



MODELLING TO ESTIMATE EFFECT OF FIBER CONTENT ON YOUNG MODULUS OF GFRC

Nguyen Dinh Hai¹, Tran Anh Tuan²

¹*Building Materials Departement, University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam.*

²*Bridge and Tunnel Engineering Departement, University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam.*

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 02/09/2019

Revised: 18/11/2019

Accepted: 20/11/2019

Published online: 16/12/2019

<https://doi.org/10.25073/tcsj.70.4.20>

* *Corresponding author*

Email: nguyendinhhai.1986@utc.edu.vn

Abstract. The objective of this study is, first to determine the effective elastic modulus of Glass Fiber Reinforced Concrete (GFRC) and, second to analyse the dependencies of this effective modulus on the volume fraction of glass fibers. To achieve the aforementioned twofold objective, the Diluted schema is applied to homogenize this fibrous composite. In this work, the constituent phases of the composite are assumed to be isotropic linear elastic. The results obtained for the effective elastic modulus are compared with the Voigt, Reuss bounds and the experimental ones.

Keywords: Homogenization, Diluted Schema, Glass fiber reinforced concrete.

© 2019 University of Transport and Communications



MÔ HÌNH HÓA DỰ BÁO ẢNH HƯỞNG CỦA HÀM LƯỢNG SỢI ĐẾN MÔ ĐUN ĐÀN HỒI CỦA BÊ TÔNG CỐT SỢI THỦY TINH

Nguyễn Đình Hải¹, Trần Anh Tuấn²

¹*Bộ môn Vật liệu xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội.*

²*Bộ môn Cầu hầm, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội.*

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 02/09/2019

Ngày nhận bài sửa: 18/11/2019

Ngày chấp nhận đăng: 20/11/2019

Ngày xuất bản Online: 16/12/2019

<https://doi.org/10.25073/tcsj.70.4.20>

* Tác giả liên hệ

Email: nguyendinhhai.1986@utc.edu.vn

Tóm tắt. Mục tiêu của nghiên cứu này trước tiên nhằm xác định mô đun đàn hồi có hiệu của bê tông gia cường cốt sợi thủy tinh (GFRC), sau đó phân tích ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi thủy tinh đến mô đun đàn hồi có hiệu của GFRC. Để đạt được các mục đích nêu trên mô hình Bảo hoà sẽ được áp dụng để đồng nhất hoá GFRC. Trong nghiên cứu này các pha cấu thành của bê tông được coi là đàn hồi tuyến tính và đẳng hướng. Kết quả thu được bằng mô hình Bảo hoà sẽ được so sánh với các biên Voigt, Reuss và các kết quả thí nghiệm đã thực hiện.

Từ khóa: Đồng nhất hoá, mô hình bảo hoà, bê tông cốt sợi thủy tinh.

© 2019 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khoa học đồng nhất hoá vật liệu đa thành phần trong những năm gần đây đã có những bước phát triển vượt bậc. Việc xây dựng các mô hình mô phỏng vật liệu đã được thực hiện từ rất sớm và bắt đầu bởi các mô hình căn bản như Eshelby, Bảo hoà, MT... [1, 2]. Tính chất vĩ mô của vật liệu đa thành phần phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố như tính chất của các vật liệu thành phần, tỷ lệ thể tích, cách thức liên kết giữa các pha, đặc trưng hình học... [1, 2, 3].

Bê tông xi măng cũng là một vật liệu đa thành phần được sử dụng rất rộng rãi trong lĩnh vực xây dựng. Nó là một vật liệu tổ hợp nhiều pha như pha đá xi măng, pha cốt liệu, pha lỗ

rỗng, pha cốt sợi. Bê tông xi măng thông thường là loại vật liệu giòn và để tăng khả năng chống uốn thì người ta thêm vào thành phần của bê tông các loại sợi như sợi thủy tinh, sợi thép, sợi cacbon ... Trong quá trình thiết kế thành phần bê tông cốt sợi thủy tinh để đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến các tính chất của bê tông thông thường chúng ta sẽ phải thực hiện rất nhiều các thử nghiệm với các hàm lượng sợi khác nhau để chọn được một hàm lượng tối ưu điều này sẽ dẫn tới tốn kém về thời gian cũng như chi phí do đó việc sử dụng một mô hình lý thuyết để dự báo trước ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi thủy tinh đến các tính chất của bê tông có ý nghĩa hết sức quan trọng.

Trên cơ sở tham khảo các nghiên cứu trước đây [1], bài báo này đề xuất sử dụng mô hình Bảo hoà để mô phỏng dự báo ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến mô đun đàn hồi của bê tông cốt sợi thủy tinh. Bài báo được kết cấu theo nội dung chính như sau: Phần 2 trình bày mô hình Bảo hoà, phần 3 dành để mô tả Vật liệu chế tạo và phương pháp thực nghiệm cũng như các kết quả thí nghiệm thu được so với các kết quả mô phỏng, phần 4 là một số kết luận và kiến nghị của nghiên cứu.

2. MÔ HÌNH BẢO HOÀ

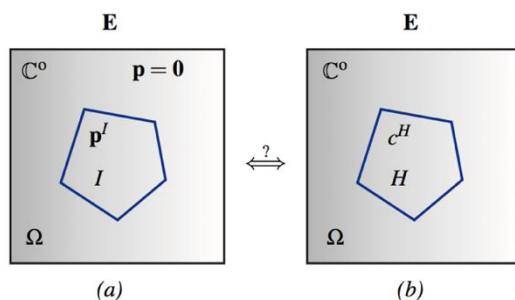
2.1. Bài toán hạt không đồng nhất

Khác với bài toán hạt đồng nhất (nghĩa là trong một môi trường nền vô hạn xuất hiện một vùng vẫn sở hữu các tính chất của pha nền nhưng xuất hiện ứng suất tự do hoặc biến dạng tự do) gắn với Tensor Eshelby, trong mục này ta nghiên cứu bài toán hạt không đồng nhất được đặt trong pha nền vô hạn (hay nói cách khác pha hạt và pha nền là hai vật liệu có các tính chất khác nhau) hạt không đồng nhất được giới hạn bởi miền H là vật liệu đàn hồi khác với pha nền. Các điều kiện biên tại miền phân giới ∂H là hoàn hảo (liên tục về chuyển vị). Ứng suất và biến dạng là bằng không tại mọi điểm không chất tải. Các điều kiện biên được áp dưới dạng "biến dạng đồng nhất" tại biên (mặt viền) E hoặc ứng suất đồng nhất tại biên $\Sigma = \mathbf{C}^0 : \mathbf{E}$ trong đó \mathbf{C}^0 là module đàn hồi của pha nền bao quanh hạt không đồng nhất H và \mathbf{C}^H là module đàn hồi của H . Trong bài toán này ta giả định rằng pha hạt có dạng elip tròn xoay [2, 3].

Các điểm khác nhau giữa bài toán hạt đồng nhất và bài toán hạt không đồng nhất được minh họa như Hình 1.

Hệ phương trình bài toán hạt đồng nhất I (hạt I và pha nền là vật liệu như nhau) được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} \underline{\text{div}}(\mathbf{C}^0 : \boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{\xi})) + \underline{\text{div}}(\mathbf{p}^I) = \underline{\mathbf{0}} & \text{Trong miền } I \\ \underline{\text{div}}(\mathbf{C}^0 : \boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{\xi})) = \underline{\mathbf{0}} & \text{Trong miền } \Omega - I \\ \underline{\boldsymbol{\xi}}(\mathbf{x}) \rightarrow \mathbf{E} \cdot \mathbf{x} & \text{Khi } |\mathbf{x}| \rightarrow \infty \end{cases} \quad (1)$$



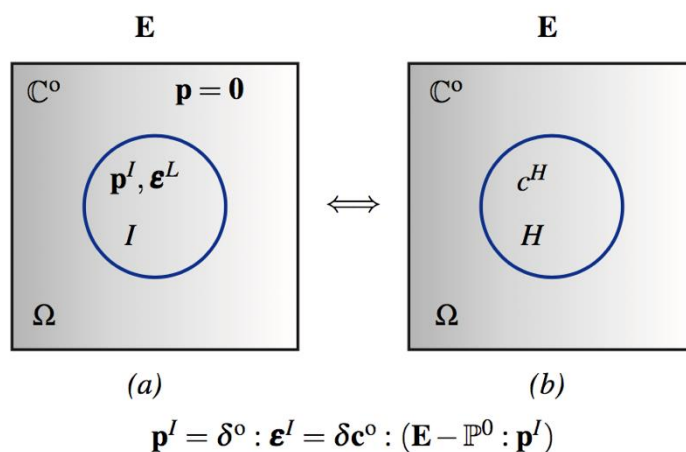
Hình 1. Bài toán hạt đồng nhất (a) và bài toán không đồng nhất (b).

Tương tự, hệ phương trình bài toán hạt không đồng nhất với sự xuất hiện chênh lệch $\mathbb{C}^H - \mathbb{C}^0$ trong hạt H được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} \underline{\text{div}}(\mathbb{C}^0 : \underline{\boldsymbol{\varepsilon}}(\underline{\xi})) + \underline{\text{div}}[(\mathbb{C}^H - \mathbb{C}^0) : \underline{\boldsymbol{\varepsilon}}(\underline{\xi})] = \underline{\mathbf{0}} & \text{Trong miền } H \\ \underline{\text{div}}(\mathbb{C}^0 : \underline{\boldsymbol{\varepsilon}}(\underline{\xi})) = \underline{\mathbf{0}} & \text{Trong miền } \Omega - H \\ \underline{\xi}(\underline{\mathbf{x}}) \rightarrow \mathbf{E} \cdot \underline{\mathbf{x}} & \text{Khi } |\underline{\mathbf{x}}| \rightarrow \infty \end{cases} \quad (2)$$

Các hạt đồng nhất I và không đồng nhất H có dạng hình học tương tự nhau. Điểm khác biệt duy nhất của hai bài toán nằm ở số hạng thứ hai của phương trình đầu tiên: Trường ứng suất trước (phân cực) \mathbf{p}^I là biết trước và đồng nhất trong pha hạt I trong khi đó số hạng tương ứng ở bài toán hạt không đồng nhất $(\mathbb{C}^H - \mathbb{C}^0) : \underline{\boldsymbol{\varepsilon}}(\underline{\xi})$ là chưa xác định được và không đồng nhất trong pha H tại thời điểm ban đầu.

Xét trường hợp hạt I và H như nhau và có dạng elip tròn xoay (Hình 2):



Hình 2. Điều kiện tương đương giữa bài toán hạt và bài toán không đồng nhất dạng elip tròn xoay.

Hệ phương trình 2 cho một nghiệm biến dạng đồng nhất trong miền I và sau khi cộng tác dụng tại mọi điểm là biến dạng đồng nhất E:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^I = \mathbf{E} + \mathbf{P}^0 : \mathbb{C}^0 : \boldsymbol{\varepsilon}^L = \mathbf{E} - \mathbf{P}^0 : \mathbf{p}^I \quad (3)$$

Nếu ta chọn \mathbf{p}^I thỏa mãn điều kiện sau:

$$\mathbf{p}^I = (\mathbb{C}^H - \mathbb{C}^0): \boldsymbol{\varepsilon}^I \quad (4)$$

thì nghiệm của bài toán này sẽ thỏa mãn tất cả các phương trình của hệ phương trình 2.

Từ 3 và 4 ta rút được phương trình sau:

$$\mathbf{P}^0: \mathbf{p}^I = \mathbf{P}^0: (\mathbb{C}^H - \mathbb{C}^0): \boldsymbol{\varepsilon}^I = \mathbf{E} - \boldsymbol{\varepsilon}^I \quad (5)$$

Đồng nhất $\boldsymbol{\varepsilon}^I$ và $\boldsymbol{\varepsilon}^H$ ta được

$$\boldsymbol{\varepsilon}^H = [\mathbb{I} + \mathbf{P}^0: (\mathbb{C}^H - \mathbb{C}^0)]^{-1}: \mathbf{E} \quad (6)$$

2.2. Mô hình bão hoà

Ước tính xấp xỉ trong Mô hình bão hoà được thực hiện với các giả thuyết sau [1]:

- Vật liệu composite có pha nền ($i = 1$) và được gia cường bằng các pha hạt ($i = 2, 3, \dots, n$). Trong đó tất cả các pha đều có ứng xử đàn hồi tuyến tính và đồng nhất.
- Khoảng cách giữa các pha hạt được coi là đủ lớn để bỏ qua tương tác giữa các hạt.
- Vật liệu composite chịu một biến dạng vĩ mô ở vô hạn là \mathbf{E} .

Với tensor Eshelby đã được xác định cho các pha hạt [3] thì tensor định vị biến dạng của pha hạt thứ i và pha nền 1 được tính như sau [6]

$$\mathbb{A}^{(i)} = \mathbb{C}^{(i)}: [\mathbb{I} + \mathbb{P}^{(i)}: (\mathbb{C}^{(i)} - \mathbb{C}^{(1)})]^{-1} \quad (7)$$

$$\mathbb{A}^{(1)} = \frac{1}{f_1} \left(\mathbb{I} - \sum_{i=2}^n f_i \mathbb{C}^{(i)}: [\mathbb{I} + \mathbb{P}^{(i)}: (\mathbb{C}^{(i)} - \mathbb{C}^{(1)})]^{-1} \right) \quad (8)$$

trong đó f_i là tỉ lệ thể tích của từng pha trong composite. Thay các công thức kể trên vào công thức đồng nhất hoá theo mô hình bão hoà [9] ta có tensor độ cứng đồng nhất của composite theo phương pháp bão hoà như sau:

$$\mathbb{C}_{DIL}^{hom} = f_1 \mathbb{C}^{(1)}: \mathbb{A}^{(1)} + \sum_{i=2}^n f_i \mathbb{C}^{(i)}: [\mathbb{I} + \mathbb{P}^{(i)}: (\mathbb{C}^{(i)} - \mathbb{C}^{(1)})]^{-1} \quad (9)$$

$$\mathbb{C}_{DIL}^{hom} = \mathbb{C}^{(1)} + \sum_{i=2}^n f_i (\mathbb{C}^{(i)} - \mathbb{C}^{(1)}): [\mathbb{I} + \mathbb{P}^{(i)}: (\mathbb{C}^{(i)} - \mathbb{C}^{(1)})]^{-1} \quad (10)$$

Trong trường hợp vật liệu tổng hợp cấu thành bởi hai vật liệu đàn hồi đồng nhất và đẳng hướng tensor độ cứng của vật liệu thành phần có công thức sau:

$$\mathbb{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix}$$

Trong đó các phần tử khác không của ma trận độ cứng có giá trị

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)}, \quad C_{12} = C_{13} = C_{21} = C_{23} =$$

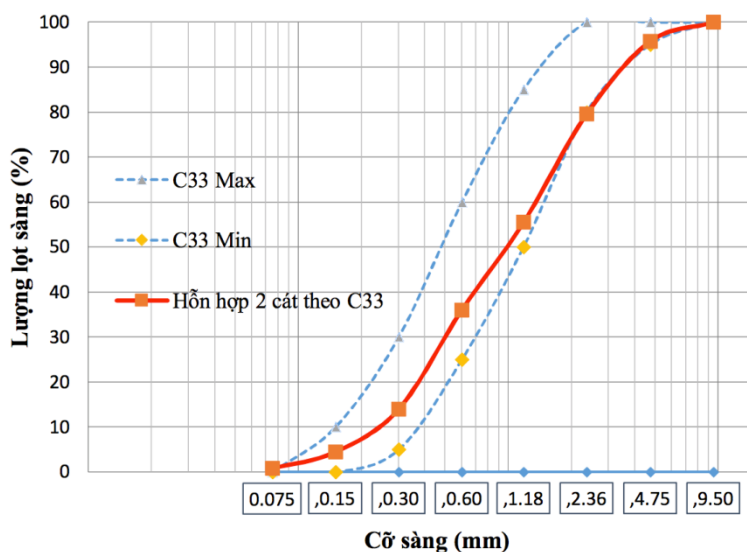
$$C_{31} = C_{32} = \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)}, \quad C_{44} = C_{55} = C_{66} = \frac{E}{1+\nu}.$$

Với E, ν lần lượt là modul đàn hồi và hệ số poisson của vật liệu.

3. VẬT LIỆU CHẾ TẠO VÀ PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

3.1. Vật liệu chế tạo

Trong nghiên cứu này vật liệu để chế tạo bê tông xi măng gia cường cốt sợi thủy tinh GFRC bao gồm Xi măng Bút Sơn PC40 thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 2682 : 2009 [18]. Tro bay Phá Lại loại F với các tính chất cơ lý đạt yêu cầu theo TCVN1032:2014 [14].



Hình 3. Biểu đồ cấp phối thành phần hạt hỗn hợp cốt liệu (40% cát mịn + 60% cát nghiền).

Hỗn hợp cốt liệu bao gồm cát nghiền Hoà Bình và cát mịn Sông Hồng với thành phần cấp phối thỏa mãn tiêu chuẩn ASTM C33 [11] với thành phần hạt được biểu diễn như Hình 3, phụ gia siêu dẻo sử dụng trong nghiên cứu này là Polycarboxylate R- 209. Nước dùng trong nghiên cứu này phù hợp với TCVN 4506-2012 [15]. Cốt sợi thủy tinh sử dụng trong nghiên cứu là loại kháng kiềm và có một số thông số đặc trưng như sau:

- Khối lượng riêng 2,7 g/cm³, cường độ kéo đạt 3500MPa
- Mô đun đàn hồi 72,5 GPa
- Hệ số poisson 0,23
- Chiều dài sợi: 1cm
- Đường kính sợi: 0,02mm

3.2. Thiết kế thành phần

Thành phần bê tông xi măng hạt nhỏ gia cường cốt sợi thủy tinh được thiết kế theo nguyên tắc về thể tích tuyệt đối [4 -10] đảm bảo tính công tác của hỗn hợp bê tông đối chứng đạt trên 260 mm. Bê tông GFRC với các hàm lượng cốt sợi khác nhau từ 0 % đối với bê tông đối chứng đến 1,5% theo thể tích cốt sợi nhằm nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến mô đun đàn hồi của GFRC được trình bày ở bảng 2.1 dưới đây.

Bảng 2.1. Thành phần cấp phối cho 1m³ hỗn hợp bê tông.

Vật liệu (Kg)	Đối chứng	0,1 % Sợi	0,2 % Sợi	0,3 % Sợi	0,5 % Sợi	1 % Sợi	1,5 % Sợi
Cát thô	870	870	870	870	870	870	870
Cát mịn	580	579,3	578,6	577,9	577,2	576,6	575,9
Xi măng	400	399,57	399,15	398,7	398,3	397,87	397,45
Tro bay	271	270,56	270,14	269,7	269,29	268,87	268,44
Phụ gia	6,7	6,284	5,86	5,43	5,01	4,58	4,16
Nước	177,94	177,513	177,09	176,66	176,24	175,81	175,39
N/CKD	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

3.3. Thục nghiệm xác định các tính chất của GFRC

Tính công tác của hỗn hợp GFRC được xác định bằng cách đo độ Chảy của hỗn hợp qua côn có kích thước: đường kính đáy lớn 100 mm ± 0,5 mm, đáy nhỏ 70 mm ± 0,5 mm, chiều cao 60 mm ± 0,5 mm theo TCVN 3121 – 2: 2003 [16]. Cường độ chịu nén của GFRC được xác định thông qua TCVN 3118 – 1993 [17] và mô đun đàn hồi được xác định theo ASTM C469 [12].

Giá trị thực nghiệm xác định cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi ở 28 ngày tuổi của các cấp phối bê tông được trình bày ở bảng 2.2 và 2.3 dưới đây:

Bảng 2.2. Cường độ chịu nén của GFRC ở 28 ngày tuổi.

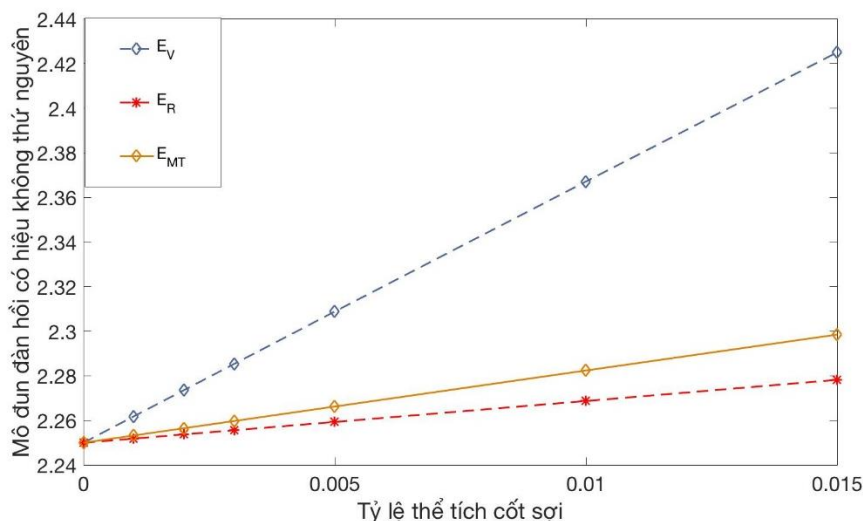
Hàm lượng sợi (%)	Cường độ chịu nén của mẫu trụ 15X30 cm ở 28 ngày tuổi (MPa)
0	41,3
0,1	40,8
0,2	42,6
0,3	46,7
0,5	48,3
1	49,2
1,5	50,16

Bảng 2.3. Mô đun đàn hồi của GFRC ở 28 ngày tuổi.

Hàm lượng sợi	0	0,1	0,2	0,3	0,5	1	1,5
E(GPa)	29,328	29,247	30,410	33,471	32,012	33,525	34,050

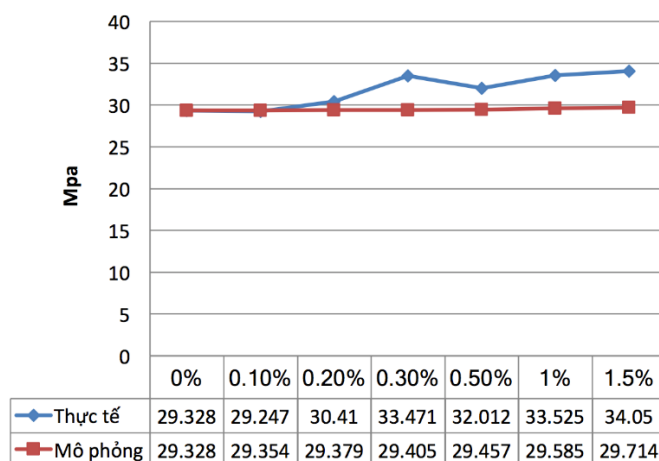
3.4. So sánh kết quả Mô phỏng và thực nghiệm

Mô phỏng số của mô hình Bảo hoà sẽ được thực hiện trên phần mềm matlab: Mô đun đàn hồi của bê tông đối chứng E có giá trị 29,329 GPa và hệ số Poisson lấy bằng 0,2; Sợi thủy tinh có Mô đun đàn hồi là 72,5 GPa và hệ số Poisson 0,23.



Hình 4. Kết quả Mô hình bảo hoà so với Biên Voigt và Reuss.

Các kết quả thu được bằng Mô hình bảo hoà nằm hoàn toàn trong Biên Voigt – Reuss [1, 2] khi hàm lượng sợi thủy tinh nhỏ hơn 1,5% theo thể tích (Hình 4). Các kết quả thu được bằng phương pháp Mô phỏng hội tụ tốt khi hàm lượng sợi thấp dưới 0,2 % (Hình 5). Khi hàm lượng sợi từ 0,3% trở lên thì các kết quả thu được bằng Mô hình Bảo hoà và thực nghiệm có độ vênh tăng lên nguyên nhân ở đây có thể do việc nhào trộn (máy móc, quy trình là như nhau với mọi hàm lượng sợi) là chưa được tối ưu hoặc việc đúc mẫu (hỗn hợp bê tông với hàm lượng thấp đạt được mức độ tự đầm còn khi hàm lượng sợi tăng cao thì cần phải đầm rung khi đúc mẫu) chưa được thống nhất. Do vậy việc chế tạo mẫu cần cải thiện ở các nghiên cứu tiếp theo.



Hình 5. So sánh kết quả thu được từ Mô hình Bảo hoà và thực nghiệm.

4. KẾT LUẬN

Tăng hàm lượng sợi ảnh hưởng lớn đến tính công tác của hỗn hợp bê tông cốt sợi thủy tinh cụ thể độ chảy lan đo bằng côn mini đạt 320 mm đối với hỗn hợp đối chứng và không chảy lan khi hàm lượng sợi thủy tinh trên 0,5%. Việc gia tăng hàm lượng sợi có ảnh hưởng tích cực đến cường độ chịu nén của GFRC, khi hàm lượng sợi tăng từ 0,1% đến 1,5% thì R_n ở 28 cải thiện được từ 5 cho đến 25%. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến mô đun đàn hồi của GFRC thu được bởi thực nghiệm và dự báo bởi mô hình cho cùng xu hướng là có ảnh hưởng tích cực làm cải thiện mô đun đàn hồi khi hàm lượng cốt sợi tăng. Tuy nhiên khi hàm lượng cốt sợi tăng trên 0,3% thì kết quả thu được từ mô hình dự báo và thực nghiệm có độ sai lệch rộng hơn khi ở hàm lượng sợi thấp.

Để cải thiện khả năng dự báo của mô hình cần phải tính thêm ảnh hưởng của miền chuyển tiếp giữ cốt sợi và bê tông, tính đến chiều dài của cốt sợi thủy tinh.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (Nafosted) trong đề tài mã số 107.02-2017.10

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. B. V. Trần, T. K. Nguyễn, A. T. Trần, Đ. H. Nguyễn, Đồng nhất vật liệu nhiều thành phần - Ứng xử tuyến tính, Xuất bản lần 1, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội, 2019.
- [2]. A. Zaoui, Matériaux hétérogènes et composites, Palaiseau : Presses de L'Ecole polytechnique, Paris, 2000.
- [3]. J. Eshelby, The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems, Proceedings of the royal society a, 241(1957) 376–386. <https://doi.org/10.1098/rspa.1957.0133>
- [4]. J. P. J. G. Ferreira; F. A. B. Branco, The Use of Glass Fiber-Reinforced Concrete as a Structural Material. Experimental Techniques, Society for Experimental Mechanics. 31 (2007) 64 – 73. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2007.00153.x>
- [5]. P. Shtivan, N. Shakor, S. Pimplikar, Glass Fiber Reinforced Concrete Use in Construction, International Journal of Technology and Engineering System, 2 (2011) 6 pages.
- [6]. F. Larrard, T. Sedran, Optimization of ultra high-performance concrete by the use of a packing model, Cement and Concrete Research, 24 (1994) 997-1009. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)
- [7]. 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, Xuất bản lần 1, Nhà xuất bản Giao thông Vận tải, Hà Nội, 2018.
- [8]. D. H. Phạm, V. Đ. Đào, D. A. Phạm, T. S. Nguyễn, Đ. L. Mai, Công nghệ bê tông và kết cấu bê tông, Xuất bản lần 1, Nhà xuất bản Giao thông vận tải, Hà Nội, 2011.

- [9]. D. H. Phạm, T. T. Trần, K. C. Thái, V. D. Đào, T. S. Nguyễn, Thiết kế kết cấu theo độ bền, Xuất bản lần 1, Nhà xuất bản giao thông vận tải, Hà Nội, 2018.
- [10]. T. S. Nguyễn, Nghiên cứu thành phần, cường độ của bê tông sử dụng cát mịn làm đường Luận văn thạc sỹ Kỹ thuật, ĐH Giao Thông Vận Tải/Hà Nội, 2005.
- [11]. ASTM C33 / C33M – 18, Standard Specification for Concrete Aggregates, 2016.
- [12]. ASTM C469 / C469M – 14, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, 2010.
- [13]. Bộ Xây dựng, TCVN 4506 – Nước trộn bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật, Tiêu chuẩn Xây dựng Việt Nam, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2012.
- [14]. Bộ Xây dựng, TCVN 10302 – Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông và vữa xây dựng, Tiêu chuẩn Xây dựng Việt Nam, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2014.
- [15]. Bộ Xây dựng, TCVN 4506– Nước trộn bê tông và vữa – Yêu cầu kỹ thuật, Tiêu chuẩn Xây dựng Việt Nam, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2012.
- [16]. Bộ Xây dựng, TCVN 3121 – Vữa xây dựng – Phương pháp thử, Tiêu chuẩn Xây dựng Việt Nam, NXB Xây dựng, Hà Nội, (2) 2003.
- [17]. Bộ Xây dựng, TCVN 3118 – Bê tông nặng– Phương pháp xác định cường độ nén, Tiêu chuẩn Xây dựng Việt Nam, NXB Xây dựng, Hà Nội, 1993.
- [18]. Bộ Xây dựng, TCVN 2682 – Xi măng Poóc Lăng– Yêu cầu kỹ thuật, Tiêu chuẩn Xây dựng Việt Nam, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2009.