích kết quả thí nghiệm

Cấp phối chứa 3,5% bột đá cho kết quả cường độ chịu nén cao nhất, khi lượng bột đá lớn hơn hoặc nhỏ hơn giá trị trên cường độ đều giảm. Cả 4 cấp phối thí nghiệm đều có cường độ chịu nén lớn hơn cát sông từ 0,6% đến 19,5%.

Quy luật về cường độ chịu kéo khi uốn tương tự như cường độ chịu nén, giá trị lớn nhất đạt được khi lượng bột đá chiếm 3,5% trong đá xay. Cả 4 cấp phối thí nghiệm đều có cường độ chịu kéo khi uốn lớn hơn cát sông từ 0,8 đến 17,6%.

Mô đun đàn hồi đạt giá trị lớn nhất ở cấp phối CP-3,5%, hàm lượng bột đá nhỏ hơn hay lớn hơn giá trị trên mô đun đàn hồi đều giảm.

2.8. So sánh mối tương quan giữa các đặc trưng cơ học với các công thức thực nghiệm và Tiêu chuẩn

Từ các kết quả thí nghiệm so sánh mối tương quan giá trị giữa cường độ chịu kéo khi uốn (f_r) với cường độ chịu nén đặc trưng (f'_c) theo các tiêu chuẩn hiện hành:

Bảng 2. Công thức mô tả quan hệ giữa E và f'_c của bê tông.

TCVN11823-2017 [12]	Shah và Ahmad [13]	Carrasquillo, Nilson và Slate [14]	ACI 363R-10 [15]
$f_r = 0,63\sqrt{f'_c}$ (MPa)	$f_r = 0,438(f'_c)^{2/3}$ (MPa)	$f_r = 0,94(f'_c)^{1/2}$ (MPa)	$0,62\sqrt{f'_c} \div 0,99\sqrt{f'_c}$ (MPa)

Bảng 3. Quan hệ giữa f_r và R_n theo các công thức thực nghiệm.

Cấp phối	R_n (MPa)	R_u (MPa)				
		Kết quả thí nghiệm	Shad và Ahmad	Chênh lệch (%)	Carrasquillo, Nilson	Chênh lệch (%)
CP-2%BD	64,50	7,25	7,04	2,92	8,27	-12,36
CP-3,5%BD	65,10	7,41	7,09	-4,49	8,31	-10,88
CP-5%BD	63,46	7,05	6,97	-1,24	8,21	-14,02
CP-7%BD	54,61	6,38	6,30	-1,21	7,61	-16,16

Bảng 4. Quan hệ giữa f_r và R_n theo các tiêu chuẩn.

Cấp phối	R_n (MPa)	R_u (MPa)				
		Kết quả thí nghiệm	TCVN 11823	Chênh lệch (%)	ACI363	Chênh lệch (%)
CP-2%BĐ	64,50	7,25	5,06	43,29	7,55	-3,96
CP-3,5%BĐ	65,10	7,41	5,08	45,70	7,58	-2,35
CP-5%BĐ	63,46	7,05	5,02	40,57	7,49	-5,79
CP-7%BĐ	54,61	6,38	4,66	37,06	6,95	-8,14

Từ các kết quả nghiên cứu so sánh mối tương quan giữa mô đun đàn hồi E với R_n theo các tiêu chuẩn hiện hành:

Bảng 5. Công thức mô tả quan hệ giữa E và f'_c của bê tông.

TCVN11823-2017	Theo tiêu chuẩn ACI 363 – R10	ACI 318	Theo tiêu chuẩn CEB-FIP-2010 [16]
$E_c = 0,0017 K_1 W_c^2 f_c^{0,33}$ (MPa)	$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900$ (MPa)	$E_c = 0,0428\gamma^{1,5}\sqrt{f'_c}$ (MPa)	$E_c = 21,5.10^3 \alpha \left(\frac{f_{ck} + 8}{10}\right)^{1/3}$ (MPa) *

*: với $f_{ck} + 8 = f'_c$ theo kết quả thí nghiệm và với đá bazan $\alpha = 1,2$; đá quắc zít $\alpha=1$; đá vôi $\alpha=0,9$.

Bảng 6. Quan hệ giữa E và f'_c của bê tông theo các tiêu chuẩn.

Cấp phối	Mô đun đàn hồi E (MPa)						
	Kết quả thí nghiệm	TCVN 11823	Chênh lệch (%)	ACI 318	Chênh lệch (%)	CEB-FIP	Chênh lệch (%)
CP-2%BĐ	38760	40359	3,96	41684	7,02	46225	19,26
CP-3,5%BĐ	39150	40482	3,29	41878	6,51	46655	19,17
CP-5%BĐ	38690	40142	3,62	41346	6,42	45480	17,549
CP-7%BĐ	36250	38202	5,11	38356	5,49	39137	7,965

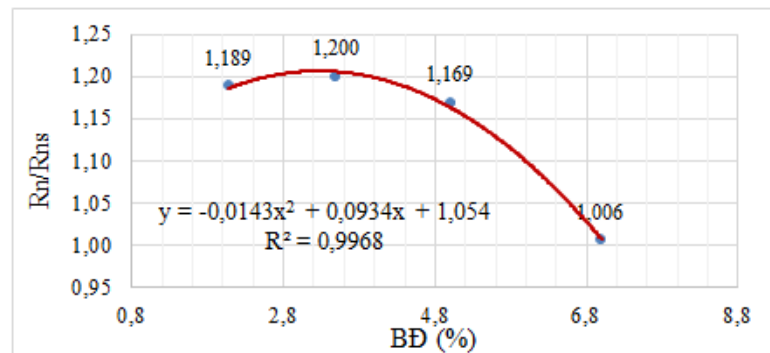
So sánh giá trị cường độ chịu kéo khi uốn thí nghiệm được với các giá trị tính toán từ mối tương quan với f'_c theo các công thức của các nghiên cứu trước đây đề xuất, kết quả cho thấy giá trị thí nghiệm xấp xỉ các giá trị tính theo công thức của Shad và Ahmad, lớn hơn 40% - 45 % so với TCVN 11823-2017 nhưng nhỏ hơn so với các công thức còn lại từ 4% - 16%.

So sánh giá trị mô đun đàn hồi thí nghiệm với giá trị tính toán theo các công thức trong tiêu chuẩn cho thấy giá trị thí nghiệm xấp xỉ giá trị tính toán, chênh lệch tương đối nhỏ. Theo tiêu chuẩn như thiết kế cầu TCVN 11823-2017 sai khác từ 1,09% đến 2,47%, theo tiêu chuẩn ACI 318 sai khác từ 1,15% đến 5,69%.

3. THIẾT LẬP MỐI QUAN HỆ GIỮA CÁC TÍNH CHẤT CƠ HỌC CỦA BÊ TÔNG VỚI CÁC ĐẶC TRƯNG VẬT LIỆU

Từ kết quả thí nghiệm đặc trưng cơ học của các cấp phối cát hỗn hợp thiết lập phương trình quan hệ giữa cường độ chịu nén trung bình R_n , cường độ chịu kéo khi uốn trung bình R_u và mô đun đàn hồi E với hàm lượng bột đá BD :

Phương trình ảnh hưởng của hàm lượng BD đến cường độ nén trung bình R_n của BTXM sử dụng cát hỗn hợp so với cường độ chịu nén trung bình R_{ns} của BTXM sử dụng cát sông (hình 16).

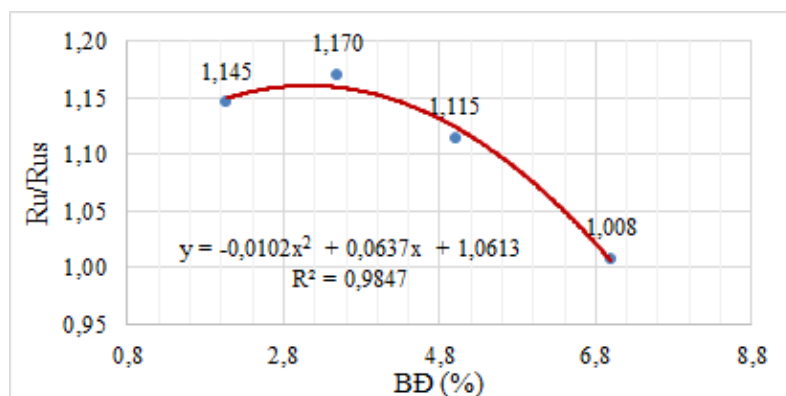


Hình 16. Quan hệ giữa % bột đá với R_n/R_{ns} .

$$R_n / R_{ns} = -0,014(BĐ)^2 + 0,0934(BĐ) + 1,054 \quad (1)$$

Với $R^2 = 0,9968$.

Phương trình ảnh hưởng của hàm lượng BD đến cường độ chịu kéo khi uốn trung bình R_u của BTXM sử dụng cát hỗn hợp so với cường độ chịu kéo khi uốn trung bình R_{us} của BTXM sử dụng cát sông (hình 17).

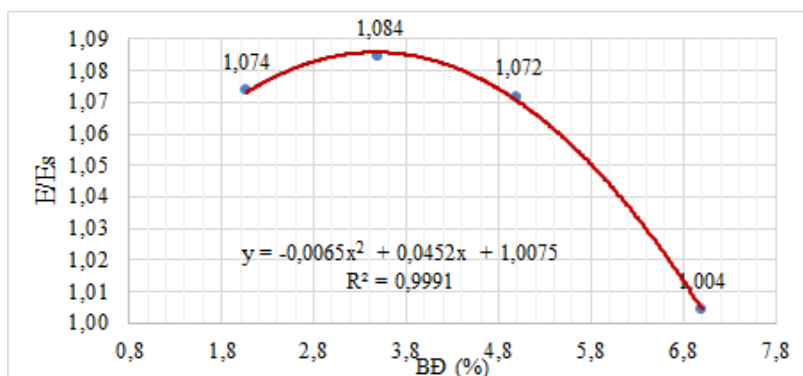


Hình 17. Đường cong quan hệ giữa % BD với R_u/R_{us} .

$$R_u / R_{us} = -0,0102(BĐ)^2 + 0,0637(BĐ) + 1,0613 \quad (2)$$

Với $R^2 = 0,9847$.

Phương trình ảnh hưởng của hàm lượng BĐ đến mô đun đàn hồi E của BTXM sử dụng cát hỗn hợp so với mô đun đàn hồi E_s của BTXM sử dụng cát sông (hình 18).



Hình 18. Đường cong quan hệ giữa % BĐ với E/E_s .

$$E / E_s = -0,0065(BĐ)^2 + 0,0452(BĐ) + 1,0075 \quad (3)$$

Với $R^2 = 0,9991$.

4. KẾT LUẬN

Kết quả các nghiên cứu chỉ ra rằng lượng bột đá vừa đủ có khả năng làm tăng cường độ bê tông nhưng nếu vượt quá giới hạn đó cường độ lại suy giảm. Kết quả thí nghiệm từ cát nghiền từ đá gốc Andesite khi hàm lượng bột đá chiếm 3,5% cho giá trị cường độ chịu nén cao nhất và cao hơn 0,9% so với cấp phối có 2% bột đá và cao hơn 19,2% cấp phối chứa 7% bột đá.

Quy luật biến thiên cường độ chịu kéo khi uốn tương tự quy luật cường độ chịu nén, cấp phối chứa 3,5% bột đá có giá trị lớn nhất là 7,41MPa, cấp phối chứa 2% bột đá có giá trị 7,25MPa, cấp phối chứa 7% bột đá là 6,38MPa. Cấp phối chứa 3,5% bột đá cũng đạt giá trị mô đun đàn hồi cao nhất là 39150MPa cao hơn 1% so với cấp phối chứa 2% bột đá nhưng cao hơn 8% so với cấp phối chứa 7% bột đá.

Giá trị cường độ chịu kéo khi uốn thí nghiệm xấp xỉ so với giá trị cường độ chịu kéo khi uốn tính toán từ phương trình quan hệ giữa cường độ chịu kéo và cường độ chịu nén theo một số tác giả đã đề xuất, nhưng nhỏ hơn giá trị tính theo công thức của tiêu chuẩn TCVN 11823-2017, điều đó chứng tỏ tiêu chuẩn tính toán thiên về an toàn.

Giá trị mô đun đàn hồi thí nghiệm xấp xỉ giá trị mô đun đàn hồi tính toán theo phương trình quan hệ giữa mô đun đàn hồi với cường độ chịu nén, điều đó cho thấy hàm lượng bột đá ảnh hưởng mạnh đến cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông hơn so với ảnh hưởng đến mô đun đàn hồi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Hồ sơ dự án xây dựng đường cao tốc Bắc-Nam gói thầu J1 - cầu Bình Khánh thành phố Hồ Chí Minh, 2016.

- [2]. A. Nadimalla, S.A. Masjuki, S.A. Saad, E. Lee Woen, S. Maisarah Ali, The Impact of Manufactured Sand (M-Sand) as Partially and Fully Replacement of Fine Aggregate in Concrete, *Advances in Science Technology and Engineering Systems Journal*, 5 (2020) 302-306. <https://doi.org/10.25046/aj050138>
- [3]. K. Marar, T. Celik, Effects of crushed stone dust on some properties of concrete, *Cement and Concrete Research*, 26 (1996) 1121-1130. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00078-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00078-6)
- [4]. A.E. Ahmed, A.A. El-Kour, Properties of Concrete Incorporating Natural and Crushed Stone Very Fine Sand, *ACI Materials Journal*, 86 (1989) 417-424.
- [5]. N.S. Ahn, W.D. Fowler, an experimental study on the guidelines for using higher contents of aggregate microfines in portland cement concrete, *International center for aggregates research - Research Report ICAR 102-1F*, 2001.
- [6]. F. Li, Q. Zhu, G. Zhanfang, Study on Durability of Concrete with Machine-Made Sand Part II: Long-Term Carbonization, *Applied Mechanics and Materials*, 438 (2013) 10-14. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.438-439.10>
- [7]. Q.V. Vũ, Nghiên cứu một số cấp phối và tính chất chủ yếu của bê tông tự lèn dùng cát nghiền, *Tạp chí khoa học kỹ thuật Thủy lợi và môi trường*, 33 (2011) 112-116.
- [8]. ASTM C33/C33M, Standard specifications for Concrete Aggregates, 2016.
- [9]. AASHTO M6, Standard specifications Roads and Bridges, 2017.
- [10]. ACI 211.4R-08, Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials, Reported by ACI Committee 211, 2008.
- [11]. ACI 318-19, Building Code Requirements for Structural Concrete, Reported by ACI Committee 318, 2019.
- [12]. TCVN 11823, Tiêu chuẩn Quốc gia về thiết kế cầu đường bộ Việt Nam, 2017.
- [13]. S.Ahmad, S. Shah, Structural properties of high strength concrete and its implications for precasting prestressed concrete, *Prestressed Concrete Inst.*, 30 (1985) 92-119. <https://doi.org/10.15554/pcij.11011985.92.119>
- [14]. R. L. Carrasquillo, A.H. Nilson, F.O. Slate, Properties of High Strength Concrete Subjected to Short-Term Loads, *ACI JOURNAL, Proceedings*, 78 (1981) 171-178.
- [15]. ACI 363R-10, Report on High-Strength Concrete, Reported by ACI Committee 363, 2010.
- [16]. CEB-FIP-2010, Fib Model Code for Concrete Structures, 2010.