

NGHIÊN CỨU VI CẤU TRÚC LÝ GIẢI SỰ GIẢM HỆ SỐ THẨM CỦA ĐẤT CÁT SAN LẤP TRỘN XI MĂNG

Lương Thị Bích^{a,b,*}, Trần Nguyễn Hoàng Hùng^{a,b}

^aKhoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh,
268 đường Lý Thường Kiệt, quận 10, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^bĐại học Quốc gia TP. HCM, phường Linh Trung, quận Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 06/5/2021, Sửa xong 11/7/2022, Chấp nhận đăng 14/7/2022

Tóm tắt

Xi măng được sử dụng phổ biến để cải thiện đất yếu như làm tăng cường độ, không chế biến dạng, giảm hệ số thấm, v.v... Sự thay đổi các đặc tính kỹ thuật của đất trộn xi măng (soilcrete) phụ thuộc vào sự thay đổi cấu trúc vi mô của nó. Nghiên cứu này khảo sát sự biến đổi vi cấu trúc của soilcrete bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) để làm sáng tỏ sự thay đổi hệ số thấm (k_s) theo thời gian. Hai mẫu soilcrete giống nhau được chế tạo từ đất cát san lấp tỉnh Đồng Tháp trộn với xi măng OPC hàm lượng 300 kg/m³ để thực hiện thí nghiệm thấm và SEM. Kết quả cho thấy k_s của soilcrete giảm hơn 1.000 lần so với đất cát tự nhiên. k_s của soilcrete giảm theo thời gian bảo dưỡng. Vi cấu trúc của mẫu soilcrete đặc chắc hơn so với mẫu đất chưa xử lý. Các sản phẩm CSH và ettringite được nhìn thấy rõ ràng trên các hình ảnh SEM, các sản phẩm này tăng dần lấp đầy lỗ rỗng trong mẫu soilcrete làm giảm hệ số thấm của soilcrete theo thời gian bảo dưỡng.

Từ khoá: hệ số thấm; đất trộn xi măng; cát san lấp; vi cấu trúc; SEM.

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE OF DREDGING SAND MIXING CEMENT TO INTERPRET REDUCTION OF PERMEABILITY

Abstract

Cement is widely utilized to mix with soft soils to improve their properties such as strength, stiffness, hydraulic conductivity, and so on. The improved characteristics of soils mixing cement (soilcrete) depend on the change of soilcrete microstructure. This paper investigated the variation of soilcrete microstructure using a scanning electron microscopy (SEM) to interpret changes in the hydraulic conductivity (k_s) with curing time. Two identical soilcrete specimens were made from dredging sand taken in Dong Thap province mixing the OPC cement at a content of 300 kg/m³ for the permeability and SEM tests. The results indicate that k_s of the soilcrete specimen was lower 1.000 times than that of the unmixed sand. k_s of the soilcrete specimen decreases with increasing in curing time. The soilcrete microstructure was denser than that of the untreated sand sample. The CSH and ettringite products were seen on the SEM images, these products were gradually developed with the curing time filling void spaces in the soil specimen and resulting reduction of k_s with curing time.

Keywords: hydraulic conductivity; soilcrete; dredging sand; microstructure; SEM.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(3V\)-09](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(3V)-09) © 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Công nghệ đất trộn xi măng (SCM) đã được áp dụng phổ biến trên thế giới cho nhiều mục đích khác nhau như gia cố đất yếu, làm lõi đê, đập, tường chắn, v.v... Công nghệ SCM với ý tưởng đơn giản

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: ltbich.sdh19@hcmut.edu.vn (Bích, L. T.)

là trộn đất tự nhiên với xi măng và nước tạo ra vật liệu mới bền vững, có các đặc trưng cơ-hóa-lý tốt hơn đất tự nhiên trong thời gian ngắn. Các đặc trưng của soilcrete được cải thiện như tăng cường độ, độ cứng, giảm tính nén lún, và giảm tính thấm [1–3]. Khi xi măng trộn vào trong đất xảy ra các phản ứng hóa học giữa khoáng trong đất, xi măng và nước tạo ra các sản phẩm dạng gel calcium silicat hydrat (CSH), calcium aluminate hydrate (CAH), và canxi hydroxit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), các sản phẩm này keo tụ, hóa cứng, bao phủ các hạt đất làm giảm độ rỗng trong soilcrete [3, 4]. Các phản ứng hóa học này là cơ sở để giải thích sự cải thiện các đặc tính kỹ thuật của soilcrete [5]. Tuy nhiên, bản chất của sự thay đổi các tính chất kỹ thuật của soilcrete phụ thuộc vào sự thay đổi cấu trúc của nó. Thuật ngữ cấu trúc được sử dụng để chỉ sự sắp xếp hình học của các hạt khác nhau trong một khối vật liệu [6]. Việc tìm hiểu sự thay đổi vi cấu trúc của soilcrete theo các nhân tố tác động như hàm lượng xi măng, loại xi măng, thời gian bảo dưỡng, loại đất, và phương pháp trộn để làm sáng tỏ sự thay đổi đặc tính kỹ thuật của soilcrete là cần thiết.

Kính hiển vi điện tử quét (SEM) là một phương pháp hiệu quả được sử dụng để quan sát và phân tích cấu trúc vi mô của bề mặt vật liệu ở độ phóng đại cao hàng nghìn lần. Một vài tác giả đã sử dụng SEM khảo sát sự thay đổi cấu trúc hỗn hợp đất trộn xi măng hoặc vôi để giải thích các ứng xử cơ học của chúng [6–12]. Cấu trúc đất thay đổi đáng kể khi trộn với xi măng hoặc vôi. Mengue và cs. [7] đã nghiên cứu sự thay đổi vi cấu trúc của mẫu đất laterit khi trộn với xi măng có hàm lượng lần lượt 3%, 6%, và 9%. Tác giả cho rằng, đất laterit chưa xử lý có cấu trúc mở, các hạt mịn tập hợp thành màng mỏng bao phủ hạt có kích thước lớn hơn tạo thành một khối, các khối phân tán để lại nhiều lỗ rỗng lớn. Đối với đất laterit sau khi trộn xi măng, xuất hiện một lớp gel bao phủ các khối kết tụ, ở hàm lượng xi măng 3% hỗn hợp có cấu trúc dạng lưới, khi hàm lượng xi măng tăng lên 6%, 9% cấu trúc kết bông trở nên rõ ràng hơn. Sự thay đổi cấu trúc mẫu đất laterit trộn xi măng theo hàm lượng xi măng, tác giả cho là sự tăng của sản phẩm CSH, sản phẩm CSH hóa cứng trên bề mặt mẫu đất làm cho cấu trúc đặc chắc hơn làm tăng cường độ. Mousavi và Wong [8] phân tích cấu trúc vi mô của mẫu đất sét dẻo được trộn với hỗn hợp chất kết dính gồm 18% xi măng (OPC), 2% than bùn (PA), và 5% cát silic (SS). Kết quả cho thấy các lỗ rỗng trong đất sau xử lý bị chèn kín bởi các sản phẩm của quá trình thủy hóa xi măng. Các sản phẩm này như một tinh thể có chức năng liên kết các hạt đất lại với nhau tạo một kết cấu mới với lỗ rỗng rất nhỏ làm giảm hệ số thấm so với mẫu đất chưa xử lý. Onitsuka và cs. [9] cũng đã phát hiện rằng các sản phẩm kết dính CSH chiếm chỗ trong các lỗ rỗng tạo cầu nối liên kết các cụm cốt liệu hình thành dạng kết cấu khung khi quan sát cấu trúc vi mô của hai mẫu đất sét trộn vôi, xi măng tại lần lượt các hàm lượng 10%, 20%. Ảnh hưởng của thời gian bảo dưỡng lên sự thay đổi cấu trúc đất sét trộn xi măng để lý giải về sự phát triển cường độ cũng được điều tra bởi Horpibulsuk [12]. Tác giả kết luận rằng các sản phẩm từ quá trình thủy hóa xi măng phát triển theo thời gian bảo dưỡng, lấp đầy lỗ rỗng và bao phủ các hạt đất hình thành các cụm cốt liệu đất – xi măng có xu hướng lớn dần theo thời gian.

Mối quan hệ giữa cường độ và cấu trúc soilcrete đã được nghiên cứu bởi một số tác giả trên thế giới [7, 9, 11, 12]. Tuy nhiên, nghiên cứu vi cấu trúc để lý giải về hệ số thấm của soilcrete còn hạn chế. Vi cấu trúc soilcrete bước đầu được nghiên cứu chủ yếu cho đất sét trộn xi măng hoặc vôi. Vi cấu trúc của mẫu đất cát san lấp lấy ở tỉnh Đồng Tháp trộn xi măng Portland thông thường (OPC) và mối quan hệ của chúng với ứng xử thấm theo thời gian bảo dưỡng. Cấu trúc vi mô của mẫu soilcrete được quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét. Hệ số thấm mẫu soilcrete được khảo sát trên thiết bị thấm thành mềm. Hai thí nghiệm này được thực hiện song hành lên đến 120 ngày tuổi. Các hình ảnh SEM quan sát được sẽ minh chứng rõ ràng hơn cho tiến trình hình thành, sắp xếp, liên kết tạo hình dạng của các sản phẩm (CSH, CAH) từ quá trình thủy hóa xi măng xảy ra trong mẫu soilcrete làm giảm hệ số thấm.

2. Phương pháp luận

2.1. Tiêu chuẩn thí nghiệm

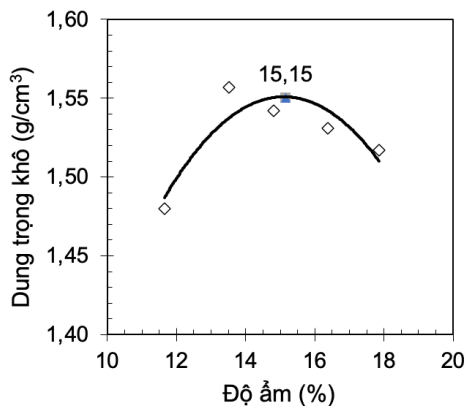
Phương pháp tạo mẫu soilcrete tham khảo tiêu chuẩn ASTM D698 [13] và TCVN 9403:2012 [14]. Phương pháp thí nghiệm thấm tuân theo tiêu chuẩn ASTM D5084 [15], xác định hình ảnh vi cấu trúc mẫu đất và mẫu soilcrete bằng kính hiển vi điện tử quét (Scanning electron microscopy – SEM).

2.2. Vật liệu thí nghiệm

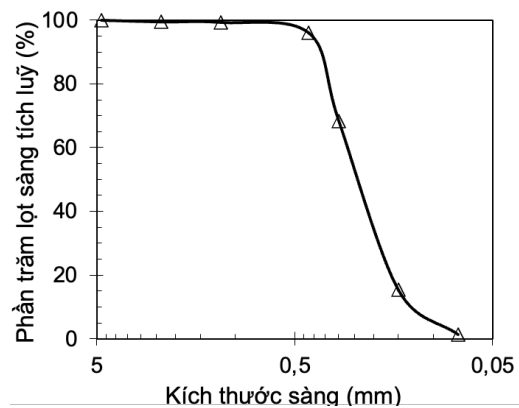
Đất cát san lấp lấy tại tỉnh Đồng Tháp được sử dụng trong nghiên cứu này. Các chỉ tiêu cơ lý của cát được xác định và trình bày ở Bảng 1. Kết quả thí nghiệm đầm nén cát và đường cong cấp phối hạt được thể hiện ở Hình 1.

Bảng 1. Chỉ tiêu cơ lý của cát sông san lấp

Độ ẩm tốt nhất w_{op} (%)	Trọng lượng riêng ướt γ_w (kN/m ³)	Trọng lượng khô γ_{dmax} (kN/m ³)	Độ pH	Hàm lượng hữu cơ %	Mô đun đô lớn
15,15	17,84	15,55	6,7	6,76	1,29



(a) Đường cong đầm nén tiêu chuẩn



(b) Đường cong cấp phối hạt

Hình 1. Kết quả thí nghiệm đầm nén cát và đường cong cấp phối hạt

Xi măng được sử dụng trong nghiên cứu này là xi măng Portland thông thường OPC40 tuân thủ tiêu chuẩn TCVN 2682:2009 [16]. Nước dùng chế tạo mẫu soilcrete và thí nghiệm thấm là nước sinh hoạt phù hợp tiêu chuẩn TCVN 4506:2012 [17].

2.3. Chuẩn bị mẫu

a. Mẫu đất cát tự nhiên

Mẫu đất cát thu thập về phòng thí nghiệm được sấy khô sau đó trộn với nước để đạt độ ẩm tốt nhất 15,15%. Thanh đầm có trọng lượng 1,54 kg được sử dụng để tạo mẫu trong khuôn trụ tròn thành cứng có chiều cao, $H = 140$ mm và đường kính, $D = 62$ mm. Đất ở độ ẩm tốt nhất lần lượt được cho vào khuôn thành 3 lớp, mỗi lớp được đầm 21 lượt, chiều cao rơi 0,305 m đạt công đầm 600 kN-m/m³.

Hai đầu mẫu được bịt bằng viên đá thấm và tấm vải địa kỹ thuật để ngăn chặn sự trôi đi các hạt mịn trong quá trình bão hòa và thí nghiệm thấm mẫu. Mẫu đất cát sau khi đầm nén (S) được bão hòa bằng cách ngâm trong nước chịu lực hút chân không từ -80 đến -90 kPa trong vòng 24 giờ.

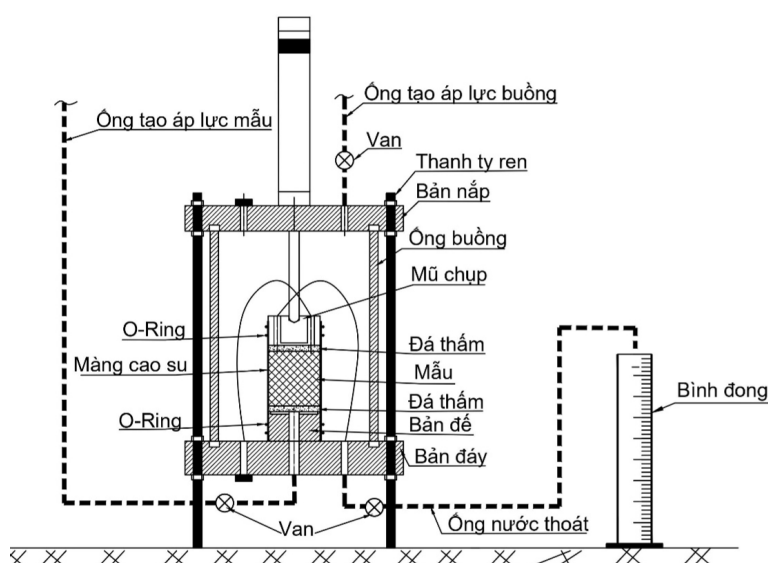
b. Mẫu đất cát trộn xi măng

Hai mẫu đất cát san lấp trộn xi măng OPC40 hàm lượng 300 kg/m^3 (SC1, SC2) được chế tạo trong cùng một mẻ trộn với trình tự thực hiện như sau: (1) cát khô trộn với nước đạt độ ẩm 15,15%, được xem là độ ẩm cát tự nhiên phổ biến; (2) cát ẩm trộn với xi măng khô trong 5 phút, nước với khối lượng tính toán theo tỉ lệ nước/xi măng (w/c) = 0,7/1 được thêm vào hỗn hợp trên và tiếp tục trộn đều trong 5 phút để có hỗn hợp soilcrete thuận lợi trong việc đầm nén mẫu; (3) hỗn hợp soilcrete lần lượt được cho vào khuôn nhựa hình trụ tròn có kích thước $D \times H = (62 \times 65)$ mm thành 3 lớp, mỗi lớp được đầm bằng máy đầm rung để loại bỏ bọt khí từ 3 – 5 phút; (4) các đầu mẫu được bịt kín bằng nilong, dán nhãn và ngâm bảo dưỡng trong nước 2 ngày; (5) các mẫu được ép đẩy ra khỏi khuôn và tiến hành bão hòa mẫu bằng bình hút chân không với lực hút -80 kPa trong 24 giờ; (6) mẫu SC1 được lắp đặt vào thiết bị thấm thành mềm để khảo sát thấm theo thời gian, mẫu SC2 được thí nghiệm xác định vi cấu trúc.

2.4. Quy trình thí nghiệm

a. Đối với thí nghiệm thấm

Hệ số thấm của mẫu đất cát tự nhiên, k_{soil} , được xác định bằng thiết bị thành cứng theo phương pháp cột áp vào giảm - cột áp ra không đổi. Độ dốc thủy lực từ 2-5 được áp dụng nhằm tránh hiện tượng cổ kết mẫu và rò rỉ nước chảy dọc theo thành khuôn mẫu (ASTM D5856) [18]. Đối với mẫu soilcrete, k_s , được xác định bằng phương pháp cột áp vào hạ - cột áp ra không đổi trên thiết bị thành mềm được thiết kế riêng cho nghiên cứu này, thiết bị tuân theo tiêu chuẩn ASTM D5084 [15] (Hình 2). Cột áp vào mẫu từ 35 - 45 kPa. Quá trình lắp đặt mẫu vào thiết bị thấm được thực hiện trong nước, đảm bảo cho mẫu bão hòa hoàn toàn. Thí nghiệm thấm được thực hiện đến hơn 120 ngày, số liệu được ghi nhận mỗi ngày và phân tích cẩn thận để khảo sát sự thay đổi hệ số thấm theo thời gian.



Hình 2. Thiết bị thấm thành mềm

Hệ số thấm ở nhiệt độ phòng thí nghiệm được tính theo công thức (1). Hệ số thấm ở nhiệt độ chuẩn 20°C được quy đổi theo Công thức (2).

$$k = 2,303 \frac{aL}{At} \cdot \log \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

$$k_{20} = R_T \times k \quad (2)$$

trong đó: L là chiều dài của mẫu (m); A là diện tích tiết diện mẫu; a là diện tích tiết diện ống nước chảy vào mẫu (m²); $t = t_1 - t_2$ là khoảng thời gian xác định chênh cao cột áp h_1 và h_2 (giây); h_1 là chênh cao cột áp tại thời điểm t_1 (m); h_2 là chênh cao cột áp tại thời điểm t_2 (m); R_T là hệ số quy đổi độ nhớt của nước theo nhiệt độ, được xác định theo tiêu chuẩn ASTM D5084 [15].

b. Đối với thí nghiệm SEM

Thiết bị SEM sử dụng trong nghiên cứu là dòng máy JSM-IT100 (hãng JEOL, Nhật Bản) (Hình 3). Thiết bị có các thông số kỹ thuật: điện thế 500 V – 20 kV, độ phóng đại tối đa 20.000 lần, độ phân giải trong môi trường chân không thấp, kích thước mẫu tối đa theo kích thước giá đỡ mẫu là 3 cm.



Hình 3. Thiết bị SEM JSM-IT100

Mẫu soilcrete sau khi được bảo hòa bằng hút chân không luôn được ngâm trong nước cho đến khi thí nghiệm SEM. Ngày tuổi mẫu thí nghiệm SEM trong nghiên cứu là 4, 7, 10, 14, 37, 60, 90, và 120 ngày. Trình tự thí nghiệm SEM được thực hiện như sau: (1) đến ngày tuổi thí nghiệm, mẫu soilcrete SC2 được phá vỡ một phần, lấy 2-3 mảnh vỡ nằm phía trong mẫu soilcrete gia công sao cho kích thước mẫu SEM ≤ 3 cm; (2) mẫu SEM được phủ một lớp mỏng vàng (Au) để cho hình ảnh tốt hơn, thời gian phủ Au thực hiện trong 1 phút bằng thiết bị chuyên dụng; (3) đặt mẫu đã phủ Au lên giá đỡ của thiết bị SEM (Hình 4), điều chỉnh độ phân giải, độ phóng đại, điện thế tăng tốc theo yêu cầu. Trong nghiên cứu này độ phóng đại thay đổi từ 50 – 3.000 lần, điện thế tăng tốc đến 10 kV. Quan sát hình ảnh vi cấu trúc mẫu thu được trên màn hình máy vi tính đã được kết nối với thiết bị.

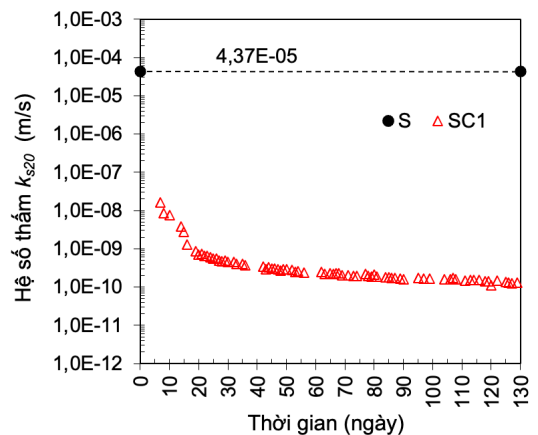


Hình 4. Mẫu bên trong thiết bị SEM

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Hệ số thấm của mẫu đất cát chưa xử lý và mẫu đất cát trộn xi măng

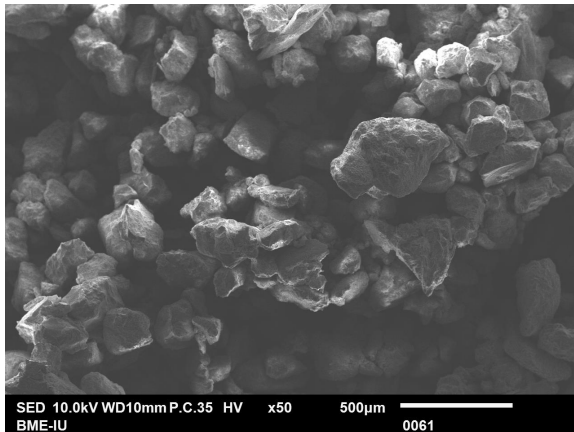
Hệ số thấm của đất cát tự nhiên (S) và mẫu đất cát trộn xi măng hàm lượng 300 kg/m^3 (SC1) được thể hiện ở Hình 5. Hệ số thấm của mẫu cát đầm chặt sau 5 lần thí nghiệm thấm đạt giá trị trung bình $4,37 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Hệ số thấm của mẫu soilcrete tại 7, 28, và 90 ngày tuổi lần lượt là $1,59 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, $4,63 \times 10^{-10} \text{ m/s}$, và $1,59 \times 10^{-10} \text{ m/s}$. Kết quả này cho thấy hệ số thấm của đất cát trộn xi măng hàm lượng 300 kg/m^3 giảm đáng kể từ $10^3 - 10^5$ lần so với đất cát chưa xử lý. Hệ số thấm mẫu soilcrete giảm mạnh trong hai tuần tuổi đầu và sau đó giảm nhẹ theo thời gian bảo dưỡng. Akbulut và Saglamer [19], Bellezza và Fratalocchi [4], Helson và cs. [20] đã cho kết quả tương tự.



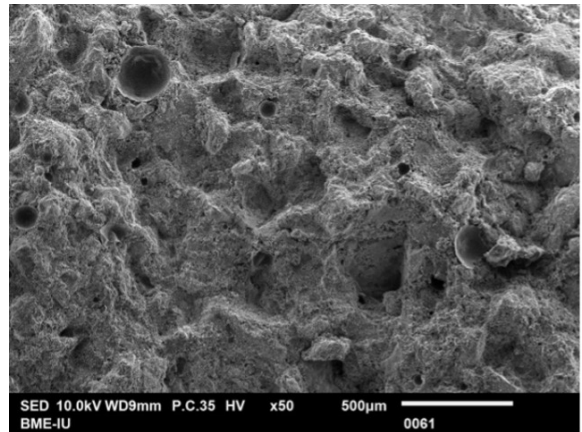
Hình 5. Hệ số thấm của mẫu cát đầm chặt (S) và mẫu soilcrete (SC1) theo thời gian bảo dưỡng

3.2. Vi cấu trúc của mẫu đất cát tự nhiên và mẫu đất cát trộn xi măng

Cấu trúc bề mặt của đất cát tự nhiên được đầm chặt ở độ ẩm 15,15% có dạng cấu trúc mở, các hạt liên kết kém, phân tán để lại nhiều lỗ rỗng (Hình 6(a)). Ở cùng độ phóng đại thấp ($\times 50$ lần) hình ảnh SEM cho thấy mẫu đất cát trộn xi măng OPC hàm lượng 300 kg/m^3 có cấu trúc đặc chắc hơn so với đất chưa xử lý (Hình 6(b)). Cấu trúc mở và cấu trúc đặc chắc cũng được Mengue và cs. [7] phát hiện khi quan sát hình ảnh SEM đối với mẫu đất đỏ laterit trước và sau khi trộn với xi măng. Hình ảnh tương tự cũng được báo cáo bởi Schnaid và cs. [21]. Hình ảnh SEM (Hình 6) phù hợp với sự cải thiện hệ số thấm của mẫu soilcrete so với mẫu đất cát tự nhiên đã được xác định ở thí nghiệm thấm (Hình 5).



(a) Đất cát đầm chặt ở độ ẩm 15,15%

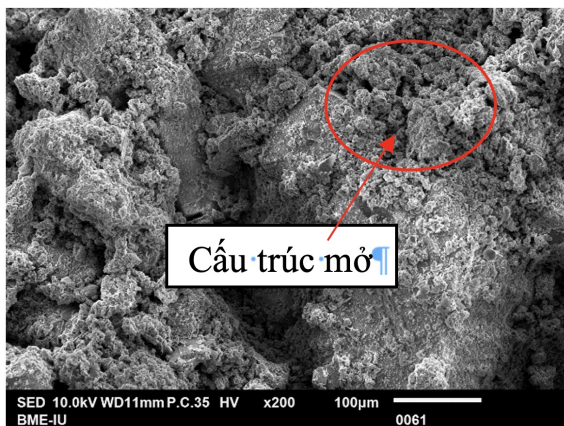


(b) Đất cát trộn xi măng 14 ngày tuổi

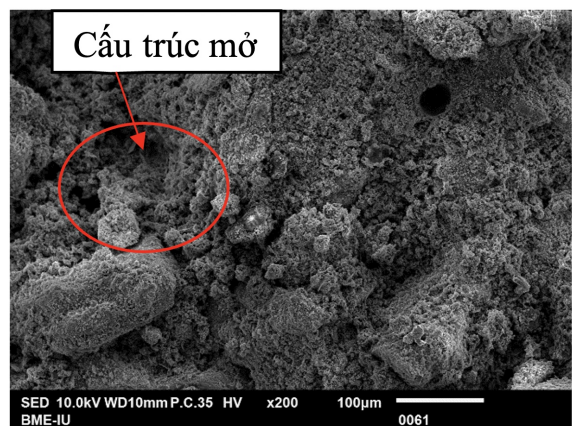
Hình 6. Hình ảnh SEM của đất cát trước và sau khi trộn xi măng ở độ phóng đại thấp

3.3. Vi cấu trúc của mẫu đất cát trộn xi măng theo thời gian bảo dưỡng

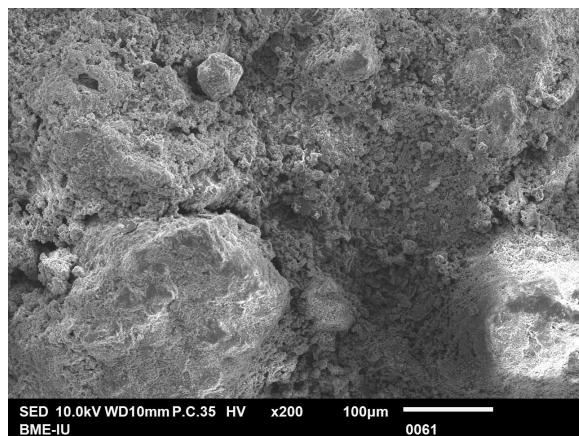
Vi cấu trúc của mẫu soilcrete SC2 ở các ngày tuổi khác nhau được quan sát tại cả hai độ phóng đại thấp và cao được trình bày ở Hình 7 và Hình 8. Hình ảnh SEM ở độ phóng đại thấp ($\times 200$ lần) cho thấy cấu trúc bề mặt mẫu soilcrete thay đổi rõ ràng theo thời gian. Bề mặt mẫu ngày càng đặc chắc và ổn định (Hình 7). Hình 7(a), (b) cho thấy mẫu soilcrete ở 4, 7 ngày tuổi vẫn có dạng cấu trúc mở, các hạt hay cụm hạt trong giai đoạn đầu của sự kết tụ còn rời rạc để lại nhiều lỗ rỗng. Khi thời gian bảo dưỡng tăng lên, cấu trúc keo tụ được nhìn thấy rõ ràng ở Hình 7(c), (d), (e), (f) với sự xuất hiện của các cụm dày đặc như đá cứng tăng dần theo thời gian, lỗ rỗng trở nên ít hơn trong mẫu soilcrete. Ngoài ra, cấu trúc phẳng đặc chắc cũng được nhìn thấy trên bề mặt mẫu ở thời gian bảo dưỡng 90 ngày tuổi (Hình 7(g)). Những thay đổi trong cấu trúc của mẫu soilcrete từ mở sang chặt được nhìn thấy trên các hình ảnh SEM đã giải thích rõ ràng cho sự giảm mạnh hệ số thấm trong hai tuần đầu và sau đó giảm nhẹ theo thời gian bảo dưỡng.



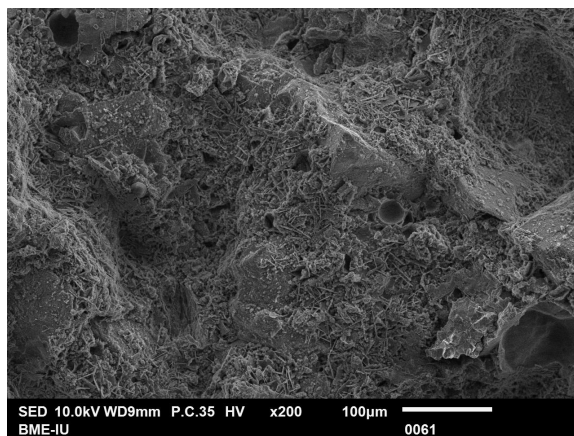
(a) 4 ngày



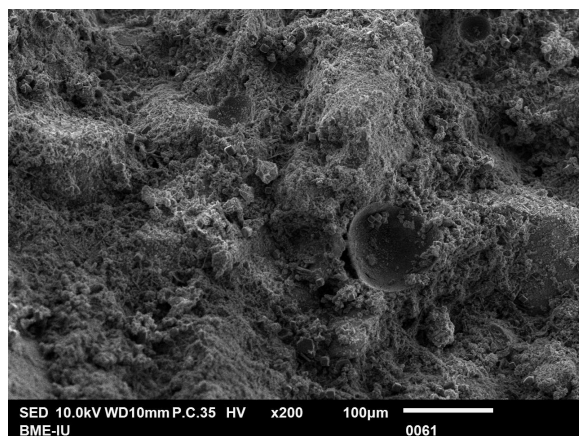
(b) 7 ngày



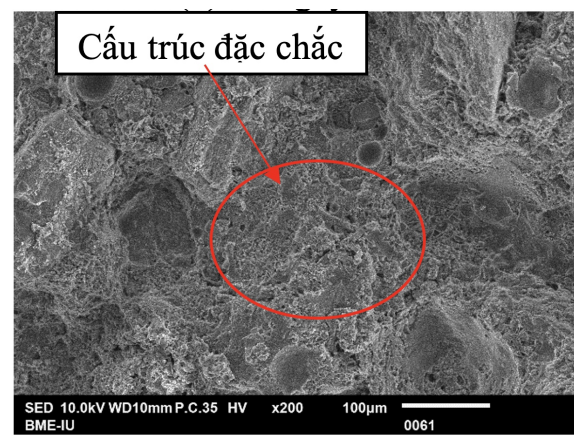
(c) 10 ngày



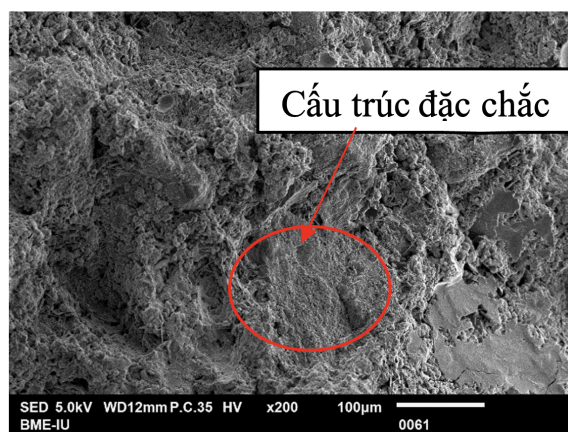
(d) 14 ngày



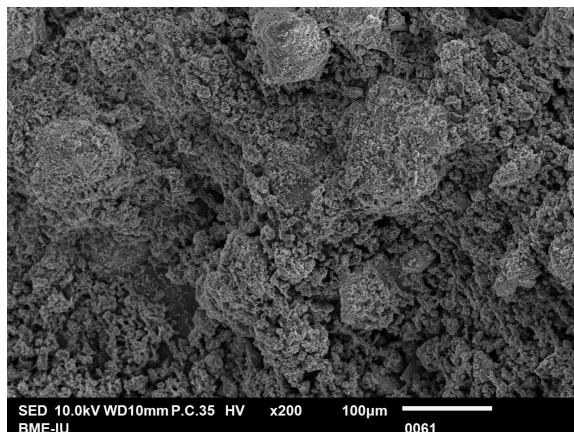
(e) 37 ngày



(f) 60 ngày



(g) 90 ngày

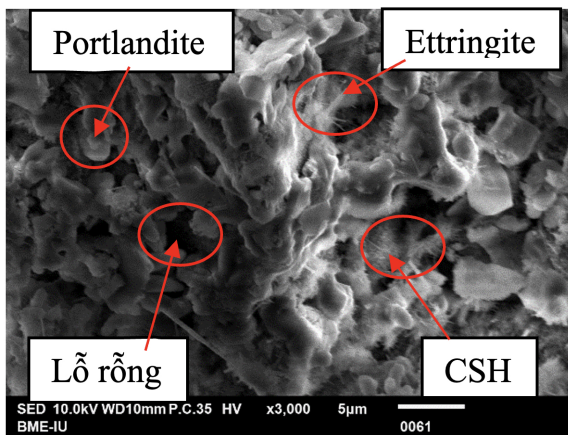


(h) 120 ngày

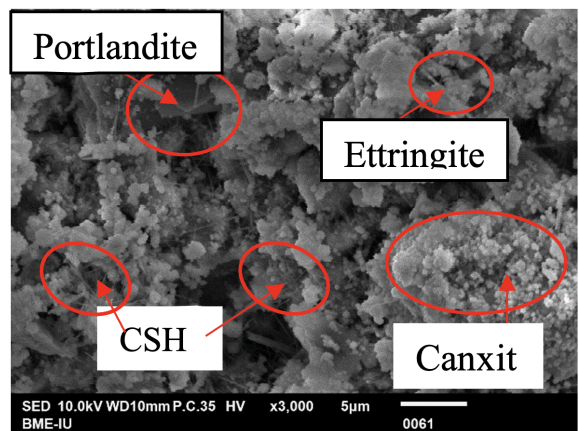
Hình 7. Hình ảnh SEM của mẫu soilcrete ở độ phóng đại thấp ($\times 200$ lần) theo các ngày tuổi khác nhau

Hình ảnh SEM của mẫu soilcrete tại độ phóng đại cao ($\times 3.000$ lần) được thể hiện ở Hình 8. Hình 8(a) chỉ ra rằng, ở 4 ngày tuổi mẫu soilcrete đã xuất hiện các sản phẩm của quá trình thủy hóa

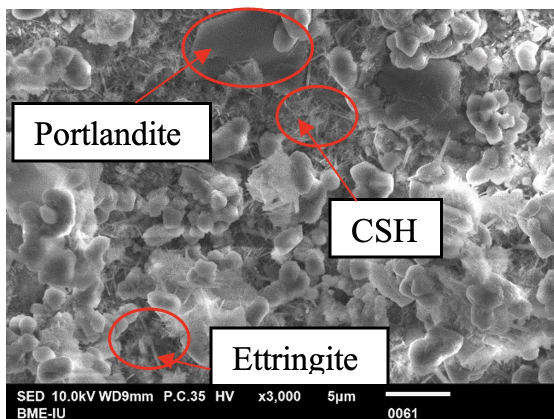
xi măng như $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CSH và CAH. Sản phẩm $\text{Ca}(\text{OH})_2$ xuất hiện ở dạng pha rắn portlandite có hình dạng khối đa giác chiếm chủ yếu trên bề mặt mẫu. Hình thái các tinh thể portlandite thay đổi phụ thuộc vào không gian sẵn có để kết tinh, tỷ lệ w/c , loại phụ gia [22]. Sản phẩm CSH tồn tại ở dạng gel có hình que kim nhọn kết bông lại từng chùm, trong khi đó sản phẩm CAH còn gọi ettringite có dạng que hình thoi xuất hiện ít hơn. Kết quả này cho thấy, ở 4 ngày tuổi phản ứng thủy hóa xi măng trong mẫu soilcrete chưa xảy ra hoàn toàn. Khi thời gian bảo dưỡng tăng lên 7, 10, 14 ngày tuổi, các sản phẩm CSH và CAH tăng trưởng đáng kể so với mẫu ở 4 ngày tuổi (Hình 8(b)–(h)). Các sản phẩm này kết bông và kết tụ trên bề mặt mẫu soilcrete. Các sản phẩm CSH đan xen liên kết nhau giống như kết cấu tổ ong góp phần tạo nên cấu trúc vững chắc. Ngoài ra, Hình 8(b) cho thấy trên bề mặt mẫu còn có các tinh thể rắn màu trắng được cho là canxit (CaCO_3). Mengue và cs. [7] và cũng phát hiện khoáng chất này sau khi trộn đất laterit với xi măng. Hình 8d cho thấy một số tinh thể tấm mỏng hình lục giác được gọi là monosulfat, là sản phẩm của một phần ettringite tác dụng với thạch cao tự do ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) có trong hỗn hợp [11]. Thông qua hình ảnh SEM của mẫu soilcrete ở độ phóng đại cao thấy được tiến trình hình thành, phát triển và liên kết của các sản phẩm từ quá trình thủy hóa xi măng. Những hình ảnh SEM của mẫu ở độ phóng đại cao minh chứng rõ ràng hơn cho những hình ảnh SEM của mẫu ở độ phóng đại thấp với cấu trúc mẫu ngày càng đặc chắc và ổn định theo thời



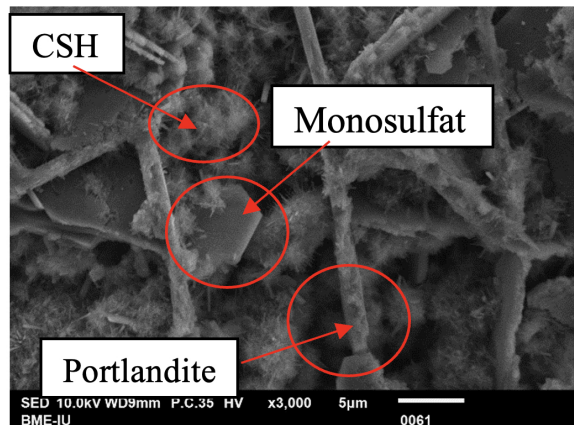
(a) 4 ngày



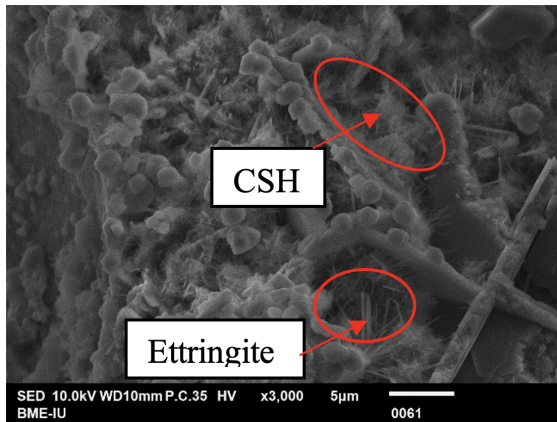
(b) 7 ngày



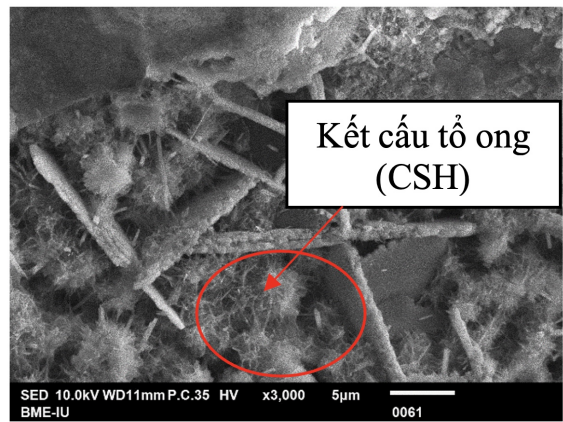
(c) 10 ngày



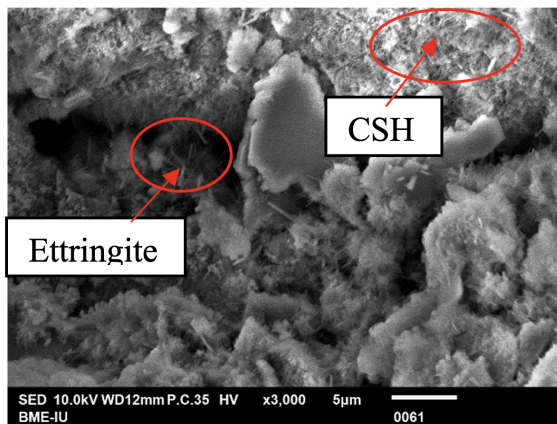
(d) 14 ngày



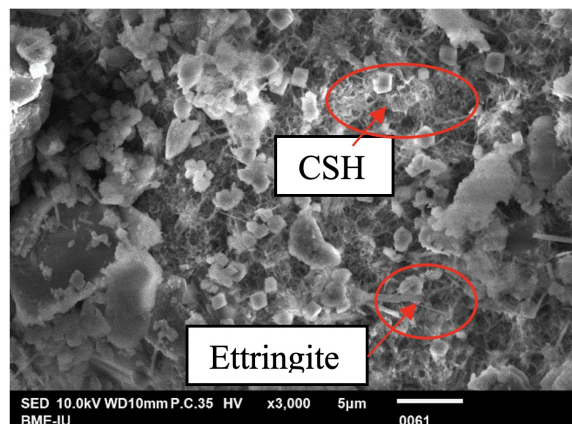
(e) 37 ngày



(f) 60 ngày



(g) 90 ngày



(h) 120 ngày

Hình 8. Hình ảnh SEM của mẫu soilcrete ở độ phóng đại cao ($\times 3.000$ lần) theo các ngày tuổi khác nhau

gian. Một số tác giả cũng cho kết quả tương tự khi nghiên cứu vi cấu trúc các mẫu đất sét trộn với xi măng [7, 8, 11, 12]. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu của họ, vi cấu trúc của mẫu đất sau gia cố được quan sát bằng SEM tại hai hoặc ba độ tuổi 28, 60, và 90 ngày. Trong nghiên cứu này, vi cấu trúc mẫu cát san lấp trộn xi măng được quan sát ở nhiều độ tuổi khác nhau lần lượt 4, 7, 10, 14, 37, 60, 90, 120 ngày cho thấy được diễn biến cấu trúc mẫu soilcrete theo thời gian một cách rõ ràng. Như vậy, sự thay đổi vi cấu trúc của mẫu soilcrete SC2 theo chiều hướng đặc chắc dần đã lý giải cho kết quả thí nghiệm thấm của mẫu SC1 với hệ thấm giảm dần theo thời gian bảo dưỡng (Hình 5).

4. Kết luận

Hai mẫu soilcrete đã được chế tạo trong cùng điều kiện giống nhau từ đất cát san lấp tỉnh Đồng Tháp trộn xi măng OPC tại hàm lượng 300 kg/m^3 . Mẫu thứ nhất được khảo sát sự thay đổi hệ số thấm theo thời gian bằng phương pháp cột áp vào giảm - cột áp ra không đổi trên thiết bị thấm thành mềm. Mẫu thứ hai được quan sát sự thay đổi cấu trúc bề mặt theo thời gian bằng kính hiển vi điện tử quét. Hệ số thấm của mẫu đất cát đầm chặt cũng được xác định trên thiết bị thấm thành cứng. Các kết luận

được rút ra từ các thí nghiệm như sau:

- Hệ số thấm đất cát trộn xi măng giảm đáng kể, lớn hơn 10^3 lần so với đất cát tự nhiên.
- Hệ số thấm đất cát trộn xi măng giảm theo thời gian bảo dưỡng.
- Cấu trúc bề mặt mẫu đất cát trộn xi măng đặc chắc hơn so với đất chưa xử lý.
- Sự hình thành và phát triển các sản phẩm CSH và ettringite được nhìn thấy rõ ràng trên các hình ảnh SEM của mẫu soilcrete. Các sản phẩm này góp phần làm cho cấu trúc mẫu soilcrete đặc chắc hơn mẫu đất cát chưa xử lý. Độ đặc chắc mẫu soilcrete tăng theo thời gian bảo dưỡng dẫn đến hệ số thấm giảm theo thời gian. Kết quả hình ảnh SEM phù hợp với kết quả thí nghiệm thấm.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện từ nguồn kinh phí của đề tài loại B - Đại học Quốc gia TP HCM, mã số B2018-20-04. Nhóm nghiên cứu chân thành cảm ơn Đại học Quốc gia TP HCM và trường Đại học Bách Khoa đã hỗ trợ hiệu quả trong suốt quá trình nghiên cứu.

Tài liệu tham khảo

- [1] Tran-Nguyen, H.-H., Kitazume, M., Luong, B. T., Bui, T. T. (2014). Laboratory investigation on An Giang soil mixed with dry cement. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 26(1).
- [2] Hùng, N. S., Thạch, V. H. (2019). [Gia cường nông đất yếu có cát san lấp bằng cọc xi măng - đất](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 13(4V):159–168.
- [3] Kamruzzaman, A. (2002). *Physico-Chemical and Engineering of cement treated Singapore marine clay*. ME Thesis, National University of Singapore.
- [4] Bellezza, I., Fratalocchi, E. (2006). [Effectiveness of cement on hydraulic conductivity of compacted soil-cement mixtures](#). *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 10(2): 77–90.
- [5] Chew, S. H., Kamruzzaman, A. H. M., Lee, F. H. (2004). [Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays](#). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(7):696–706.
- [6] Estabragh, A. R., Khatibi, M., Javadi, A. A. (2016). [Effect of cement on treatment of a clay soil contaminated with glycerol](#). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(4).
- [7] Mengue, E., Mroueh, H., Lancelot, L., Eko, R. M. (2017). [Physicochemical and consolidation properties of compacted lateritic soil treated with cement](#). *Soils and Foundations*, 57(1):60–79.
- [8] Mousavi, S. E., Wong, L. S. (2016). Permeability characteristics of compacted and stabilized clay with cement, peat ash and silica sand. *Civil Engineering Infrastructures Journal*.
- [9] Onitsuka, K., Modmoltin, C., Kouno, M., Negami, T. (2003). [Effect of organic matter on lime and cement stabilized ariake clays](#). *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2003(729):1–13.
- [10] Choquette, M., Berube, M., Locat, J. (1987). [Mineralogical and microtextural changes associated with lime stabilization of marine clays from eastern Canada](#). *Applied Clay Science*, 2(3):215–232.
- [11] Nontananandh, S., Thakon, Y., Sanupong, B. (2005). Scanning electron microscopic investigation of cement stabilized soil. *National conference on civil engineering*, Citeseer, 10:23–26.
- [12] Horpibulsuk, S. (2012). Strength and microstructure of cement stabilized clay. *Scanning electron microscopy*, IntechOpen.
- [13] ASTM D 698 (1998). *Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. American Society for Testing and Materials, America.
- [14] TCVN 9403:2012. *Quy trình gia cố nền đất yếu - Phương pháp trụ đất xi măng*. Bộ Khoa học và Công nghệ Việt Nam.
- [15] ASTM D5084 (2010). *Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous material using a flexible wall permeameter*. American Society for Testing and Materials, America.
- [16] TCVN 6282:2009. *Xi măng Poóc lăng - yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ Việt Nam.
- [17] TCVN 4506:2012. *Nước cho bê tông và vữa - yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

- [18] ASTM D5856 (1995). *Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid wall, compaction mold permeameter*. American Society for Testing and Materials, America.
- [19] Akbulut, S., Saglamer, A. (2004). [Modification of hydraulic conductivity in granular soils using waste materials](#). *Waste Management*, 24(5):491–499.
- [20] Helson, O., Eslami, J., Beaucour, A.-L., Noumowe, A., Gotteland, P. (2018). [Hydro-mechanical behaviour of soilcretes through a parametric laboratory study](#). *Construction and Building Materials*, 166:657–667.
- [21] Schnaid, F., Prietto, P. D. M., Consoli, N. C. (2001). [Characterization of cemented sand in triaxial compression](#). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10):857–868.
- [22] Franas, W., Panek, R., Wdowin, M. (2015). [SEM investigation of microstructures in hydration products of portland cement](#). *Springer Proceedings in Physics*, Springer International Publishing, 105–112.