

Xác định các đặc trưng về mặt kích thước của lỗ rỗng trong bê tông thông qua phương pháp xử lý hình ảnh

Determination of the size characteristics of the airvoids within the hardened concrete via image analysis

> TS VŨ CHÍ CÔNG

Khoa XDDD và CN, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội; Email: congvc@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Hệ thống các lỗ rỗng xuất hiện bên trong cấu trúc đóng rắn của bê tông đóng vai trò rất quan trọng và ảnh hưởng trực tiếp đến các đặc trưng cơ học của bê tông dưới tác động của các loại tải trọng khác nhau. Chính vì vậy, xác định được các thông số định lượng của hệ thống các lỗ rỗng trong bê tông là rất cần thiết đối với các phân tích mô phỏng số và nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử của các cấu kiện và kết cấu bê tông. Tuy nhiên định lượng cấu trúc rỗng của bê tông ở trạng thái đã đóng rắn thường khó khăn hơn rất nhiều so với trạng thái vừa trước khi đóng rắn. Nghiên cứu này đề xuất một quy trình chuẩn bị và xử lý hình ảnh khá đơn giản và hiệu quả giúp định lượng được thông số kích thước đặc trưng của cấu trúc rỗng trong bê tông. Thông qua hai kiểm định thống kê là Kolmogorov-Smirnov (K-S test) và Anderson-Darling (A-D test), bài báo đồng thời cũng đã chỉ ra được sự phù hợp của hàm phân phối Weibull nhằm diễn giải xác suất phân bố về mặt kích thước của các lỗ rỗng trong bê tông.

Từ khóa: Bọt khí; cấu trúc rỗng; bê tông; xác suất phân phối; phân phối kích thước

ABSTRACT

The system of airvoids appearing within the hardened structure of concrete plays a crucial role and directly influences the mechanical behavior of concrete under various types of loads. Hence, determining the quantitative parameters of the airvoids' system within concrete is essential for numerical simulations and experimental investigations of concrete members and structures. However, quantifying the airvoid structure in the hardened state of concrete is often much more challenging than in its fresh state. The present study proposes a relatively simple and effective image preparation and processing procedure to quantify the characteristic size parameters of the airvoid structure within hardened concrete. Based on two statistical tests, including the Kolmogorov-Smirnov (K-S test) and Anderson-Darling (A-D test), this paper also demonstrates the relevance of the Weibull distribution function in interpreting the size distribution of the airvoids in hardened concrete.

Keywords: Airvoid; pore structure; concrete; probability distribution; size distribution.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Những đặc trưng cơ học của bê tông (như đường cong ứng suất - biến dạng, cường độ chịu lực hay mô đun đàn hồi) dưới tác dụng của các loại tải trọng khác nhau bị ảnh hưởng rất lớn bởi hệ thống các lỗ rỗng tồn tại bên trong cấu trúc đóng rắn của bê tông [1,2]. Trong các thành phần lỗ rỗng, hệ thống các lỗ rỗng dạng bóng khí (air voids hay air bubbles) là thành phần có kích thước lớn nhất và ảnh hưởng chủ yếu đến ứng xử của bê tông dưới các tác dụng cơ học khác nhau [1,3]. Hệ thống các lỗ rỗng dạng bóng khí này được hình thành chủ yếu do hiện tượng cuốn theo không khí vào cùng trong quá trình chế trộn và thi công bê tông tươi. Khi bê tông đóng rắn, các bóng khí này chủ yếu xuất hiện ở phần ma trận xi măng - cát (cement matrix). Trong lĩnh vực nghiên cứu về ảnh hưởng của hệ thống các lỗ rỗng trong cấu trúc

đóng rắn đến các đặc trưng cơ học của bê tông, phân tích và khảo sát các đặc trưng về mặt cấu tạo và đặc biệt là kích thước của hệ thống các lỗ rỗng dạng bóng khí này đóng vai trò chủ yếu và quan trọng nhất [1]. Hệ thống các lỗ rỗng dạng bóng khí (sau đây gọi tắt là lỗ rỗng) thường được định lượng thông qua các giá trị như độ rỗng, kích thước, diện tích bề mặt, thể tích, hình dạng, hướng phân bố, khoảng cách giữa các lỗ rỗng. Để xác định các giá trị định lượng như trị số độ rỗng, các phương pháp thực nghiệm như phương pháp dịch chuyển chất lỏng [4], phương pháp đo độ xâm nhập thủy ngân [5-7], phương pháp đo ngưng tụ mao quản [8,9] thường được sử dụng. Tuy nhiên, các phương pháp thực nghiệm kể trên thường không xác định được các đặc trưng định lượng như kích thước, diện tích và thể tích lỗ rỗng, đặc biệt là không thể xác định được hướng phân bố và quy tắc phân

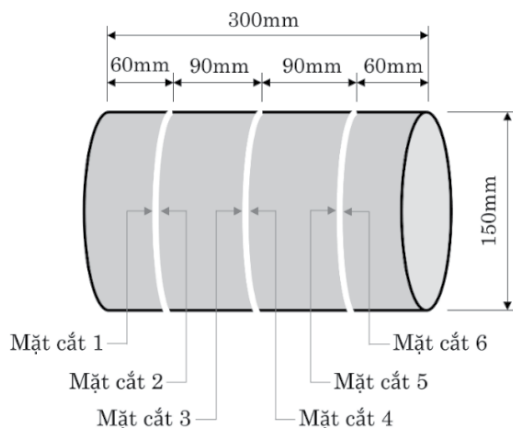
phối về mặt kích thước của các lỗ rỗng. Các vấn đề này về cơ bản có thể được giải quyết thông qua các phương pháp xử lý và phân tích hình ảnh. Những hình ảnh về hệ thống các lỗ rỗng xuất hiện trong bê tông có thể là dạng hai chiều hoặc ba chiều, nhưng nhìn chung phổ biến là các ảnh hai chiều như ảnh chụp hay ảnh scan của các mặt cắt mẫu. Một cách truyền thống, các lỗ rỗng xuất hiện trong bê tông thường được định lượng thông qua phương pháp di chuyển ngang tuyến tính (linear tranverse method) hoặc phương pháp đếm điểm (point counting method) như mô tả trong ASTM C457 [10]. Những phương pháp này yêu cầu đếm số lỗ rỗng một cách thủ công và đo độ dài dây cung của các lỗ rỗng trên bề mặt mẫu bằng kính hiển vi soi nổi. Tuy nhiên, cách làm này về cơ bản tốn rất nhiều thời gian và công sức để có thể thu được một kết quả phân tích có ý nghĩa thống kê. Hơn thế nữa, các phương pháp trên chỉ được áp dụng trên hình ảnh hai chiều, do đó sẽ không mang tính tổng quát và không chỉ ra được thực tế phân bố của hệ thống các lỗ rỗng trong không gian ba chiều (không gian bên trong mẫu bê tông).

Áp dụng các nguyên tắc của phương pháp lập thể được giới thiệu bởi Saltykov và cộng sự [11,12], nguyên cứu này đề xuất một quy trình xử lý và phân tích hình ảnh giúp xác định các đặc trưng về mặt kích thước của hệ thống các lỗ rỗng trong bê tông, bao gồm: độ rỗng, kích thước và phân phối kích thước các lỗ rỗng. Đồng thời, nghiên cứu cũng phân tích và so sánh sự phù hợp của hai mô hình phân phối xác suất phổ biến là phân phối chuẩn (normal distribution function) và phân phối Weibull (Weibull distribution function) trong diễn giải phân phối về mặt kích thước của các lỗ rỗng trong bê tông.

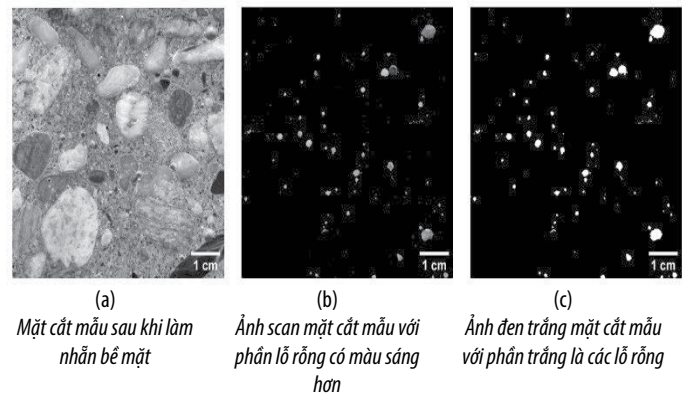
2. CHUẨN BỊ MẪU VÀ XỬ LÝ HÌNH ẢNH

2.1. Chuẩn bị mẫu

Trong nghiên cứu, 03 (ba) mẫu trụ có kích thước ($\phi \times h = 150 \times 300$ mm) được sử dụng để phân tích. Các mẫu bê tông được chế tạo với tỷ lệ cấp phối về mặt khối lượng như sau: Xi măng : Cát : Sỏi : Nước = 1 : 2,2 : 2,7 : 0,43. Kích thước danh định lớn nhất của cốt liệu là 20mm. Trên mỗi mẫu bê tông, thực hiện 03 (ba) lát cắt phẳng như thể hiện trên Hình 1. Tương ứng mỗi lát cắt có hai bề mặt của mẫu thí nghiệm (sau đây gọi chung là các mặt cắt mẫu), tổng số có tất cả 18 mặt cắt mẫu được chuẩn bị. Các mặt cắt mẫu sau đó được làm nhẵn bề mặt nhằm loại bỏ các vết xước hoặc các phần bị nhám do quá trình của cắt chuẩn bị mẫu (Hình 2a). Tiếp theo, các mặt cắt mẫu được sơn đen toàn bộ bề mặt. Sử dụng bột đá trắng Canxi Cacbonat siêu mịn KSHG-20C (dạng vữa) phủ kín mặt cắt mẫu. Các lỗ rỗng được chen đầy vữa Canxi Cacbonat màu trắng sẽ dễ dàng được làm nổi rõ trên nền tối màu của các mặt cắt mẫu (do đã được sơn đen trước) (Hình 2b).



Hình 1. Vị trí các mặt cắt chuẩn bị mẫu thí nghiệm



Hình 2. Quy trình xử lý hình ảnh

2.2. Xử lý hình ảnh

Ảnh scan mặt cắt mẫu (Hình 2b) được xử lý thông qua công cụ “imbinarize” của phần mềm MATLAB™ để thu được ảnh đen trắng (ảnh nhị phân) của mặt cắt mẫu (Hình 2c) với hai phần phân biệt rõ rệt như sau: phần màu trắng là các lỗ rỗng, và phần màu đen là phần vữa xi măng và cốt liệu. Như thể hiện trên Hình 2c, các lỗ rỗng xuất hiện trên các mặt cắt mẫu thường có dạng hình tròn với đường kính thay đổi khác nhau. Tuy nhiên, các hình tròn (lỗ rỗng) này là trên mặt phẳng hai chiều (2D), do đó để xác định cấu trúc lỗ rỗng phân bố trên toàn bộ thể tích mẫu, cần phải chuyển đổi các lỗ rỗng hai chiều này thành các khối lỗ rỗng ba chiều (3D). Trong nghiên cứu này, phương pháp chuyển đổi $2D \rightarrow 3D$ lập thể (stereological method) cho hệ các hình cầu đa phần tán của Saltykov [11,12] được áp dụng. Trong phương pháp lập thể của Saltykov, các hình tròn (lỗ rỗng) hai chiều trên các mặt cắt mẫu (Hình 2c) được phân chia vào n khoảng giá trị kích thước. Số lượng các lỗ rỗng (2D) trong mỗi khoảng giá trị kích thước i là $N_A(i)$ với $i = 1, 2, \dots, n$. Khoảng giá trị của đường kính các lỗ rỗng tương ứng ở bước kích thước thứ i được giới hạn là $[d_{\max} \times 10^{-0.1(i-2)}, d_{\max} \times 10^{-0.1(i-1)}]$, trong đó $d_{\max}$ là đường kính lớn nhất của lỗ rỗng tại khoảng giá trị đang xét. Phương pháp lập thể của Saltykov [11,12] giả thiết rằng hình tròn (lỗ rỗng) hai chiều xuất hiện trên mặt cắt mẫu tương ứng với hình cầu có cùng đường kính xuất hiện trong khối mẫu ba chiều. Các hình tròn có đường kính là d_i xuất hiện trên mặt cắt mẫu (hình ảnh hai chiều) là kết quả của việc cắt các hình cầu có đường kính d_j (với $j = 1, 2, \dots, n$) lớn hơn hoặc bằng d_i tại các vị trí khác nhau. Từ các giả thiết trên và công thức xác suất phân bố hình học của khoảng cách tính từ tâm của các hình cầu có đường kính là d_j đến các mặt cắt phẳng tạo nên các hình tròn có đường kính d_i , số lượng các hình cầu có đường kính d_j trên một đơn vị thể tích $N_v(j)$ có thể được xác định như sau [11,12]:

$$N_v(j) = \frac{1}{d_j} \sum_{i=j}^n \alpha_i [N_A(i)] \quad (1)$$

trong đó α_i là hệ số tương ứng với từng bước kích thước của hình tròn có đường kính là d_i . Hệ số α_i này được xác định từ xác suất phân bố hình học của khoảng cách tính từ tâm của hình cầu có đường kính là d_j đến các mặt cắt phẳng tạo nên các hình tròn có đường kính d_i . Tuân thủ theo khuyến cáo của Saltykov [11] và Underwood [12], trong nghiên cứu này 14 bước giá trị kích thước lỗ rỗng ($n = 14$) được áp dụng. Số bước giá trị kích thước này cho phép đảm bảo tất cả các khoảng giá trị đều có các lỗ rỗng, đồng thời cũng đảm bảo kết quả phân tích về xác suất phân phối kích thước của lỗ rỗng có ý nghĩa thống kê. Theo Liu và cộng sự [13], công thức (1) có thể diễn giải với dạng tường minh như sau:

$$N_v(j) = \frac{1}{d_j} \begin{bmatrix} 1.646121.N_A(i) - 0.456123.N_A(i-1) - 0.11619.N_A(i-2) \\ -0.041495.N_A(i-3) - 0.017271.N_A(i-4) - 0.007795.N_A(i-5) \\ -0.003684.N_A(i-6) - 0.00179.N_A(i-7) - 0.000884.N_A(i-8) \\ -0.000441.N_A(i-9) - 0.000222.N_A(i-10) - 0.000112.N_A(i-11) \\ -0.000057.N_A(i-12) - 0.000029.N_A(i-13) - 0.000015.N_A(i-14) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Để tính toán giá trị $N_v(j)$ cho các giá trị đường kính lỗ rỗng d_j , một đoạn chương trình tính được thiết lập bằng sự kết hợp giữa phần mềm ImageJ và phần mềm MATLAB™ theo quy trình như sau:

- Xác định diện tích bề mặt tương ứng với từng lỗ rỗng thông qua công cụ “Analyze Particles” của phần mềm ImageJ áp dụng trên hình ảnh đen trắng (nhị phân) của mặt cắt mẫu (Hình 2c);

- Từ giá trị diện tích bề mặt các lỗ rỗng, tính giá trị đường kính danh định, d_{max} , của lỗ rỗng có diện tích lớn nhất xuất hiện trên mặt cắt mẫu;

- Xác định 14 bước kích thước của đường kính lỗ rỗng, d_j , với $j = 1, 2, \dots, 14$ theo công thức sau $[d_{max} \times 10^{-0.1(i-2)}, d_{max} \times 10^{-0.1(i-1)}]$;

- Tính giá trị $N_A(i)$, với $i = 1, 2, \dots, 14$;

- Tính giá trị $N_v(j)$ theo công thức (2).

3. KẾT QUẢ VÀ BÌNH LUẬN

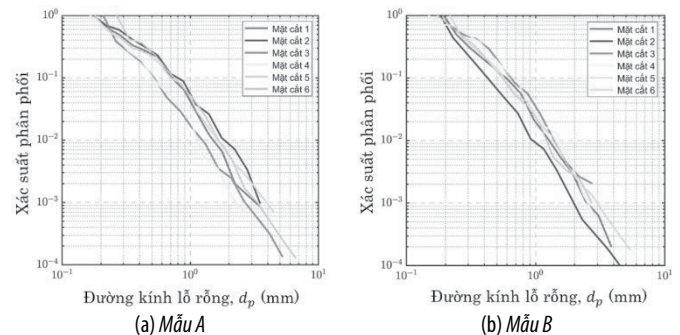
3.1. Các thông số kích thước của cấu trúc rỗng trong mẫu bê tông

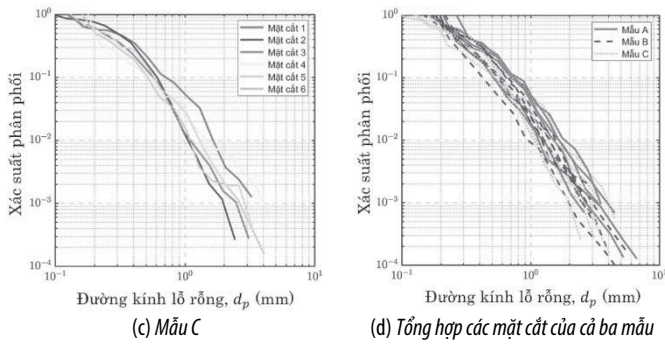
Từ giá trị số lượng các lỗ rỗng của bước đường kính d_j phân bố trong một đơn vị thể tích, $N_v(j)$, độ rỗng trong không gian ba chiều được xác định như sau $p = N_v(j) \cdot d_j/V_0$, với $V_0 = 1$. Giá trị độ rỗng được xác định từ các mặt cắt mẫu và trung bình cho ba mẫu thí nghiệm được tổng hợp ở Bảng 1. Kết quả cho thấy mức độ chênh lệch độ rỗng xác định từ mặt cắt mẫu khác nhau là không quá lớn với hệ số biến thiên (Coefficient of Variation, CV) trung bình khoảng 30%. Điều này có nghĩa rằng: (i) không có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê trong cấu trúc rỗng ở các vị trí khác nhau của mẫu bê tông; và (ii) đối với cấp phối bê tông xem xét trong nghiên cứu này, giá trị độ rỗng là khá nhỏ (trung bình khoảng 1.6%), thể hiện các mẫu có độ đồng nhất là mật độ hạt khá tốt. Một số thông số quan trọng khác của đường kính lỗ rỗng đối với tất cả các mặt cắt mẫu cũng được tổng hợp tại Bảng 1.

Bảng 1. Một số thông số về mặt kích thước của cấu trúc rỗng trong các mẫu bê tông

Mẫu	Mặt cắt	Độ rỗng, p (%)	Độ rỗng của mẫu (%)			Đường kính lỗ rỗng, d_p (mm)			
			Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn	Hệ số biến thiên, CV (%)	Giá trị lớn nhất, d_{max}	Giá trị trung bình, d_m	Độ lệch chuẩn, δ	Hệ số biến thiên, CV (%)
1	1	1.21	1.51	0.52	34.5	3.5	0.35	0.27	77.1
	2	1.04				3.6	0.38	0.32	84.2
	3	1.42				5.2	0.29	0.20	69.0
	4	1.17				2.6	0.28	0.19	67.9
	5	2.43				4.5	0.34	0.29	85.3
	6	1.77				6.6	0.40	0.28	70.0
2	1	1.61	1.34	0.37	28.0	3.9	0.29	0.21	72.4
	2	1.38				4.6	0.25	0.15	60.0
	3	1.09				2.7	0.34	0.24	70.6
	4	1.35				2.9	0.32	0.24	75.0
	5	1.83				5.4	0.32	0.23	71.9
	6	0.77				2.7	0.30	0.21	70.0
3	1	1.31	1.88	0.45	23.7	3.3	0.34	0.30	88.2
	2	1.51				2.4	0.30	0.19	63.3
	3	2.51				3.1	0.27	0.19	70.4
	4	2.16				4.5	0.28	0.24	85.7
	5	2.06				3.3	0.29	0.23	79.3
	6	1.73				4.1	0.27	0.19	70.4

Như thể hiện ở Bảng 1, tồn tại một quan hệ đồng biến tuyến tính giữa đường kính lỗ rỗng lớn nhất (d_{max}) và đường kính trung bình của lỗ rỗng (d_m). Khi d_{max} tăng thì d_m cũng tăng. Điều này có thể giải thích như sau: trong phương pháp xử lý hình ảnh áp dụng trong nghiên cứu này, d_{max} là căn cứ chính để xác định 13 bước đường kính còn lại (xem mục 2.2). Nếu d_{max} càng lớn thì khoảng giá trị của 14 bước đường kính phân tích càng lớn, do đó xác suất tìm thấy nhiều lỗ rỗng trong các khoảng giá trị này cũng tăng lên và vì thế giá trị trung bình của đường kính lỗ rỗng sẽ lớn hơn.





Hình 3. Xác suất phân phối cộng dồn của đường kính lỗ rỗng

3.2. Phân phối về mặt kích thước của lỗ rỗng

Hình 3 thể hiện xác suất phân phối cộng dồn của đường kính lỗ rỗng xác định từ các mặt cắt của mẫu A (Hình 3a), mẫu B (Hình 3b), mẫu C (Hình 3c) và của tất cả các mặt cắt nghiên cứu (Hình 3d). Như thể hiện trên hình, một số kết quả thu được đáng chú ý như sau:

(i) Giá trị đường kính của các lỗ rỗng xuất hiện ở tất cả các mặt cắt mẫu nằm trong khoảng từ 0.1 mm đến dưới 7 mm. Đây là khoảng giá trị phù hợp với mức kích thước của lỗ rỗng dạng bóng khí thường được ghi nhận trong các nghiên cứu trước đây [1,2].

(ii) Không có sự khác biệt quá lớn về phân phối kích thước của các lỗ rỗng ở tất cả các mặt cắt trong khoảng giá trị đường kính d_p dưới 1,0 mm, tuy nhiên sự khác biệt tăng dần khi d_p tăng.

(iii) Biến động giá trị đường kính lỗ rỗng của các mặt cắt đối với ba mẫu bê tông nghiên cứu tăng dần theo thứ tự sau: Mẫu B < Mẫu A < Mẫu C. Kết quả này là phù hợp với hệ số biến thiên, CV, thể hiện ở Bảng 1.

(iv) Xu hướng phát triển của xác suất phân phối cộng dồn đối với đường kính các lỗ rỗng là tương tự nhau ở tất cả các mặt cắt của tất cả các mẫu (Hình 3d). Như thể hiện trên Hình 3, mối quan hệ giữa xác suất phân phối $P(d_p)$ và đường kính lỗ rỗng (d_p)

đường như phù hợp một quy luật hàm mũ giữa hai đại lượng này: $P(d_p) \sim d_p^g$. Điều này gợi ý rằng hàm phân phối xác suất đường kính của lỗ rỗng xuất hiện trong cấu trúc đóng rắn của bê tông có thể được biểu diễn bởi các hàm số mũ như hàm phân phối chuẩn hoặc hàm phân phối Weibull.

3.3. Hàm phân phối xác suất phù hợp để diễn giải phân phối kích thước lỗ rỗng của bê tông

Như nhận xét ở trên, đường kính lỗ rỗng của bê tông có thể có xác suất phân phối phù hợp với các hàm phân phối xác suất dạng hàm số mũ (điểm iv mục 3.2). Để kiểm chứng nhận định này, hai hàm phân phối xác suất dạng hàm mũ phổ biến là phân phối chuẩn và phân phối Weibull được xem xét nhằm phân tích xác suất phân phối đường kính lỗ rỗng xuất hiện ở các mặt cắt của các mẫu bê tông. Trong nghiên cứu này, các kiểm định Kolmogorov-Smirnov (K-S test) [14,15] và Anderson-Darling (A-D test) [16,17] được sử dụng để kiểm tra và so sánh sự phù hợp của hai hàm phân phối xác suất kể trên đối với các bộ dữ liệu đường kính lỗ rỗng thu được từ phương pháp xử lý hình ảnh.

Trị số kiểm định K-S (D_n) và trị số kiểm định A-D (A_n^2) cho hàm phân phối xác suất $F(x)$ lần lượt được xác định theo công thức (3) và (4) dưới đây:

$$D_n = \sup_x |F_n(x_i) - F(x_i)| \quad (3)$$

$$A_n^2 = -n - \sum_{i=1}^n \frac{2i-1}{n} \{ \ln[F(x_i)] + \ln[1 - F(x_{n+1-i})] \} \quad (4)$$

trong đó, $\sup_x$ là cận trên đúng của khoảng cách $F_n(x_i) - F(x_i)$ với $F_n(x_i)$ là phân phối xác suất thực nghiệm của bộ dữ liệu gồm n các giá trị x_i . Một hàm phân phối xác suất được coi là phù hợp với độ dữ liệu nếu $D_n \leq D_{nc}$ và/hoặc $A_n^2 \leq A_{nc}^2$, với D_{nc} và A_{nc}^2 lần lượt là giá trị giới hạn trong kiểm định K-S và kiểm định A-D. Trong trường hợp có nhiều hàm phân phối xác suất thỏa mãn yêu cầu, hàm phân phối nào có giá trị D_n và/hoặc A_n^2 nhỏ nhất sẽ là mô hình phù hợp nhất với bộ dữ liệu đang xem xét.

Bảng 2. Tổng hợp các giá trị kiểm định sự phù hợp của các hàm phân phối xác suất với dữ liệu đường kính lỗ rỗng của bê tông

Mẫu	Mặt cắt	Kiểm định K-S			Kiểm định A-D		
		D_n của phân phối chuẩn	D_n của phân phối Weibull	Giá trị tới hạn, D_{nc}	A_n^2 của phân phối chuẩn	A_n^2 của phân phối Weibull	Giá trị tới hạn, A_{nc}^2
1	1	0.447	0.168	0.361	46.154	0.225	2.507
	2	0.440	0.111	0.349	42.857	0.245	2.506
	3	0.631	0.108	0.338	40.012	0.257	2.505
	4	0.512	0.113	0.361	42.857	0.234	2.507
	5	0.468	0.105	0.349	42.857	0.232	2.506
	6	0.582	0.107	0.349	46.154	0.274	2.506
2	1	0.626	0.123	0.361	46.154	0.213	2.507
	2	0.676	0.110	0.361	46.154	0.224	2.507
	3	0.461	0.113	0.361	46.154	0.234	2.507
	4	0.497	0.141	0.361	46.154	0.246	2.507
	5	0.613	0.108	0.338	40.012	0.257	2.505
	6	0.506	0.113	0.361	46.154	0.234	2.507

3	1	0.407	0.108	0.338	40.008	0.257	2.505
	2	0.451	0.140	0.349	42.857	0.306	2.506
	3	0.531	0.141	0.349	42.857	0.276	2.506
	4	0.539	0.108	0.338	40.008	0.257	2.505
	5	0.473	0.108	0.338	40.008	0.257	2.505
	6	0.546	0.105	0.349	40.001	0.232	2.506

Kết quả các giá trị kiểm định K-S và A-D của hàm phân phối chuẩn và phân phối Weibull đối với các bộ dữ liệu đường kính lỗ rỗng của các tất cả các mặt cắt xem xét trong nghiên cứu này được tổng hợp ở Bảng 2.

Như kết quả thể hiện ở Bảng 2, giá trị kiểm định K-S (D_n) và kiểm định A-D (A_n^2) của phân phối chuẩn đối với tất cả các mặt cắt đều lớn hơn khá nhiều giá trị tới hạn tương ứng. Trong khi đó, các giá trị D_n và A_n^2 của phân phối Weibull đều nhỏ hơn giá trị tới hạn tương ứng đối với tất cả các mặt cắt. Điều này có nghĩa rằng, kích thước của các lỗ rỗng xuất hiện trong cấu trúc đóng rắn của bê tông có xác suất phân phối tuân thủ theo quy luật hàm phân phối Weibull, trong khi đó không thể diễn giải được bằng quy luật của hàm phân phối chuẩn.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã giới thiệu một quy trình chuẩn bị và xử lý hình ảnh các mặt cắt mẫu giúp phân tích các thông số định lượng đặc trưng của cấu trúc rỗng (giá trị độ rỗng và các giá trị về đường kính lỗ rỗng) trong không gian ba chiều của mẫu bê tông. Quy trình đề xuất là khá đơn giản, nên có thể dễ dàng áp dụng trong quy mô phòng thí nghiệm cũng như ngoài hiện trường trong phân tích cấu trúc rỗng và độ đồng nhất của bê tông. Tuy nhiên, một nghiên cứu so sánh giữa kết quả phân tích cấu trúc rỗng của bê tông theo quy trình xử lý hình ảnh được đề xuất trong bài báo này với các kết quả thu được từ các phương pháp thực nghiệm truyền thống khác là rất cần thiết để giúp chuẩn hóa hơn các kết luận trong nghiên cứu này.

Tuy rằng, hệ thống các lỗ rỗng xuất hiện bên trong cấu trúc đóng rắn của bê tông là ngẫu nhiên, nhưng từ kết quả của các kiểm định Kolmogorov-Smirnov (K-S test) và Anderson-Darling (A-D test), có thể kết luận rằng kích thước các lỗ rỗng của bê tông có xác suất phân phối tuân thủ theo quy luật của hàm phân phối Weibull mà không phù hợp với hàm phân phối chuẩn. Áp dụng hàm phân phối Weibull và sử dụng quy trình xử lý hình ảnh để xuất trong nghiên cứu này, có thể giúp thiết lập hệ thống các lỗ rỗng xuất hiện trong các mẫu bê tông. Đây sẽ là dữ liệu đầu vào quan trọng đối với các phân tích mô phỏng số về ứng xử của bê tông dưới các loại tải trọng khác nhau cũng như ảnh hưởng của cấu trúc rỗng đến các đặc trưng cơ học của bê tông.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (HUCE) trong đề tài mã số 37-2023/KHXD.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A.M. Neville, J.J. Brooks, Properties of concrete, 4th ed., Pearson Education Limited, 2010. <https://doi.org/10.4135/9781412975704.n88>.
- [2] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, Concrete: microstructure, properties, and materials, Third, McGraw-Hill, 2006. <https://doi.org/10.1036/0071462899>.
- [3] S. Diamond, Mercury porosimetry. An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials, Cem. Concr. Res. 30 (2000) 1517-1525. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00370-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00370-7).

- [4] B.B. Das, B. Kondraivendhan, Implication of pore size distribution parameters on compressive strength, permeability and hydraulic diffusivity of concrete, Constr. Build. Mater. 28 (2012) 382-386. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.055>.

- [5] C. Gallé, Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry - A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying, Cem. Concr. Res. 31 (2001) 1467-1477. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00594-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00594-4).

- [6] R. Kumar, B. Bhattacharjee, Assessment of permeation quality of concrete through mercury intrusion porosimetry, Cem. Concr. Res. 34 (2004) 321-328. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.013>.

- [7] R.A. Cook, K.C. Hover, Mercury porosimetry of hardened cement pastes, Cem. Concr. Res. 29 (1999) 933-943. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00083-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00083-6).

- [8] S. Diamond, A critical comparison of mercury porosimetry and capillary condensation pore size distributions of portland cement pastes, Cem. Concr. Res. 1 (1971) 531-545. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(71\)90058-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(71)90058-5).

- [9] R.S. Mikhail, L.E. Copeland, S. Brunauer, Pore structures and surface areas of hardened portland cement pastes by nitrogen adsorption, Can. J. Chem. 42 (1964) 426-438. www.nrcresearchpress.com.

- [10] ASTM C 457/C 457M-16, Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, ASTM Int. (2016). www.astm.org.

- [11] S.A. Saltykov, The determination of the size distribution of particles in an opaque material from a measurement of the size distribution of their sections, Springer Berlin Heidelberg, 1967. https://doi.org/10.1007/978-3-642-88260-9_31.

- [12] E.E. Underwood, Quantitative stereology, Addison-Wesley Pub. Co., 1970.

- [13] Y. Liu, R.M. German, R.G. Iacocca, Microstructure quantification procedures in liquid-phase sintered materials, Acta Mater. 47 (1999) 915-926. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00395-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00395-4).

- [14] KOLMOGOROV, Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione, Giorn Dell'inst Ital Degli Att. 4 (1933) 89-91.

- [15] N.. Smirnov, Estimate of deviation between empirical distribution functions in two independent samples, Bull. Moscow Univ. 2 (1939).

- [16] T.W. Anderson, D.A. Darling, A Test of Goodness of Fit, J. Am. Stat. Assoc. 49 (1954) 765. <https://doi.org/10.2307/2281537>.

- [17] M.A. Stephens, EDF statistics for goodness of fit and some comparisons, J. Am. Stat. Assoc. 69 (1974) 730-737. <https://doi.org/10.1080/01621459.1974.10480196>.