

NGHIÊN CỨU HIỆN TƯỢNG TẮC NGHẼN CỦA BÊ TÔNG RỒNG THOÁT NƯỚC SỬ DỤNG CỐT LIỆU TÁI CHẾ TỪ PHÉ THẢI XÂY DỰNG

Ngô Kim Tuấn^{a,*}, Nguyễn Hoàng Giang^b, Phan Quang Minh^b,
Nguyễn Tiến Dũng^b, Ken Kawamoto^c

^aKhoa Vật liệu Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^cFaculty of Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, Japan

Nhận ngày 14/01/2025, Sửa xong 20/02/2025, Chấp nhận đăng 24/02/2025

Tóm tắt

Bê tông rỗng thoát nước đang được ứng dụng rộng rãi trong thực tế với ưu điểm nổi bật về tính thấm nước và khả năng thoát nước bề mặt qua cấu trúc rỗng của bê tông. Tuy nhiên, trong quá trình sử dụng, khả năng thoát nước của bê tông rỗng bị suy giảm theo thời gian do các tác nhân gây tắc nghẽn làm giảm hệ số thấm. Đây được xem là một trong những nhược điểm chính của bê tông rỗng thoát nước. Bài báo này trình bày các nguyên nhân gây ra hiện tượng tắc nghẽn, được xác định bằng thực nghiệm khi sử dụng các tác nhân tắc nghẽn phổ biến như đất sét và cát. Kết quả nghiên cứu cho thấy hiện tượng tắc nghẽn phụ thuộc vào độ rỗng thiết kế và đặc tính độ rỗng của bê tông rỗng, chiều dày của bê tông rỗng thoát nước theo phương thấm nước và kích thước hạt của tác nhân tắc nghẽn. Hệ số thấm giảm mạnh ở những lần bổ sung tác nhân gây tắc nghẽn đầu tiên, trạng thái tác nhân tắc nghẽn xâm nhập vào trong cấu trúc rỗng sẽ quyết định sự ảnh hưởng đến hệ số thấm cũng như khả năng loại bỏ và các biện pháp bảo dưỡng, duy trì khả năng thoát nước của bê tông rỗng.

Từ khóa: bê tông rỗng thoát nước; tắc nghẽn; hệ số thấm; cấu trúc rỗng; tác nhân tắc nghẽn.

RESEARCH ON THE CLOGGING PHENOMENON OF PERVIOUS CONCRETE USING RECYCLED AGGREGATES FROM CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE

Abstract

Pervious concrete is widely applied in practice due to its outstanding advantages in water permeability and surface drainage capability through its porous structure. However, during usage, the drainage capacity of permeable concrete deteriorates over time due to clogging agents that reduce the permeability coefficient. This is considered one of the main drawbacks of pervious concrete. This paper presents the causes of the clogging phenomenon, experimentally identified using common clogging agents such as clay and sand. The research results show that clogging depends on the relationship between the designed porosity and the porosity characteristics of the pervious concrete, the thickness of the concrete in the direction of water flow, and the particle size of the clogging agents. The permeability coefficient decreases significantly during the initial additions of clogging agents. The state of clogging agents penetrating the porous structure determines their impact on the permeability coefficient, as well as the removal methods and maintenance strategies to sustain the drainage capacity of permeable concrete.

Keywords: pervious concrete; clogging; permeability coefficient; porous structure; clogging agents.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(1V\)-01](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(1V)-01) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

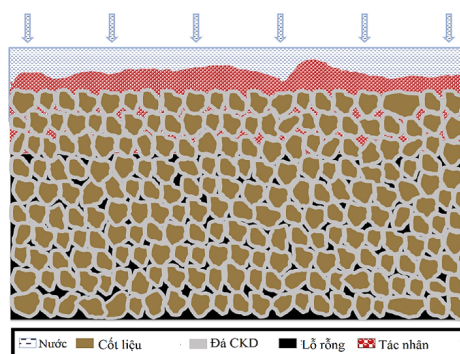
*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: tuannk@huce.edu.vn (Tuân, N. K.)

1. Giới thiệu

Bê tông rỗng thoát nước (BTR) là loại bê tông thân thiện với môi trường đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi nhờ các ưu điểm hướng đến phát triển bền vững như: tiêu thoát nước làm giảm hiện tượng ngập úng, bổ sung nước ngầm, giảm hiệu ứng nhiệt đô thị, làm tăng khả năng chống trượt, hấp thụ âm thanh [1, 2]. BTR được nghiên cứu và ứng dụng sớm nhất tại Châu Âu từ giữa thế kỷ 19, từ những năm 1970 trở đi, BTR được ứng dụng phổ biến ở Mỹ và nhiều khu vực trên thế giới với mục tiêu chính là kiểm soát lượng nước mưa và lượng nước hình thành do băng tan [3]. Hiện nay, một số nước trên thế giới như Mỹ, Nhật, các nước Châu Âu sử dụng BTR chủ yếu cho lớp áo đường tại các khu đô thị với cường độ từ 20 – 30 MPa [4]. Nhiều ứng dụng khác sử dụng BTR với cường độ thấp như lớp mặt khu vực đỗ xe, vỉa hè với mục tiêu giảm hiệu ứng đảo nhiệt đô thị [5, 6]. Các tính chất, vai trò và tác động của BTR đã được thực hiện trong rất nhiều các nghiên cứu gần đây, trong đó tập trung vào các tính chất và các vấn đề liên quan đến môi trường, đặc tính thủy lực, tính an toàn, đặc tính cơ học, ... Trong đó theo thống kê từ năm 2009 đến năm 2018 có 121 nghiên cứu về đặc tính thủy lực, trong đó có 19 nghiên cứu về khả năng tắc nghẽn [7]. Hiện tượng tắc nghẽn làm giảm hệ số thấm hoặc làm mất hoàn toàn hệ số thấm nước của BTR (Hình 1). Trong các nhược điểm của BTR, hiện tượng tắc nghẽn cần được xem xét và đánh giá cụ thể do có ảnh hưởng lớn nhất đến đặc tính của BTR. Nguyên nhân tắc nghẽn chủ yếu do một lượng lớn các hạt như bùn sét, đất, cát hoặc các mảnh vụn liên tục đi qua hệ thống lỗ rỗng và bị đọng lại trong cấu trúc hoặc trên bề mặt [2]. Bên cạnh đó, các tác nhân tích lũy từ phương tiện giao thông, các thảm thực vật, lá cây hoặc bụi bẩn cũng có thể gây ra tắc nghẽn lỗ rỗng.

Sự tắc nghẽn được phân loại theo thời gian hoặc theo bản chất của tác nhân. Phân loại theo thời gian có hai loại: (1) quá trình diễn ra theo thời gian do sự lắng đọng liên tục hoặc theo chu kỳ của một lượng nhỏ trầm tích hoặc một số tác nhân khác gây ra; (2) quá trình tắc nghẽn đột ngột do xói mòn đất, cát, lá cây [9]. Phân loại tắc nghẽn theo tác nhân được chia làm 3 loại: (1) Tác nhân vật lý; (2) Tác nhân do hiện tượng hóa học (quá trình cacbonat hoặc sunfua của các khoáng dẫn đến kết tủa); (3) Sự tắc nghẽn sinh học khi các loại tảo, nấm, rễ cây gây ra. Hiệu quả sử dụng của BTR sẽ giảm nếu giảm khả năng thấm nước. Hệ số thấm nước có thể giảm 90% sau 5 năm sử dụng và dần trở thành vật liệu không thấm nước. Một nghiên cứu khác chỉ ra hệ số thấm của mặt đường sau 8 năm sử dụng chỉ là 0,007 mm/s, bằng 1/1000 so với ban đầu [10, 11].

Yếu tố ảnh hưởng đến sự tắc nghẽn chủ yếu là kích thước của tác nhân gây tắc nghẽn. Theo nghiên cứu của Huang và cs. [12]: tác nhân tắc gây nghẽn có kích thước từ 0,1 – 100 μm và được phân loại thành hạt keo có kích thước 0,01 – 10 μm ; các hạt lơ lửng trong nước có kích thước từ 10 - 100 μm và các hạt kích thước lớn trên 100 μm và thường giới hạn đến 5 mm (do đường kính lỗ rỗng thường từ 1 – 5 mm) [13]. Tác nhân gây tắc nghẽn và kích thước lỗ rỗng của BTR có mối quan hệ với nhau, kích thước lỗ rỗng càng lớn càng hạn chế ảnh hưởng của tác nhân gây tắc nghẽn, trong khi tăng kích thước của tác nhân làm tăng hiện tượng tắc nghẽn (Hình 1.2) [12]. Cùng quan điểm đó, Chen và cs. [14] kết luận kích thước tác nhân từ 0,15 – 0,3 và 1,18 – 2,36 mm làm giảm mạnh nhất hệ số thấm của BTR. Trong nghiên cứu của Haselbach [15], đất sét là tác nhân rất nguy hiểm làm suy giảm hệ số thấm, tác động có thể lớn hơn so với cát do khó loại bỏ đất sét bám trên bề mặt hoặc trong cấu trúc rỗng. Trong



Hình 1. Hiện tượng tắc nghẽn của BTR [8]

một nghiên cứu khác, tác giả Kayhanian [11] kết luận các hạt trầm tích nhỏ hơn 38 μm là một yếu tố quan trọng gây ra hiện tượng tắc nghẽn.

Một số biện pháp khắc phục thể giảm đáng kể hiện tượng tắc nghẽn đã được nghiên cứu gồm: thổi áp lực cao, rửa áp lực cao và hút chân không. Hút chân không sẽ không có hiệu quả với trường hợp tác nhân lắng đọng và tắc sâu trong cấu trúc BTR, chỉ hiệu quả khi tác nhân ở lớp mặt, trong trường hợp này rửa áp lực cao sẽ có hiệu quả cao hơn [16]. Các phương pháp này có thể đạt hiệu quả lên đến 90% so với hệ số thấm ban đầu. Nếu kết hợp cả hai phương pháp thổi áp lực cao và rửa áp lực cao sẽ có hiệu quả cao nhất [17].

Bên cạnh đó, nghiên cứu về ảnh hưởng của chiều dày BTR đến hệ số thấm còn ít được xem xét, và cũng ít được đề cập đến trong mối liên hệ với tình trạng tắc nghẽn. Khi thay đổi chiều dày mẫu từ 50 mm, 75 mm và 100 mm cho thấy các quy luật khác nhau về hệ số thấm khi có mặt của các tác nhân gây tắc nghẽn [12]. Đây là hiện tượng phức tạp và mang tính chất ngẫu nhiên giữa 1 trong 2 cơ chế (phụ thuộc vào cơ chế nào chiếm ưu thế): (1) Tăng chiều dày làm giảm nguy cơ tắc nghẽn do hai nguyên nhân: với cùng lượng tác nhân gây tắc nghẽn và cùng diện tích bề mặt, khi tăng chiều dày làm tăng thể tích bê tông và thể tích lỗ rỗng, từ đó làm giảm tỷ lệ giữa thể tích tác nhân gây tắc nghẽn và thể tích lỗ rỗng. Đồng thời, tăng chiều dày làm tăng hệ số thấm, từ đó làm giảm nguy cơ tắc nghẽn. Cơ chế (2): tác nhân gây tắc nghẽn sẽ phải di chuyển quãng đường dài hơn khi tăng chiều dày, từ đó làm tăng nguy cơ tác nhân gây tắc nghẽn bị tắc lại trong quá trình dịch chuyển, khi lỗ rỗng bị tắc sẽ làm giảm nhanh chóng hệ số thấm. Trong đó, cơ chế số (2) phụ thuộc vào kích thước tác nhân gây tắc nghẽn và kích thước lỗ rỗng của BTR.

Ở Việt Nam, BTR đã được nghiên cứu ở các đơn vị như Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Trường Đại học Giao thông Vận tải (Hà Nội, Thành phố Hồ Chí Minh), Đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh, Đại học Kiến Trúc Hà Nội, các viện chuyên ngành như Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng (IBST), Bộ Giao thông vận tải, ... Các nghiên cứu [18–21] tập trung nghiên cứu ảnh hưởng các loại nguyên vật liệu đến các đặc tính cơ lý, đặc tính rỗng và khả năng thoát nước của BTR. Trong đó có nêu một số biện pháp cải thiện đặc tính cơ lý của BTR. Như vậy, BTR đã được nghiên cứu ở Việt Nam nhiều năm và đa dạng hướng nghiên cứu. Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu về sự suy giảm hệ số thấm liên quan đến hiện tượng tắc nghẽn của BTR.

Bên cạnh đó, các thành phố lớn ở Việt Nam phát sinh lượng lớn phế thải xây dựng và cần có các giải pháp xử lý hiệu quả, giảm thiểu tác động đến môi trường. Phế thải xây dựng (PTXD) có thể được tái chế thành cốt liệu và sử dụng để chế tạo BTR, đạt được mục tiêu kép trong bảo vệ môi trường và phát triển bền vững. Hiện nay các nghiên cứu về BTR sử dụng cốt liệu tái chế (CLTC) từ phế thải xây dựng ở Việt Nam còn khá mới mẻ. Các nghiên cứu trên thế giới cho thấy, BTR sử dụng CLTC thường thu được độ rỗng lớn hơn độ rỗng thiết kế khi độ rỗng thu được có thể đạt từ 22 - 28%, trong khi độ rỗng thiết kế là 20 – 25% [9, 22]. Điều này là do CLTC có nhiều góc cạnh làm tăng độ rỗng giữa các hạt và độ rỗng trong hạt cốt liệu cũng làm tăng đáng kể tổng độ rỗng của bê tông. Tuy nhiên, độ rỗng chỉ là một thông số quyết định hệ số thấm, với cùng độ rỗng có thể có nhiều giá trị hệ số thấm và ngược lại. Ví dụ, trong một nghiên cứu cho thấy độ rỗng cao nhất là 42%, với hệ số thấm chỉ là 17,4 mm/s. Vì vậy, bên cạnh độ rỗng thì thông số lỗ rỗng, cấu trúc lỗ rỗng quyết định hệ số thấm nước của BTR [23].

Thông số lỗ rỗng và cấu trúc lỗ rỗng là các yếu tố bị tác động và thay đổi khi có các tác nhân tắc nghẽn như cát, đất sét có các kích thước khác nhau xâm nhập và hệ thống lỗ rỗng của BTR và làm thay đổi hệ số thấm. Trong bài báo này, tác giả phân tích ảnh hưởng của hai tác nhân gây tắc nghẽn phổ biến là cát và đất sét đến khả năng thoát nước của BTR thông qua sự thay đổi hệ số thấm và lượng tác nhân tắc nghẽn bị giữ lại trong cấu trúc của BTR. Ngoài ra, sự thay đổi trong độ rỗng thiết kế và

chiều dày của BTR cũng được nghiên cứu trong bài báo này.

2. Nguyên vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên vật liệu

a. Xi măng

Xi măng đóng vai trò chất kết dính tạo tính công tác cần thiết cho hỗn hợp bê tông và hình thành cường độ bê tông. Trong nghiên cứu sử dụng xi măng PC40 Bút Sơn, các chỉ tiêu kỹ thuật được đưa ra trong Bảng 1. Xi măng sử dụng đạt yêu cầu kỹ thuật của xi măng PC 40 theo TCVN 2682:2020.

Bảng 1. Tính chất cơ lý xi măng PC40 Bút Sơn theo TCVN 2682:2020

Tính chất	Đơn vị	Yêu cầu	Kết quả	Phương pháp thử
Khối lượng riêng	g/cm ³	-	3,07	TCVN 13605:2023 [24]
Nước tiêu chuẩn	%	-	29,5	TCVN 6017:2015 [25]
Độ ổn định thể tích	mm	≤ 10	1,70	
Bắt đầu đông kết	Phút	≥ 45	160	
Kết thúc đông kết	Phút	≤ 375	245	
Cường độ nén:				
Sau 3 ngày	MPa	≥ 21	28,00	TCVN 6016:2011 [26]
Sau 28 ngày	MPa	≥ 40	47,50	

b. Cốt liệu tái chế từ PTXD

Cốt liệu tái chế sử dụng có nguồn gốc từ kết cấu bê tông cốt thép và khối xây được thu gom từ việc phá dỡ công trình tại Hà Nội. Quá trình gia công từ kẹp hàm, đập búa và sàng phân loại được thực hiện trên dây chuyền tái chế công suất 20 - 50 tấn phế thải/giờ, đặt tại nhà máy bê tông Bình Dương tại Đông Anh, Hà Nội. CLTC được sàng phân loại và cỡ hạt 5 – 10 mm được sử dụng trong nghiên cứu (Phù hợp với kích thước mắt sàng theo Tiêu chuẩn Việt Nam). Bảng 2 thể hiện các tính chất của cốt liệu tái chế từ phế thải xây dựng.



Hình 2. CLTC từ PTXD sau khi gia công

Bảng 2. Tính chất của CLTC từ PTXD

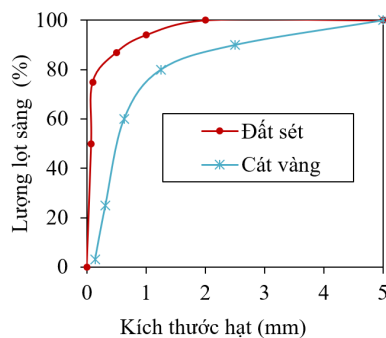
STT	Tính chất thí nghiệm	Đơn vị	CLTC
1	Khối lượng riêng	kg/m ³	2620
2	Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	1370
3	Khối lượng thể tích lèn chặt	kg/m ³	1620
4	Khối lượng thể tích hạt ở trạng thái khô	kg/m ³	2270
5	Độ hút nước ở trạng thái bão hòa khô bề mặt	%	4,8
6	Hàm lượng hạt toai dẹt	%	3,9
7	Độ nén dập trong xilanh	%	19,7
8	Độ mài mòn Los Angeles	%	32,1

c. Nước

Nghiên cứu sử dụng nước sinh hoạt để chế tạo bê tông như bê tông thường. Nước sử dụng thỏa mãn các yêu cầu kỹ thuật của TCVN 4560:2012.

d. Tác nhân tắc nghẽn

Bài báo sử dụng hai tác nhân gây tắc nghẽn phổ biến, xuất hiện trong quá trình khai thác sử dụng các bề mặt BTR là cát vàng và đất sét (Được sử dụng riêng từng loại, ở trạng thái khô). Thành phần hạt của hai loại tác nhân được thể hiện trong Bảng 3 và Hình 3. Thành phần hạt của tác nhân gây tắc nghẽn quyết định các mức độ xâm nhập của tác nhân vào trong cấu trúc rỗng của BTR, từ đó quyết định mức độ ảnh hưởng đến hệ số thấm của BTR.



Hình 3. Biểu đồ thành phần hạt của tác nhân tắc nghẽn

Bảng 3. Tính chất của các tác nhân tắc nghẽn

STT	Tác nhân tắc nghẽn	Kích thước (mm)	Lượng lọt sàng tích lũy
1	Cát vàng	< 0,14	3%
		0,14 – 0,315	25%
		0,315 – 0,63	60%
		0,63 – 1,25	80%
		1,25 – 2,5	90%
		2,5 – 5	100%
2	Đất sét	< 0,075	45%
		0,075 – 0,1	75%
		0,1 – 0,5	87%
		0,5 – 1	100%

2.2. Phương pháp nghiên cứu

a. Thiết kế cấp phối bê tông rỗng thoát nước

Phương pháp thiết kế cấp phối BTR dựa trên tiêu chuẩn ACI 522R-10 [13]. Các bước thiết kế thành phần BTR dựa trên nguyên tắc thể tích tuyệt đối, thể tích của BTR bao gồm: Thể tích cốt liệu + Thể tích hồ xi măng + Thể tích độ rỗng (theo thiết kế). Thành phần cấp phối bê tông được thể hiện trong Bảng 4.

Bảng 4. Thành phần cấp phối bê tông rỗng thoát nước

STT	Ký hiệu (theo độ rỗng thiết kế)	CLTC (kg)	Xi măng (kg)	Nước (kg)	R_n (28 ngày) Mpa
1	R-15	1317	414	137	19,3
2	R-20	1317	337	111	14,5
3	R-25	1317	268	88	9,7

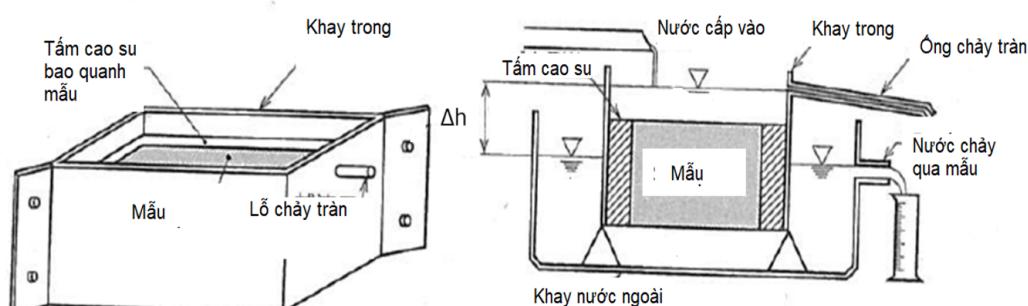
b. Thí nghiệm xác định hệ số thấm nước

Tính thấm nước của BTR được áp dụng theo định luật Darcy mô tả chuyển động tuyến tính của chất lỏng trong dòng chảy tầng qua hệ thống lỗ rỗng bằng nguyên lý cột nước ổn định (Hình 4). Phương pháp thí nghiệm được quy định theo tiêu chuẩn JIS A 1218:2020 [27]/JIS A 5371-2016 [28]. Nước được chảy qua mẫu với sự chênh lệch cột nước ổn định trong quá trình thí nghiệm (Δh cố định). Hệ số thấm được tính toán dựa trên lượng nước chảy qua mẫu trong 30 giây. Công thức tính toán hệ số thấm như sau:

$$K = \frac{L \cdot Q}{F \cdot \Delta h \cdot 30 \cdot 100} \quad (\text{mm/s})$$

trong đó F là tiết diện ngang của mẫu gạch bê tông, mm^2 ; L là chiều cao (chiều dài đường thấm) của mẫu, mm; Δh là chiều cao chênh lệch bề mặt nước giữa khay và thùng nước, mm; Q là lượng nước chảy qua mẫu trong 30 giây, mm^3 ;

Thí nghiệm xác định hệ số thấm được thực hiện theo phương xx (qua mặt cắt ngang có diện tích $100 \times 100 \text{ mm}$).



Hình 4. Sơ đồ thí nghiệm xác định hệ số thấm nước

c. Thí nghiệm xác định mức độ tắc nghẽn

Các mẫu thí nghiệm và thiết bị xác định mức độ tắc nghẽn chính là các mẫu và thiết bị dùng để xác định hệ số thấm nước nhưng được bổ sung các tác nhân tắc nghẽn. Mẫu có hình dạng là hình trụ chữ nhật: $100 \times 100 \times 60$, $100 \times 100 \times 100$, $100 \times 100 \times 150 \text{ (mm)}$, cụ thể: mặt cắt ngang hình vuông $100 \times 100 \text{ mm}$, chiều cao mẫu thay đổi từ $60 - 100 - 150 \text{ mm}$.

Mô hình thí nghiệm và khối lượng tác nhân tắc nghẽn cho mỗi lần thí nghiệm được xác định dựa trên nghiên cứu của các tác giả Huang [12], Sriravindrarajah và cs. [29], theo mô phỏng số năm sử dụng và lượng tác nhân tích lũy từng năm. Tác nhân gây tắc nghẽn đã được sử dụng 25 g/lần thử nghiệm đến khi hệ số thấm không thay đổi [10]. Trong nghiên cứu của Pezzaniti và cs. [30], tác nhân gây tắc nghẽn được sử dụng với lượng 200 mg/lít nước (500 mg/lần), tổng cộng 1110 g tác nhân được sử dụng để mô phỏng 35 năm sử dụng (khoảng 32 g/năm). Zhang và cs. [31] sử dụng 50 g tác nhân cho mỗi lần thử nghiệm hệ số thấm.

Trong kết quả nghiên cứu của bài báo này sử dụng tác nhân gây tắc nghẽn là cát vàng và đất sét (riêng từng tác nhân), các thông số thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 3. Mỗi chu kỳ sử dụng 50 g tác nhân gây tắc nghẽn và lặp lại 10 chu kỳ. Quá trình thử nghiệm theo phương tạo hình mẫu (phương zz). Hệ số thấm ký hiệu từ K0 đến K10 (K0 là hệ số thấm ban đầu). Sau khi xác định hệ số thấm K0, 50 g tác nhân tắc nghẽn được đổ trực tiếp lên mặt mẫu, dùng thước gạt đều trên bề mặt mẫu, sau đó lặp lại thao tác xác định hệ số thấm (K1). Sau 10 lần thử nghiệm, lượng tác nhân tắc nghẽn nằm trong mẫu được xác định. Lượng tác nhân gây tắc nghẽn theo diện tích bề mặt là không đổi.

d. Xác định lượng tác nhân tắc nghẽn nằm lại trong mẫu

Khi thí nghiệm xác định mức độ tắc nghẽn, các tác nhân tắc nghẽn sẽ được chia làm 3 mức độ khác nhau. Mức độ 1: các hạt có kích thước lớn, không xâm nhập vào trong mẫu BTR mà bịt kín các lỗ rỗng trên bề mặt; Mức độ 2: các hạt có kích thước nhỏ hơn, đi vào trong cấu trúc rỗng của mẫu bê tông và bị giữ lại trong cấu trúc rỗng; Mức độ 3: các hạt có kích thước nhỏ, đi vào trong cấu trúc rỗng của mẫu bê tông và theo dòng nước đi ra ngoài ở mặt dưới của mẫu.

Để xác định khối lượng tác nhân tắc nghẽn nằm trong cấu trúc rỗng của bê tông cần xác định khối lượng các tác nhân tắc nghẽn ở mức độ 1 và mức độ 3. Đối với mức độ 1, sau khi tiến hành hết 10 chu kỳ, sử dụng chổi quét và thu lại hết lượng tác nhân tắc nghẽn đọng lại phía trên mặt mẫu. Sấy khô và cân khối lượng (M1). Đối với mức độ 3, để tác nhân lắng đọng trong nước (thu được sau khi thí nghiệm thấm nước có bổ sung tác nhân tắc nghẽn), sau đó gạn và lọc bằng giấy lọc, tiếp tục sấy khô để xác định khối lượng (M3).

Khối lượng tác nhân tắc nghẽn trong mẫu (mức độ 2, M2) được xác định như sau: $M2 = \text{Tổng khối lượng tác nhân tắc nghẽn (10 lần, mỗi lần 50 g)} - M1 - M3$ (g)

3. Kết quả nghiên cứu

3.1. Ảnh hưởng tác nhân gây tắc nghẽn đến hệ số thấm của bê tông rỗng thoát nước

Tác nhân gây tắc nghẽn và hình ảnh mẫu sau nghiên cứu được thể hiện trong Hình 5. Kết quả nghiên cứu hệ số thấm sau các chu kỳ bổ sung tác nhân gây tắc nghẽn được thể hiện trong Hình 5. Số liệu hệ số thấm được chuyển về số liệu tương đối theo tỷ lệ % so với hệ số thấm K0. Các mẫu ký hiệu theo chiều cao mẫu, tác nhân tắc nghẽn và độ rỗng thiết kế. Ví dụ, ký hiệu H6C-15: chiều cao mẫu 6 cm, tác nhân là cát (C), độ rỗng thiết kế 15%.

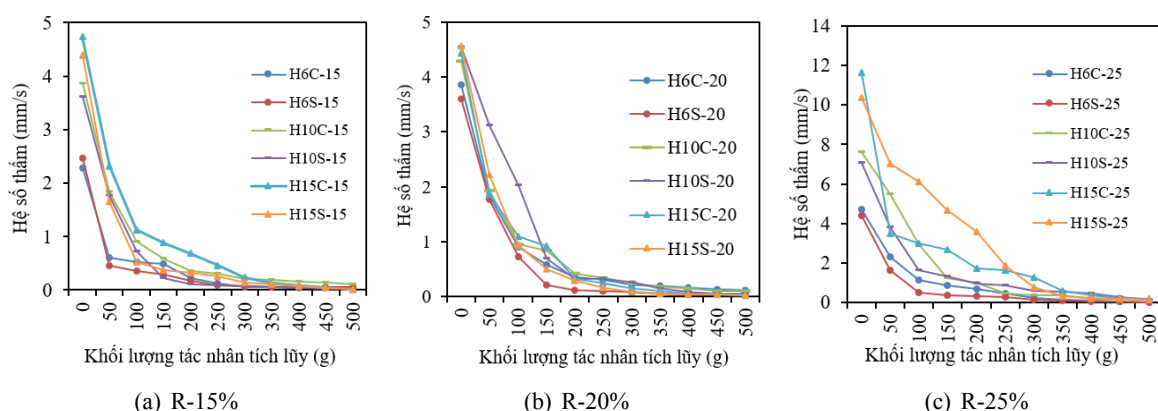
Với lần thử đầu tiên: hệ số thấm tỷ lệ thuận với độ rỗng thiết kế. Cụ thể, BTR có độ rỗng thiết kế 15%, 20% và 25% có hệ số thấm nước tăng từ 3,86; 4,29 và 7,60 mm/s với mẫu có chiều này 10 cm. Quy luật tương tự với mẫu có chiều cao 6 cm và 15 cm.



Hình 5. Hình ảnh thí nghiệm tắc nghẽn

Kết quả đáng chú ý là hệ số thấm nước tăng khi tăng chiều cao mẫu (với cùng độ rỗng thiết kế). Cụ thể, với độ rỗng thiết kế 15%, chiều dày tăng từ 6 – 10 – 15 cm thì hệ số thấm nước tương ứng thu được là 2,29 – 3,90 và 4,73 mm/s. Giá trị tương ứng với độ rỗng thiết kế 20%: 3,86 – 4,29 – 4,4 mm/s; với độ rỗng thiết kế 25% là: 4,73 – 7,6 – 11,63 mm/s. Kết quả này đã được giải thích dựa trên định luật Bernoulli và định luật Darcy [32]. Ngoài ra, khi tăng chiều dày mẫu, tính liên kết giữa hệ thống lỗ rỗng tăng lên, hình thành nhiều đường liên kết lỗ rỗng hơn, hệ số quanh co, T giảm, làm tăng hiệu quả thấm nước [32].

Đối với khối lượng tác nhân tắc nghẽn từ 50 g – 500 g cho thấy, hệ số thấm nước giảm mạnh ở tất cả các cấp phối khi bổ sung tác nhân gây tắc nghẽn. Với độ rỗng 15%, khi bổ sung tác nhân gây tắc nghẽn là cát lần thứ nhất vào dòng chảy, hệ số thấm nước giảm còn 26,62%; 47,62% và 48,80% so với hệ số ban đầu tương ứng với chiều dày mẫu là 6, 10 và 15 cm. Các kết quả tương tự thu được ở các độ rỗng thiết kế 20 – 25%. Điều này thể hiện rõ mức độ ảnh hưởng của chiều dày mẫu đến hệ số thấm. Ở các lần bổ sung tác nhân tắc nghẽn tiếp theo, hệ số thấm nước tiếp tục giảm mạnh. Sau 3 lần bổ sung tác nhân tắc nghẽn, hệ số thấm nước giảm trên 90% so với hệ số ban đầu. Sau 10 lần bổ sung tác nhân tắc nghẽn, hệ số thấm nước thu được rất thấp, chỉ còn từ 0,19% đến 2,89% so với K0, một số mẫu gần như bị tắc nghẽn hoàn toàn, chỉ còn lượng nước nhỏ chảy qua mẫu. Lượng tác nhân tắc nghẽn được bổ sung tăng dần dần đến khối lượng tác nhân bị kẹt lại trong hệ thống lỗ rỗng ngày càng tăng. Trong đó, cấu trúc rỗng ở lớp trên cùng tiếp xúc trực tiếp với tác nhân gây tắc nghẽn, các lỗ rỗng có xu hướng bị bít kín gây ra suy giảm nghiêm trọng hệ số thấm nước.



Hình 6. Biểu đồ thể hiện hệ số thấm nước khi có tác nhân tắc nghẽn

Kết quả đáng chú ý là khi tăng chiều cao mẫu từ 6 – 10 – 15 cm thì ảnh hưởng của tác nhân tắc nghẽn đến hệ số thấm nước càng tăng hơn. Với độ rỗng 20%, chiều dày mẫu 15 cm, sau 3 lần bổ sung tác nhân tắc nghẽn (cát), hệ số thấm nước chỉ còn hơn 5% và giảm nhanh về mức dưới 1% so với K0. Trong khi đó, mẫu có chiều dày 6 cm sau 3 lần bổ sung tác nhân tắc nghẽn (cát) thì hệ số thấm nước vẫn đạt khoảng 10% và duy trì ở mức từ 2-3% sau 10 chu kỳ bổ sung tác nhân tắc nghẽn. Khi chiều cao mẫu càng lớn, đường đi của dòng nước và tác nhân tắc nghẽn càng lớn, vì vậy lượng tác nhân bị tắc nằm lại trong cấu trúc rỗng của BTR tăng lên.

Vì vậy làm giảm hệ số thấm nước của các mẫu BTR. Kết quả nghiên cứu phù hợp với kết quả trước đó khi kết luận với các tác nhân khác nhau, tăng chiều cao mẫu sẽ làm tăng nguy cơ tắc nghẽn và tăng lượng tác nhân nằm trong cấu trúc bê tông [12].

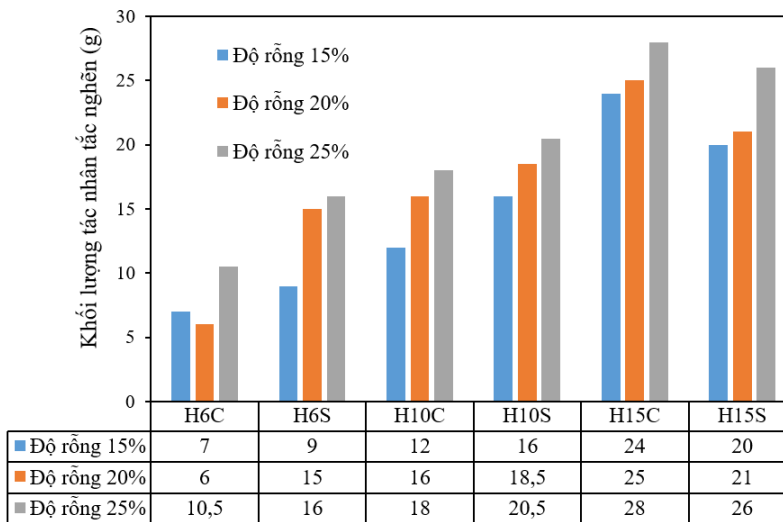
Mức độ ảnh hưởng của tác nhân tắc nghẽn đến hệ số thấm phụ thuộc vào độ rỗng thiết kế và chiều cao mẫu. Khi độ rỗng thiết kế thấp (R-15%), đất sét làm suy giảm hệ số thấm lớn hơn so với cát, điều này là do với độ rỗng thiết kế 15% làm giảm bán kính lỗ rỗng hiệu quả, từ đó tính liên kết của hệ thống lỗ rỗng giảm xuống và hệ số quanh co, T, tăng lên [32]. Điều này làm tăng lượng đất sét lắng đọng trong cấu trúc của BTR, từ đó làm giảm hệ số thấm nước. Trong khi đó các hạt cát vàng ở cấp hạt nhỏ dễ dàng bị dòng nước kéo đi trong hệ thống lỗ rỗng của BTR. Trong trường hợp các hạt bị mắc kẹt tại các “họng” liên kết giữa các lỗ rỗng thì vẫn có khả năng cho nước chảy qua ở một mức độ nhất định. Do vậy, với độ rỗng thiết kế 15%, chỉ các hạt nhỏ của cát đi vào trong BTR, các hạt có kích thước lớn vẫn nằm trên bề mặt mẫu.

Chiều cao mẫu càng tăng thì ảnh hưởng của các tác nhân tắc nghẽn càng rõ ràng, đặc biệt là ở độ

rỗng thiết kế nhỏ. Có hai cơ chế cùng tồn tại trong trường hợp này: chiều cao mẫu tăng làm tăng hệ số thấm nước của BTR và làm giảm tỷ lệ khối lượng tác nhân tắc nghẽn/đơn vị thể tích của BTR, vì vậy tăng chiều cao mẫu là có lợi cho hệ số thấm. Tuy nhiên, chiều dài đường thấm (quãng đường đi của nước và tác nhân tắc nghẽn) tăng lên, làm tăng nguy cơ và xác suất gây tắc nghẽn [32]. Vì vậy, mức độ ảnh hưởng của tác nhân tắc nghẽn phụ thuộc vào cơ chế nào chiếm ưu thế. Kết quả nghiên cứu bán kính hiệu quả của lỗ rỗng cho thấy, độ rỗng thiết kế càng thấp bán kính lỗ rỗng hiệu quả càng giảm [32], từ đó làm tăng nguy cơ tắc nghẽn, đặc biệt là khi chiều dài đường thấm tăng. Vì vậy, mức độ ảnh hưởng của chiều cao mẫu ở các cấp phối có độ rỗng thiết kế 15% và 20% là khá rõ ràng, đặc biệt là với tác nhân tắc nghẽn là đất sét.

3.2. Khối lượng tác nhân tắc nghẽn đọng lại trong mẫu

Về ảnh hưởng của chiều cao mẫu: đối với cùng độ rỗng thiết kế, khi tăng chiều cao mẫu, lượng tác nhân tắc nghẽn đọng lại trong mẫu càng lớn. Chiều này chứng tỏ trong 2 cơ chế xảy ra khi tăng chiều cao mẫu, cơ chế thứ 2 có tác động lớn hơn (chiều dài đường thấm càng dài thì nguy cơ và xác suất bị tắc nghẽn càng cao). Khi chiều cao mẫu tăng lên 15 cm thì cát có xu hướng bị tắc trong mẫu nhiều hơn đất sét do cát có kích thước hạt lớn hơn so với đất sét (Hình 7).



Hình 7. Khối lượng tác nhân tắc nghẽn đọng lại trong mẫu

Về ảnh hưởng của kích thước lỗ rỗng: tương quan giữa kích thước lỗ rỗng và kích thước tác nhân tắc nghẽn sẽ quyết định lượng tác nhân đọng lại trong mẫu. Kết quả cho thấy cát có kích thước lớn hơn đất sét, tuy nhiên ở các cấp phối có độ rỗng thiết kế nhỏ (15%, 20%), lượng cát bị đọng lại trong mẫu thấp hơn lượng đất sét. Theo Bảng 3, thành phần hạt của cát dùng trong nghiên cứu từ 0,14 – 5 mm. Theo kết quả nghiên cứu [32] bán kính lỗ rỗng hiệu quả của BTR dao động từ 50 – 2000 μm , tương đương với đường kính lỗ rỗng hiệu quả từ 100 – 4000 μm , tức 0,1 – 4 mm; tương tự với các nghiên cứu trước đó [13]. Tuy nhiên, lỗ rỗng phân bố chủ yếu quanh các pick có bán kính lỗ rỗng là 100 μm và 500 μm với các khoảng 50 – 300 μm và 400 – 1000 μm ; tương đương đường kính lỗ rỗng phân bố chủ yếu trong các khoảng 0,1 – 0,6 mm và 0,8 – 2 mm [32]. Do tác nhân tắc nghẽn được bổ sung phía trên bề mặt mẫu, vì vậy chỉ có các kích thước hạt cát dưới 2 mm đi vào trong cấu trúc BTR, các hạt có kích thước lớn hơn đọng lại trên bề mặt mẫu. Cát trên bề mặt cũng gây ra sự suy giảm hệ số thấm nhưng không đọng lại trong cấu trúc của BTR. Vì vậy, kết quả nghiên cứu thể hiện khối lượng cát nằm trong mẫu thấp hơn so với khối lượng đất sét ở các cấp phối có độ rỗng thiết kế nhỏ. Tuy

nhiên, với độ rỗng 25%, cấu trúc rỗng lớn hơn, lượng cát xâm nhập vào cấu trúc tăng lên và đa số các hạt cát bị đọng lại trong cấu trúc rỗng. Vì vậy, lượng cát đọng lại lớn hơn đáng kể so với lượng đất sét đối với mẫu độ rỗng 25%.

Trong các ứng dụng BTR, chiều dày lớp BTR có ảnh hưởng đến khả năng chịu lực. Trong các thiết kế thường quy định chiều dày thay vì cường độ. Tuy nhiên, tăng chiều dày đồng nghĩa với tăng nguy cơ gây tắc nghẽn. Ngoài ra, tăng chiều dày còn ảnh hưởng đến hiệu quả của các biện pháp làm sạch BTR.

3.3. Đề xuất giải pháp bảo dưỡng, duy trì khả năng thấm nước của bê tông rỗng thoát nước

Với phạm vi nghiên cứu hiện tượng tắc nghẽn vật lý do các tác nhân tắc nghẽn phổ biến gây ra, bài báo đưa ra một số giải pháp bảo dưỡng xử lý nhằm duy trì khả năng thấm nước của BTR. Các giải pháp được lựa chọn căn cứ trên bản chất của tác nhân tắc nghẽn và quá trình tắc nghẽn xảy ra dựa trên các mức độ đã được phân tích ở trên:

- Với mức độ 1, các tác nhân tắc nghẽn có kích thước lớn hơn kích thước lỗ rỗng, bịt kín các lỗ rỗng trên bề mặt BTR mà không xâm nhập vào trong cấu trúc rỗng cần xử lý theo hướng sử dụng thiết bị hút chân không để hút các tác nhân tắc nghẽn trên bề mặt, làm hở bề mặt và các lỗ rỗng liên kết.

- Với mức độ 2, khi các tác nhân tắc nghẽn nằm tích tụ trong cấu trúc rỗng và ở dạng lắng đọng (do đất sét và các hạt mịn gây ra): sử dụng vòi phun nước áp lực cao từ trên bề mặt nhằm rửa trôi và làm yếu các liên kết giữa các hạt bị tắc nghẽn và bê tông, đẩy các hạt tắc nghẽn xuống đáy và thoát ra ngoài.

- Với mức độ 2 nhưng là các hạt có kích thước trung bình bị mắc kẹt trong các “họng” liên kết lỗ rỗng: sử dụng phương pháp “xả ngược”. Đây là phương pháp sử dụng các đường ống dẫn nước được lắp đặt trước khi thi công BTR, nước được bơm ra ở các vị trí định sẵn với áp lực thấp nhưng lưu lượng cao nhằm kéo theo các hạt bị tắc nghẽn ra khỏi cấu trúc rỗng của bê tông.

4. Kết luận

Chiều cao mẫu ảnh hưởng đến hệ số thấm của BTR, chiều cao tăng giúp nâng cao khả năng thấm nước nhưng đồng thời làm tăng nguy cơ gây tắc nghẽn, đặc biệt với BTR có độ rỗng thiết kế nhỏ, kích thước lỗ rỗng nhỏ.

Hệ số thấm nước giảm mạnh ở các chu kỳ bổ sung tác nhân tắc nghẽn đầu tiên, ở các chu kỳ sau hệ số thấm giảm không nhiều. Theo kết quả nghiên cứu, sau 3 chu kỳ đầu, hệ số thấm nước giảm dưới 30% so với hệ số thấm nước ban đầu, đặc biệt, với độ rỗng thiết kế 15% và 20%, hệ số thấm nước chỉ còn 5% - 10% so với hệ số K₀. Sau 10 chu kỳ, hệ số thấm giảm còn từ 0,19% - 2,5% so với K₀, tức hệ số thấm giảm từ 40 – 500 lần. Trong một số nghiên cứu cho thấy hệ số thấm giảm 90% sau 5 năm sử dụng hoặc giảm 1000 lần sau 8 năm sử dụng (có thể xem như không còn tính thấm nước) [9].

Ở độ rỗng thiết kế nhỏ, đất sét có xu hướng bị tắc lại trong mẫu nhiều hơn so với cát vàng. Khi tăng độ rỗng thì cát có xu hướng bị tắc lại nhiều hơn so với đất sét.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Dự án SATREPS – Trường Đại học Xây dựng Hà Nội và các cộng sự. Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Dự án trong việc triển khai nghiên cứu và hoàn thiện bài báo này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Wang, H., Li, H., Liang, X., Zhou, H., Xie, N., Dai, Z. (2019). [Investigation on the mechanical properties and environmental impacts of pervious concrete containing fly ash based on the cement-aggregate ratio. Construction and Building Materials](#), 202:387–395.

- [2] Wang, J., Meng, Q., Zhang, L., Zhang, Y., He, B.-J., Zheng, S., Santamouris, M. (2019). [Impacts of the water absorption capability on the evaporative cooling effect of pervious paving materials](#). *Building and Environment*, 151:187–197.
- [3] Bakshi, P., Parihar, A., Singh, A., Ahtesham, A. (2016). Pervious Concrete. *International Journal of Scientific Research*, 5(4):387–395.
- [4] Yang, J., Jiang, G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 33:381–386.
- [5] EPA (2005). [Cool Pavement Report, EPA Cool Pavements Study - Task 5 June](#).
- [6] Rehan, R. M. (2016). [Cool city as a sustainable example of heat island management case study of the coolest city in the world](#). *HBRC Journal*, 12(2):191–204.
- [7] Elizondo-Martínez, E.-J., Andrés-Valeri, V.-C., Jato-Espino, D., Rodríguez-Hernández, J. (2020). [Review of porous concrete as multifunctional and sustainable pavement](#). *Journal of Building Engineering*, 27: 100967.
- [8] Kia, A., Wong, H. S., Cheeseman, C. R. (2017). [Clogging in permeable concrete: A review](#). *Journal of Environmental Management*, 193:221–233.
- [9] Mishra, K., Zhuge, Y., Karunasena, K. (2013). Clogging mechanism of permeable concrete: A review. *Proceedings of Concrete*, 1–10.
- [10] Deo, O., Sumanasooriya, M., Neithalath, N. (2010). [Permeability Reduction in Pervious Concretes due to Clogging: Experiments and Modeling](#). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(7):741–751.
- [11] Kayhanian, M., Anderson, D., Harvey, J. T., Jones, D., Muhunthan, B. (2012). [Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots](#). *Journal of Environmental Management*, 95(1):114–123.
- [12] Huang, J., Zhang, Y., Sun, Y., Ren, J., Zhao, Z., Zhang, J. (2021). [Evaluation of pore size distribution and permeability reduction behavior in pervious concrete](#). *Construction and Building Materials*, 290:123228.
- [13] ACI 522.R-10 (2010). *Report on Pervious Concrete*. American Concrete Institute.
- [14] Chen, J., Li, H., Huang, X., Wu, J. (2015). [Permeability Loss of Open-Graded Friction Course Mixtures due to Deformation-Related and Particle-Related Clogging: Understanding from a Laboratory Investigation](#). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(11):04015017.
- [15] Haselbach, L. M. (2010). [Potential for Clay Clogging of Pervious Concrete under Extreme Conditions](#). *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(1):67–69.
- [16] Chopra, M., Kakuturu, S., Ballock, C., Spence, J., Wanielista, M. (2010). [Effect of Rejuvenation Methods on the Infiltration Rates of Pervious Concrete Pavements](#). *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6): 426–433.
- [17] Xie, N., Akin, M., Shi, X. (2019). [Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability](#). *Journal of Cleaner Production*, 210:1605–1621.
- [18] Hồng, N. T., Hà, L. T. (2022). [Nghiên cứu kết cấu mặt đường bê tông xi măng rỗng có khả năng thoát nước mặt theo hướng phát triển bền vững](#). *Tạp chí Vật Liệu và Xây Dựng*, 53–63.
- [19] Trung, N. T. (2022). [Nghiên cứu chế tạo bê tông cấu trúc rỗng từ vật liệu nhiễm mặn và tro bay ứng dụng trong xây dựng công trình ven biển](#). Đề tài cấp Bộ CT.2020.04.XDA.06, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.
- [20] Đồng, N. V. (2021). [Nghiên cứu chế tạo bê tông rỗng thoát nước, ứng dụng trong công trình giao thông](#). Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.
- [21] Minh, P. Q., Hanh, P. H., Tùng, P. T., Hiếu, N. T., Hằng, V. T., Ân, V. V. T., Tuấn, N. V., Phương, N. V., Doanh, B. P., Đồng, N. V. (2021). [Nghiên cứu chế tạo, ứng dụng bê tông rỗng thoát nước nhanh và kết cấu rỗng thu chứa nước trong công trình hạ tầng kỹ thuật nhằm giảm thiểu úng ngập khi mưa, điều tiết nước trong đô thị thích ứng với biến đổi khí hậu](#). Đề tài cấp Quốc gia BDKH.07/16-20.
- [22] Amer Rafique Bhutta, M., Hasanah, N., Farhayu, N., Hussin, M. W., Tahir, M. b. M., Mirza, J. (2013). [Properties of porous concrete from waste crushed concrete \(recycled aggregate\)](#). *Construction and Building Materials*, 47:1243–1248.
- [23] Wu, H., Huang, B., Shu, X., Dong, Q. (2011). [Laboratory Evaluation of Abrasion Resistance of Portland Cement Pervious Concrete](#). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(5):697–702.

- [24] TCVN 13605:2023. *Xi măng - Phương pháp xác định độ mịn.*
- [25] TCVN 6017:2015. *Xi măng - Phương pháp xác định thời gian đông kết và độ ổn định thể tích.*
- [26] TCVN 6016:2011. *Xi măng - Phương pháp thử - Xác định độ bền.*
- [27] JIS A 1218:2020. *Test methods for permeability of saturated soils.* Japanese Standards Association.
- [28] JIS A 5371:2016. *Precast Unreinforced Concrete Products.* Japanese Standards Association.
- [29] Sriravindrarajah, R., Do, H. M., Nguyen, L. D., Aoki, Y. (2011). Effect of clogging on the water permeability of pervious concrete. *Incorporating Sustainable Practice in Mechanics of Structures and Materials - Proceedings of the 21st Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*, 873–876.
- [30] Pezzaniti, D., Beecham, S., Kandasamy, J. (2009). [Influence of clogging on the effective life of permeable pavements](#). *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 162(3):211–220.
- [31] Zhang, J., Jin, Q., Cui, X. (2014). Experimental Study on Pore Clogging of a Porous Pavement under Surface Runoff. *Geotechnical Special Publication*, American Society of Civil Engineers, 138–146.
- [32] Tuân, N. K. (2024). *Nghiên cứu chế tạo bê tông rỗng thoát nước sử dụng cốt liệu tái chế từ phế thải xây dựng*. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.