

Nghiên cứu một số tính chất cơ học của bê tông nhẹ sử dụng hạt polystyrene phòng nở gia cường cốt sợi thủy tinh

Investigation of the mechanical properties of lightweight concrete using expanded polystyrene reinforced with glass fibers

Nguyễn Đình Hải*, Nguyễn Tiên Dũng

Trường Đại học Giao thông vận tải

*Tác giả liên hệ: nguyendinhhai.1986@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/10/2023 ; Ngày chấp nhận đăng: 15/11/2023

Tóm tắt:

Hiện nay, bê tông nhẹ ngày càng được quan tâm và trở thành lựa chọn phổ biến trong ngành xây dựng nhờ khả năng giảm trọng lượng và diện tích cắt dầm. Sự kết hợp của bê tông với hạt polystyrene phòng nở giúp giảm khối lượng, nhưng lại làm giảm độ bền cơ học của bê tông. Để khắc phục điều này, việc gia cường sợi thủy tinh cho bê tông nhẹ sử dụng hạt polystyrene đã được đề xuất. Bài báo tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng sợi thủy tinh đối với một số đặc tính cơ học của bê tông nhẹ sử dụng hạt polystyrene phòng nở. Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng việc gia cường sợi thủy tinh làm giảm tính công tác của hỗn hợp bê tông, tuy nhiên, không gây ảnh hưởng đáng kể đến khối lượng thể tích và cường độ chịu nén của bê tông. Đặc biệt, sự có mặt của sợi thủy tinh được cho là giải pháp tiềm năng để cải thiện cường độ chịu kéo khi uốn của bê tông nhẹ sử dụng hạt polystyrene phòng nở, vì vậy, nghiên cứu mở ra triển vọng ứng dụng loại bê tông này cho các kết cấu chịu lực.

Từ khóa: Bê tông nhẹ sử dụng hạt polystyrene phòng nở; Cốt sợi thủy tinh; Cường độ chịu nén; Cường độ chịu kéo khi uốn.

Abstract:

The use of lightweight concrete has gained popularity in the industrial construction sector owing to its ability to reduce dead weight and enable smaller cross-sections of beams. Adding expanded polystyrene to replace a portion of fine aggregate is a widely accepted solution to decrease the weight of concrete. However, lightweight expanded polystyrene concrete (EPSC) has poor mechanical properties and brittleness, limiting its application to non-bearing structures and thermal isolation. Glass fiber reinforcement is a promising solution to improve the mechanical properties of lightweight expanded polystyrene concrete. This study investigates the effect of glass fiber content on the mechanical properties of lightweight expanded polystyrene concrete. To investigate the impact of glass fiber on the mechanical properties of concrete, various volume percentages of glass fiber were incorporated into the mixture. The compressive and tensile strengths of the concrete were measured and compared for each percentage of glass fiber added. The results showed that the addition of glass fiber significantly reduced workability without causing a significant impact on volume density and compressive strength. The study concludes that glass fiber reinforcement is a promising solution to improve the flexural strength of lightweight expanded polystyrene concrete and make it suitable for load-bearing applications in construction.

Keywords: Lightweight expanded polystyrene concrete; Glass fiber; Compressive strength; Flexural strength.

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, có rất nhiều nghiên cứu được đề xuất để cải thiện các hạn chế của bê tông truyền thống trên phương diện khối lượng thể tích lớn cùng với khả năng cách nhiệt kém. Phần lớn các nghiên cứu đề xuất thay thế toàn bộ hoặc một phần cốt liệu truyền thống bằng các loại cốt liệu nhẹ hơn như sỏi keramzit, vi cầu thủy tinh, đá phòng nổ,...[1]-[5]. Trước đây, bê tông nhẹ đã được sử dụng cho cả ứng dụng đối với vật liệu chịu lực và không chịu lực. Với lợi thế về khối lượng bản thân nhỏ nên cho phép tạo các cấu kiện có tiết diện nhỏ hơn dẫn tới giảm kích cỡ cấu kiện, chính vì vậy, bê tông nhẹ thường được sử dụng trong xây dựng các tòa nhà cao tầng, công trình ngoài khơi và cầu nhịp lớn. Tuy nhiên, việc sử dụng các cốt liệu nhẹ truyền thống với độ rỗng lớn có thể hấp thụ một lượng nước lớn gây ảnh hưởng tới tính công tác của hỗn hợp bê tông, để đảm bảo đồng thời cả tính công tác lẫn cường độ, một lượng nước và xi măng cần được bổ sung cho loại bê tông sử dụng các cốt liệu nhẹ này [6]. Nhằm khắc phục hạn chế này, việc sử dụng hạt polystyrene phòng nổ với các đặc điểm không hấp thụ nước, bề mặt kháng nước, không để nước thấm qua, khối lượng thể tích siêu nhẹ [7]-[11] đã được đề xuất sử dụng thay thế các cốt liệu và tạo ra bê tông nhẹ sử dụng hạt xốp phòng nổ với nhiều giá trị khối lượng thể tích khác nhau dao động từ 300 đến 1800 kg/m³.

Bê tông nhẹ sử dụng hạt polystyrene phòng nổ đã được ứng dụng cho nhiều công trình không yêu cầu khả năng chịu lực lớn như kết cấu nổi trên nước, vật liệu gia cố nền đất yếu đắp sau móng cầu, vật liệu hấp thụ năng lượng bảo vệ các công trình quân sự, làm tấm chắn cho giàn khoan ngoài khơi, vật liệu tấm tiêu âm đường cao tốc, ...[12]. Phần lớn các nghiên cứu chỉ ra rằng khi hàm lượng hạt polystyrene phòng nổ trong bê tông nhẹ càng lớn, các đặc tính cơ học của loại bê tông này càng giảm. Tức là bê tông càng nhẹ, các tính năng cơ học càng yếu, cụ thể, với khối lượng EPSC từ 500 đến 900 kg/m³, cường độ chịu nén chỉ đạt từ 2,5 đến 5,0 MPa [12], [13].

Để đáp ứng các yêu cầu sử dụng bê tông hạt polystyrene phòng nổ đã được thiết kế với dải khối lượng thể tích từ 300 đến 1850 kg/m³ và cường độ chịu nén đạt tới trên 20 MPa [7]. Với các giải pháp đưa ra chủ yếu dựa trên việc sử dụng các phụ gia hoạt tính như tro bay, muối silic, tro trấu,... nhờ cơ chế giảm lỗ rỗng, tăng dính bám giữa hạt xốp và bê tông nền, tăng sản phẩm C-S-H [14]. Ngoài ra, việc giảm đồng thời kích thước hạt của polystyrene và kích thước hạt của cốt liệu cũng là một nhân tố cải thiện các tính năng cơ học của EPSC. Tuy nhiên, các giải pháp kể trên, nhìn chung, EPSC vẫn là vật liệu giòn và có cường độ chưa cao. Để nâng cao khả năng chịu lực của EPSC nhiều nghiên cứu đã đề xuất gia cường cốt sợi như sợi thép, sợi PP, sợi thủy tinh,... cho loại bê tông này và bước đầu đạt được một số kết quả đáng kể [15]-[21]. Sự có mặt của cốt sợi đã cải thiện được các đặc trưng cơ học của loại bê tông này như cường độ chịu nén, cường độ chịu kéo khi uốn và mô đun đàn hồi. Tại Việt Nam hiện nay, việc nghiên cứu ảnh hưởng của các loại cốt sợi trong EPSC chưa được phổ biến, bài báo này tập trung nghiên cứu và phân tích ảnh hưởng của cốt sợi thủy tinh (một loại sợi tương đối phổ biến trên thị trường) đến các tính chất của hỗn hợp EPSC và EPSC trong điều kiện Việt Nam.

2. Nghiên cứu thực nghiệm

2.1 Vật liệu chế tạo và thiết kế thành phần

- Xi măng

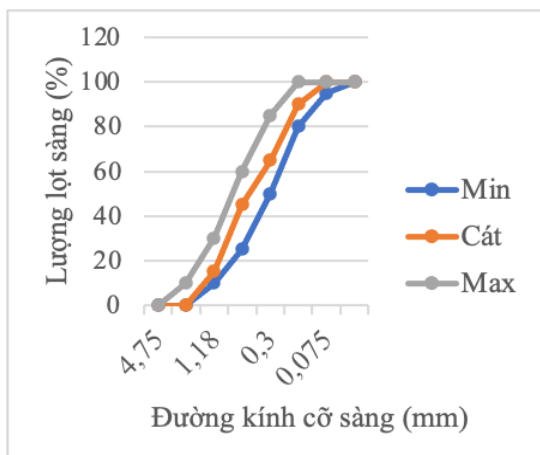
Nghiên cứu này dùng xi măng PC40 Bút Sơn từ nhà máy xi măng Bút Sơn (xã Thanh Sơn, huyện Kim Bảng, tỉnh Hà Nam). Các chỉ tiêu kỹ thuật của xi măng Bút Sơn PC40 thỏa mãn tiêu chuẩn TCVN 2682:2009.

- Tro bay

Sử dụng trong nghiên cứu này là tro bay Phả Lại loại F với khối lượng riêng là 2.356 kg/m³. Có các yêu cầu kỹ thuật thỏa tiêu chuẩn TCVN10302:2014.

• Cốt liệu

Cốt liệu sử dụng là cát vàng sông Lô. Có thành phần hạt thoả mãn tiêu chuẩn ASTM C33 như Hình 1.



Hình 1. Biểu đồ thành phần hạt của cát.

• Hạt polystyrene phòng nổ

Hạt polystyrene phòng nổ (EPS) được sử dụng có thể tìm thấy trên thị trường, với dạng hình cầu và đường kính khoảng từ 3 đến 5 mm.

Bảng 1. Tính chất cốt liệu EPS.

STT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị
1	Đường kính hạt	mm	3-5
2	Khối lượng thể tích	kg/m ³	19,7
3	Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	11,1
4	Cường độ ứng với biến dạng 10%	MPa	0,2
5	Cường độ ứng với biến dạng 20%	MPa	0,4



Hình 2. Hạt EPS chế tạo bê tông.

• Sợi thủy tinh

Sợi thủy tinh kháng kiềm nhập tại công ty Vật liệu hỗn hợp Quốc tế Trùng Khánh (Trung Quốc) với các thông số như khối lượng riêng 2,7 g/cm³, cường độ kéo 3500 MPa, mô đun đàn hồi 72 GPa và đường kính sợi 0,15mm.



Hình 3. Cốt sợi thủy tinh.

• Nước

Nước dùng theo nước được sử dụng trong bê tông xi măng thường, đạt yêu cầu theo tiêu chuẩn nước cho bê tông và vữa xây dựng TCVN 4506:2012.

• Phụ gia siêu dẻo

Phụ gia siêu dẻo (PGSD) được sử dụng trong nghiên cứu là Sikament NN dạng lỏng có gốc naphthalen formaldehyt sulfonat.



Hình 4. PGSD Sikament NN.

2.2. Công thức thành phần

Thành phần bê tông nhẹ cốt sợi thủy tinh sử dụng hạt polystyrene phòng nổ được tính toán theo

phương pháp thể tích tuyệt đối [22] trên cơ sở các thông số đầu vào như sau:

$$\frac{X}{\rho_X} + \frac{CL}{\rho_{CL}} + \frac{N}{\rho_N} + \frac{TB}{\rho_{TB}} + \frac{PE}{\rho_{PE}} + \frac{GF}{\rho_{GF}} + V_{kk} = 1 \quad (1)$$

Trong đó:

X, CL, N, TB, PE, GF lần lượt là khối lượng xi măng, cát vàng, nước, tro bay, hạt xốp phòng nổ và cốt sợi thủy tinh;

V_{kk} : Thể tích không khí;

$\rho_X, \rho_{CL}, \rho_N, \rho_{TB}, \rho_{PE}, \rho_{GF}$: Lần lượt là khối lượng riêng của xi măng, cát vàng, tro bay, hạt xốp phòng nổ và sợi thủy tinh.

Trên cơ sở tính toán và điều chỉnh trong phòng thí nghiệm, nhóm nghiên cứu đề xuất công thức thành phần bê tông đối chứng và hai cấp phối EPSC, được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Cấp phối EPSC.

Vật liệu thành phần	CPĐC	CP1 - 40% EPS	CP2 - 50% EPS
Xi măng (kg)	450	450	450
Tro bay (kg)	180	180	180
Nước (lít)	180	180	180
PGSD (l)	9	9	9
Cát (kg)	1516,3836	480,42	221,43
EPS (kg)	0	7,5272	9,409

Trên cơ sở các cấp phối EPSC, nhóm nghiên cứu đã tiến hành thí nghiệm thực nghiệm khảo sát khả năng phân tán của cốt sợi vào EPSC với các hàm lượng khác nhau. Qua thực nghiệm khảo

sát, nghiên cứu đề xuất cấp phối EPSC gia cường cốt sợi thủy tinh với chiều dài sợi là 1 cm cùng hai hàm lượng thay thế là 0,5% và 1% theo thể tích bê tông như Bảng 3 dưới đây.

Bảng 3. Cấp phối EPSC gia cường cốt sợi thủy tinh.

Vật liệu thành phần	CP1-0,5	CP1-1	CP2- 0,5	CP2-1
Xi măng (kg)	450	450	450	450
Tro bay (kg)	180	180	180	180
Nước (lít)	180	180	180	180
PGSD(l)	9	9	9	9
Cát (kg)	463,57	450,32	206,52	193,27
EPS (kg)	7,5272	7,5272	9,409	9,409
Sợi thủy tinh (kg)	13	26	13	26

2.3. Chế tạo mẫu và thực nghiệm

- Quy trình nhào trộn

Sau khi nghiên cứu và tiến hành điều chỉnh nhiều mẻ trộn, nhóm tác giả đề xuất quy trình nhào trộn EPSC như sau:

Bước 1: Đổ cốt liệu khô và xi măng vào máy trộn trong 1 phút;

Bước 2: Đổ 2/3 lượng nước nhào trộn cùng phụ gia vào máy trong 1 phút;

Bước 3: Thêm hạt xốp vào máy trộn để máy quay trong 2 phút;

Bước 4: Thêm sợi thủy tinh vào trộn trong 3 phút;

Bước 5: Đổ phần nước và phụ gia còn lại vào máy cho chạy trong 5 phút.

Tổng thời gian trộn 10 phút. Hỗn hợp EPSC được đổ ra các khuôn trụ 15 x 30 cm để xác định cường độ chịu nén và các mẫu dầm 10 x 10 x 40 cm để xác định cường độ chịu kéo khi uốn. Các mẫu được bảo dưỡng trong 28 ngày tuổi ở điều kiện tiêu chuẩn trong phòng thí nghiệm Vật liệu xây dựng thuộc công ty Sumen Việt Nhật.

• Thực nghiệm

Các chỉ tiêu kỹ thuật của hỗn hợp EPSC và EPSC được thực hiện theo các phương pháp tiêu chuẩn như sau:

(i) TCVN 3105:2022 - Hỗn hợp bê tông và bê tông- Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử [23];

(ii) TCVN 3106:2022 - Hỗn hợp bê tông- Phương pháp thử độ sụt [24];

(iii) TCVN 3108:1993 - Hỗn hợp bê tông nặng - Phương pháp xác định khối lượng thể tích [25];

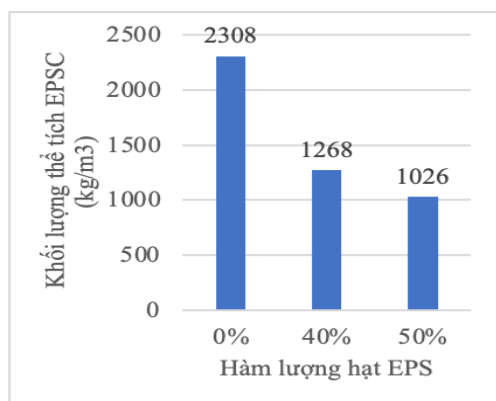
(iv) TCVN 3118:2022 - Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu nén [26];

(v) TCVN 3119:2022 - Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu kéo khi uốn [27].

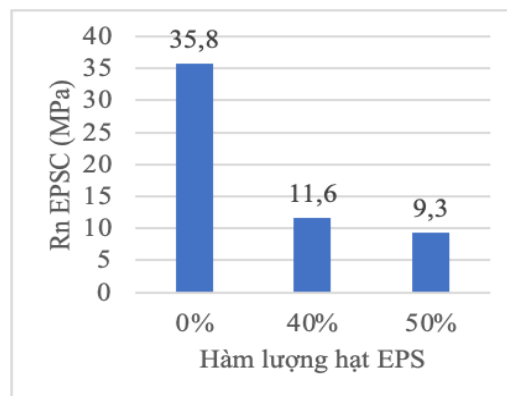
3. Kết quả thực nghiệm và thảo luận

3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng EPS thay thế đến một số tính chất của EPSC

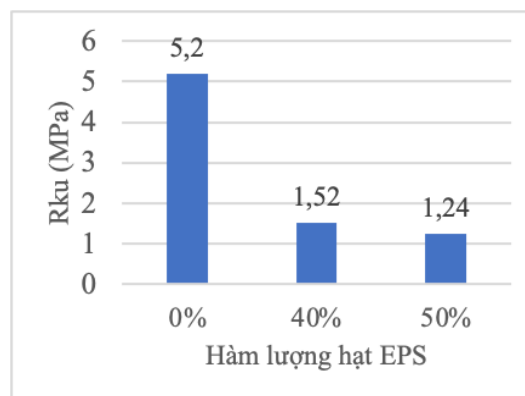
Ảnh hưởng của hàm lượng EPS thay thế đến khối lượng thể tích, cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi uốn của EPSC được nghiên cứu, được thể hiện tại Hình 5 đến Hình 7.



Hình 5. Ảnh hưởng của hàm lượng EPS thay thế đến khối lượng thể tích của EPSC.



Hình 6. Ảnh hưởng của hàm lượng EPS thay thế đến cường độ chịu nén (R_n) của EPSC.

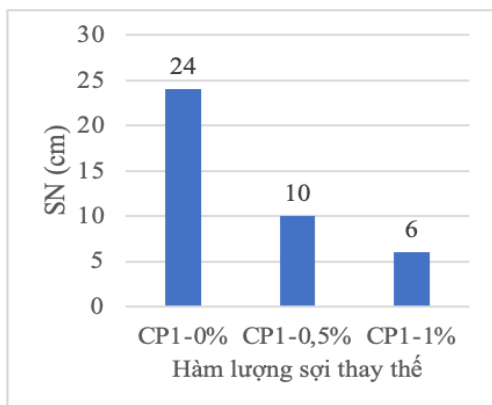


Hình 7. Ảnh hưởng của hàm lượng EPS thay thế đến cường độ chịu kéo khi uốn (R_{ku}) của EPSC.

Dựa vào các kết quả biểu thị trên Hình 5, cho thấy hàm lượng thay thế ảnh hưởng rất lớn tới hàm khối lượng thể tích của bê tông, cụ thể, với hàm lượng EPS thay thế 40 - 50% thì khối lượng thể tích của bê tông tương ứng chỉ đạt 55% và 52,2% so với mẫu bê tông đối chứng. Điều đó dẫn đến cường độ chịu nén và cường độ chịu kéo khi uốn của các mẫu EPSC sẽ giảm so với mẫu đối chứng ban đầu với các kết quả thực nghiệm ghi nhận được thể hiện ở Hình 6 và Hình 7.

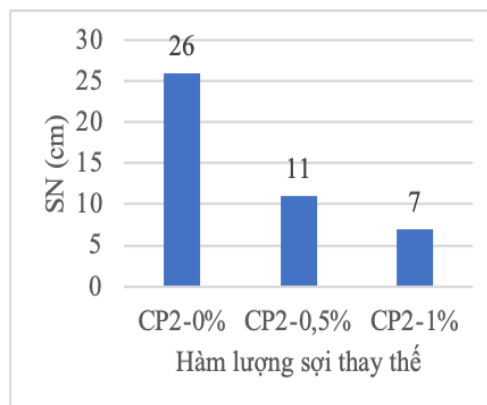
3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thủy tinh thay thế đến một số tính chất của EPSC

Khi tiếp tục thay thế cốt liệu bởi sợi thủy tinh với hàm lượng 0,5% và 1% theo thể tích cho hai cấp phối EPSC đã đề xuất theo công thức thành phần tại Bảng 3. Qua thực nghiệm khảo sát cho thấy, ảnh hưởng của hàm lượng sợi thủy tinh đến tính công tác của EPSC được thể hiện tại Hình 8 và Hình 9.



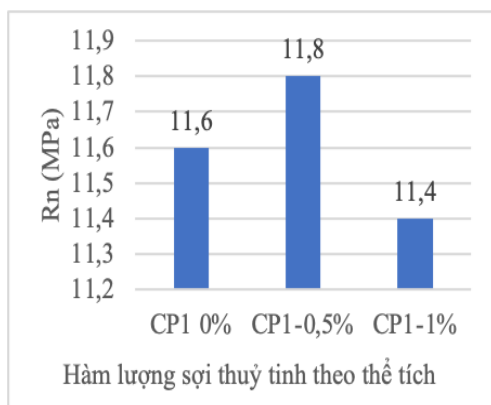
Hình 8. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thủy tinh thay thế tới tính công tác của hỗn hợp EPSC CP1.

Trên cơ sở các kết quả thực nghiệm, ảnh hưởng của hàm lượng sợi thủy tinh thay thế cốt liệu tới tính công tác của hỗn hợp EPSC, nhận thấy rằng, độ sụt các hỗn hợp EPSC CP1 giảm lần lượt 58,3% và 75%, trong khi đó, độ sụt của các hỗn hợp EPSC CP2 giảm lần lượt 57,69% và 73,07% khi hàm lượng sợi thay thế lần lượt là 0,5% và

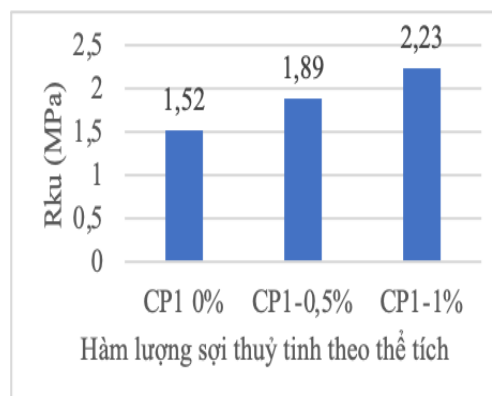


Hình 9. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thủy tinh thay thế tới tính công tác của hỗn hợp EPSC CP2.

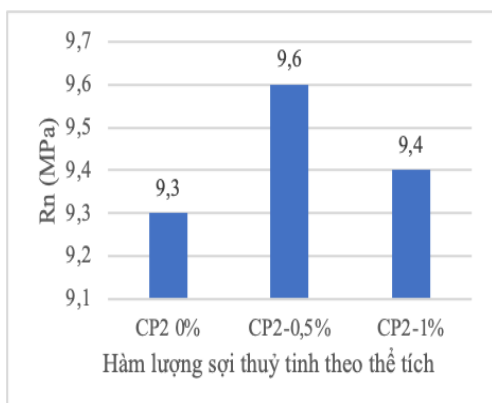
1% theo thể tích. Điều đó cho thấy, sợi thủy tinh làm suy giảm tính công tác rất lớn do sợi có dạng sợi dài với tỷ lệ giữa chiều dài và đường kính lớn làm tăng ma sát giữa các hạt cốt liệu. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thủy tinh tới R_n và R_{ku} thuộc các cấp phối EPSC được trình bày ở các Hình 10 đến Hình 13.



Hình 10. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thủy tinh thay thế tới R_n của EPSC CP1.

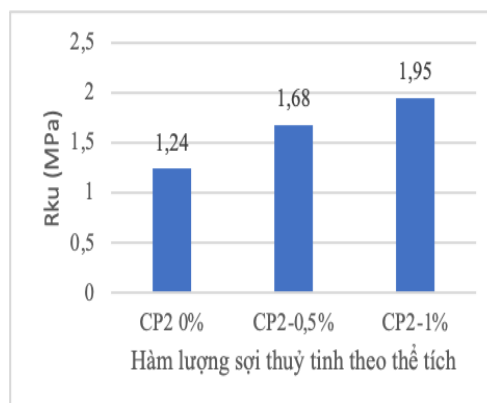


Hình 11. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thủy tinh thay thế tới R_{ku} của EPSC CP1.



Hình 12. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thủy tinh thay thế tới R_n của EPSC CP2.

Quan sát các kết quả được thể hiện trên hình 10 và 12, nhận thấy với các hàm lượng sợi thủy tinh thay thế 0,5% và 1%, dường như không làm thay đổi cường độ chịu nén của



Hình 13. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thủy tinh thay thế tới R_{ku} của EPSC CP2.

EPSC ở cả hai loại cấp phối nghiên cứu. Trong khi đó, quan sát hình 11 và 13, có thể thấy rằng, hàm lượng sợi thủy tinh thay thế tăng lên cải thiện được khả năng chịu kéo khi uốn của

EPSC, cụ thể, với CP1, khi hàm lượng sợi thủy tinh thay thế lần lượt là 0,5% và 1% thì R_{ku} được cải thiện lần lượt là 24,34% và 46,7% so với CP1 đối chứng. Đối với các cấp phối CP2, khả năng cải thiện R_{ku} ghi nhận tương ứng lần lượt là 35,48% và 57,2% so với CP2 đối chứng, điều này có thể được lý giải do sợi thủy tinh dài vắt qua các vết nứt làm cải thiện khả năng chịu uốn của bê tông.

4. Kết luận và kiến nghị

Qua các kết quả nghiên cứu thực nghiệm EPSC đã chỉ ra rằng, khối lượng thể tích và các chỉ tiêu R_n và R_{ku} của EPSC đều giảm khi hàm lượng EPS thay thế cốt liệu tăng lên. Cụ thể, khi hàm lượng EPS thay thế cốt liệu lên đến 50%, khối lượng thể tích của EPSC giảm từ 2308kg/m³ xuống 1026 kg/m³, cường độ chịu nén giảm từ 35,8 MPa xuống 9,6 MPa, trong khi đó, cường độ chịu kéo khi uốn giảm từ 5,2 xuống 1,24 MPa.

Sự có mặt của sợi thủy tinh trong EPSC làm giảm mạnh tính công tác của hỗn hợp bê tông từ 24 xuống 6 cm đối với CP1 và 26 xuống 7 cm đối với CP2 khi thay thế 1% cốt sợi thủy tinh theo thể tích bê tông. Tuy nhiên, việc thay thế bê tông bởi sợi thủy tinh tác động không đáng kể đến khối lượng thể tích cũng như cường độ chịu nén của loại bê tông này. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng ghi nhận sự cải thiện rõ rệt về R_{ku} của EPSC khi có mặt sợi thủy tinh với CP1 khi hàm lượng sợi thay thế là 1%, đã cải thiện R_{ku} từ 1,52 lên 2,23 MPa và đối với CP2 là từ 1,24 lên 1,95 MPa.

Tác động của sợi thủy tinh cũng như hạt EPS đến các tính chất của loại bê tông này sẽ được trình bày trong các nghiên cứu tiếp theo về các tính năng khác như chịu nhiệt, chống thấm, cách nhiệt,... của loại bê tông này. Đồng thời, các chiều dài sợi khác nhau cũng như các loại sợi khác nhau được xem xét.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2023-XD-006.

Tài liệu tham khảo

- [1] Z. -J. Wallace, “Mechanical and computational evaluation of cementitious materials with hollow glass microsphere inclusions,” M.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Univ. Mississippi, MS, USA, 2017.
- [2] A. Benazzouk, O. Douzane, K. Mezreb, B. Laidoudi, M. Queneudec, “Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling,” *Const. Build. Mater.*, vol. 22, no.4, pp. 573–579, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.11.011.
- [3] D. Oreshkin, V. Semenov, T. Rozovskaya. “Properties of light-weight extruded concrete with hollow glass microspheres,” *Proc. Eng.*, vol. 153, pp. 638 – 643, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.214.
- [4] L. P. Ly, “Nghiên cứu chế tạo bê tông nhẹ kết cấu sử dụng cốt liệu polystyrene,” Luận án tiến sĩ kỹ thuật, KT vật liệu, Viện KH & CNXD, Bộ GD & ĐT, HN, VN, 2019.
- [5] A. Mulla and A. Shelake, “Lightweight expanded polystyrene beads concrete,” *Int. J. Res. in Adv. Technol.*, pp. 17-21, Mar. 2016.
- [6] D. H. Phạm, V. Đ. Đào, D. A. Phạm, T. D. Nguyễn, Đ. H. Nguyễn, *Vật liệu mới trong xây dựng công trình giao thông*, NXB GTVT, HN, VN, 2018.
- [7] H. M. Đức, “Nghiên cứu chế tạo bê tông nhẹ cách nhiệt kết cấu sử dụng hạt Polystyrol phòng nổ,” *TC KHCN XD*, số 4, tr. 39-47, 2017.
- [8] N. C. Thắng, H. N. Đức, H. T. Nghĩa, “Nghiên cứu thực nghiệm nâng cao một số tính chất của bê tông nhẹ cốt liệu rỗng,” *TC KHCN XD*, tập 12, số 2, tr. 104-109, 2018, doi: /10.31814/stce.nuce2018-12(2)-16.

- [9] P. Pradhan, S. Maharjan, “Light Weight concrete brick using expanded polystyrene EPS: Preparation and cost estimation,” in *Proc. IOE Grad. Conf.*, 2016, pp. 361–364.
- [10] A. Mandlik, T. S. Sood, S. Karade, S. Naik, A. Kulkarni, “Lightweight concrete using EPS,” *Int. J. Sci. Res.*, vol. 4, no. 3, pp. 2007-2010, Mar. 2015.
- [11] D. Bouvard *et al.*, “Characterization and simulation of microstructure and properties of EPS lightweight concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 12, pp. 1666-1673, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.08.028.
- [12] D. J. Cook, “Expanded polystyrene concrete, concrete technology and design,” *New Concrete Materials*, London, UK: Surrey Univ. Press, 1983, pp. 41-69.
- [13] B. Sabaa, R. S. Ravindrarajah, “Engineering properties of lightweight concrete containing crushed expanded polystyrene waste,” presented at Mat. Res. Soc., 1997 Fall Meeting Sympos. MM: Adv. in Mat. for Cementit. Comp., Boston, MA, USA, Dec. 1-3, 1997.
- [14] A. S. Momtazi *et al.*, “Durability of lightweight concrete containing EPS in salty exposure conditions,” in *Proc. Second Int. Conf. Sustain. Const. Mater. Technol.*, Ancona, Italy, Jun. 28-30, 2010.
- [15] Y. Sun *et al.*, “An investigation of the properties of expanded polystyrene concrete with fibers based on an orthogonal experimental design,” *Materials*, vol. 15, no. 3, 2022, Art. no. 1228, doi: 10.3390/ma15031228.
- [16] C. Cheng, S. Hong, Y. Zhang, and J. He, “Effect of expanded polystyrene on the flexural behavior of lightweight glass fiber reinforced cement,” *Const. Build. Mater.*, vol. 265, Dec. 2020, Art. no. 120328, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120328.
- [17] B. K. Anjan *et al.*, “Analysis of polyester fiber-reinforced lightweight concrete using expanded polystyrene (EPS) beads,” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 749-752, Jun. 2019.
- [18] A. Sadrmomtazi, M. A. Mirgozar Langeroudi, A. Fasihi, A. K. Haghi, “An investigation on effect of using PP fibers and different cementitious materials on mechanical properties of EPS concrete,” in *Proc. 3rd Int. Conf. Conc. Develop*, Tehran, Iran, Apr. 27, 2009, pp. 1035-1044.
- [19] G. Okolnikova, L. A. Saad, M. M. Haidar and F. adnan noman A. Al-shaibani, “Compressive strength of lightweight expanded polystyrene basalt fiber concrete,” in *Proc. Int. Conf. Mod. Trends Manuf. Technol. Equip.: Mech. Eng. Mater. Sci. (ICMTMTE 2020)*, vol. 329, 2020, Paper 04010, doi: 10.1051/mateconf/202032904010.
- [20] W. Huo, S. Zhang, “Research and statistical analysis on impact resistance of steel fiber expanded polystyrene concrete and expanded polystyrene concrete,” *Materials*, vol. 15, no. 12, 2022, Art. no. 4216, doi: 10.3390/ma15124216.
- [21] B. Chen, J. Liu. “Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber,” *Cem. Conc. Res.*, vol. 34, no. 7, pp.1259–1263, Jul. 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.12.014.
- [22] A. Neville, *Properties of concrete*, London, UK: Pitman, 1981.
- [23] *Hỗn hợp bê tông và bê tông - Lấy mẫu, chế tạo và bảo dưỡng mẫu thử*, TCVN 3105:2022, Bộ KHCN, HN, VN, 2022.
- [24] *Hỗn hợp bê tông nặng - Phương pháp thử độ sụt*, TCVN 3106:1993, Bộ KHCN, HN, VN, 1993.
- [25] *Hỗn hợp bê tông nặng - Phương pháp xác định khối lượng thể tích*, TCVN 3108:1993, Bộ KHCN, HN, VN, 1993.
- [26] *Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu nén*, TCVN 3118:2022, Bộ KHCN, HN, VN, 2022.
- [27] *Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu kéo khi uốn*, TCVN 3119:2022, Bộ KHCN, HN, VN, 2022.