Transport and Communications Science Journal, Vol 72, Issue 9 (12/2021), 1047-1056

Transport and Communications Science Journal

DETERMINATION OF THE EFFECTIVE PERMEABILITY FOR FRACTURED CONCRETE MODEL BY USING FEM

Tran Thi Bich Thao*

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

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article
Received: 26/09/2021
Revised: 23/10/2021
Accepted: 09/11/2021
Published online: 15/12/2021
https://doi.org/10.47869/tcsj.72.9.4

* Corresponding author
Email: tbthao.tran@utc.edu.vn

Abstract. The durability of a concrete structure containing intersecting fractures depends strongly on its water permeability. A good understanding of transport phenomena will be useful for predicting the service life and optimizing the material design. Therefore, the objective of this work is to investigate the influence of the fracture distribution law on the effective permeability for numerical fractured concrete model. To achieve this objective, two-dimensional concrete specimens with coarse aggregates are first generated. Then the system of fractures are randomly built with varied density ranges. Finaly, the hydraulic properties of the proposed models are determined by finite element method. Furthermore, the numerical results obtained are used to demonstrate that both the fracture density and its distribution law influence the effective permeability of fractured concrete model.

Keywords: fractured concrete, coarse aggregate, effective permeability.

© 2021 University of Transport and Communications

Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải

XÁC ĐỊNH ĐỘ THẤM CÓ HIỆU CỦA MÔ HÌNH BÊ TÔNG BỊ NỨT BẰNG PHƯƠNG PHÁP PTHH

Trần Thị Bích Thảo*

Trường 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: 26/09/2021
Ngày nhận bài sửa: 23/10/2021
Ngày chấp nhận đăng: 09/11/2021
Ngày xuất bản Online: 15/12/2021
https://doi.org/10.47869/tcsj.72.9.4

* Tác giả liên hệ
Email: tbthao.tran@utc.edu.vn

Tóm tắt. Độ bền của kết cấu bê tông có chứa vết nứt phụ thuộc rất lớn vào đặc tính thấm nước của nó. Sự hiểu biết về hiện tượng truyền dẫn cho phép xác định tuổi thọ và tối ưu hoá việc thiết kế thành phần vật liệu. Vì vậy mục tiêu chính bài báo là nghiên cứu ảnh hưởng của quy luật phân bố vết nứt đến độ thấm có hiệu của mô hình mô phỏng số khối bê tông. Để đạt được mục tiêu này, trước tiên mẫu bê tông hai chiều với các hạt cốt liệu thô được khởi tạo. Tiếp đến hệ thống các vết nứt được bố trí ngẫu nhiên với sự thay đổi về mật độ. Cuối cùng các đặc tính thuỷ lực của mô hình đề xuất được xác định bởi phương pháp phần tử hữu hạn. Hơn nữa, những kết quả số thu được được dùng để chứng minh, phân tích mức độ ảnh hưởng của mật độ vết nứt và quy luật phân bố của chúng đến tính thấm có hiệu của mô hình bê tông bị nứt.

Từ khóa: bê tông nứt, cốt liệu thô, độ thấm có hiệu.

© 2021 Trường Đại học Giao thông Vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nứt và ăn mòn là hai thuộc tính cố hữu của kết cấu bê tông, nó song hành cùng kết cấu trong suốt tuổi thọ khai thác của nó. Nứt và ăn mòn có mối quan hệ ảnh hưởng qua lại. Vết nứt hình thành tạo điều kiện thuận lợi cho việc thấm nhập nước có hoà tan các chất gây ăn mòn vào trong môi trường bê tông, nước này làm hư hỏng cốt thép, kéo theo sự phá huỷ một bộ phận hoặc toàn bộ kết cấu [1-3]. Chính vì vậy sự hiểu biết tường tận về đặc tính thấm và

mối tương quan với vết nứt của môi trường bê tông là rất cần thiết cho việc dự báo tuổi thọ làm việc và thiết kế thành phần của vật liệu bê tông nói chung và kết cấu có sử dụng bê tông nói riêng. Đến nay trên thế giới có rất nhiều công bố liên quan đến chủ đề phân tích tính thấm của môi trường rỗng nói chung và bê tông bị nứt nói riêng, chúng ta có thể liệt kê sau đây một số nghiên cứu như bài báo của Vu [4], Bogdanov [5], Choinska [6], Cao [7], Chen [8] và Pouya [9]. Đa phần các nghiên cứu này đều xem xét môi trường rỗng là một miền đồng nhất đặc trưng bởi một giá trị độ thấm nhất định. Tuy nhiên thực tế rằng bê tông bao gồm hỗn hợp vữa xi măng và các hạt cốt liệu thô, môi trường này bản chất là không đồng nhất và được đặc trưng bởi các giá trị độ thấm khác nhau. Mặt khác tuỳ vào độ cứng của hạt cốt liệu mà vết nứt có thể xuất hiện cắt qua hạt cốt liệu hoặc chỉ hiện hữu trong phạm vi miền vữa xi măng. Đây chính là đặc điểm mà các nghiên cứu nói trên chưa xem xét đến. Trên cơ sở đó nghiên cứu này hướng đến việc phân tích ảnh hưởng của quy luật phân bố và mật độ vết nứt đến độ thấm có hiệu của mô hình số mẫu bê tông có chứa các hạt cốt liệu thô. Trong đó các hạt cốt liệu được mô phỏng dạng hình tròn gieo ngẫu nhiên trong môi trường chất nền là vữa xi măng với một tỷ lệ thể tích nhất định, hệ thống vết nứt dưới dạng các đoạn thẳng phân bố ngẫu nhiên được xem xét với các trường hợp có chiều dài khác nhau, cắt qua và không cắt các hạt cốt liệu thô. Mô hình này được mô phỏng và tính toán bằng phương pháp phần tử hữu hạn, đặc tính thấm thu được được dùng để đưa ra những nhận định trong mối liên hệ với quy luật phân bố và mật độ của hệ thống vết nứt.

Các mục còn lại của bài báo được sắp xếp theo các trình tự nội dung như sau: Phần 2 dành để mô tả việc xây dựng mô hình bài toán, thống kê các thông số vật liệu và mô phỏng bằng phần mềm ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn; Phần 3 tập trung vào việc phân tích các kết quả số thu được liên quan đến độ thấm, dự báo ảnh hưởng của quy luật và mật độ phân bố vết nứt đến độ thấm có hiệu; Cuối cùng là một số kết luận của vấn đề nghiên cứu.

2. MÔ HÌNH BÀI TOÁN VÀ THIẾT LẬP PHƯƠNG TRÌNH

Trong nghiên cứu này mô hình mẫu bê tông giả định có dạng hình vuông với kích thước L tạo bởi chất nền là vữa xi măng, miền vữa xi măng ký hiệu là Ω được bao bọc bởi biên ngoài $\partial\Omega$. Trong miền vữa xi măng này chúng ta thực hiện gieo vị trí các hạt cốt liệu thô theo quy luật phân bố ngẫu nhiên, các hạt này có dạng tròn được ký hiệu bởi ω_i, biên tiếp xúc giữa các hạt cốt liệu và chất nền vữa xi măng ký hiệu là Γ_i. Hệ thống vết nứt có dạng các đoạn thẳng ký hiệu bởi l_j phân bố ngẫu nhiên trong mẫu bê tông mô phỏng. Mô tả nói trên được minh hoạ trên hình 1. Trong nghiên cứu này các hạt cốt liệu thô trong mẫu bê tông chiếm một tỷ lệ cố định được ký hiệu bởi φ, mật độ vết nứt được đại diện bởi tham số c, chúng được xác định thông qua các biểu thức sau

$$\varphi = \frac{N\pi R^2}{L^2}, \tag{1}$$

$$c = \frac{\sum_{j=1}^{M} s_j w}{L^2}, \tag{2}$$

trong đó N là tổng số hạt cốt liệu thô, R là bán kính của hình tròn, s_j là chiều dài của vết nứt thứ " j ", w là độ mở rộng vết nứt.

Đặc tính thuỷ lực dòng chảy trong môi trường chất nền vữa xi măng và môi trường hạt cốt liệu thô đều tuân theo định luật Darcy như sau

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = -\frac{k}{\mu}\nabla p(\mathbf{x}), \tag{3}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u}(\mathbf{x}) = 0. \tag{4}$$

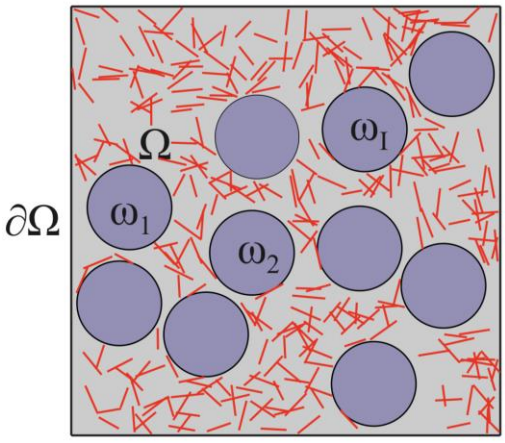
Đối với dòng chảy trong khe nứt, trong nghiên cứu này chúng ta mô tả nó bằng quy luật lập phương (cubic law) như sau

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = -\frac{\kappa_f}{\mu}\nabla p(\mathbf{x}) \tag{5}$$

với

$$\kappa_f = \frac{w^2}{12}. \tag{6}$$

Trong các phương trình (3), (4), (5), (6) nói trên $\mathbf{u}(\mathbf{x}), p(\mathbf{x})$ lần lượt là ký hiệu trường vận tốc và áp suất, μ là độ nhớt động lực học của chất lỏng (nước), κ_f là độ thấm của vết nứt, k là độ thấm của môi trường rỗng, ở đây nó có thể nhận một trong hai giá trị độ thấm của môi trường vữa xi măng hoặc độ thấm của môi trường cốt liệu thô, tuỳ thuộc vào vị trí điểm $\mathbf{x}$ xem xét.

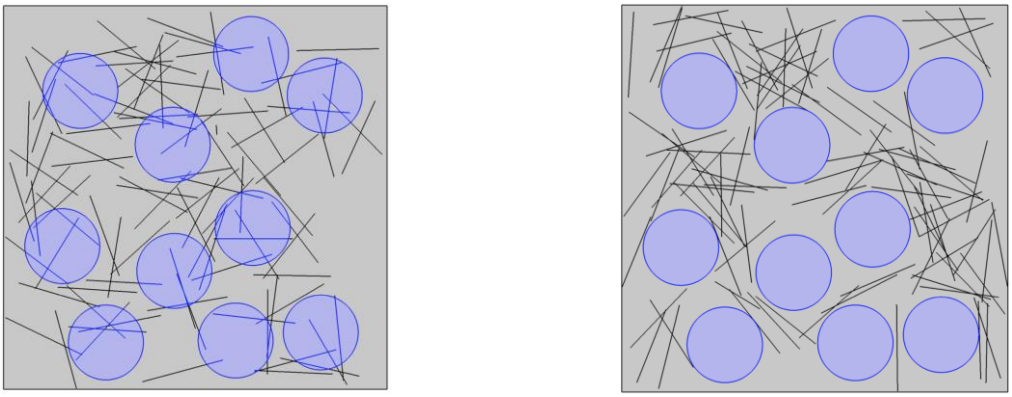


Hình 1. Mô hình mô phỏng mẫu bê tông bị nứt.

Biên $\partial\Omega$ của khối bê tông nói trên được được áp điều kiện áp suất tuân theo phương trình biểu diễn sau

$$p(\mathbf{x}) = G_1 x + G_2 y \quad \forall \mathbf{x} \in \partial\Omega. \tag{7}$$

Trong nghiên cứu này, trước tiên mẫu mô phỏng khối bê tông được xây dựng bằng cách khởi tạo một cách ngẫu nhiên vị trí tương đối của các hạt đại diện cốt liệu thô trong phạm vi miền vuông $L \times L$ với điều kiện các hạt cốt liệu không được phép giao cắt nhau. Tiếp đến các vết nứt được gieo ngẫu nhiên theo hai nguyên tắc tương ứng với hai trường hợp sau: (*i*) Vết nứt không cắt qua hạt cốt liệu, nói cách khác vết nứt chỉ xuất hiện trong miền vữa xi măng; (*ii*) Vết nứt cắt qua cả miền vữa xi măng và miền cốt liệu thô. Mô phỏng hai trạng thái vết nứt này được thể hiện trên hình 2 phía dưới. Đối với các hạt mô phỏng cốt liệu thô, thông số đặc trưng cho từng hạt là toạ độ vị trí tâm (x_c, y_c) và bán kính R. Đối với các vết nứt đơn thì thông số đặc trưng là toạ độ hai điểm đầu cuối của vết nứt $\mathbf{A}(x_A, y_A)$ và $\mathbf{B}(x_B, y_B)$. Các thông số này được khởi tạo ngẫu nhiên bằng lập trình thuật toán với phần mềm hỗ trợ Matlab. Sau đó các thông số này được nhập vào phần mềm ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn là Comsol Multyphysics để mô phỏng và tính toán.



Hình 2. Dạng hình thái phân bố vết nứt: Cắt qua cốt liệu (trái); Không cắt qua cốt liệu (phải).

Sau khi mô phỏng, gán tính chất vật liệu tương ứng với từng miền xem xét (vữa xi măng, cốt liệu và vết nứt), áp điều kiện biên và tính toán. Kết quả tính toán thu được được dùng để xác độ thấm có hiệu của mẫu mô hình bê tông bị nứt theo các biểu thức sau đây

$$\mathbf{k}^{eff} = -\frac{\bar{\mathbf{u}}}{\overline{\nabla p}}, \tag{8}$$

trong đó $\bar{\mathbf{u}}, \overline{\nabla p}$ là vận tốc và gradient áp suất trung bình trên toàn khối bê tông mô phỏng, chúng được xác định như sau

$$\bar{\mathbf{u}} = \langle \mathbf{u}(\mathbf{x}) \rangle = \frac{1}{L \times L} \int_{\Omega} \mathbf{u}(\mathbf{x}) \mathrm{d}\Omega, \tag{9}$$

$$\overline{\nabla p} = \langle \nabla p(\mathbf{x}) \rangle = \frac{1}{L \times L} \int_{\Omega} \nabla p(\mathbf{x}) \mathrm{d}\Omega, \tag{10}$$

trong đó ký hiệu $\langle \cdot \rangle$ là toán tử trung bình.

3. ÁP DỤNG SỐ VÀ PHÂN TÍCH

Để phân tích đặc tính thuỷ lực của mô hình mẫu bê tông bị nứt chúng ta tiến hành mô phỏng tính toán với các thông số vật liệu cụ thể được thống kê trong bảng dưới đây

Bảng 1. Thông số vật liệu mô hình.

Vật liệu	**Độ thấm** (m^2)	**Độ nhớt của của chất lỏng** ($Pa \cdot s$)
Vữa xi măng	$1,98\times10^{-16}$	$1,002\times10^{-3}$
Cốt liệu thô	$1,8\times10^{-14}$	$1,002\times10^{-3}$
Vết nứt	Quy luật lập phương	$1,002\times10^{-3}$

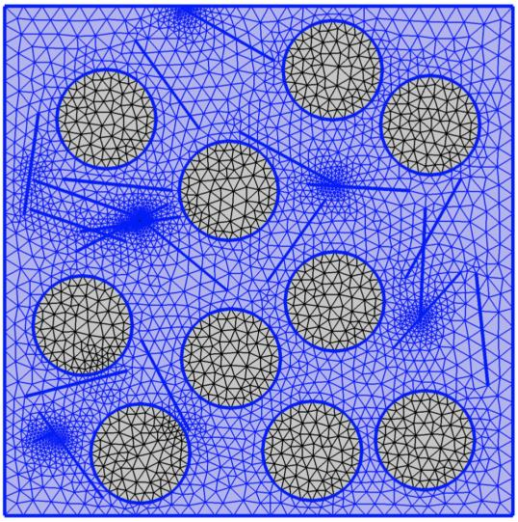
Trong nghiên cứu này chúng ta xem xét 04 hình thái phân bố vết nứt lần lượt được đặt tên tương ứng với 04 trường hợp mô tả cụ thể trong bảng 2 dưới đây, cả 4 trạng thái này đều có độ mở rộng vết nứt w=0,5 mm.

Bảng 2. Mô tả hình thái phân bố vết nứt của 04 trường hợp xem xét.

Tên trường hợp	**Vị trí tương đối của vết nứt đơn**	**Chiều dài vết nứt đơn**	**Biến thiên mật độ vết nứt**
TH1	Nằm trong miền vữa xi măng	$0,5R \div 0,8R$	$0 \div 0,1$
TH2	Cắt qua hạt cốt liệu thô	$0,5R \div 0,8R$	$0 \div 0,1$
TH3	Nằm trong miền vữa xi măng	$2R \div 2,3R$	$0 \div 0,1$
TH4	Cắt qua hạt cốt liệu thô	$2R \div 2,3R$	$0 \div 0,1$

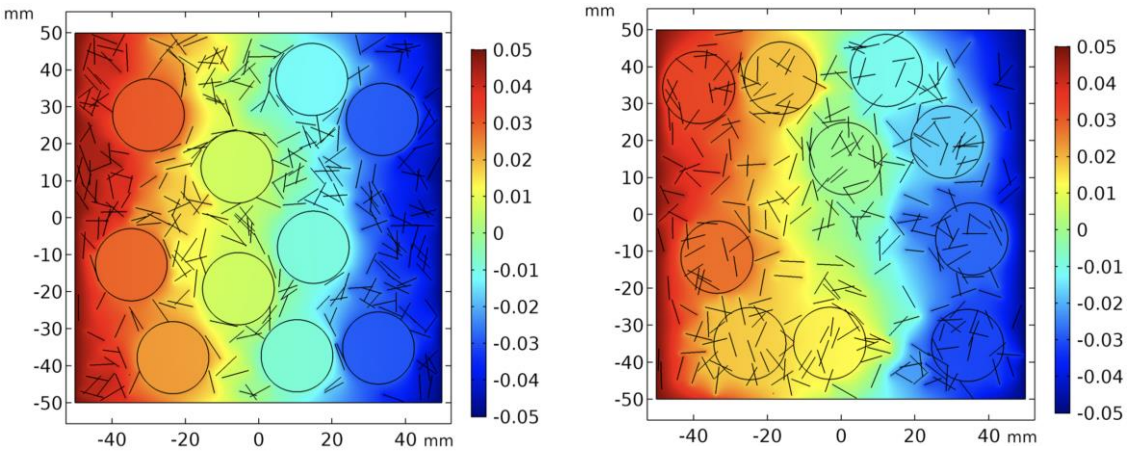
Mô hình mẫu bê tông được áp điều kiện biên áp suất như đã mô tả ở biểu thức số (7) với giá trị cụ thể $G_1 = -1, G_2 = 0.$

Tuỳ theo cấu trúc được tạo ra ngẫu nhiên mà mẫu mô hình được chia lưới với số lượng phần tử khác nhau giao động từ 6080 đến 70161 phần tử tam giác. Hình ảnh minh hoạ cho việc chia lưới miền tính toán được thể hiện trong hình vẽ dưới đây.

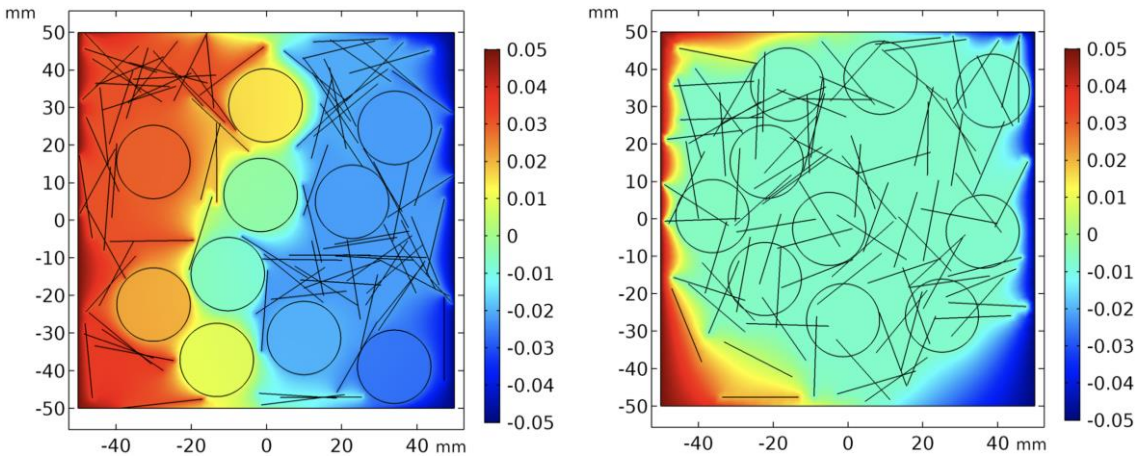


Hình 3. Hình ảnh rời rạc hoá miền tính toán bằng phần tử tam giác.

Sau khi mô phỏng tính toán thì trường kết quả được minh hoạ như các hình vẽ dưới đây tương ứng với 04 trường hợp phân bố hình thái vết nứt như đã thống kê ở bảng 2.



Hình 4. Trường áp suất tương ứng với TH1(trái) và TH2(phải).



Hình 5. Trường áp suất tương ứng với TH3(trái) và TH4(phải).

Kết quả của trường vận tốc và áp suất thu được sẽ được dùng để tính toán độ thấm có hiệu theo các biểu thức (8), (9) và (10). Trong nghiên nghiên cứu này tác giả thực hiện 10 lần gieo ngẫu nhiên trạng thái phân bố vết nứt cũng như vị trí hạt cốt liệu thô cho mỗi trường hợp thống kê ở bảng 2, sau đó giá trị độ thấm trung bình của các lần gieo được tính toán theo công thức Monte Carlo, công thức này cũng được sử dụng trong công bố của Lachihab và Sab [10,11] khi tính toán giá trị trung bình các đại lượng đặc trưng của các lần gieo ngẫu nhiên hình thành cấu trúc vi mô của vật liệu nhiều thành phần. Theo đó giá trị trung bình độ thấm có thể xác định như sau

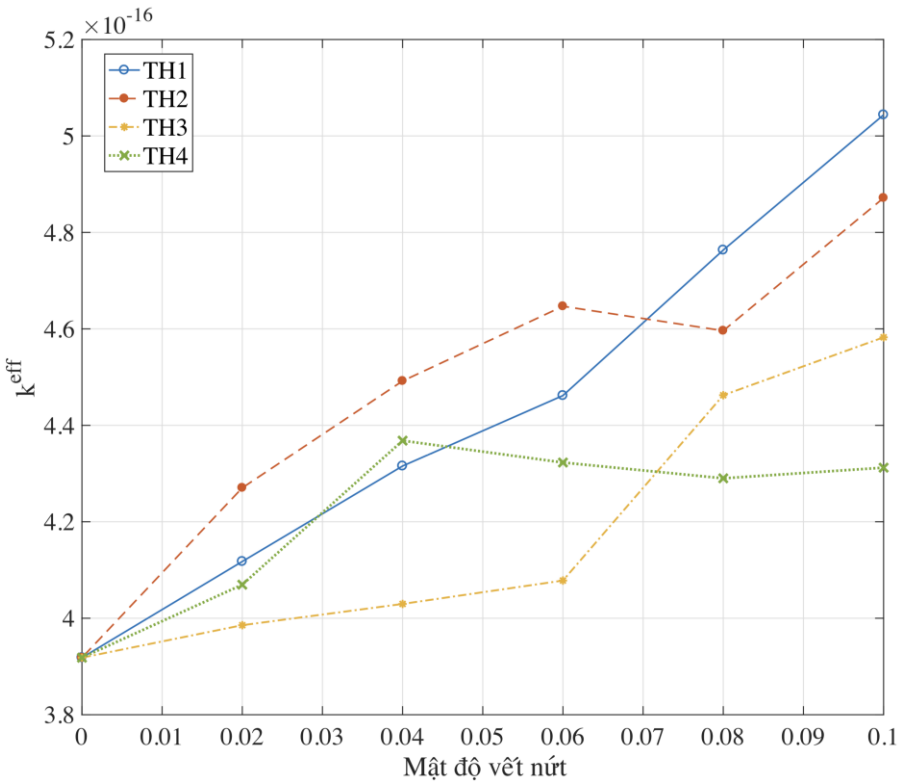
$$\bar{\bullet}_N = \frac{1}{N}(\bullet_1 + \mathrm{K} + \bullet_N), \tag{11}$$

trong đó $\cdot$ là đại lượng cần tính giá trị trung bình (ở đây là độ thấm có hiệu), N là số mẫu mô hình được khởi tạo bằng gieo ngẫu nhiên. Phương sai và sai số tương đối của giá trị trung bình được xác định lần lượt theo hai biểu thức dưới đây

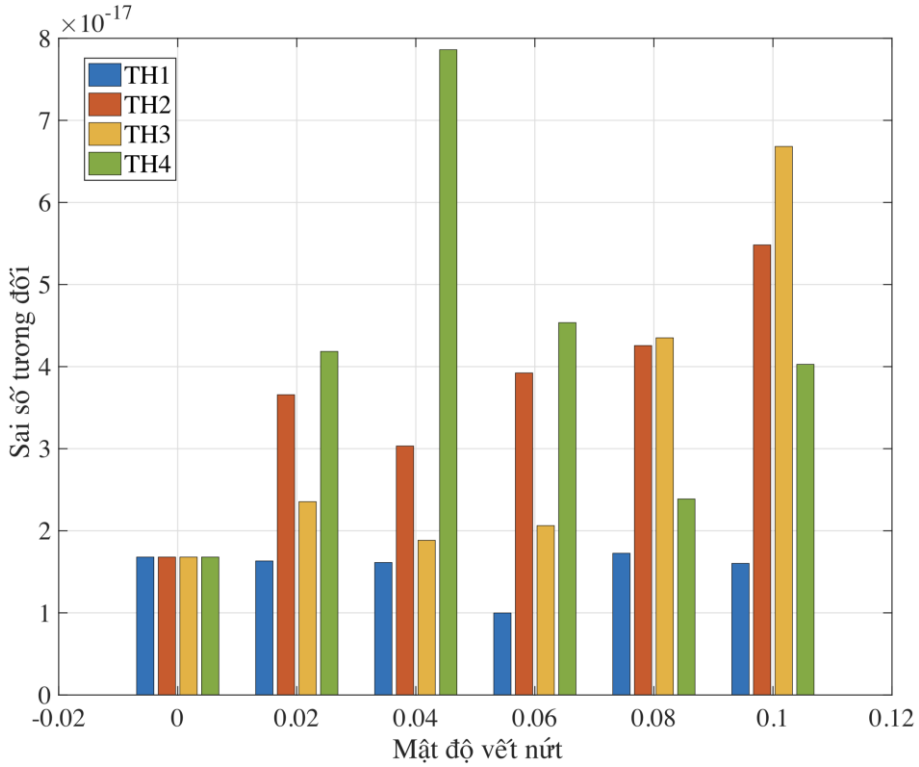
$$\delta_N^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\bullet_i - \bar{\bullet}_N), \tag{12}$$

$$\zeta_N = 1{,}96\frac{\delta_N}{\bar{\bullet}\sqrt{N}}. \tag{13}$$

Chúng ta biểu diễn trên hình 6 và 7 sự biến thiên độ thấm có hiệu trung bình và sai số của nó theo sự thay đổi của mật độ vết nứt.



Hình 6. Biến thiên độ thấm trung bình theo mật độ vết nứt.



Hình 7. Sai số tương đối thay đổi theo mật độ vết nứt.

Trên cơ sở hai biểu đồ nêu trên chúng ta đưa ra những nhận xét sau đây. Về cơ bản khi mật độ vết nứt tăng thì độ thấm có hiệu của mẫu mô hình bê tông cũng tăng, điều này là hợp lý về mặt xu hướng. So sánh tương quan thì vết nứt ngắn (TH1&TH2) có xu hướng làm tăng độ thấm tổng thể so với vết nứt dài (TH3&TH4) khi có cùng mật độ vết nứt như nhau. Đối với cùng loại vết nứt thì dạng phân bố vết nứt cắt qua cốt liệu (TH2&TH4) có xu hướng làm tăng độ thấm có hiệu so với vết nứt không cắt qua cốt liệu (TH1&TH3), tuy nhiên khi mật độ vết nứt lớn hơn 0,08 thì biểu đồ lại theo xu hướng ngược lại, điều này có thể giải thích bởi biểu đồ sai số tương đối như sau: Nhìn trên biểu đồ sai số tương đối (hình 7) chúng ta thấy rằng sai số cho TH2&TH3 (màu cam và vàng) có giá trị tăng vọt điều này giải thích rằng trong các giá trị lấy trung bình có giá trị khác biệt hoàn toàn so với các giá trị còn lại, như vậy việc gieo mẫu ngẫu nhiên có thể chưa đủ lớn để đạt được giá trị trung bình thực sự, điều này phần nào lý giải cho xu hướng về độ thấm (hình 6) không còn theo quy luật khi mật độ vết nứt là 0,08. Ở vị trí mật độ vết nứt bằng 0,04 chúng ta nhận thấy sai số của TH4 tăng vọt điều này lý giải tại sao giá trị độ thấm của mô hình vết nứt dài lớn hơn vết nứt ngắn (trái với nhận xét khái quát đã nói ở trên), hiện tượng này có thể được khắc phục bằng cách loại bỏ giá trị khác biệt hoặc tăng số lần gieo ngẫu nhiên trạng thái vết nứt nhằm tìm ra giá trị trung bình có sai số phù hợp. Nhận xét cuối cùng đó là sai số của mỗi trường hợp có giá trị khá chênh lệch như vậy để đạt được kết quả chính xác hơn trong mối tương quan giữa các trường hợp phân bố vết nứt chúng ta cần phải tăng số lần gieo ngẫu nhiên lớn hơn 10 hoặc khống chế một giá trị sai số nhất định cần đạt được cho tất cả các trường hợp của trạng thái vết nứt, khi đó các nhận định tương quan về mối quan hệ giữa các trường hợp phân bố vết nứt ảnh hưởng đến độ thấm có hiệu của mẫu mô hình bê tông sẽ được rõ ràng hơn. Tuy nhiên trong nghiên cứu này do

điều kiện hạn chế về thời tính toán cũng như tài nguyên máy tính, tác giả mới chỉ dừng lại ở việc tính toán cho 10 lần gieo ngẫu nhiên.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã chỉ ra ảnh hưởng của mật độ vết nứt cũng như trạng thái phân bố vết nứt đến độ thấm tổng thể của một mô hình mẫu bê tông, bên cạnh đó vai trò ảnh hưởng của cốt liệu thô cũng được tính đến trong bài báo này. Tác giả đã xây dựng thành công thuật toán gieo ngẫu nhiên vị trí hạt cốt liệu cũng như vết nứt, phân biệt được hai trường hợp vết nứt cắt qua hoặc không cắt hạt cốt liệu, điều này giúp mô phỏng sát hơn với thực tế làm việc của môi trường vật liệu bê tông xi măng. Nhược điểm của nghiên cứu trình bày trong bài báo này đó là số lần gieo ngẫu nhiên chưa đủ lớn để thể hiện một cách rõ rệt xu hướng ảnh hưởng của mật độ và hình thái vết nứt đến độ thấm có hiệu, đây chính là hướng phát triển tiếp theo của tác giả đối với chủ đề này. Nghiên cứu trên đây có thể được sử dụng như một kênh tham khảo cho sinh viên, học viên cao học trong các công tác chuyên môn liên quan đến chủ đề thấm và nứt trong kết cấu bê tông.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. H.W. Reinhardt, Penetration and permeability of concrete: barriers to organic and contaminating liquids, RILEM Report 16, E&FN Spon, London, (1997).

[2]. C. Hall, W.D. Hoff, Water Transport in Brick, Stone and Concrete, Spon Press, London, (2012).

[3]. L. Basheer, J. Kropp, D.J. Cleland. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. Constr. Build. Mater., 15 (2001) 93–103. https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00058-1

[4]. M. N. Vu, S. T. Nguyen, M. H. Vu, Modeling of fluid flow through fractured porous media by a single boundary integral equation, Eng. Anal. Boundary Elem., 59 (2015) 166-171. https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2015.06.003

[5]. I. I. Bogdanov, V. V. Mourzenko, J. F. Thovert, Effective permeability of fractured porous media in steady state flow, Water Resour. Res., 39 (2003) 13/1-13/16. https://doi.org/10.1029/2001WR000756

[6]. M. Choinska, H. Al-Khazraji, N. Benkemoun, A. Khelidj, Influence of tensile cracking and of aggregate size on concrete permeability, MATEC Web of Conferences, 163 (2018) 02001. https://doi.org/10.1051/matecconf/201816302001

[7]. Y. Cao, J. E. Kilough, An Improved Boundary Element Method for Modeling Fluid Flow through Fractured Porous Medium, SPE Reservoir Simulation Conference, Montgomery, Texas, USA, February 2017, ISBN: 978-1-61399-483-2. https://doi.org/10.2118/182658-MS

[8]. T. Chen, Equivalent Permeability Distribution for Fractured Porous Rocks: Correlating Fracture Aperture and Length, Geofluids, 2020 (2020) 8834666. https://doi.org/10.1155/2020/8834666

[9]. A. Pouya, M. N. Vu, Numerical Modelling of Steady-State Flow in 2D Cracked Anisotropic Porous Media by Singular Integral Equations Method, Transp. Porous Med., 93 (2012) 475-493. 10.1007/s11242-012-9968-1

[10]. A. Lachihab, K. Sab, Aggregate composites: a contact based modeling, Comput. Mater., 33 (2005) 467-490. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2004.10.003

[11]. A. Lachihab, K. Sab, Does a representative volume element exist for fatigue life prediction? The case of aggregate composites, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 32 (2008) 1005-1021. https://doi.org/10.1002/nag.655