



THE EFFECT OF POROSITY ON THE STRENGTH OF PREVIOUS CONCRETE

Tran Bao Viet^{1,2}

¹*Construction Engineering Faculty, University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam.*

²*Research and Application Center for Technology in Civil Engineering, University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam.*

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 17/5/2019

Revised: 11/6/2019

Accepted: 17/6/2019

Published online: 16/9/2019

<https://doi.org/10.25073/tcsj.70.1.43>

* *Corresponding author*

Email: viettb@utc.edu.vn

Abstract. A novel micromechanical models are developed to predict the relationship between the porosity and the strength of the previous concrete material. Based on the three phase composite sphere assemblage model with coated pore-concrete inclusions embedded in a fictitious effective medium then the strain, stress mean fields and the effective properties of material are constructed. Illustrative applications are reported by comparing the theoretical predictions with the experimental to show pertinence of model.

Keywords: previous concrete, strength, porosity

© 2019 University of Transport and Communications



ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ RỠNG TỚI CƯỜNG ĐỘ BÊ TÔNG ĐỘ RỠNG CAO

Trần Bảo Việt^{1,2}

¹Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội.

²Trung tâm nghiên cứu và ứng dụng công nghệ xây dựng, 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: 17/5/2019

Ngày nhận bài sửa: 11/6/2019

Ngày chấp nhận đăng: 17/6/2019

Ngày xuất bản Online: 16/9/2019

<https://doi.org/10.25073/tcsj.70.1.43>

* Tác giả liên hệ

Email: viettb@utc.edu.vn

Tóm tắt: Bài báo có nội dung chính là thiết lập mối quan hệ giải tích giữa độ rỗng và cường độ của vật liệu bê tông rỗng. Dựa trên mô hình cải tiến 3 pha quả cầu lồng nhau với pha lỗ rỗng hình cầu được bao quanh bởi lớp vỏ vật liệu bê tông nằm trong miền vật liệu trung bình, trường ứng suất và biến dạng của vật liệu được tính toán, từ đó các đặc trưng trung bình về mô đun đàn hồi và cường độ được thiết lập phụ thuộc vào các thông số của vật liệu. Một số so sánh giữa kết quả lý thuyết và thực nghiệm được thực hiện để kiểm chứng hiệu quả của mô hình.

Từ khóa: bê tông rỗng, cường độ, độ rỗng

© 2019 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vật liệu rỗng được cấu thành từ cấu trúc rắn liên tục sắp xếp có trật tự hoặc ngẫu nhiên tạo thành bộ khung và giữa chúng tồn tại những khoảng không gian trống gọi là lỗ rỗng được lấp đầy bởi chất lưu (chất lỏng, chất khí, ga). Vật liệu rỗng tồn tại nhiều trong tự nhiên như đất đá, gỗ, xương ... hoặc các vật liệu nhân tạo như sứ, kim loại, bê tông, nhựa có độ rỗng cao nhằm phục vụ các ứng dụng quan trọng trong thực tế như quản lý năng lượng, giảm chấn, cách âm, cách nhiệt, thấm nước, sản phẩm y tế ... Một trong những ứng dụng quan trọng của vật liệu rỗng trong ngành xây dựng là bê tông có độ rỗng cao dùng để chế tạo lớp phủ có khả năng thấm

nước tự nhiên. Giải pháp này có tên gọi là hệ thống thoát nước mặt bền vững (Sustainable Drainage Systems – SUDS). Trái với hệ thống thoát nước truyền thống, hệ thống thoát nước mặt bền vững là giải pháp làm tăng khả năng thấm nước tự nhiên trên bề mặt phủ. Tại Việt Nam, hệ thống thoát nước bền vững nói chung và đặc trưng cơ lý, cấu tạo của các lớp vật liệu rỗng cấu thành hệ thống nói riêng đã được triển khai nghiên cứu và thí điểm ứng dụng thông qua một số đề tài khoa học.

Tuy vậy, vật liệu bê tông rỗng có đặc điểm là đặc trưng hư hại được biểu hiện thông qua giá trị cường độ hay sức bền chịu phá huỷ có xu hướng thấp hơn so với vật liệu bê tông thông thường. Hai đặc trưng cường độ và độ rỗng của vật liệu nói chung là có xu hướng tỉ lệ nghịch với nhau, khi cường độ càng cao thì lỗ rỗng càng giảm, khả năng truyền vật chất giảm đi và ngược lại. Bài toán xác định mối quan hệ giữa hai đặc trưng trên, và bước cao hơn là tối ưu hóa mối quan hệ đó là bài toán phức tạp trong khoa học [1].

Để dự báo mối quan hệ trên thì thông thường các nghiên cứu dựa trên hai cách tiếp cận, mô hình giải tích và mô hình số. Các phương pháp số mô tả đặc trưng hư hại trong vật liệu bất đồng nhất có tính đến ảnh hưởng của cấu trúc vi mô của vật liệu là chủ đề thú vị. Cường độ chịu lực của bê tông có độ rỗng cao phụ thuộc nhiều vào sự phân bố các lỗ rỗng và khả năng phát triển của vết nứt trong loại vật liệu này. Phương pháp Phần tử hữu hạn và tiếp theo là phương pháp phần tử hữu hạn mở rộng (XFEM) hoặc phương pháp Trường pha (phase – field method – PFM) [2] được phát triển cho phép tính toán chính xác thời điểm và diễn tiến của quá trình hư hại vật liệu bê tông độ rỗng cao. Tuy nhiên tính phức tạp và khả năng khó áp dụng thực tế ở cấp độ Kỹ sư là nhược điểm lớn nhất của phương pháp số.

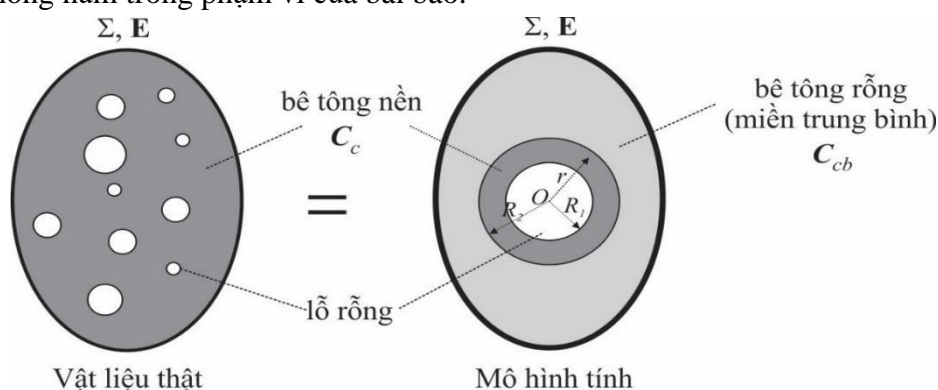
Ngược lại, các phương pháp giải tích, bán giải tích hoặc xấp xỉ thực nghiệm có mục tiêu xây dựng các công thức tính toán đơn giản, dễ áp dụng dựa trên các giả thiết về điều kiện biên và lý tưởng hóa tính chất cơ học và hình học của các pha vật liệu. Điều này cho phép các công thức lý thuyết dễ áp dụng nhưng khó để mô tả chính xác những tính chất cho vật liệu cụ thể. Thường kết quả lý thuyết là những miền phỏng đoán làm cơ sở đối chiếu với phương pháp số hoặc thực nghiệm.

Một số công thức bán giải tích về mối quan hệ cường độ - độ rỗng của bê tông độ rỗng cao có thể tìm thấy trong một vài công bố trong lịch sử [3, 4]. Các mô hình này là các đường xấp xỉ thực nghiệm. Gần đây, một số tác giả dựa trên việc xây dựng trường ứng suất cục bộ bao quanh lỗ rỗng để từ đó xác định giá trị cường độ vật liệu. Năm 2013, Du và cộng sự xây dựng mô hình dựa trên mô hình cầu rỗng 2 pha hữu hạn để xác định cường độ chịu kéo của vật liệu bê tông rỗng [4]. Năm 2018, Li và cộng sự [5] xây dựng quan hệ cường độ chịu nén, chịu kéo của vật liệu dựa trên bài toán một quả cầu rỗng trên miền vô hạn. Cả hai nghiên cứu này đều không tính đến đặc trưng đàn hồi của vật liệu bê tông và ngưỡng độ rỗng tối đa.

Vì vậy, xây dựng công thức xấp xỉ giải tích mới dựa trên cơ sở cơ học vật liệu, tiếp cận đa tỉ lệ, khắc phục được các nhược điểm của các nghiên cứu trên và kiểm chứng thực nghiệm thành công là nội dung chính của bài báo này.

2. XÂY DỰNG TRƯỜNG ỨNG SUẤT VÀ BIẾN DẠNG

Chúng ta bắt đầu bằng việc xem xét môi trường vật liệu gồm các lỗ rỗng được bao quanh bởi khung bê tông. Bê tông xem như đàn hồi tuyến tính và đẳng hướng đặc trưng bởi độ cứng C_c (gồm hai mô đun đàn hồi thể tích và trượt K_c, μ_c) và giá trị cường độ chịu kéo S_{t0} , cường độ chịu nén S_{c0} . Pha rỗng gồm các hình cầu giả thiết không có áp lực, có độ rỗng p và phân bố đều. Có thể xem như đây là một dạng vật liệu composite với pha cốt là lỗ rỗng và pha nền là bê tông (Hình 1). Việc xác định tính chất trung bình của dạng vật liệu này là hướng nghiên cứu phổ biến, khi độ rỗng tăng lên các tính chất cơ học trung bình của vật liệu sẽ giảm xuống. Luật ứng xử trung bình của bê tông rỗng (gồm pha rỗng và nền bê tông) do đó là đàn hồi tuyến tính đặc trưng bởi độ cứng C_{cp} (K_{cp}, μ_{cp}) và các giá trị cường độ chịu kéo và nén S_t, S_c . Xây dựng các mối liên hệ giữa các đại lượng trình bày trên đây là chủ đề chính của nghiên cứu. Cần phân biệt rằng vật liệu nghiên cứu gọi là bê tông rỗng gồm hai phần: phần lỗ rỗng kích thước lớn và phần nền là vật liệu bê tông thông thường gồm các pha cốt liệu và các lỗ rỗng vi mô. Ảnh hưởng của pha cốt liệu và lỗ rỗng vi mô tới tính chất vật liệu bê tông nền là chủ đề nghiên cứu khác và không nằm trong phạm vi của bài báo.



Hình 1. Minh họa sơ đồ tính.

Giả thiết tải trọng ở biên dưới dạng ứng suất Σ hoặc hoặc biến dạng đồng nhất E , do bài toán là đàn hồi tuyến tính nên ta có:

$$\Sigma = C_{cp} : E = (3K_{cp}J + 2\mu_{cp}K) : E, \quad (1)$$

hoặc ngược lại:

$$E = S_{cp} : \Sigma = \left(\frac{1}{3K_{cp}}J + \frac{1}{2\mu_{cp}}K \right) : \Sigma. \quad (2)$$

$J = 1/31 \otimes 1$ và $K = I - J$, với I và 1 là tenxơ đơn vị bậc 4 và bậc 2; J, K được gọi lần lượt là ten-xơ đơn vị cầu và ten-xơ đơn vị lệch, có vai trò quan trọng trong tính toán bài toán đẳng hướng.

Để xác định trường ứng suất và biến dạng trên các miền của vật liệu ta coi vật liệu có dạng 3 pha quả cầu lồng nhau như Hình 1. Lỗ rỗng giả thiết hình cầu đường kính R_1 được bao bởi lớp vỏ là bê tông có đường kính ngoài R_2 , cả hệ được đặt trong miền vô hạn giả tưởng có tính chất của bê tông rỗng. Giá trị biến dạng trung bình của bê tông nền, lỗ rỗng và ứng suất trung bình của bê tông nền được xác định lần lượt theo các công thức

$$\mathbf{E}_c = \mathbf{A}_c : \mathbf{E} = (A_c^s \mathbf{J} + A_c^d \mathbf{K}) : \mathbf{E}, \quad \mathbf{E}_p = \mathbf{A}_p : \mathbf{E} = (A_p^s \mathbf{J} + A_p^d \mathbf{K}) : \mathbf{E}, \quad (3)$$

$$\mathbf{\Sigma}_c = \mathbf{B}_c : \mathbf{\Sigma} = (B_c^s \mathbf{J} + B_c^d \mathbf{K}) : \mathbf{\Sigma}. \quad (4)$$

\mathbf{A}_p ký hiệu ten-xơ tập trung biến dạng ở miền lỗ rỗng, $\mathbf{A}_c, \mathbf{B}_c$ lần lượt là ten-xơ tập trung biến dạng và ten-xơ tập trung ứng suất của bê tông, có mối liên hệ theo công thức

$$B_c^s = \frac{K_c}{K_{cp}} A_c^s, B_c^d = \frac{\mu_c}{\mu_{cp}} A_c^d. \quad (5)$$

Để tính toán giá trị A_c^s, A_p^s ta dựa trên bài toán với tải trọng thủy tĩnh $\mathbf{E} = E_0 \mathbf{1}$ trong khi thành phần lệch A_c^d, A_p^d được tính toán dựa trên bài toán cắt $\mathbf{E} = E_0 (e_1 \otimes e_2 + e_2 \otimes e_1)$. Chiến lược tính toán được trình bày cụ thể như sau.

Với bài toán tải trọng thủy tĩnh, vật liệu chịu biến dạng đều $\mathbf{E} = E_0 \mathbf{1}$ tại biên. Trường chuyển vị tại điểm bất kỳ trong hệ tọa độ cầu có dạng [6].

$$u_i^r = F_i r + G_i / r^2, \quad (6)$$

$$\sigma_i^r = 3K_i F_i - 4\mu_i G_i / r^3 \quad (7)$$

$i = (p, c, cp)$ tương ứng với 3 miền lỗ rỗng, vật liệu nền và bê tông rỗng; $K_p = \mu_p = 0$, F_i, G_i là các hằng số được xác định theo 6 phương trình cân bằng sau:

- $r = 0 \rightarrow G_p = 0$
- $r = \infty \rightarrow F_{cp} = E_0$
- $r = R_1, R_2 \rightarrow 4$ phương trình cân bằng là kết quả sự liên tục về chuyển vị và lực tại biên R_1, R_2 .

Biến dạng trung bình tại miền bán kính r được tính theo công thức

$$\boldsymbol{\varepsilon}_r = \int_r \mathbf{u}(\mathbf{x}) \otimes \mathbf{n}(\mathbf{x}) d\mathbf{S}. \quad (8)$$

Với $\mathbf{u}(\mathbf{x}), \mathbf{n}(\mathbf{x})$ là các véc tơ chuyển vị và véc tơ pháp tuyến tại biên.

Thay (6) vào (8) ta có biến dạng tại miền lỗ rỗng ($r = R_1$) và miền lỗ rỗng giao với vật liệu bê tông nền ($r = R_2$) lần lượt là:

$$\mathbf{E}_p = F_p \mathbf{1} \text{ và } \mathbf{E}_{p \cup c} = (F_c + G_c / R^3) \mathbf{1}. \quad (9)$$

Biến dạng trung bình của pha bê tông nền có thể tính được theo (9) nhờ mối liên hệ

$$\mathbf{E}_{p \cup c} = \frac{R_1^3}{R_2^3} \mathbf{E}_p + \frac{R_2^3 - R_1^3}{R_2^3} \mathbf{E}_c \quad (10)$$

Từ (3), (9) và (10), ta có thể tính được thành phần cầu của ten-xơ tập trung biến dạng cho phần bê tông nền và pha lỗ rỗng

$$A_c^s = \frac{-(3K_{cp} + 4\mu_{cp})\mu_c}{3pK_c(\mu_c - \mu_{cp}) - \mu_c(3K_c - 4\mu_{cp})}, \quad (11)$$

$$A_p^s = -\frac{1}{4} \frac{(3K_{cp} + 4\mu_{cp})(3K_c + 4\mu_c)}{3pK_c(\mu_c - \mu_{cp}) - \mu_c(3K_c - 4\mu_{cp})}. \quad (12)$$

Với trường hợp bài toán chịu cắt sẽ cho phép tính thành phần lệch của ten-xơ tập trung biến dạng A_c^d, A_p^d , cách làm tương tự như trên nhưng kết quả phức tạp có thể tham khảo trong nghiên cứu của chúng tôi [7].

3. TÍNH TOÁN MÔ ĐUN ĐÀN HỒI BÊ TÔNG RỖNG

Sau khi tính toán được trường ứng suất, biến dạng trung bình tại các miền của vật liệu. Giá trị của các hệ số đàn hồi trung bình của vật liệu có thể được tính dựa trên sơ đồ tự tương hợp dạng tổng quát mở rộng bằng cách giải hệ phương trình tự tương hợp như sau:

$$\frac{p_m(1-p/p_m)K_c A_c^s + (1-p_m)K_c A_{c0}^s}{pA_p^s + (1-p)A_c^s + (1-p_m)A_{c0}^s} - K_{cp} = 0 \quad (13)$$

và

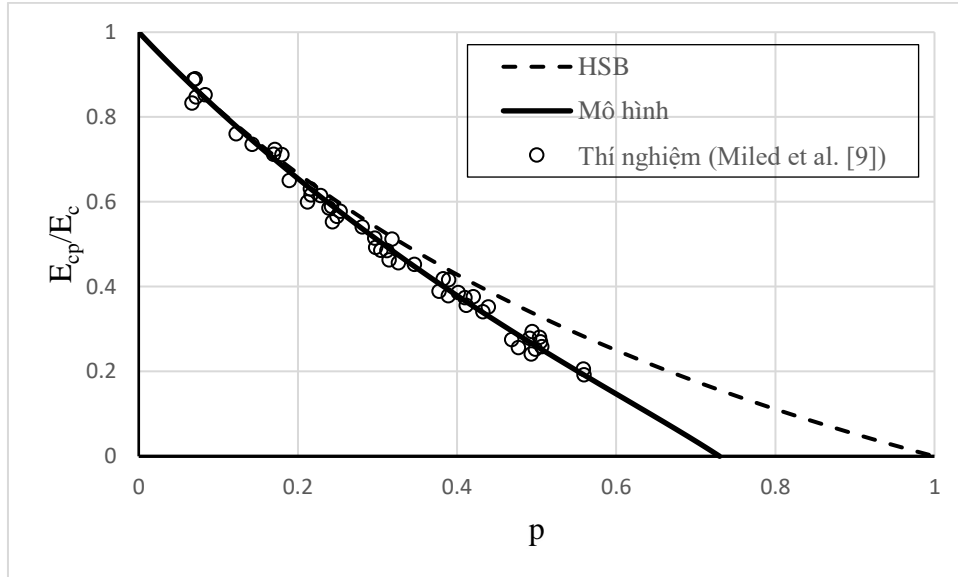
$$\frac{p_m(1-p/p_m)\mu_c A_c^d + (1-p_m)\mu_c A_{c0}^d}{pA_p^d + (1-p)A_c^d + (1-p_m)A_{c0}^d} - \mu_{cp} = 0. \quad (14)$$

Mô đun đàn hồi và hệ số nở ngang có thể được tính thông qua mối liên hệ với mô đun trượt và mô đun thể tích

$$E = \frac{9K\mu}{3K+\mu}; \nu = \frac{3K-2\mu}{6K+2\mu}. \quad (15)$$

Với A_{c0}^s, A_{c0}^d lần lượt là giá trị của A_c^s, A_c^d khi $p = 0$ và p_m là giá trị độ rỗng tối đa có thể đạt được của vật liệu. Cách thức xây dựng phương trình tự tương hợp (13), (14) có thể được tham khảo trong công bố của Marcadon và cộng sự [8], tuy nhiên việc phát triển cho vật liệu rỗng lần đầu tiên được thực hiện. Ưu thế của phương pháp này cho phép đánh giá chính xác khi giá trị độ rỗng lớn do được đưa thêm vào tham số độ rỗng tối đa.

Để đánh giá hiệu quả, chúng tôi so sánh giá trị mô đun đàn hồi tính toán tại công thức (13), (14) với kết quả thực nghiệm được thực hiện bởi Miled và cộng sự [9] cho mô đun đàn hồi của bê tông nhẹ có độ rỗng cao với hệ số nở ngang của vật liệu nền được lấy bằng 0,2. Hình 2 giới thiệu so sánh giữa mô hình lý thuyết trình bày trong bài báo (đường kẻ đậm) với kết quả thí nghiệm và mô hình truyền thống Hashin-Strickman (HSB). Mô hình đề xuất phản ánh khá tốt kết quả thực nghiệm do đưa vào tham số độ rỗng tối đa $p_m = 0,74$ là giá trị được giới thiệu bởi Miled và cộng sự.



Hình 2. So sánh mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm của Miled và cộng sự [9] về mối quan hệ giữa mô đun đàn hồi và độ rỗng.

4. TÍNH TOÁN CƯỜNG ĐỘ BÊ TÔNG RỖNG

Đóng góp lớn nhất của bài báo đến ở phần này với mục tiêu xây dựng công thức xác định giá trị cường độ chịu nén và kéo của bê tông rỗng. Để xác định cường độ chịu kéo của bê tông, ta giả thiết đặt tải trọng thủy tĩnh đều $\Sigma = \Sigma \mathbf{1}$ tại biên của vật liệu, dựa theo phương trình (4), (5) giá trị ứng suất trung bình chịu kéo của vật liệu bê tông Σ_c được tính toán theo công thức sau:

$$\Sigma_c = \Sigma_c \mathbf{1} = \mathbf{B}_c : \Sigma = (\mathbf{B}_c^s \mathbf{J} + \mathbf{B}_c^d \mathbf{K}) : \mathbf{1} \Sigma = \frac{K_c}{K_{cp}} A_c^s \Sigma \quad (16)$$

$$\Rightarrow \Sigma_c = \frac{K_c}{K_{cp}} A_c^s \Sigma. \quad (17)$$

Khi bê tông nền đạt tới cường độ chịu kéo $\Sigma_c = S_{t0}$ đồng nghĩa với việc giá trị tải trọng đạt ngưỡng cường độ chịu kéo của cả vật liệu bê tông rỗng. Khi đó ta có công thức liên hệ giữa cường độ chịu kéo của bê tông rỗng với các tham số vật liệu

$$S_t = \frac{K_{cp}}{K_c} \frac{1}{A_c^s} S_{t0}. \quad (18)$$

Trong công thức (18), giá trị cường độ chịu kéo trung bình của bê tông rỗng được tính toán dựa trên cường độ kéo của vật liệu bê tông nền, độ rỗng của vật liệu và các hệ số đàn hồi của bê tông nền. Giá trị K_{cp}, μ_{cp} có thể được tính toán từ thực nghiệm hoặc theo công thức lý thuyết tại hệ phương trình (13) và (14).

Tuy vậy trong thực tế, cường độ chịu nén của bê tông là thông số được quan tâm nhiều hơn. Để tính toán trong trường hợp này, tải trọng tại biên cần có dạng nén một trục với $\Sigma = \Sigma e_3 \otimes e_3$. Khi đó công thức (16) sẽ có dạng khá phức tạp do bài toán không còn ở dạng đối xứng cầu. Phá hủy sẽ xảy ra ở đỉnh hình cầu theo phương tải trọng trục (e_3). Việc xây dựng giá trị ứng suất kéo theo phương chu vi tại điểm này là công việc khá phức tạp và rất khó có khả năng ứng dụng tại cấp độ kỹ sư. Để đơn giản hóa chúng tôi đề xuất một công thức bán giải tích dựa trên quan hệ cường độ chịu kéo và chịu nén đã được thừa nhận [10]

$$S_t = \lambda(S_c)^n. \quad (19)$$

Trong đó λ, n là các hệ số phụ thuộc vào loại bê tông, số mũ n thường có giá trị từ 1/2 tới 3/4 hoặc tùy theo các nghiên cứu cụ thể. Thay (19) vào (18) ta có mô hình bán giải tích xác định cường độ chịu nén của bê tông độ rỗng cao

$$S_c = \left(\frac{K_{cp}}{K_c} \frac{1}{A_c^s} \right)^{1/n} S_{c0}. \quad (20)$$

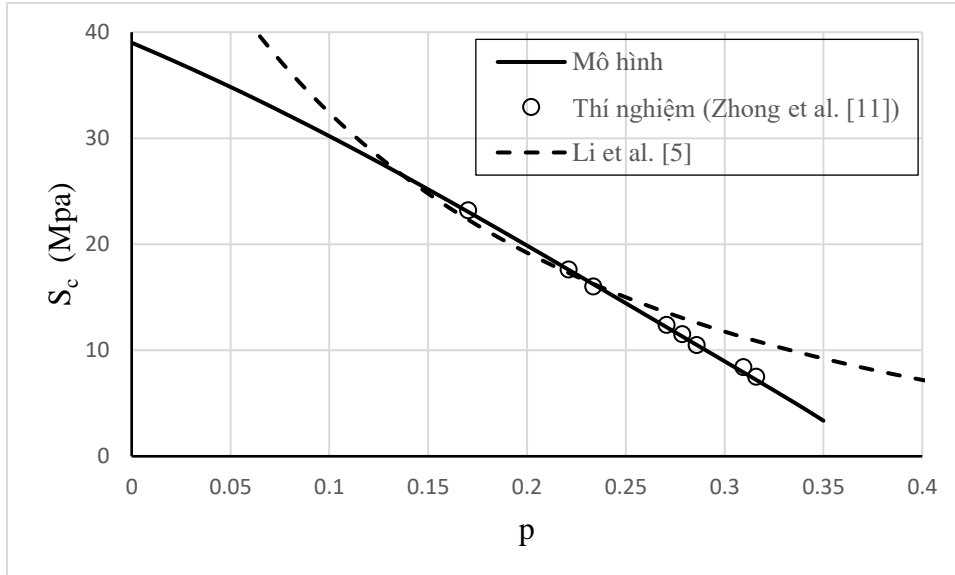
Khác với hầu hết các mô hình hiện tại, mô hình tại công thức (20) được xây dựng từ trường ứng suất vi mô của vật liệu do đó chứa đựng đầy đủ các thông tin về vật liệu như các hệ số đàn hồi của vật liệu bê tông nền, độ rỗng, độ rỗng tối đa. Cần nhắc lại rằng độ rỗng tối đa và cường độ của bê tông nền là các tham số của mô hình, phụ thuộc vào từng vật liệu cụ thể và có thể xác định bằng lý thuyết hoặc thực nghiệm. Trong trường hợp chưa xác định, các giá trị này có thể xem như là biến tự do được dùng để xấp xỉ với các kết quả thực nghiệm. Điều kiện biên của các mô hình tính ở đây là các giả thiết về biến dạng nhỏ, trạng thái dừng, liên kết lý tưởng giữa các pha, sự đồng nhất không gian của vật liệu, bỏ qua ảnh hưởng chế độ thủy nhiệt và không tồn tại trường ứng suất hoặc biến dạng trước.

Để minh họa tính hữu ích của mô hình, tác giả quan tâm tới so sánh mô hình lý thuyết với thí nghiệm đề xuất gần đây bởi và Zhong và cộng sự năm 2016 [11] (hình 3). Các thông số mô hình được thể hiện tại bảng 1. Để thể hiện hiệu quả của phương pháp, mô hình lý thuyết được đề xuất trong bài báo sẽ được so sánh với kết quả thực nghiệm và mô hình giải tích được đề xuất gần đây năm 2018 bởi Li và cộng sự [5]. Mô hình của Li là mô hình giải tích thuần túy gần nhất được công bố dựa trên việc phân tích trường ứng suất quanh hình cầu trong miền vô hạn. Rõ ràng rằng việc bỏ qua các thông tin liên quan tới tính chất vật liệu làm giảm hiệu quả của mô hình đề xuất này.

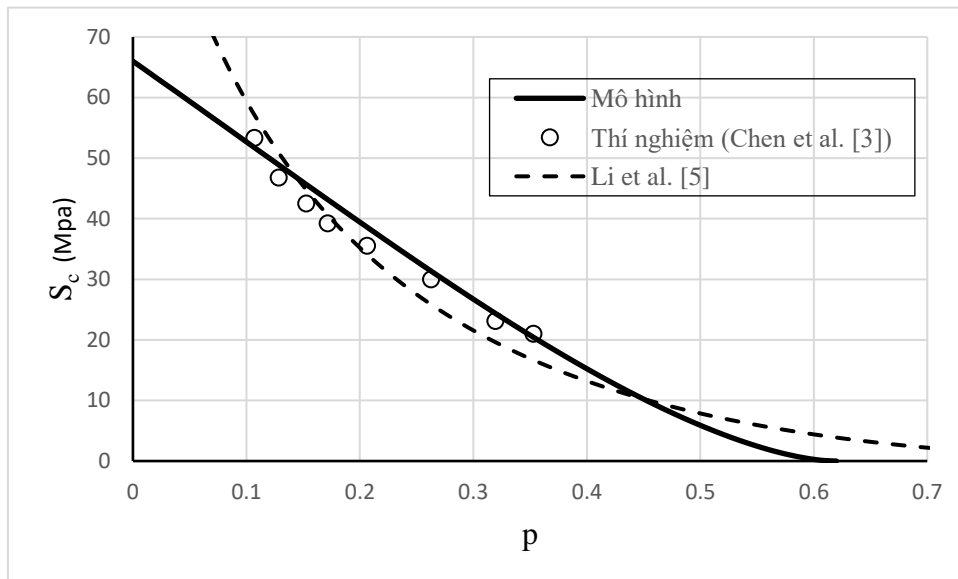
Cần nhấn mạnh thêm rằng, mô hình được xây dựng dựa trên giả thiết rằng vật liệu có dạng các lỗ rỗng tròn được bao quanh bởi miền vật liệu đồng nhất do vậy mô hình có thể được áp dụng cho các vật liệu gốc xi măng khác như vữa xi măng hoặc một số dạng bê tông rỗng đặc thù với độ rỗng rất cao. Để minh họa ý này, mô hình sẽ được so sánh với các số liệu thực nghiệm về mối quan hệ giữa độ rỗng và cường độ chịu nén của vữa xi măng thực hiện bởi Chen và cộng sự năm 2013 [3] và mô hình lý thuyết của Li và cộng sự [5] (hình 4). Những kết luận tương tự như trong ví dụ tại hình 3 có thể nhận thấy trong ví dụ này.

Bảng 1. Tham số tính toán.

	E_c (Gpa)	ν_c	S_{c0} (Mpa)	p_m	n
Hình 3	33,1	0,2	39	0,39	1/2
Hình 4	44,35	0,229	66	0,62	1/2



Hình 3. So sánh mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm của Zhong và cộng sự [11] về mối quan hệ giữa cường độ chịu kéo và độ rỗng của hỗn hợp bê tông.



Hình 4. So sánh mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm của Chen và cộng sự [3] về mối quan hệ giữa cường độ chịu kéo và độ rỗng của hỗn hợp vữa xi măng.

5. KẾT LUẬN

Dựa trên việc xây dựng các trường ứng suất, biến dạng cục bộ và kết hợp với công thức thực nghiệm về mối liên hệ giữa cường độ chịu kéo và chịu nén của bê tông, một công thức lý thuyết xác định cường độ chịu kéo của bê tông rỗng phụ thuộc vào độ rỗng và các tính chất của vật liệu nền đã được đề xuất.

Do chứa thêm các thông tin về độ rỗng tối đa và mô đun đàn hồi của vật liệu do đó mô hình xấp xỉ mới phù hợp với các kết quả thực nghiệm tốt hơn so với một số mô hình giải tích đã được công bố, điều này thể hiện hiệu quả của phương pháp nghiên cứu.

So sánh mô hình với các kết quả số và kết quả thực nghiệm mới chứa nhiều thông tin hơn về cấu trúc vật liệu và áp dụng mô hình cho các dạng vật liệu rỗng khác là các hướng nghiên cứu có thể được triển khai tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. B.Huang, H. Wu, X. Shu, E. G. Burdette, Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete, *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 818-823. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.025>
- [2]. G.A. Francfort, J.J. Marigo, Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem, *J Mech Phys Solids*, 46 (1998)1319–1342. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(98\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(98)00034-9)
- [3]. X. Chen, S. Wu, J. Zhou, Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar, *Construction and Building Materials*, 40 (2013) 869-874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072>
- [4]. X. Du, L. Jin, G.Ma, Macroscopic effective mechanical properties of porous dry concrete, *Cement and Concrete Research*, 44 (2013) 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.012>
- [5]. D. Li, Z. Li, G. Lv, G.Zhang, Y.Yin, A predictive model of the effective tensile and compressive strengths of concrete considering porosity and pore size, *Construction and Building Materials*, 170 (2018) 520-526. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.028>
- [6]. R.M. Christensen, *Mechanics of composite materials*, Wiley, New York, 1979.
- [7]. B. V. Tran, D. C. Pham, T. H. G. Nguyen, Equivalent-inclusion approach and effective medium approximations for elastic moduli of compound-inclusion composites, *Archive of Applied Mechanics*, 85 (2015) 1983–1995. <https://doi.org/10.1007/s00419-015-1031-6>
- [8]. V. Marcadon, E. Herve, A. Zaoui, Micromechanical modeling of packing and size effects in particulate composites, *International Journal of Solids and Structures*, 44 (2007) 8213-8228. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2007.06.008>
- [9]. K. Miled, K. Sab, R. Le Roy, Effective elastic properties of porous materials: Homogenization schemes vs experimental data, *Mechanics Research Communications*, 38 (2011) 131-135. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2011.01.009>
- [10]. ACI-318 Committee: ACI 318-11: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2011.
- [11]. R. Zhong, K. Wille, Compression response of normal and high strength pervious concrete, *Construction and Building Materials*, 109 (2016) 177-187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.051>