

XÂY DỰNG

TẠP CHÍ ĐIỆN TỬ CỦA BỘ XÂY DỰNG
JOURNAL OF CONSTRUCTION

TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

Áp dụng SEM để phân tích mô hình cấu trúc cho cọc đất - xi măng tại Bình Khánh, TP Hồ Chí Minh

Applying SEM to analyze the structural model for soil - cement piles in Bình Khánh, Ho Chi Minh City

➤ **TS Ngô Thành Phong**

Trường Đại học Thủ Dầu Một

*Email: phongnt@tdmu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 28/5/2026

Ngày sửa bài: 14/6/2026

Ngày chấp nhận đăng: 22/6/2026

Ngày xuất bản Online: 25/6/2026

Tác giả liên hệ Email: phongnt@tdmu.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu xác định hàm lượng xi măng tối ưu cho cọc đất - xi măng nhằm tăng sức chịu tải và giảm độ lún của nền đất yếu nhiễm phèn, nhiễm mặn tại xã Bình Khánh, TP Hồ Chí Minh. Kính hiển vi điện tử quét (SEM) được sử dụng để phân tích vi cấu trúc và thành phần hóa học của các mẫu đất. Mối quan hệ giữa hàm lượng xi măng và cường độ nén một trục (UCS) là phi tuyến, nghĩa là việc tăng hàm lượng xi măng không nhất thiết kéo theo sự gia tăng tương ứng về cường độ.

Dựa trên thí nghiệm nén UCS và phân tích vi cấu trúc bằng SEM, hàm lượng xi măng 8% cho cường độ nén 28 ngày cao nhất (363,6 kg/cm²) và được khuyến nghị là giá trị tối ưu áp dụng cho cọc đất - xi măng tại khu vực này.

Từ khóa: Cọc đất - xi măng, cường độ nén một trục, hàm lượng xi măng tối ưu.

ABSTRACT

This study investigates the optimum cement dosage for soil-cement columns designed to improve bearing capacity and reduce settlement in soft, acid-sulfate and saline soils in Binh Khanh Commune, Ho Chi Minh City. Scanning electron microscopy (SEM) was used to examine the microstructural features and chemical composition of the treated soils. The correlation between cement content and unconfined compressive strength (UCS) is shown to be non-linear, demonstrating that higher cement dosages do not invariably produce commensurate strength gains.

On the basis of UCS test data and SEM microstructural observations, a cement content of 8% provides the highest 28 day compressive strength (363.6 kg/cm²) and is thus proposed as the optimal cement level for soil - cement columns in this locality.

Keywords: Soil - cement piles, unconfined compressive strength, optimal cement content.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khu vực xã Bình Khánh (ven biển TP HCM) hiện đang trong giai đoạn quy hoạch và phát triển mạnh mẽ kết hợp du lịch sinh thái, đòi hỏi tiêu chuẩn nền móng cao trong bối cảnh địa chất phức tạp. Vùng lân cận cầu An Nghĩa là điển hình của nền đất yếu với lớp bùn sét dày, độ ẩm cao, sức kháng cắt thấp, độ nén lún lớn và mức độ nhiễm phèn, nhiễm mặn đáng kể [1,2]. Những điều kiện này đặt ra yêu cầu cao đối với điều kiện nền móng trong bối cảnh địa chất phức tạp và đối với việc suy giảm tuổi thọ công trình nếu không có giải pháp gia tăng sức chịu tải và giảm độ lún của nền đất [1,2].

Trong số các phương pháp cải tạo nền đất, công nghệ cọc đất - xi măng (Cement Deep Mixing - CDM) được ưa chuộng nhờ thi công và khả năng cải thiện cường độ cũng như giảm lún nhanh [3,4]. Hiệu năng của phương pháp xử lý nền này chịu ảnh hưởng đáng kể từ các đặc tính cơ lý của đất tại vị trí thi công và tỷ lệ vật liệu liên kết được đưa vào hỗn hợp. Hàm lượng xi măng quá thấp dẫn đến không đạt cường độ thiết kế; quá cao thì lãng phí chi phí và tăng phát thải CO₂ từ sản xuất xi măng. Ở Bình Khánh, với đặc thù hàm lượng hữu cơ và độ nhiễm mặn lớn [1,2], việc xác định tỷ lệ phối trộn tối ưu không chỉ là một yêu cầu về mặt an toàn cho công trình mà còn là bài toán cân cân nhắc đồng thời việc cân bằng giữa chi phí và tác động sinh thái.

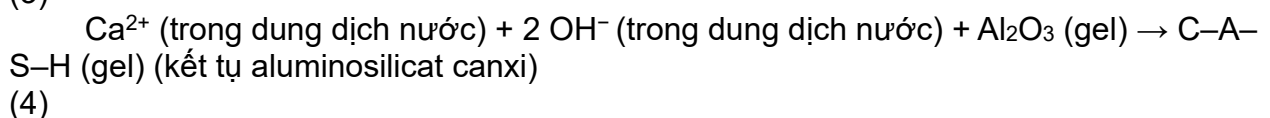
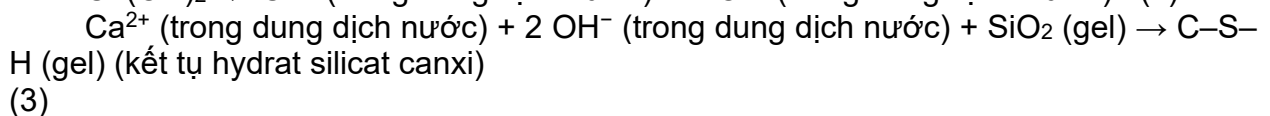
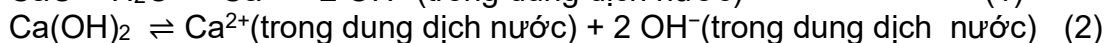
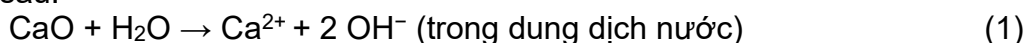
Trên phạm vi quốc tế, công nghệ trộn sâu xi măng trong đất (CDM) đã được chứng minh là hiệu quả trong việc gia tăng cường độ, giảm độ lún và tối ưu chi phí xử lý nền đất yếu [3,4]. Tuy nhiên, các nghiên cứu về CDM trên đất yếu còn hạn chế [5,6]. Trạng thái ứng suất phát sinh trong quá trình xi măng đóng rắn có tác động đáng kể đến khả năng chịu lực và ứng xử biến dạng của đất gia cố, nhưng chỉ vài nghiên cứu xem xét điều này [7,8].

Cả ở nước ngoài lẫn tại Việt Nam đã có nhiều công trình nghiên cứu về công nghệ CDM, nhưng ảnh hưởng của điều kiện địa chất, thành phần đất và thông số thi công đến cường độ cũng như biến dạng của cọc đất - xi măng vẫn chưa được đánh giá một cách toàn diện [9,10,11].

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Cơ sở lý thuyết

Khi xi măng trộn với đất ẩm có nước, xảy ra các phản ứng dưới dạng ion cân bằng như sau:



Gel hydrat silicat canxi cung cấp cường độ ngắn hạn, Gel aluminosilicat canxi tăng cường độ dài hạn. Ổn định đất yếu xảy ra thông qua việc giảm tính dẻo nhờ trao đổi cation và tăng độ mạnh ion và qua việc hình thành gel C-S-H/C-A-S-H nối kết các hạt thành ma trận bền hơn. Chất hữu cơ trong đất yếu làm suy giảm hiệu quả tăng sức chịu tải bằng cách thay đổi cấu trúc gel, làm chậm phản ứng, giữ nước.

Ngoài ra, chất hữu cơ này còn tạo thành một hệ phức hợp với aluminosilicat và với các ion kim loại, chính những hệ phức hợp này làm cản trở quá trình thủy hóa.

2.2. Đất thí nghiệm

2.2.1. Vị trí lấy mẫu

Mẫu thu thập lân cận cầu An Nghĩa, TP Hồ Chí Minh. Sau khi loại bỏ lớp xà bần bên trên khoảng 0.5 m, mẫu đất được lấy xuống thêm khoảng 1 m nữa tại vị trí khảo sát.

2.2.2. Trạng thái

Đất tại khu vực khảo sát chủ yếu là bùn sét ở điều kiện nhão mềm đến rất mềm; độ ẩm tự nhiên cao và cường độ chịu lực thấp. Mẫu được giữ nguyên trạng tự nhiên để mang đến phòng thí nghiệm.

2.2.3. Kết quả

Các đặc trưng cơ học và vật lý của đất được minh họa trong các bảng dưới đây.

Bảng 1. Đặc trưng cơ học và vật lý của mẫu đất.

Số hiệu mẫu	Độ ẩm	Dung trọng			Tỷ trọng hạt	Độ bão hòa	Độ rỗng	Hệ số rỗng
		Trạng thái ướt	Trạng thái bão hòa	Trạng thái khô				
	W %	g_w g/cm^3	g_{bh} g/cm^3	g_c g/cm^3	D g/cm^3	Sr %	n %	e_o 0,0
M1	133,0 7	1,350	1,359	0,579	2,635	98,8	78,0	3,550
M2	108,4 3	1,361	1,406	0,653	2,641	94,1	75,3	3,043
M3	112,41	1,328	1,390	0,625	2,653	92,0	76,4	3,243
Trung bình	118,0	1,3	1,4	0,6	2,6	94,9	76,6	3,3

Bảng 2. Kết quả khảo sát sức kháng cắt và tỷ lệ thành phần hữu cơ.

Số hiệu mẫu	TN cắt cánh trong phòng	Hàm lượng hữu cơ	Phân loại đất
M1	0,80	13,9	Hạt mịn nâu xám, dạng chảy lỏng theo phân loại địa kỹ thuật
M2	0,70	12,6	
M3	1,20	11,3	
Trung bình	0,9	12,6	

2.3. Chất kết dính sử dụng trong nghiên cứu

Vật liệu liên kết là xi măng, sản phẩm poóc-lăng do cơ sở sản xuất tại Nghi Sơn, Việt Nam cung ứng, thuộc cấp cường độ 40, nhóm I theo tiêu chuẩn ASTM C150/C150M 16 [12], với tỉ trọng xấp xỉ 3,12 g/cm^3 và diện tích bề mặt riêng khoảng 3.635 cm^2/g . Thành phần hóa học của loại chất kết dính này được xác định bằng phân tích trong phòng thí nghiệm và được minh họa trong Bảng 3.

Bảng 3. Tính chất hóa học của xi măng.

Thành phần	L.O.I	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
Hàm lượng (%)	0,8	29,8	11,6	1,6	48,2	4,6
Thành phần	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
Hàm lượng (%)	2,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0,0
L.O.I: Lượng mất khi nung						

2.4. Trình tự tạo hình và bảo dưỡng mẫu

- Khâu chuẩn bị mẫu

+ Sắp xếp vật liệu: Đất thí nghiệm và chất kết dính được xử lý và cân đong theo hướng dẫn trong Tiêu chuẩn TCVN 9438:2012. [13]

+ Công đoạn phối trộn: Phần đất yếu và chất kết dính được nhào trộn đến khi đạt độ đồng nhất, tuân theo quy định trong Tiêu chuẩn TCVN 9438:2012 [13]

+ Công đoạn tạo mẫu: Hỗn hợp đã trộn được đóng vào khuôn trụ với kích thước đường kính 38 mm và chiều cao 76 mm.

+ Công đoạn bảo dưỡng: Các mẫu được lưu giữ trong điều kiện chuẩn đến các mốc thời gian 7 ngày và 28 ngày trước khi tiến hành thí nghiệm nén đơn trục (UCS).

- Thông số mẫu đất thí nghiệm: Kích thước của mẫu đất có đường kính \times chiều cao là 38 mm \times 76 mm; số lượng: 54 mẫu bao gồm 27 mẫu thử ở tuổi 7 ngày và 27 mẫu thử ở tuổi 28 ngày.

2.5. Phương pháp thí nghiệm

2.5.1. Phương pháp

Nén một trục có nở hông (UCS) theo TCVN 9438:2012 [13] trên mẫu đất có kích thước 38 mm \times 76 mm; liều lượng chất kết dính biến thiên trong dải từ 6 đến 14 phần trăm khối lượng đất khô với chín mức xác định (6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14%); số mẫu: Mỗi mức hàm lượng chuẩn bị 6 mẫu; 3 mẫu thử tại tuổi dưỡng 7 ngày và 3 mẫu thử tại tuổi dưỡng 28 ngày.

2.5.2 Kết quả đo đạc

Các kết quả đo đạc được tổng hợp và đánh giá theo hướng dẫn của tiêu chuẩn TCVN 9438:2012 [13]. Đối với từng tuổi mẫu và mỗi mức liều lượng chất kết dính, giá trị cường độ nén được lấy bằng trung bình cộng của ba thí nghiệm nhằm bảo đảm khả năng phản ánh đặc trưng của mẫu.

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

3.1 Các số liệu thu được từ thí nghiệm UCS

Đối với mẫu đất gia cố bằng chất kết dính, với tỷ lệ trộn dao động trong khoảng 6 - 14% và được bảo dưỡng tại hai mốc thời gian 7 ngày và 28 ngày, được tổng hợp trong Bảng 4. Đối với mỗi mức liều lượng và từng thời gian bảo dưỡng, giá trị sức kháng nén được xác định bằng trung bình cộng của ba mẫu đo tương ứng, nhằm bảo đảm tính đặc trưng và độ ổn định của kết quả, phù hợp với hướng dẫn trong Tiêu chuẩn TCVN 9438:2012 [13].

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm UCS.

Hàm lượng xi măng	Cường độ TB (7 ngày) (kG/cm ²)	Cường độ TB (28 ngày) (kG/cm ²)
6%	62,6	317,33
7%	91,4	276
8%	110,5	363,55
9%	89	203,7
10%	43,8	192,2
11%	72	169,15
12%	93,8	232,78
13%	76,8	146,08
14%	101,6	183,95
CĐTB Lớn nhất	110,5	363,55
CĐTB Nhỏ nhất	43,8	146,08

Kết quả đo đạc cho thấy sức kháng nén trung bình của các mẫu tại mốc 7 ngày bảo dưỡng nằm trong dải khoảng 43,8 - 110,5 kg/cm², trong khi ở thời điểm 28 ngày giá trị này tăng lên khoảng 146,08 - 363,55 kg/cm². Sự chênh lệch nêu trên chứng tỏ thời gian bảo dưỡng chi phối mạnh mẽ quá trình gia tăng cường độ của cọc đất - xi măng, với mức cải thiện đáng kể khi kéo dài thời gian từ 7 lên 28 ngày.

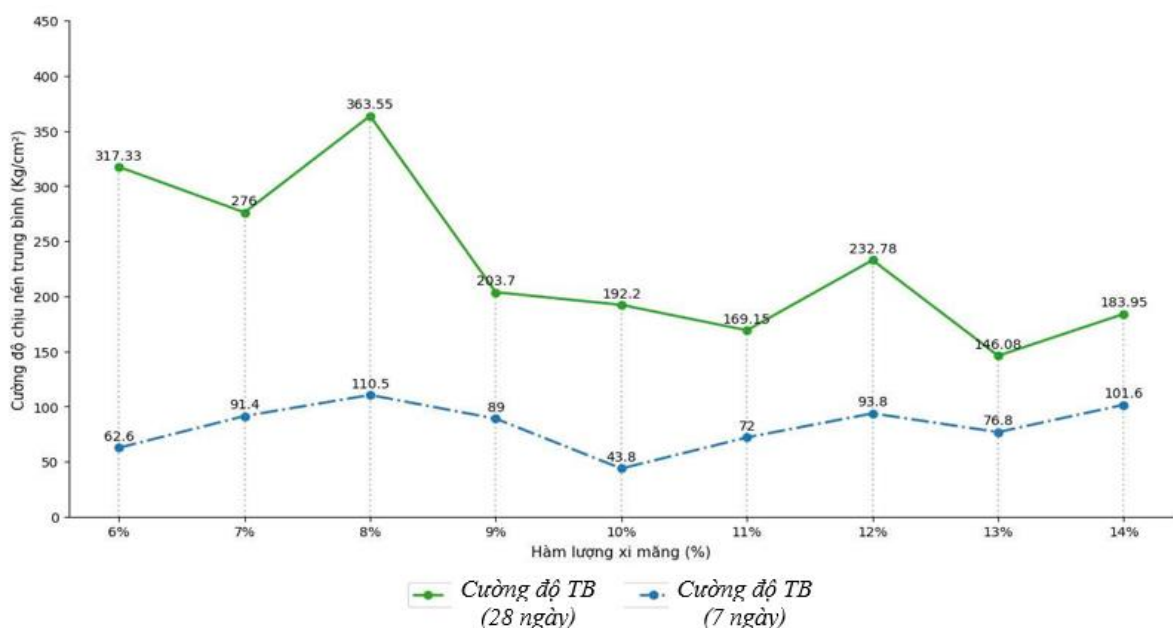
4. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

4.1. Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng đến cường độ chịu nén của cọc xi măng đất

Ở tuổi dưỡng hộ 7 ngày, cường độ chịu nén trung bình tăng từ 62,6 kg/cm² tại hàm lượng xi măng 6% lên 110,5 kg/cm² ở 8%, sau đó giảm xuống 89,0 kg/cm² tại 9% và đạt giá trị thấp nhất 43,8 kg/cm² tại 10%. Khi tiếp tục gia tăng tỷ lệ chất kết dính, giá trị sức kháng nén đơn trục lại tăng lên, đạt khoảng 72,0 kg/cm² tại 11% và 93,8 kg/cm² tại 12%, giảm nhẹ còn 76,8 kg/cm² tại 13% rồi tăng lên 101,6 kg/cm² ở 14%.

Đối với mẫu đất ở tuổi dưỡng hộ 28 ngày, các giá trị sức kháng nén trung bình tương ứng là 317,33 kg/cm² tại 6% và 276,00 kg/cm² tại 7%, sau đó tăng mạnh và đạt cực đại 363,55 kg/cm² tại 8%. Khi hàm lượng chất kết dính tăng tiếp, cường độ giảm xuống 203,70 kg/cm² tại 9%, 192,20 kg/cm² tại 10% và 169,15 kg/cm² tại 11%. Ở các mức cao hơn, cường độ tăng lên 232,78 kg/cm² tại 12%, giảm sâu còn 146,08 kg/cm² tại 13%, rồi nhích lên 183,95 kg/cm² tại 14%.

Các số liệu thu được cho thấy sự phụ thuộc giữa tỷ lệ chất kết dính và sức kháng nén của cọc đất-xi măng có bản chất không tuyến tính. Việc tăng thêm liều lượng chất kết dính chỉ mang lại hiệu quả nâng cao khả năng chịu lực rõ rệt trong một dải giá trị giới hạn; khi vượt ra khỏi vùng tối ưu này, chỉ tiêu UCS không tăng tương ứng, thậm chí có thể suy giảm. Sự biến thiên của giá trị trung bình cường độ nén UCS theo tỷ lệ chất kết dính tại các mốc thời gian bảo dưỡng khác nhau được biểu diễn trên Hình 1.

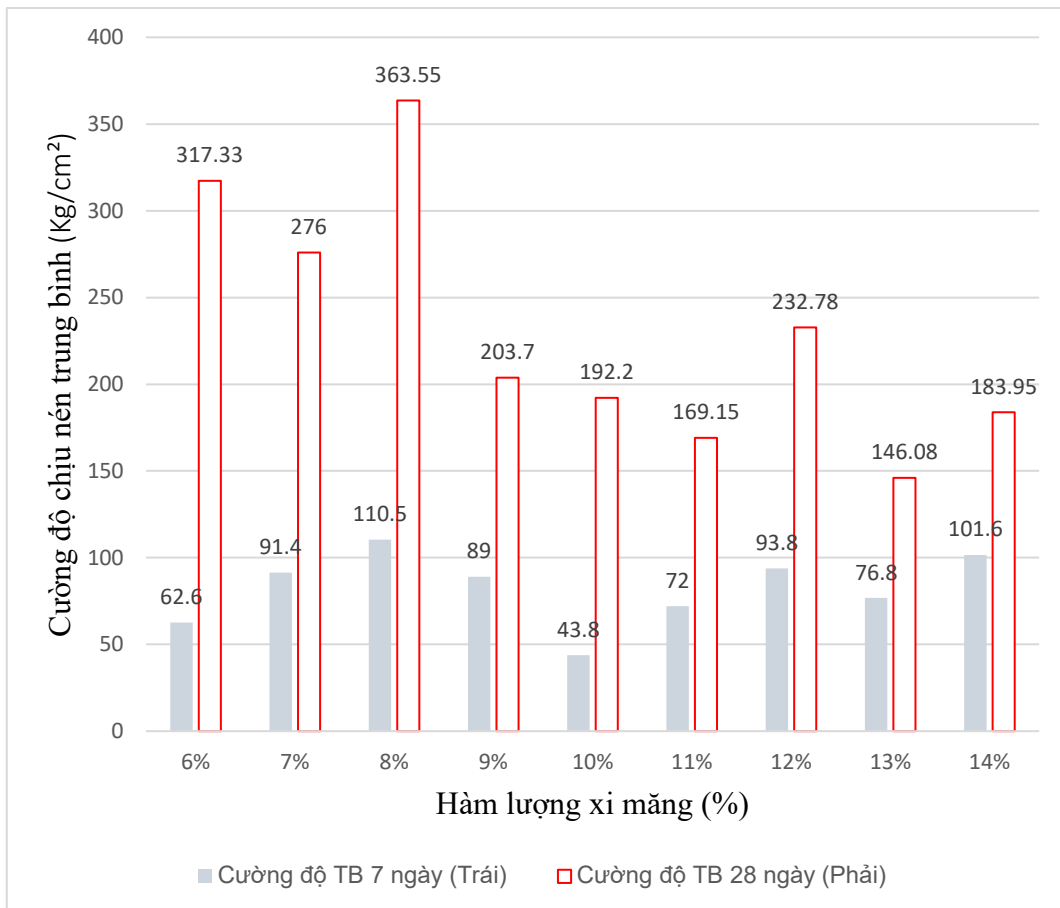


Hình 1. Mối quan hệ giữa tỷ lệ chất kết dính và sức kháng nén đơn.

4.2. So sánh cường độ chịu nén UCS ở tuổi 7 ngày và 28 ngày

Khi đối chiếu giá trị sức kháng nén trung bình tại hai mốc bảo dưỡng 7 và 28 ngày, có thể nhận thấy rằng ở tất cả các mức tỷ lệ chất kết dính được xem xét, sức kháng nén tại 28 ngày luôn cao hơn rõ rệt so với tại 7 ngày, với độ chênh nằm trong khoảng xấp xỉ 80 đến hơn 250 kg/cm².

Đáng chú ý, với tỷ lệ xi măng 8%, sức kháng nén tăng từ 110,5 lên 363,55 kg/cm², tức lớn hơn khoảng 3,3 lần, cho thấy mức độ gia tăng cường độ theo thời gian nổi trội so với phần lớn các tỷ lệ khác. Sự khác biệt về cường độ giữa hai thời điểm bảo dưỡng ứng với từng tỷ lệ chất kết dính được biểu diễn trên Hình 2



Hình 2. Đối chiếu sức kháng nén một trục ở tuổi 7 ngày và 28 ngày.

4.3. Phân tích SEM và thảo luận

4.3.1. Nền tảng lý thuyết vận hành của kính hiển vi điện tử quét (SEM)

Electron được phát xạ từ súng điện tử và được tăng tốc, hội tụ thành chùm hẹp (dưới 10 nm) sau đó quét lên bề mặt mẫu; độ phân giải của SEM phụ thuộc đường kính chùm, và việc tạo ảnh cùng phân tích dựa trên phát hiện các loại tín hiệu bức xạ khác nhau phát sinh khi electron tương tác với mẫu.

4.3.1.1 Mục đích

Quan sát được hình ảnh bề mặt của vật liệu với độ phân giải cao.

4.3.1.2 Chuẩn bị mẫu thử

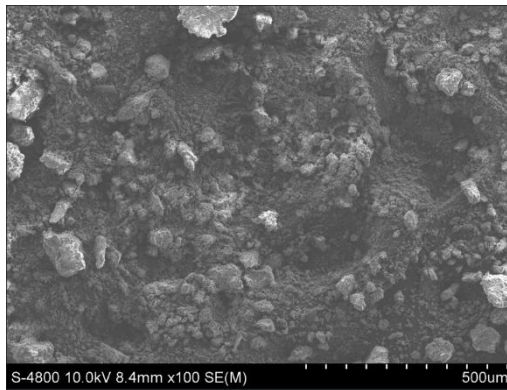
Mẫu thử được phá vỡ từ tâm và tạo thành các mảnh vỡ nhỏ. Dùng dao để gia công những mẫu nhỏ được lựa chọn sao cho vừa vặn với đế mẫu (đế mẫu có kích thước đường kính 10 mm chiều cao 5 mm). Dùng keo Cacbon dán mẫu vào đế mẫu. Mẫu thử trước khi đo sẽ được phủ 1 lớp phủ kim loại dẫn điện tốt (Platin, Pt) trên bề mặt cần đo, nhằm thu được ảnh quan sát với chi tiết rõ nét bằng thiết bị JEC-3000FC. Mẫu sau khi được phủ, được đem ra tiến hành chụp ảnh ngay.

4.3.1.3 Thiết bị thử nghiệm

Thiết bị phủ mẫu JEC-3000PC, dùng để phủ Platin lên bề mặt mẫu.

4.3.2 Phân tích hình ảnh SEM

4.3.2.1 Mẫu đất tự nhiên

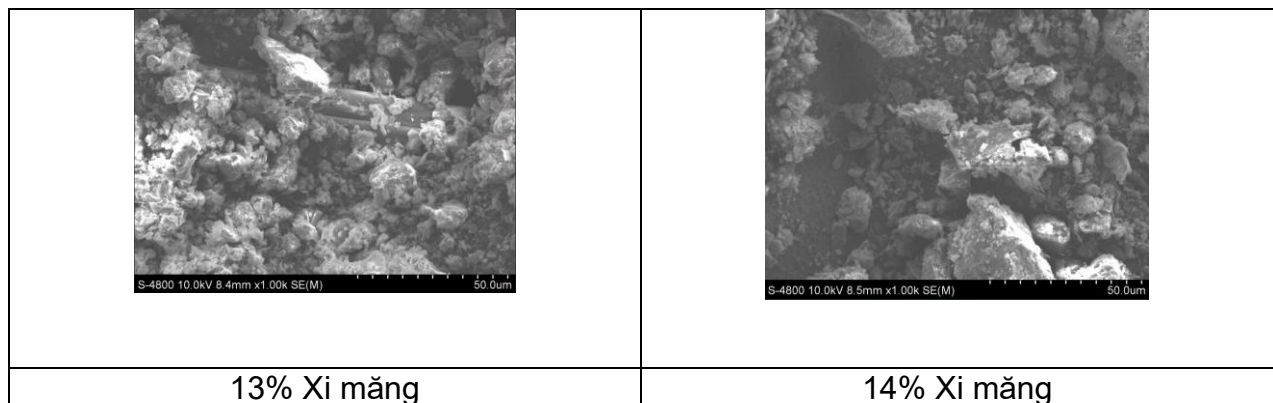


Hình 3. SEM của mẫu đất tự nhiên.

4.3.2.2 Mẫu đất trộn xi măng

Hình ảnh SEM của mẫu đất - xi măng tương ứng với các tỉ lệ trộn xi măng theo trọng lượng khô là 8%, 6%, 7%, 9%, 10%, 11%, 12%, 13% và 14% được trình bày ở Hình 4.

SEM của mẫu 8% Xi măng		
6% Xi măng	7% Xi măng	9% Xi măng
10% Xi măng	11% Xi măng	12% Xi măng



Hình 4. Hình thái vi mô quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét của mẫu đất gia cường với dải hàm lượng 6 - 14%.

So với trạng thái đất nguyên khai, các mẫu đất đã được ổn định hóa bằng xi măng biểu hiện vi cấu trúc đặc trưng bởi sự hiện diện với mật độ cao hơn của các pha gel hydrat hóa hệ canxi-silicat-hydrat và canxi-alumin-silicat-hydrat, đóng vai trò như pha liên kết liên tục bao bọc và gắn kết hệ hạt đất thành một ma trận không gian, trong khi ở mẫu đối chứng không gia cố hầu như không nhận diện được dạng sản phẩm này.

Tuy nhiên, trên ảnh vi mô vẫn xuất hiện nhiều vùng khe hở hoặc khoảng trống không được lấp đầy bởi gel, cho thấy các phản ứng thủy hóa giữa xi măng và nước mới diễn tiến ở mức độ chưa hoàn toàn, chưa hình thành được một mạng lưới gel địa kỹ thuật C-S-H/C-A-S-H phát triển đồng nhất trong toàn bộ thể tích đất. Do các cơ chế phản ứng hydrat của pha clinker xi măng với nước có khả năng tiếp tục diễn ra sau tuổi 7 ngày, cường độ nén một trục (UCS) của các mẫu đất được gia cố bằng xi măng thường tiếp tục tăng ở các tuổi thí nghiệm lớn hơn, phản ánh sự phát triển bổ sung của sản phẩm hydrat hóa và mức độ liên kết hạt.

Ngược lại, khi hàm lượng xi măng lựa chọn không tương thích với đặc trưng của nền đất yếu, cơ chế thủy hóa có thể bị cản trở hoặc diễn ra kém hiệu quả, kéo theo sự suy giảm về mức độ phát triển và tính liên tục của mạng lưới gel, từ đó làm hạn chế hiệu quả gia tăng sức chịu tải của hệ đất đã xử lý. Hệ quả là đối với các cấp phối có hàm lượng xi măng thấp hơn hoặc vượt quá giá trị tối ưu khoảng 8%, giá trị UCS quan sát được đều thấp hơn so với trường hợp cấp phối ứng với hàm lượng xi măng tối ưu nêu trên.

4.4. Đánh giá hiệu trong việc gia tăng sức chịu tải và lựa chọn mức chất kết dính đạt hiệu quả cao

Hiệu quả cải thiện khả năng chịu lực của nền đất khi sử dụng giải pháp cọc đất - xi măng chịu chi phối đồng thời bởi hàm lượng chất kết dính được đưa vào hệ đất yếu và quy luật phát triển cường độ theo thời gian dưỡng hộ. Trong khuôn khổ các thí nghiệm đã thực hiện, cấp phối với hàm lượng xi măng bằng 8%, mẫu này cho thấy cường độ UCS vượt trội đạt 363,6 kg/cm², đây là giá trị lớn nhất trong toàn bộ dải tỷ lệ khảo sát.

Từ kết quả này có thể nhận thấy mức 8% xi măng thể hiện năng lực nâng cao cường độ vượt trội hơn so với các hàm lượng khác khi xét theo tiêu chí UCS. Do đó, có thể luận giải rằng hàm lượng xi măng vào khoảng 8% là giá trị tối ưu khuyến nghị cho thiết kế và thi công cọc đất - xi măng tại khu vực xã Bình Khánh, Thành phố Hồ Chí Minh.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

5.1. Kết luận

Trên cơ sở kết quả thí nghiệm UCS và phân tích số liệu thu được, có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

Sức kháng nén của hệ cọc đất - xi măng được xác định là hàm phụ thuộc đồng thời vào hàm lượng chất kết dính đưa vào và thời gian dưỡng hộ. Kết quả thí nghiệm cho thấy, tại các cấp phối xem xét, giá trị UCS ở tuổi 28 ngày đều vượt trội so với ở 7 ngày, phản ánh vai trò chi phối của thời gian bảo dưỡng đối với tiến trình hydrat hóa xi măng và sự hình thành, phát triển mạng lưới liên kết trong môi trường đất - xi măng.

Đặc trưng tương quan giữa tỷ lệ chất kết dính và sức kháng nén của vật liệu nghiên cứu thể hiện đặc trưng phi tuyến, không tuân theo quy luật tỷ lệ thuận đơn giản giữa lượng chất kết dính và cường độ thu được. Việc tăng thêm xi măng không đồng nghĩa với sự gia tăng tương ứng của sức kháng nén, mà chỉ tại một số khoảng hàm lượng nhất định mới quan sát được mức cải thiện sức chịu tải có ý nghĩa, trong khi các mức thấp hơn hoặc vượt quá khoảng này cho thấy hiệu quả gia cường hạn chế.

Hàm lượng 8% xi măng so với trọng lượng khô cho sức kháng nén lớn nhất ở 28 ngày đạt 363,6 kg/cm², là giá trị cao nhất trong các cấp phối khảo sát. Trên cơ sở đó, có thể xem 8% là mức hàm lượng xi măng phối trộn đạt hiệu quả cao nhất về mặt cường độ. Kết luận này tương thích với các nghiên cứu trước, chẳng hạn D.T. Bergado [14] đã chỉ ra đối với đất sét yếu Bangkok, hàm lượng xi măng cho hiệu quả cao nằm trong khoảng 8 - 9,5% so với trọng lượng khô. Từ các luận cứ nêu trên, có thể kiến nghị sử dụng hàm lượng xi măng khoảng 8% như một lựa chọn thích hợp cho thiết kế cọc đất - xi măng tại khu vực xã Bình Khánh, TP Hồ Chí Minh.

5.2. Kiến nghị

Do giới hạn về quy mô mẫu thí nghiệm và điều kiện khảo sát trong nghiên cứu này, kết quả thu được mới chỉ phản ánh một phần tiềm năng ứng dụng của giải pháp cọc đất - xi măng. Vì vậy, cần tiếp tục triển khai các nghiên cứu bổ sung nhằm hoàn thiện cơ sở khoa học và mở rộng khả năng áp dụng biện pháp xử lý này trong thực tế. Trên nền tảng đó, có thể đề xuất một số hướng nghiên cứu tiếp nối như sau:

Tiến hành thí nghiệm với quy mô mẫu lớn hơn, lấy mẫu tại nhiều vị trí địa chất khác nhau trong khu vực Nhà Bè - Cần Giờ TP Hồ Chí Minh cũng như các khu vực nhiễm phèn nhiễm mặn khác ở Việt Nam như khu vực đồng bằng ven biển Nam Bộ.

Song song với việc sử dụng chỉ tiêu sức kháng nén, cần xem xét các thí nghiệm cơ học khác nhằm mô tả một cách toàn diện hơn ứng xử của cọc đất-xi măng, chẳng hạn như các thí nghiệm cắt và thí nghiệm nén ba trục.

Cần triển khai đồng thời các chương trình thí nghiệm trong phòng và khảo sát, thử nghiệm tại khu vực xây dựng để phản ánh sát thực hơn hiệu quả làm việc của cọc đất - xi măng trong điều kiện khai thác ngoài thực tế. Cách tiếp cận này đặc biệt quan trọng đối với các vùng đất yếu nhiễm phèn, nhiễm mặn như khu vực Bình Khánh (TP. Hồ Chí Minh) và các khu vực có điều kiện địa chất tương tự trên phạm vi cả nước.

Lời cảm ơn: Tác giả xin trân trọng cảm ơn Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam vì đã dành cho đề tài sự hỗ trợ quý báu về các điều kiện phục vụ cho thí nghiệm, qua đó góp phần hoàn thành bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Phan Quốc, Khảo sát định tính đất yếu vùng Cần Giờ, Trường Đại học Bách khoa TP Hồ Chí Minh, 2016.

[2] Vũ Ngọc Bình, Nguyễn Quốc Dũng, Vũ Đình Phụng, Nguyễn Thanh Tùng, Nguyễn Trọng Tín, Nghiên cứu đánh giá hiệu quả cải tạo đất loại sét yếu vùng Đồng bằng sông Cửu Long bằng xi măng, Viện Thủy công, Tạp chí Thủy lợi, Số 10/2015.

[3] Consoli et al., Variables Controlling Strength of Artificially Cemented Sand: Influence of Curing Time, Journal of Materials in Civil Engineering 23(5):692-696, October 2010, 2011, DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000205.

- [4] Lopez et al., Effects of temperature, pH and sugar concentration on the growth parameters of *Saccharomyces cerevisiae*, *S. kudriavzevii* and their interspecific hybrid, 2009, *Int J Food Microbiol* 131(2-3):120-7.
- [5] Samuel J. Abbey et al., Effect of Cement and by-Product Material Inclusion on Plasticity of Deep Mixing Improved Soils, 2016, *International Journal of Civil Engineering and Technology* 7(75):265-274.
- [6] Phan., 2024, Ground Improvement Using Soil-Cement Method: A Case Study with Laboratory Testing and In-Situ Verification for a Highway Project in Southern Vietnam, <https://doi.org/10.14456/seagj.2016.58>.
- [7] Abu Taher Md Zillur Rabbi et al., 2011, Effect of Curing Stress and Period on the Mechanical Properties of Cement-Mixed Sand, Volume 51, Issue 4, August 2011, Pages 651-661, <https://doi.org/10.3208/sandf.51.651>.
- [8] Liu et al., 2013, Effects of Curing Conditions on Unconfined Compressive Strength of Cement- and Cement-Fiber-Improved Soft Soils, *Journal of Materials in Civil Engineering* 25(8):1134-1141.
- [9] PT Ngo et al., 2021, Improvement the strength of the Nha be soils by Portland cement. AIP Conference Proceedings. https://pubs.aip.org/aip/acp/article-pdf/doi/10.1063/5.0068375/14241088/050004_1.
- [10] Nilo Cesar Consoli et al., 2002, Influence of curing under stress on the triaxial response of cemented soils, *Geotechnique* 52(5):382-384. Doi:10.1680/geot.52.5.382.38696.
- [11] Tạ Đức Thịnh, Xác định tỷ lệ xi măng tối ưu và thời gian bảo dưỡng đối với cọc đất xi măng, *Tạp chí Công nghệ Xây dựng*, 2002.
- [12] ASTM C150/C150M-16, Standard Specification for Portland Cement.
- [13] TCVN 9438:2012, Đất xây dựng - Phương pháp xác định độ bền nén một trục nở hông.
- [14] Bergado D. T, Long P. V, Lee C. H, Loke K. H và Werner. G (1994), "Performance of reinforced embankment on soft Bangkok clay with highstrength geotextile reinforcement," *Geotextiles and geomembranes*, vol. 13, p. 403-420.