

Ảnh hưởng của tỉ lệ W/B và hàm lượng tro bay tới hệ số tốc độ hút nước mao dẫn của bê tông

Vũ Việt Cường^{1*}, Nguyễn Đình Hải², Nguyễn Tiến Thế³

¹ Trung tâm Khoa học công nghệ, Trường Đại học Giao thông vận tải

² Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải

³ Khoa Khoa học ứng dụng, Trường Đại học Công nghệ giao thông vận tải

TỪ KHOẢ

Thấm nước mao dẫn

Độ bền lâu

Tro bay

Tỉ lệ W/B

TÓM TẮT

Khả năng hút nước mao dẫn của bê tông đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát quá trình suy giảm độ bền của kết cấu bê tông cốt thép, đặc biệt khi xét đến tác động kết hợp giữa cacbonat hóa và sự xâm nhập của nước mưa. Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ nước trên chất kết dính (W/B) và hàm lượng tro bay thay thế xi măng đến hệ số tốc độ thấm nước mao dẫn của bê tông. Các cấp phối bê tông được thiết kế với ba tỷ lệ W/B (0,4; 0,5 và 0,6) và hai mức thay thế tro bay là 20% và 30%. Hệ số thấm mao dẫn được xác định theo phương pháp thí nghiệm JSCE-G 582-2018, với mỗi kết quả là giá trị trung bình của ba mẫu thí nghiệm. Kết quả cho thấy hệ số thấm mao dẫn tăng khi tỷ lệ W/B tăng. Khi W/B tăng từ 0,4 lên 0,6, hệ số thấm của bê tông OPC tăng từ 4,30 lên 11,7 mm/vh. Việc sử dụng tro bay giúp giảm hệ số thấm từ khoảng 7,8–21,1% so với OPC. Kết quả cũng được so sánh với công thức dự báo của tiêu chuẩn JSCE (2017), cho thấy xu hướng biến thiên phù hợp với thực nghiệm. Nghiên cứu chỉ ra rằng giảm W/B kết hợp sử dụng 20–30% tro bay là giải pháp hiệu quả để cải thiện khả năng kháng thấm của bê tông.

KEYWORDS

Concrete sorptivity

Durability

Fly ash

W/B ratio

ABSTRACT

Concrete sorptivity plays an important role in the durability of reinforced concrete structures, particularly under the combined effects of carbonation and rainwater penetration. This study investigates the influence of the water-to-binder ratio (W/B) and fly ash content on the sorptivity of concrete. Concrete mixtures were prepared with three W/B ratios (0.4, 0.5, and 0.6), and fly ash was used to replace cement at levels of 20% and 30% by mass. The sorptivity coefficient was experimentally determined using the JSCE-G 582-2018 test method, and each result represents the average value of three specimens. The results indicate that sorptivity increases significantly with increasing W/B ratio. When the W/B ratio increased from 0.4 to 0.6, the sorptivity of OPC concrete increased from 4.30 to 11.7 mm/vh. The incorporation of fly ash reduced the sorptivity coefficient by approximately 7.8–21.1% compared with OPC concrete, depending on the W/B ratio. The experimental results were also compared with the predictive equation proposed in the JSCE Standard Specification for Concrete Structures (2017), showing a similar trend. The findings suggest that reducing the W/B ratio combined with 20–30% fly ash replacement is an effective approach to reduce concrete sorptivity and improve the durability performance of concrete structures.

1. Đặt vấn đề

Bê tông cốt thép là vật liệu xây dựng chủ đạo nhờ khả năng duy trì môi trường kiềm cao, giúp hình thành và bảo vệ lớp màng thụ động trên bề mặt thép khỏi sự ăn mòn [1-2]. Tuy nhiên, các tác động từ môi trường có thể phá vỡ lớp bảo vệ này, dẫn đến hư hỏng cấu trúc [2-3]. Trong số đó, sự xâm nhập của nước và quá trình cacbonat hóa được xác định là những nguyên nhân chính gây ra hiện tượng ăn mòn và bong tróc lớp bê tông bảo vệ [4-5].

Trước đây, tuổi thọ của các công trình thường được dự báo dựa trên chiều sâu cacbonat hóa như một chỉ số chính [6]. Tuy nhiên, quan

điểm này đã thay đổi đáng kể từ sau các khảo sát thực địa quan trọng của Ishibashi và cộng sự [5]. Nghiên cứu của Ishibashi đã xác lập vai trò quan trọng của nước khi chỉ ra rằng hiện tượng ăn mòn và bong tróc lớp bê tông bảo vệ xảy ra chủ yếu ở các khu vực tiếp xúc trực tiếp với nước mưa hoặc có sự tích tụ ẩm, ngay cả khi chiều sâu cacbonat hóa chưa chạm tới vị trí cốt thép [7,8-9]. Ngược lại, trong môi trường khô ráo, dù bê tông bị cacbonat hóa hoàn toàn, sự ăn mòn vẫn không đáng kể do thiếu sự thấm nước tới vị trí cốt thép [7-8,10]. Từ đó, khả năng kháng thấm nước được coi là yếu tố quan trọng hàng đầu để đảm bảo độ bền cho kết cấu bê tông cốt thép [7][8].

*Liên hệ tác giả: vietcuong.vu@utc.edu.vn

Nhận ngày 06/03/2026, sửa xong ngày 17/03/2026, chấp nhận đăng ngày 18/03/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2026.1266>

Cơ chế hư hỏng thực tế cần được nhìn nhận là kết quả của tác động kết hợp giữa quá trình cacbonat hóa và sự thâm nhập của nước mưa [4,11-12]. Trong khi quá trình cacbonat hóa làm trung hòa độ kiềm trong bê tông, làm suy yếu lớp màng thụ động, nước mưa thâm nhập vào cấu trúc lỗ rỗng đóng vai trò là chất điện ly và mang theo oxy hòa tan để thúc đẩy phản ứng điện hóa gây ăn mòn [8,13]. Các nghiên cứu đã khẳng định rằng sự xâm nhập của nước mưa là yếu tố quyết định gây hư hỏng vì nồng độ cacbonat trong không khí tương đối đồng nhất nhưng sự thấm nước lại phụ thuộc chặt chẽ vào vị trí và điều kiện tiếp xúc của cấu kiện [14][15]. Ăn mòn có thể bắt đầu khi lớp màng thụ động bị phá vỡ ở pH khoảng 11,5, tức là xảy ra ngay cả khi chiều sâu cacbonat hóa (thường đo ở pH 9,5 bằng phenolphthalein) vẫn còn cách cốt thép một khoảng nhất định [9,13].

Khả năng kháng thấm nước của bê tông bị chi phối mạnh mẽ bởi cấu trúc lỗ rỗng, vốn được quyết định bởi tỉ lệ nước trên chất kết dính (W/B) và điều kiện bảo dưỡng [16-18]. Việc sử dụng các phụ gia khoáng như tro bay (fly ash) từ lâu đã được xem là một giải pháp hiệu quả để giảm phát thải nhà kính và cải thiện độ bền thông qua phản ứng pozzolan giúp làm mịn cấu trúc lỗ rỗng và giảm đường kính lỗ rỗng ngưỡng (TPD) [19-21]. Các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy việc thay thế khoảng 15 % đến 30 % xi măng bằng tro bay mang lại hiệu quả kháng thấm vượt trội so với bê tông thường 1720. Tuy nhiên, nếu hàm lượng tro bay thay thế quá cao (ví dụ đạt mức 70 %), khả năng hấp thụ nước có thể tăng lên đáng kể, gây bất lợi cho độ bền công trình [22].

Mặc dù vai trò kết hợp giữa nước mưa và cacbonat hóa đã được ghi nhận, việc đánh giá định lượng tốc độ thấm nước dưới tác động của thành phần cấp phối vẫn còn nhiều khoảng trống nghiên cứu [11]. Xuất phát từ nhu cầu thực tế trong tính toán độ bền trong thiết kế và bảo trì công trình, việc nghiên cứu ảnh hưởng của tỉ lệ W/B và hàm lượng tro bay tới tốc độ thấm nước của bê tông nhằm giúp lượng hóa các tác động này. Kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp cơ sở dữ liệu thực nghiệm quan trọng giúp xây dựng các mô hình dự báo hư hỏng thực tế và tối ưu hóa công tác duy trì tuổi thọ cho các công trình xây dựng.

2. Vật liệu chế tạo và phương pháp thực nghiệm

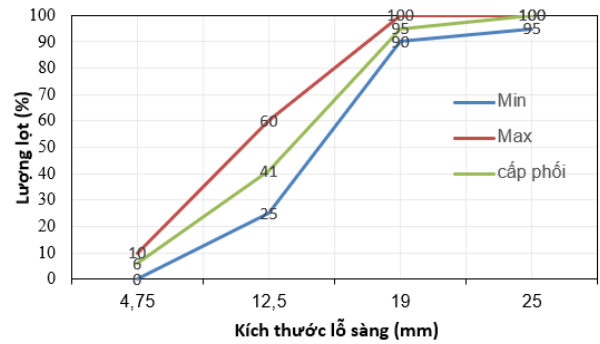
2.1. Vật liệu chế tạo

Đá được sử dụng có các chỉ tiêu kỹ thuật như sau:

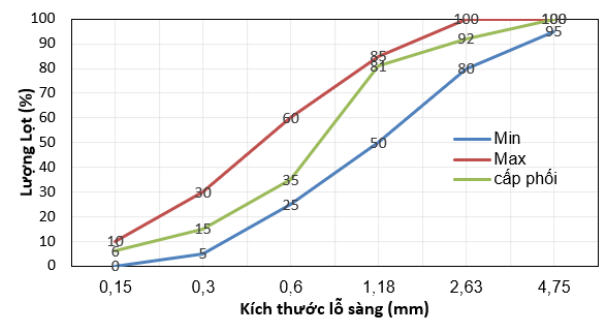
- Khối lượng riêng: $\rho_d = 2.65 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
- Cường độ chịu nén của đá gốc: 102.5MPa
- Khối lượng thể tích: $\gamma_d = 1.51 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
- $D_{max} = 25 \text{ mm}$ theo tiêu chuẩn ASTM D448

Cát có các chỉ tiêu kỹ thuật như sau:

- Khối lượng riêng: $\rho = 2.65 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
- Khối lượng thể tích: $\gamma = 1.46 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
- Thành phần hạt phù hợp với tiêu chuẩn ASTM C33



Hình 1. Thành phần hạt của đá được sử dụng.



Hình 2. Thành phần hạt của cát được sử dụng.

Xi măng sử dụng là Xi măng pooc-lăng PCB 40 VINCEM Bút Sơn và tro bay sử dụng là loại F của Nhiệt điện Phả Lại.



a. Xi măng PC 40 Bút Sơn



b. Tro bay Nhiệt điện Phả Lại

Hình 3. Xi măng và tro bay sử dụng trong nghiên cứu.

Phụ gia siêu dẻo được sử dụng là Sika Viscocrete 3000-20M và nước sử dụng là nước sạch tại Phòng thí nghiệm phù hợp với tiêu chuẩn TCVN 4506-2012.



Hình 4. Phụ gia siêu dẻo Sika Viscocrete 3000-20M.

2.2. Lựa chọn thành phần bê tông

Thành phần bê tông cơ sở được lựa chọn với lượng các tỉ lệ N/X lựa chọn là 0,4 ; 0,5 và 0,6 được đặt tên tương ứng là 0,4OPC; 0,5OPC và 0,6OPC. Tro bay được sử dụng để thay thế xi măng với tỉ lệ thay thế là 20 % và 30 % và đặt tên tương ứng là FA20 và FA30.

2.3. Phương pháp xác định hệ số thấm mao dẫn

Hiện nay trên thế giới có nhiều phương pháp để xác định hệ số tốc độ thấm nước mao dẫn của bê tông. Các phương pháp thí nghiệm đo hệ số thấm mao dẫn chủ yếu dựa trên việc theo dõi sự di chuyển của nước qua cấu trúc lỗ rỗng của bê tông dưới tác động của lực mao dẫn. Giả thiết rằng quá trình thấm nước được chi phối bởi lực mao dẫn và lực cản ma sát trong một ống tròn thẳng, mối quan hệ giữa độ sâu thấm, L , và thời gian thấm, t , được biểu diễn theo phương trình do Washburn (1921) đề xuất như sau:

$$L = \sqrt{\frac{\gamma r \cos \theta}{2\mu} t} \quad (1)$$

Trong đó

γ : sức căng bề mặt của chất lỏng;

r : bán kính ống;

θ : góc tiếp xúc;

μ : độ nhớt của chất lỏng

Tính đúng đắn của Phương trình (1) đã được xác nhận, ngay cả đối với kênh thủy tinh có độ sâu 5 nm và sự thấm nước trong bê tông có thể được đánh giá định lượng bằng Phương trình (1) [8; 11].

Mặt khác, Phương trình (1) không thể áp dụng trực tiếp cho quá trình thấm nước trong bê tông vì hệ thống lỗ rỗng thực tế không thẳng. Khi xét đến độ ngòan ngòeo (tortuosity) τ . Phương trình (1) được hiệu chỉnh thành:

$$L_t = \frac{L}{\tau} = \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{\gamma r \cos \theta}{2\mu} t} \quad (2)$$

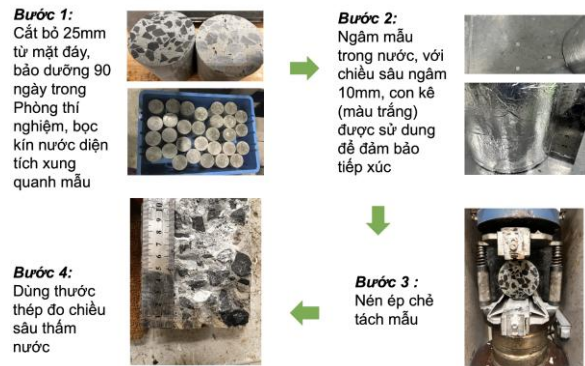
$$L_t = A\sqrt{t} \quad (3)$$

Trong đó L_t là độ sâu thấm trong ống không thẳng như lỗ rỗng của bê tông, và A là hệ số thấm mao dẫn chứa thông tin liên quan tới lỗ rỗng, tính ưa nước và tính chất của chất lỏng. Xác định A rất quan trọng để tính toán thời gian cần thiết để nước thấm đến cốt thép. Tuy nhiên xác định A theo phương pháp lý thuyết là rất phức tạp vì vậy nghiên cứu này sử dụng phương pháp thực nghiệm để xác định A .

Phương pháp phổ biến nhất là thí nghiệm ngâm mẫu, trong đó phần đáy mẫu được tiếp xúc với nước ở độ sâu 10–20 mm, sau đó mẫu được chế để xác định độ sâu thấm bằng các hóa chất chỉ thị màu hoặc cân để đo sự thay đổi khối lượng [12,23]. Một kỹ thuật định lượng khác sử dụng các lát cắt bê tông có độ dày khác nhau và giấy clorua coban để đo chính xác thời gian nước cần để xuyên qua toàn bộ độ dày lát cắt [9-10]. Các phương pháp không phá hủy sử dụng công nghệ hiện đại như cảm biến độ ẩm lắp trước, sử dụng sóng điện từ trường gần,

chẩn đoán hình ảnh qua tia neutron và MRI cho phép trực quan hóa sự phân bố nước bên trong bê tông [9,12]. Trong nghiên cứu này, phương pháp theo tiêu chuẩn Nhật Bản JSCE -G 582-2018 được tham khảo để tiến hành thí nghiệm xác định hệ số thấm A [23].

2.4. Qui trình thí nghiệm



Hình 5. Qui trình thí nghiệm xác định định chiều sâu thấm mao dẫn.

Các mẫu thí nghiệm hình trụ kích thước 10x20 cm được đúc và tháo ván khuôn sau 24 giờ, sau đó bảo dưỡng nước đủ 28 ngày tuổi. Tiếp theo mẫu được vớt cát bỏ 25 mm từ mặt đáy và để ngoài không khí 90 trong điều kiện phòng thí nghiệm. Trước khi tiến hành ngâm mẫu xác định hệ số tốc độ thấm nước mao dẫn, các mẫu thí nghiệm được cân kiểm tra trạng thái khối lượng không đổi, đảm bảo biến đổi khối lượng trong 24 giờ $\leq 0,1$ %.

Bước 1. Chuẩn bị và bảo dưỡng mẫu (air curing 90 ngày)

Sau khi mẫu đạt tuổi tháo khuôn/dưỡng hộ ban đầu, cát bỏ 25 mm ở phía đáy mẫu (phía chịu ảnh hưởng bleeding) để loại trừ vùng có cấu trúc đặc bất thường; bề mặt cát được dùng làm bề mặt thấm. Bảo dưỡng trong điều kiện không khí phòng thí nghiệm (nhiệt độ phòng) trong 90 ngày. Trước khi ngâm, bịt kín bề mặt xung quanh (thành bên) bằng vật liệu chống thấm bằng dính nhôm để đảm bảo nước chỉ xâm nhập theo phương 1 chiều từ mặt cát.

Bước 2. Ngâm nước không áp lực (mức nước 10 mm, 24 giờ)

Dùng con kê nhựa để mẫu đứng ổn định và tránh tiếp xúc không đều với đáy khay. Đặt mẫu thẳng đứng trong khay. Đổ nước sao cho mực nước ngập 10 mm tính từ bề mặt thấm (mặt cát), duy trì mực nước ổn định trong suốt thí nghiệm. Thời gian ngâm trong nghiên cứu này: 24 giờ (nằm trong khung thí nghiệm ngắn hạn; JSCE khuyến nghị đánh giá theo thời gian ngắn).

Bước 3. Chế tách mẫu

Kết thúc thời gian ngâm, lấy mẫu ra và tiến hành nén ép chế để tách mẫu theo đường kính bằng máy nén để thu được hai nửa bề mặt tách. Hạn chế tối đa thời gian thao tác từ lúc lấy mẫu khỏi nước đến khi đo để tránh sai lệch do nước bay hơi.

Bước 4. Đo chiều sâu thấm nước

Do chưa có thuốc hiện màu phản ứng với nước như khuyến nghị trong JSCE, ranh giới thấm nước được xác định bằng quan sát trực tiếp

bảng mắt thường dựa trên sự khác biệt màu sắc, độ sẫm của vùng ẩm trên bề mặt tách. Dùng thước thép đo chiều sâu thấm nước vuông góc với bề mặt thấm tại nhiều vị trí dọc theo bề mặt tách (từ 3-5 điểm cho mỗi nửa mẫu), sau đó lấy giá trị trung bình làm đại diện cho 1 mẫu. Việc

đo cần thực hiện ngay lập tức sau khi chẻ, vì nước trên bề mặt và vùng ẩm có thể bay hơi nhanh, làm mờ ranh giới thấm và gây đánh giá thấp chiều sâu thấm.

Bảng 1. Thành phần cấp phối bê tông.

Tên	W/C	W (kg)	C (kg)	FA (kg)	S (kg)	G (kg)	SP (l/100kg C)
0,4OPC	0,4	158	395	0	759	1090	1,2
0,4FA20	0,4	158	316	79	738	1090	1,2
0,4FA30	0,4	158	276,5	118,5	728	1090	1,2
0,5OPC	0,5	158	316	0	826	1090	0,8
0,5FA20	0,5	158	252,8	63,2	809	1090	0,8
0,5FA30	0,5	158	221,2	94,8	801	1090	0,8
0,6OPC	0,6	158	263,3	0	870	1090	0
0,6FA20	0,6	158	210,7	52,7	856	1090	0
0,6FA30	0,6	158	184,3	79	849	1090	0

3. Kết quả và thảo luận

Các kết quả hệ số thấm mao dẫn thu được trong nghiên cứu này được xác định thông qua thí nghiệm trên ba mẫu cho mỗi cấp phối bê tông, và giá trị được sử dụng trong phân tích là giá trị trung bình của ba mẫu thí nghiệm. Các cấp phối khảo sát bao gồm bê tông xi măng Portland thông thường (OPC) và bê tông có thay thế xi măng bằng tro bay với hàm lượng 20 % (FA20) và 30 % (FA30), tương ứng với các tỷ lệ W/B khác nhau.

Để đánh giá mức độ phù hợp của kết quả thí nghiệm, các giá trị đo được được so sánh với giá trị tính toán theo công thức dự báo tốc độ thấm nước trong tiêu chuẩn thiết kế của Nhật Bản *JSCE Standard Specification for Concrete Structures – Design (2017)*, được biểu diễn theo phương trình:

$$q_d = 1.3 \times 31.25(W/B)^2 \quad (5.8)$$

Trong đó,

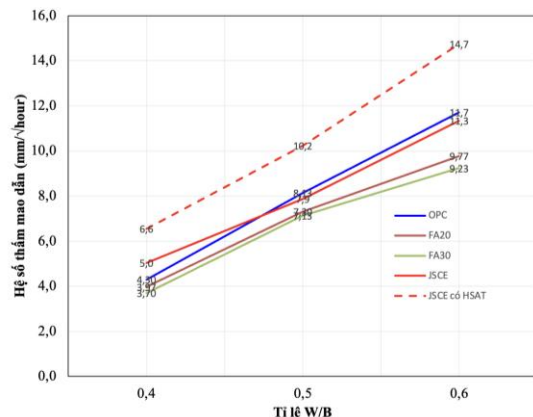
q_d : hệ số tốc độ thấm mao dẫn

W/B: Tỷ lệ nước/chất kết dính

Trong phương trình này, hệ số 1,3 được sử dụng như hệ số an toàn (HSAT) vật liệu theo quy định của JSCE nhằm đảm bảo tính an toàn trong thiết kế.

Trong nghiên cứu này, việc so sánh được thực hiện theo hai trường hợp: (i) giá trị tính toán theo công thức JSCE không xét hệ số an toàn và (ii) giá trị tính toán có xét hệ số an toàn $\gamma_c = 1,3$. Việc so sánh với giá trị không có hệ số an toàn cho phép đánh giá mức độ phù hợp giữa mô hình dự báo và kết quả thực nghiệm trong điều kiện vật liệu thực tế, trong khi việc so sánh với giá trị có hệ số an toàn giúp kiểm tra mức độ an toàn của công thức thiết kế trong tiêu chuẩn. Thông qua cách tiếp cận này, có thể xác định liệu công thức JSCE có dự báo hợp lý đối với bê tông thông thường và bê tông có sử dụng phụ gia khoáng

như tro bay hay không, đồng thời đánh giá mức độ chênh lệch giữa kết quả thí nghiệm và giá trị thiết kế được khuyến nghị trong tiêu chuẩn. Kết quả thí nghiệm và tính toán hệ số thấm được thể hiện trong Hình 6.

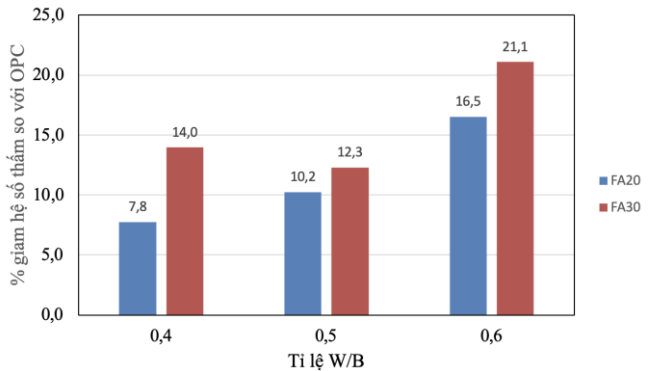


Hình 6. Ảnh hưởng của tỷ lệ W/B tới hệ số tốc độ thấm mao dẫn.

Kết quả thí nghiệm thể hiện trong Hình 6 cho thấy hệ số thấm mao dẫn của bê tông tăng theo tỷ lệ W/B đối với tất cả các cấp phối. Khi tỷ lệ W/B tăng từ 0,4 lên 0,6, hệ số thấm mao dẫn của bê tông OPC tăng từ 4,30 lên 11,7 mm/\sqrt{hour} , tương ứng mức tăng khoảng 172 %. Xu hướng này phù hợp với cơ chế phát triển cấu trúc lỗ rỗng của vật liệu xi măng. Khi tỷ lệ W/B tăng, lượng nước dư trong quá trình thủy hóa tăng lên, dẫn đến sự hình thành nhiều lỗ rỗng mao quản hơn và làm tăng mức độ liên thông của mạng lỗ rỗng. Do đó, khả năng vận chuyển nước trong bê tông tăng lên đáng kể.

Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy việc sử dụng tro bay thay thế xi măng giúp làm giảm hệ số thấm mao dẫn của bê tông. Tại tỷ lệ W/B = 0,4, khi thay thế 20 % và 30 % xi măng bằng tro bay, hệ số thấm mao dẫn giảm lần lượt khoảng 7,8 % và 14 % so với bê tông OPC như

Hình 7. Hiệu quả giảm thấm trở nên rõ rệt hơn ở tỷ lệ W/B cao. Cụ thể, tại W/B = 0,6, giá trị hệ số thấm của FA20 và FA30 giảm lần lượt khoảng 16,5 % và 21,1 % so với OPC. Sự cải thiện này có thể được giải thích bởi hai cơ chế chính. Thứ nhất là hiệu ứng lấp đầy (filler effect), trong đó các hạt tro bay có kích thước nhỏ giúp cải thiện độ đặc chắc của hệ vật liệu và lấp đầy các vi lỗ rỗng trong cấu trúc. Thứ hai là phản ứng pozzolan của tro bay với $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sinh ra trong quá trình thủy hóa xi măng, tạo thêm sản phẩm C-S-H thứ cấp. Các sản phẩm này làm tinh chỉnh cấu trúc lỗ rỗng, giảm kích thước và mức độ liên thông của lỗ rỗng mao quản, từ đó làm giảm tốc độ thấm nước.



Hình 7. Mức giảm (%) hệ số thấm mao dẫn của bê tông sử dụng tro bay so với OPC.

Kết quả thí nghiệm cũng được so sánh với giá trị dự báo theo công thức thực nghiệm của tiêu chuẩn JSCE. Nhìn chung, mô hình JSCE thể hiện xu hướng tăng của hệ số thấm mao dẫn theo tỷ lệ W/B tương tự kết quả thực nghiệm. Đối với bê tông OPC, giá trị dự báo theo JSCE khá gần với kết quả thí nghiệm, với sai khác chỉ khoảng 3–16 %. Điều này cho thấy công thức của JSCE có thể dự đoán tương đối tốt khả năng thấm mao dẫn của bê tông sử dụng xi măng Portland thông thường.

Tuy nhiên, khi xét thêm hệ số an toàn trong công thức JSCE, giá trị dự báo trở nên lớn hơn đáng kể so với kết quả thực nghiệm. Điều này giúp các thiết kế được an toàn hơn, tuy nhiên khi tính toán cho bảo trì, việc bỏ hệ số an toàn giúp việc tính toán sát với thực tế hơn và đảm bảo tính chính xác của các mô hình tính toán tuổi thọ công trình.

Xét dưới góc độ vi cấu trúc, sự giảm hệ số thấm mao dẫn khi tăng hàm lượng tro bay có thể được giải thích bằng lý thuyết percolation của mạng lỗ rỗng. Theo Sakai và Kishi (2016), quá trình vận chuyển nước trong bê tông chủ yếu xảy ra thông qua các lỗ rỗng có kích thước lớn hơn đường kính lỗ rỗng ngưỡng, tạo thành một mạng lỗ rỗng liên thông [10]. Khi tro bay được sử dụng, thể tích các lỗ rỗng lớn và mức độ liên thông của mạng lỗ rỗng giảm xuống, làm gián đoạn đường dẫn vận chuyển nước. Đồng thời, sự tinh chỉnh cấu trúc lỗ rỗng cũng làm tăng độ uốn khúc của đường dẫn thấm, khiến quá trình vận chuyển nước trong bê tông trở nên khó khăn hơn.

Tổng hợp các kết quả cho thấy tỷ lệ W/B và hàm lượng tro bay đều đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát quá trình thấm nước mao dẫn của bê tông. Tro bay từ lâu đã được biết là làm tăng tốc độ

cacbonat hoá tức là tăng nguy cơ ăn mòn cốt thép, tuy nhiên việc sử dụng tro bay ở mức 20–30 % có thể làm giảm đáng kể hệ số thấm mao dẫn của bê tông giúp giảm số lần nước có thể chạm tới vị trí cốt thép giúp giảm nguy cơ ăn mòn. Do tính 2 mặt của tro bay, việc tính toán lượng hoá ảnh hưởng của tro bay tới độ bền công trình là cần thiết để đưa sử dụng các loại bê tông phù hợp.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã đánh giá ảnh hưởng của tỷ lệ W/B và hàm lượng tro bay đến hệ số thấm mao dẫn của bê tông, đồng thời so sánh kết quả thực nghiệm với giá trị dự báo theo công thức của tiêu chuẩn JSCE. Từ các kết quả thu được, có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

Hệ số thấm mao dẫn của bê tông tăng rõ rệt khi tỷ lệ W/B tăng. Khi W/B tăng từ 0,4 lên 0,6, hệ số thấm mao dẫn của bê tông OPC tăng từ 4,30 lên $11,7 \text{ mm}/\sqrt{\text{hour}}$, cho thấy tỷ lệ W/B là yếu tố chi phối quan trọng đối với khả năng vận chuyển nước trong bê tông.

Việc thay thế một phần xi măng bằng tro bay giúp làm giảm hệ số thấm mao dẫn của bê tông. So với bê tông OPC, bê tông FA20 và FA30 có hệ số thấm thấp hơn ở tất cả các mức W/B khảo sát. Mức giảm đạt khoảng 7,8–14 % tại W/B = 0,4 và tăng lên khoảng 16,5–21,1 % tại W/B = 0,6 cho thấy hiệu quả giảm thấm của tro bay trở nên rõ rệt hơn ở tỷ lệ W/B cao.

Sự cải thiện khả năng chống thấm của bê tông khi sử dụng tro bay có thể được giải thích bởi hiệu ứng lấp đầy của các hạt tro bay mịn và phản ứng pozzolan tạo thêm sản phẩm C-S-H, từ đó làm tinh chỉnh cấu trúc lỗ rỗng và giảm mức độ liên thông của mạng lỗ rỗng mao quản.

Giá trị hệ số thấm mao dẫn dự báo theo công thức của tiêu chuẩn JSCE cho thấy xu hướng biến thiên theo tỷ lệ W/B tương tự kết quả thực nghiệm. Đối với bê tông OPC, sai khác giữa giá trị tính toán và thực nghiệm tương đối nhỏ, cho thấy công thức JSCE có thể dự báo tương đối tốt khả năng thấm mao dẫn của bê tông thông thường.

Khi xét thêm hệ số hiệu chỉnh hệ số an toàn trong công thức JSCE, giá trị dự báo có xu hướng lớn hơn so với kết quả thực nghiệm. Điều này cho thấy tính an toàn và phù hợp khi tính toán thiết kế. Khi cần tính sát thực tế như tính toán để bảo trì công trình, có thể cân nhắc việc không sử dụng hệ số an toàn trong tính toán.

Nhìn chung, kết quả nghiên cứu cho thấy việc giảm tỷ lệ W/B kết hợp với sử dụng tro bay ở mức 20–30 % là giải pháp hiệu quả để cải thiện khả năng chống thấm nước của bê tông.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số tài T2025-XD-007.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Broomfield, J. P. (2007). *Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair*, 2nd Edition.1...
- [2]. Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*, 5th edition.3
- [3]. Ishibashi, T., Furuya, T., Hamazaki, N., & Suzuki, H. (2002). Investigation of concrete spalling in bridges. *JSCE Proc.*, V56(711), 125–134.2...
- [4]. Maehara, S., & Iyoda, T. (2018). Study on the effect of the presence or absence of rain on carbonation and spalling. *JSCE Proc.*, 74(2), 80–87.4...
- [5]. Matsuda, Y. (2013). ‘Water’ controls and determines the durability of concrete. 1-effect of water on degradation of concrete structure. *Concrete Engineering*, 51(12), 989–994.6...
- [6]. Vu, V. C., Kamada, T., & Kishi, T. (2020). Combination effects of carbonation and rainwater penetration on spalling. *Proceedings of the 4th International Conference on Construction Materials (ConMat20)*, Tokyo, Japan.1112
- [7]. Vu, V. C. (2021). *Research on deterioration predictive model of concrete structures considering combined effect of carbonation and water penetration*. Doctoral Dissertation, The University of Tokyo.1314
- [8]. Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry*, 2nd edition.715
- [9]. Sakai, Y., Yokoyama, Y., & Kishi, T. (2017). Relationship Among the Permeation Rate of Water into Concrete, the Mix Design, Curing, and the Degree of Drying. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 15(10), 595-602.16...
- [10]. Sakai, Y., & Kishi, T. (2016). Quantitative Evaluation of Water Migration in Concrete With Threshold Pore Diameter Obtained Based on Critical Volume Fraction for Percolation. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E2*, 72(2), 83-96.19...
- [11]. Sakai, Y., Nakamura, C., & Kishi, T. (2013). Correlation between Permeability of Concrete and Threshold Pore Size obtained with Epoxy-Coated Sample. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 11(8), 189-195.2223
- [12]. Ueda, H., & Suzuki, H. (2016). Water Penetrability into Concrete Surface and Interface between Concrete and Repair Materials. *Quarterly Report of RTRI*, 57(1), 36-41.24...
- [13]. Bradu, A., & Florea, N. (2015). Water absorption of self-compacting concrete containing different levels of fly ash. *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi*, 61(4), 107-114.2728
- [14]. Japan Society of Civil Engineers (JSCE) (2017). *Standard Specifications for Concrete Structures - Design*.5...
- [15]. Japan Society of Civil Engineers (JSCE) (2018). *Standard Specifications for Concrete Structures - Maintenance*.5
- [16]. Railway Technical Research Institute (RTRI) (2007). *Standard specifications for maintenance and repair of railway structures and commentary: Concrete structures*.30...
- [17]. Todoroki, S., Ishida, T., Tadokoro, T., & Ueda, H. (2019). Effect of water and carbonation on reinforcement corrosion in concrete. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E2*, 75(4), 226-238.33...
- [18]. Yokoyama, Y. (2019). *Research on durability design, concrete construction and evaluation of surface quality to rationally ensure the durability of structures*. Doctoral Dissertation, The University of Tokyo.3637
- [19]. Parrott, L. J. (1992). Water absorption in cover concrete. *Materials and Structures*, 25, 284-292.9...
- [20]. Washburn, E. W. (1921). The dynamics of capillary flow. *Physical Review*, 17, 273-283.39...
- [21]. Fan, Y. F., Hu, Z. Q., Zhang, Y. Z., & Liu, J. L. (2010). Deterioration of compressive property of concrete under simulated acid rain environment. *Construction and Building Materials*, 24(10), 1975–1983.9...
- [22]. Uchida, S., & Hamada, M. (1928). Durability test of steel and concrete. *Journal of Architecture and Building Science*, 516, 1287-1303.4445
- [23]. JSCE (2018). *Test Method for Water Penetration Rate Coefficient of Concrete Subjected to Water in Short Term (JSCE-G 582-2018)*