

TƯƠNG QUAN CƯỜNG ĐỘ KHÁNG NÉN MẪU CHẾ TẠO TRONG PHÒNG THÍ NGHIỆM VÀ MẪU KHOAN RÚT LỖI HIỆN TRƯỜNG TRONG THI CÔNG CỌC XI MĂNG ĐẤT GIA CỐ NỀN ĐẤT YẾU KHU VỰC LONG MỸ - HẬU GIANG

CORRELATION OF COMPRESSIVE STRENGTH BETWEEN LABORATORY-PREPARED SAMPLES AND IN-SITU CORE SAMPLES IN DEEP SOIL MIXING COLUMNS CONSTRUCTION FOR SOFT GROUND IMPROVEMENT IN LONG MY - HAU GIANG AREA

NGUYỄN KIM THỊNH^{a,*}

^aViện Khoa học công nghệ xây dựng

*Tác giả đại diện: Email: nguyengkimthinh.ibst@gmail.com

Ngày nhận 17/9/2025, Ngày sửa 29/9/2025, Chấp nhận 30/9/2025

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2025.vi.vol3-9>

Tóm tắt: Trong thi công đường qua các khu vực có nền đất yếu, việc gia cố đất yếu để nền đạt được khả năng chịu tải rất quan trọng. Hiện tượng lún lệch tại các vị trí tiếp giáp mố cầu, cống hộp với nền đường hiện nay đang được xử lý chủ yếu bằng cọc xi măng đất nhằm tăng sức chịu tải nền vị trí này. Việc lựa chọn hàm lượng xi măng dựa trên cường độ kháng nén mẫu được chế tạo trong phòng thí nghiệm trước khi thi công cọc thử hiện trường đang được áp dụng. Do lớp đất yếu ở các khu vực nền đất yếu thường là loại đất dính có chỉ số dẻo cao, việc trộn tại chỗ làm đồng nhất vật liệu hiện trường là tương đối, do đó cường độ mẫu hiện trường có dao động lớn và thấp hơn so với cường độ mẫu chế tạo trong phòng. Kết quả nghiên cứu với lớp đất yếu (lớp 1) ở khu vực Long Mỹ - Hậu Giang, hàm lượng xi măng trên $1m^3$ đất là 240kg khoảng dao động tỷ lệ cường độ tuổi 28 ngày mẫu hiện trường và cường độ mẫu chế tạo trong phòng là 0,40 ~ 0,80. Tương quan tỷ lệ giữa cường độ hiện trường và trong phòng cải thiện tốt hơn so với giá trị khuyến nghị trong tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 9403:2012 hiện nay là 0,2 đến 0,5.

Từ khóa: Cọc xi măng đất, cường độ kháng nén, cải tạo đất yếu.

Abstract: Ground improvement is essential for road construction over weak soils to ensure adequate bearing capacity. Differential settlement at transition zones, such as bridge abutments and box culverts, is commonly treated with cement-deep mixing columns. Cement content is determined based on laboratory unconfined compressive strength tests prior to field trial columns. However, due to the high-plasticity cohesive nature of weak soils, in-situ mixing yields only relative homogeneity, leading to lower and more variable field strengths compared to laboratory specimens. A case study on soft clay (Layer 1) in

Long Mỹ, Hậu Giang, with 240 kg cement per cubic meter of soil, showed that the 28-day field-to-laboratory strength ratio ranged from 0.40 to 0.80, which is higher than the recommended range of 0.2–0.5 specified in Vietnamese standard TCVN 9403:2012

Keywords: Cement Soil Columns; Compressive Strength; Soft Ground Improvement.

1. Giới thiệu

Nền đất yếu phân bố rộng rãi ở nhiều khu vực đồng bằng ven biển và vùng trũng của Việt Nam, đặc biệt ở đồng bằng sông Cửu Long. Đây là loại đất có sức chịu tải thấp, hệ số rỗng và độ ẩm cao, độ nén lún lớn, gây ra nhiều khó khăn cho xây dựng công trình giao thông. Trong quá trình khai thác, các công trình đường bộ trên nền đất yếu thường đối mặt với hiện tượng lún không đều, đặc biệt nghiêm trọng tại các vị trí tiếp giáp giữa nền đường và công trình như mố cầu, cống hộp. Lún không đều không chỉ gây hư hỏng mặt đường mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn giao thông và chi phí duy tu sửa chữa. Vì vậy, xử lý và gia cố đất yếu luôn là nhiệm vụ quan trọng trong thiết kế và thi công công trình đường bộ.

Nhiều giải pháp kỹ thuật đã được áp dụng nhằm cải tạo nền đất yếu, có thể chia thành các nhóm chính:

- Thoát nước và gia tải trước: sử dụng bấc thấm, giếng cát kết hợp gia tải để tăng tốc độ cố kết;
- Thay thế: bóc bỏ đất yếu và thay bằng vật liệu có cường độ cao hơn (cát, đá dăm,...);
- Gia cố bằng cọc và trộn sâu: bao gồm cọc cát, cọc vôi, cọc xi măng đất (soil-cement column, deep mixing method);
- Gia cường bằng vật liệu địa kỹ thuật: sử dụng vải địa kỹ thuật, lưới địa kỹ thuật,...

Các phương pháp xử lý nền đất yếu đều có phạm vi áp dụng, ưu điểm và hạn chế riêng. Việc lựa chọn giải pháp tối ưu phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm điều kiện địa chất, đặc điểm công trình, yêu cầu kỹ thuật và chi phí đầu tư. Trong thực tế, để đạt hiệu quả kinh tế - kỹ thuật cao, nhiều dự án thường áp dụng đồng thời hai hoặc nhiều biện pháp xử lý. Hiện nay, đối với các công trình giao thông cấp cao tại khu vực Tây Nam Bộ, giải pháp phổ biến là kết hợp thoát nước ngang và gia tải trước cho phần nền đường, đồng thời sử dụng cọc xi măng đất tại khu vực đầu mố cầu nhằm kiểm soát lún không đều và bảo đảm ổn định công trình.

Cọc xi măng đất là một biện pháp thi công của phương pháp gia cố bằng cọc và trộn sâu. Biện pháp này có kỹ thuật cải tạo đất nền được sử dụng rộng rãi hiện nay, trong đó các chất kết dính như vôi, xi măng hoặc hỗn hợp của chúng được đưa trực tiếp vào đất và trộn đều nhằm nâng cao khả năng chịu tải và giảm biến dạng của nền đất. Công nghệ này được khởi xướng tại Nhật Bản từ cuối những năm 1960 bởi Viện Nghiên cứu Cảng và Bến cảng (PHRI), với ý tưởng ban đầu được công bố vào năm 1968. Okumura và Terashi (1975) là những người đầu tiên giới thiệu phương pháp này ra cộng đồng quốc tế. Trong giai đoạn đầu, vôi được sử dụng làm chất kết dính chính, với tên gọi Deep Lime Mixing (DLM). Từ giữa thập niên 1970, xi măng và hỗn hợp vôi - xi măng được áp dụng rộng rãi hơn nhằm nâng cao tính đồng nhất và hiệu quả xử lý. Đồng thời, các thiết bị trộn sâu được phát triển để đáp ứng yêu cầu thi công liên tục ở độ sâu lớn. Từ năm 1974 đến 1978, phương pháp DLM đã được áp dụng tại 21 công trình tại Nhật Bản, bao gồm cả công trình trên biển, với ứng dụng điển hình tại tỉnh Chiba do Fudo Construction Co. Ltd. thực hiện. Sau đó, xi măng và vữa xi măng dần thay thế hoàn toàn vôi, hình thành cọc xi măng đất (Cement Deep Mixing - CDM) hay còn gọi là phương pháp ướt của trộn sâu [1].

Tại châu Âu, Ba Lan là nước giữ vị trí hàng đầu về sản lượng và sự đa dạng của cọc xi măng đất. Các ứng dụng này bao gồm: đường sắt, đường bộ, cầu, các công trình dân dụng và công nghiệp, silo, trung tâm thương mại, tấm sàn, bãi đỗ xe và kho chứa, hệ thống chống đào và tường chắn [3].

Tại Hoa Kỳ, cọc xi măng đất được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi cho gia cố nền móng và đê đắp,

giảm biến dạng của đất sét nở, xử lý đất ô nhiễm và cải thiện nền đất yếu tại miền Nam nước này. Các nghiên cứu của Cục Quản lý Đường cao tốc Liên bang (FHWA) và các tổ chức nghiên cứu khác thực hiện cho thấy DSM hiệu quả trong việc tăng độ bền, giảm nén và giảm thấm cho đất yếu, đồng thời hạn chế lan truyền chất ô nhiễm trong đất và nước ngầm [4], [5], [6].

Tại Trung Quốc, cọc xi măng đất lần đầu được áp dụng tại Thượng Hải năm 1978, sau đó mở rộng sang các công trình cảng biển, điển hình là cảng Thiên Tân (1987–1990) với tổng khối lượng 513.000 m³ đất được xử lý. Đặc biệt, dự án hợp tác Nhật–Trung tại cảng Yantai năm 1992 đánh dấu bước phát triển quan trọng, với 60.000 m³ đất-xi măng được thi công ngoài biển (Tang, 1996). Đến nay, tổng khối lượng thi công bằng phương pháp trộn sâu tại Trung Quốc đã vượt trên 1 triệu m³ [7].

Ở nước ta, cọc xi măng đất được sử dụng chủ yếu để cải thiện nền đất yếu cho thủy lợi, đường giao thông, sân bay và khu công nghiệp, đặc biệt tại đồng bằng sông Cửu Long. Hiện nay có hai tiêu chuẩn về thiết kế, thi công và kiểm soát chất lượng cọc xi măng đất được áp dụng hầu hết các dự án trong nước là TCVN 9403:2012 - Gia cố nền đất yếu - Phương pháp trụ đất xi măng và TCVN 9906:2014 - Công trình thủy lợi - Cọc xi măng đất thi công theo phương pháp Jet-grouting - Yêu cầu thiết kế, thi công và nghiệm thu cho xử lý nền đất yếu. Hai tiêu chuẩn này quy định chi tiết về yêu cầu thiết kế và biện pháp thi công cho hai công nghệ khác nhau phổ biến hiện nay là công nghệ trộn sâu (Cement Deep Mixing - CDM) và công nghệ trộn kiểu tia (Jet-Grouting). Tuy nhiên, về kiểm soát chất lượng, hai tiêu chuẩn đều đưa ra quy trình tương tự nhau về các bước kiểm tra chất lượng vật liệu, thí nghiệm chế tạo mẫu trong phòng và chất lượng thi công hiện trường mà trọng tâm là cường độ nén một trục nở hông (q_u) của mẫu xi măng đất là chỉ tiêu cơ bản để đánh giá hiệu quả gia cố [8], [9].

Cũng như các vật liệu có chất kết dính sử dụng xi măng, cường độ của hệ vật liệu đó phụ thuộc chính vào hàm lượng xi măng và tỷ lệ nước/xi măng (N/X). Trong quá trình thủy hóa, các khoáng chính như C_3S , C_2S , C_3A và C_4AF nhanh chóng hòa tan, giải phóng Ca^{2+} và tạo thành dung dịch có tính kiềm mạnh. Quá trình thủy hóa này sản sinh ra các sản phẩm chủ yếu

gồm C-S-H (Calcium Silicate Hydrate), Ca(OH)_2 , C-A-H, ettringite và monosulfate [10]. Trong đó C-S-H đóng vai trò quan trọng trong việc gắn kết các hạt đất, làm tăng cường độ và giảm tính nén lún của nền. Lượng Ca(OH)_2 được giải phóng đồng thời thúc đẩy các phản ứng pozzolan với SiO_2 và Al_2O_3 có trong khoáng sét, tạo thêm C-S-H và C-A-H. Các sản phẩm thủy hóa này lấp đầy lỗ rỗng và bao bọc các hạt đất, hình thành một khung cấu trúc bền chặt, nhờ đó cải thiện đáng kể cường độ nén và khả năng ổn định đất gia cố [11, 12, 2].

Ở hai công nghệ thi công trộn sâu và trộn kiểu tia, hồ xi măng (hỗn hợp nước và xi măng) được trộn với hàm lượng xi măng và tỷ lệ N/X đã thiết kế ban đầu. Sau đó thiết bị khoan có đầu phun sẽ đưa hồ xi măng vào đất gia cố với áp lực khác nhau tùy thuộc công nghệ thi công. Công tác này khó đảm bảo đồng đều do bị ảnh hưởng bởi độ dẻo và độ ẩm đất tự nhiên [13]. Đất sét có chỉ số dẻo cao thường khó trộn đều và dẫn đến q_u hiện trường thấp hơn q_u mẫu được trộn trong phòng [1]. Để có cơ sở lựa chọn hàm lượng xi măng và tỷ lệ N/X phù hợp cho từng loại đất khu vực thi công, công tác thí nghiệm xác định cường độ q_u trong phòng được thực hiện trước khi thi công thử tại hiện trường. Qua đó, đất được lấy tại hiện trường, xử lý đồng nhất độ ẩm và chế tạo mẫu xi măng đất với quy trình định sẵn. Khi đó, tương quan khác nhau giữa q_u trong phòng và q_u hiện trường sẽ là cơ sở tính toán lựa chọn tối ưu hàm lượng xi măng, tỷ lệ N/X trong thi công hiện trường.

Như phân tích ở trên, q_u hiện trường sẽ phụ thuộc lớn vào loại đất, năng lực và công nghệ máy thi công trong việc phân phối đồng đều hồ xi măng trong toàn bộ tiết diện và chiều dài cọc. Độ ẩm đất tự nhiên cũng là một yếu tố chính vì ảnh hưởng trực tiếp đến tỷ lệ N/X, do đó sự chênh lệch này có dao động lớn. Đã có nhiều nghiên cứu về sự chênh lệch giữa q_u hiện trường và q_u trong phòng và cũng đưa ra nhiều tỷ lệ cho thấy điều này. Theo một dự án nghiên cứu và phát triển hướng dẫn thiết kế, thi công và kiểm soát chất lượng cho phương pháp trộn sâu (Deep Mixing Method – DMM) và các phương pháp gia cố đất yếu ở châu Âu tỷ lệ này là 20-50%. Ở Nhật Bản, Viện Công nghệ Phát triển Ven biển đưa ra dao động lớn hơn nhiều là 20-100%. Tại Mỹ, kỳ vọng phổ biến của q_u hiện trường là có thể đạt 50% q_u trong phòng [4]. Trong nghiên cứu về sự phát triển cường độ nền đất

yếu ở Băng Cốc - Thái Lan, kết quả trung bình là 70-100% [14]. Tại công trường ở Daegu, tỉnh Gyeongsang, Hàn Quốc cường độ nén hiện trường được so sánh với mẫu trong phòng bảo dưỡng 28 ngày ở hàm lượng xi măng cao 300, 350, 380, 400 và 450 kg/m^3 , kết quả được các tác giả báo cáo là 64% [15]. Trong nước, dựa trên số liệu từ dự án cảng nước sâu Cái Mép - Thị Vải, nhóm tác giả trường Đại học mở Thành phố Hồ Chí Minh cũng đưa ra tỷ lệ chênh lệch giữa q_u trong phòng và hiện trường là rất lớn, 100-115% đối với nhà thầu A và 42-67% đối với nhà thầu B [16]. Các kết quả này có sự khác biệt tương đối lớn so với lựa chọn trong tiêu chuẩn TCVN 9403:2012 đề xuất là 20-50%.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước, nhưng sự khác biệt về địa chất từng khu vực cho thấy cần có thêm dữ liệu thực nghiệm cụ thể. Đặc biệt, việc xác định chính xác tỷ lệ giữa q_u hiện trường và mẫu phòng thí nghiệm giúp lựa chọn hàm lượng xi măng hợp lý, nâng cao độ tin cậy trong thiết kế, thi công và góp phần hoàn thiện cơ sở khoa học cho việc điều chỉnh hoặc bổ sung các tiêu chuẩn hiện hành.

Bài báo này trình bày nghiên cứu được thực hiện tại khu vực Long Mỹ – Hậu Giang. Đây là trường hợp cụ thể nhằm đánh giá tỷ lệ giữa q_u hiện trường và mẫu phòng thí nghiệm trên lớp đất yếu điển hình có chỉ số dẻo cao, từ đó cung cấp dữ liệu làm cơ sở trong thiết kế thi công các công trình cũng như hiệu chỉnh tiêu chuẩn trong cải tạo nền đất yếu tại Việt Nam.

2. Vật liệu và phương pháp thí nghiệm

2.1 Vật liệu sử dụng

Trong thi công cải tạo nền đất yếu bằng phương pháp trộn sâu nói chung và cọc xi măng đất nói riêng, toàn bộ vật liệu đều nằm dưới mặt đất tự nhiên sau khi thi công, do đó chịu ảnh hưởng trực tiếp của nhiều tác nhân ăn mòn, gây tác động đáng kể đến tính bền lâu của nền xử lý. Xi măng xỉ lò cao được khuyến cáo sử dụng cho cọc xi măng đất ở hầu hết các công trình trong nước, bởi ưu điểm nổi bật là giảm nhiệt thủy hóa, cải thiện khả năng kháng sunfat, hạn chế sự thấm ion clo, cũng như nâng cao độ bền lâu trong môi trường ngầm có tính xâm thực cao. Bên cạnh đó, việc sử dụng xi măng xỉ lò cao còn góp phần tận dụng phế thải công nghiệp, giảm phát thải khí nhà

kính, qua đó phù hợp với xu hướng phát triển bền vững. Trong nghiên cứu này, hai loại xi măng xi lò cao đã được sử dụng gồm: Việt Nhật PCB_{bfs} 40 - loại

II (ký hiệu X1) và Tây Đô PCB_{bfs} 40 - loại I (ký hiệu X2). Kết quả cơ lý hóa của hai loại xi măng thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm xi măng

STT	Nội dung thí nghiệm	Đơn vị	Phương pháp thử	Kết quả thí nghiệm	
				X1	X2
1	Khối lượng riêng xi măng	g/cm ³	TCVN 4030 : 2003	3,09	3,10
2	Độ nghiền mịn	cm ² /g	TCVN 4030 : 2003	3.880	4.720
3	Độ dẻo tiêu chuẩn	%	TCVN 6017 : 2015	27,6	28,5
4	Thời gian bắt đầu đông kết	phút	TCVN 6017 : 2015	210	170
5	Thời gian kết thúc đông kết	phút	TCVN 6017 : 2015	240	225
6	Độ ổn định thể tích	mm	TCVN 6017 : 2015	1,0	1,0
7	Nhiệt thủy hoá 7 ngày	kJ/kg	TCVN 6070:2005	210	267
	Nhiệt thủy hoá 28 ngày	kJ/kg	TCVN 6070:2005	251	301
8	Độ nở sulfat 14 ngày	%	TCVN 141 : 2008	0,008	0,008
9	Cường độ chịu nén	3 ngày tuổi	(MPa) TCVN 6016 : 2011	21,5	21,6
		28 ngày tuổi	(MPa) TCVN 6016 : 2011	57,6	46,6
10	Hàm lượng oxyt magiê (MgO)	%	TCVN 141:2008	3,9	5,1
11	Hàm lượng anhydric Sunfuric (SO ₃)	%	TCVN 141:2008	1,12	1,73
12	Hàm lượng mất khi nung (quy đổi)	%	TCVN 141:2008	1,9	3,0

Đất trong nghiên cứu được khoan trực tiếp tại hiện trường khu vực Long Mỹ - Hậu Giang. Mẫu được khoan dọc theo chiều dài cọc thiết kế, thực hiện theo TCVN 9437-2012 - Khoan thăm dò địa chất công trình và tiêu chuẩn TCVN 2683 : 2012 - Đất xây dựng - Phương pháp lấy mẫu, bao gói, vận chuyển và bảo quản mẫu. Đất được lấy tại vị trí gia cố 1 (D1)

được phối trộn với xi măng X1, Đất được lấy tại vị trí gia cố 2 (D2) phối trộn với xi măng X2, hai vị trí này cách nhau là 6km, chiều sâu khoan là 12m thuộc phân lớp 01: Bụi, sét rất dẻo màu xám nâu xám đen - dẻo chảy. Các điểm lấy mẫu đất này cũng là vị trí thi công cọc thử hiện trường. Tính chất cơ lý của đất hai vị trí này thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý của đất gia cố

STT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	
			Đất D1	Đất D2
1	Độ ẩm tự nhiên (trung bình)	%	87,06	93,24
2	Khối lượng thể tích ướt	g/cm ³	1,48	1,43
3	Khối lượng thể tích khô	g/cm ³	0,79	0,74
4	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,67	2,67
5	Độ hồng	%	70,31	72,26
6	Giới hạn chảy, LL	%	73,16	73,52
7	Giới hạn dẻo, PL	%	34,91	35,31
8	Chỉ số dẻo, PI	%	38,25	38,31
9	Độ sệt B	--	1,363	1,515
10	Thành phần hạt, lượng lọt sàng tích lũy:			
	Sàng 2,0-5,0 mm	%	0	0
	Sàng 1,0-2,0 mm	%	0	0
	Sàng 0,5-1,0 mm	%	0	0,1
	Sàng 0,25-0,5 mm	%	1,0	0,3
	Sàng 0,08-0,25 mm	%	0,3	0,4
	Sàng 0,06-0,08 mm	%	1,8	2,3
	Sàng 0,01-0,06 mm	%	19,0	12,2
	Sàng 0,002-0,01 mm	%	34,8	24,2
	Sàng <0,002 mm	%	43,1	60,5

Nước sử dụng trong nghiên cứu được lấy từ nguồn nước giếng khoan tại địa phương. Kết quả phân tích một số chỉ tiêu cơ bản cho thấy nước có giá trị pH 6,98, hàm lượng tạp chất hữu cơ 1,35 mg/l, ion clo (Cl^-) 53,26 mg/l, ion sunphat (SO_4^{2-}) 12,44 mg/l, tổng muối hòa tan 142,50 mg/l và cặn không tan 10,36 mg/l.

2.2 Phương pháp nghiên cứu

Đất được lấy nguyên dạng từ hiện trường được thí nghiệm các chỉ tiêu cơ lý trong phòng (Bảng 2), sau đó phối khô trộn đều trước khi được đem trộn

với xi măng theo cấp phối tính toán. Quy trình chế tạo, tạo mẫu thí nghiệm trong phòng nghiên cứu tham khảo phụ lục B: Thí nghiệm trong phòng xác định sức kháng nén của mẫu xi măng đất của tiêu chuẩn TCVN 9906:2014.

Cường độ kháng nén của mẫu xi măng đất được xác định theo tiêu chuẩn ASTM D1633-00 (2007), đồng thời biến dạng trực tiếp được đo theo quy trình trong ASTM D2166-16 nhằm thu được quan hệ ứng suất - biến dạng.



Hình 1. Mẫu xi măng đất sau khi chế tạo theo TCVN 9906:2014 và thí nghiệm nén mẫu theo ASTM D1633-00(07) kết hợp ASTM D2166-16

Công tác khoan rút lõi hiện trường được thực hiện trên toàn bộ chiều dài cọc thí công hiện trường, tuân thủ theo đúng tiêu chuẩn 9437-2012. Mẫu sau khi khoan được bảo quản, vận chuyển về phòng thí nghiệm theo TCVN 2683 : 2012.

3. Kết quả nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện trên hai cấp phối CP1, CP2 với hai nhóm vật liệu là X1 phối trộn D1 và X2 phối trộn D2. Với mỗi cấp phối nghiên cứu tính toán với hàm lượng xi măng 240kg trên 1m^3 đất gia cố (trạng thái ẩm tự nhiên), tỷ lệ N/X là 0,8. Mẫu được bảo dưỡng, xác định q_u trong phòng (q_u^l) và mô đun biến dạng tương đương tại mức 50% q_u cực đại (E_{50}^l) ở các tuổi 7, 14 và 28 ngày.

Bảng 3. Bảng thành phần cấp phối và kết quả thí nghiệm trong phòng

Ký hiệu cấp phối	Thành phần cấp phối tính toán cho 1m^3 đất tự nhiên			Kết quả thí nghiệm					
	Xi măng, kg	Nước, kg	Đất, kg	q_u^l , Mpa			E_{50}^l , Mpa		
				7 ngày	14 ngày	28 ngày	7 ngày	14 ngày	28 ngày
CP1	240	192	1480	1,91	2,32	2,88	143,5	174,6	215,9
CP2	240	192	1430	2,00	2,33	2,86	150,3	175,8	217,3

Hai cấp phối đều có xu hướng tăng cường độ nén theo thời gian, thể hiện sự phát triển cường độ điển hình của xi măng các vật liệu sử dụng chất kết dính là xi măng. Tốc độ tăng cường độ giữa 7-14 ngày với 14-28 ngày khác nhau không lớn, cho thấy quá trình hydrat hóa tiếp tục diễn ra đáng kể sau 2 tuần. Chênh lệch cường độ giữa CP1 và CP2 rất nhỏ, phản ánh rằng cùng loại xi măng xi lò cao, tính chất cơ lý của đất gia cố thay đổi không đáng kể cũng sẽ không tác động nhiều đến cường độ đất sau gia cố.

Về mô đun biến dạng tương đương tại mức 50% q_u cực đại (E_{50}^f) nhận thấy tăng theo thời gian, đồng bộ với sự tăng của cường độ nén. Sự tăng của E_{50}^f

gần như tỉ lệ thuận với q_u^f , thể hiện mối liên hệ chặt chẽ giữa cường độ nén và độ cứng của đất gia cố.

Đối với công tác xác định q_u hiện trường (q_u^f), nghiên cứu thực hiện 2 vị trí cọc thử cho mỗi cấp phối. Trong đó cọc P1.1, P1.2 thi công theo cấp phối CP1 và cọc P2.1, P2.2 thi công theo cấp phối CP2. Cường độ kháng nén hiện trường (q_u^f) mỗi cọc được thí nghiệm 9 viên mẫu từ 9 vị trí phân bố đều từ đầu cọc tới mũi theo chiều dài. Kết quả này được so sánh với q_u^l tuổi 28 ngày nhằm xác định tỷ lệ tương quan trong nghiên cứu đề ra.

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm hiện trường

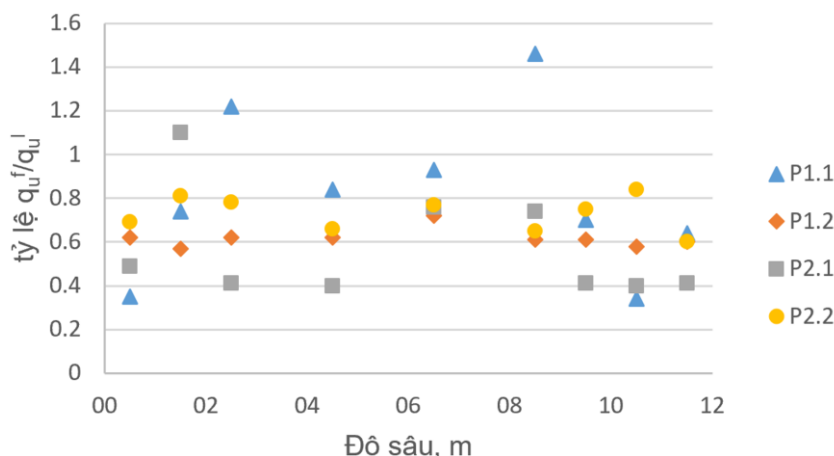
Chiều sâu, m	P1.1			P1.2			P2.1			P2.2		
	q_u^f	E_{50}^f	q_u^f/q_u^l	q_u^f	E_{50}^f	q_u^f/q_u^l	q_u^f	E_{50}^f	q_u^f/q_u^l	q_u^f	E_{50}^f	q_u^f/q_u^l
0-1	1,09	110,4	0,35	1,91	126,8	0,62	1,40	118,6	0,49	1,97	234,9	0,69
1-2	2,27	80,3	0,74	1,77	148,5	0,57	3,15	91,6	1,10	2,31	290,2	0,81
2-3	3,77	121,9	1,22	1,91	136,3	0,62	1,18	84,8	0,41	2,22	271,9	0,78
4-5	2,59	120,8	0,84	1,90	142,2	0,62	1,13	137,4	0,40	1,90	204,1	0,66
4-5	2,86	264,1	0,93	2,21	103,2	0,72	2,18	96,3	0,76	2,19	295,6	0,77
5-6	4,49	222,9	1,46	1,88	180,8	0,61	2,13	266,2	0,74	1,87	229,0	0,65
8-9	2,15	104,5	0,70	1,89	127,7	0,61	1,18	136,2	0,41	2,15	298,0	0,75
9-10	1,06	60,7	0,34	1,79	132,4	0,58	1,15	179,1	0,40	2,39	347,2	0,84
10-11	1,96	119,1	0,64	1,84	100,3	0,60	1,16	94,0	0,41	1,73	197,4	0,60

Phân tích kết quả từ bảng 4 nghiên cứu cho thấy q_u^f và E_{50}^f biến thiên lớn theo cả chiều sâu và vị trí cọc thử. Giá trị q_u^f dao động từ 1,06 MPa đến 4,49 MPa, E_{50}^f cũng thay đổi mạnh, từ 60,7 MPa đến 347,2 MPa, phản ánh tính không đồng nhất của đất xi măng hiện trường. Sự thay đổi này chủ yếu do các yếu tố tự nhiên như đặc tính đất ban đầu, mật độ phân bố hồ xi măng, và độ đồng đều trong quá trình thi công.

Mô đun biến dạng tại mức 50% q_u cực đại là mô đun biến dạng ở giai đoạn đàn hồi tuyến tính tương đối, giá trị này phản ánh độ cứng hỗn hợp đất – xi măng, tức là hiệu quả cải thiện cơ học của đất sau khi gia cố. Cọc P2.1 và P2.2 thi công trên cùng 1 cấp phối vật liệu như nhau. Tuy nhiên kết quả thí nghiệm

E_{50}^f hiện trường khác biệt lớn, đặc biệt ở độ sâu 9-10m cọc P2.2 có giá trị lớn gần gấp đôi cọc P2.1. Điều này có thể giải thích ở yếu tố phân bố hồ xi măng trong từng độ sâu, sự phân bố này ảnh hưởng từ đặc tính đất ban đầu (độ ẩm, loại đất, độ chặt), năng lực thiết bị thi công (hiệu suất máy trộn sâu, áp lực bơm vữa, máy khuấy hồ) và điều kiện thi công tại chỗ (thời gian trộn, thời gian ninh kết, hao hụt vật tư).

Tỷ số cường độ hiện trường so với cường độ phòng thí nghiệm (q_u^f/q_u^l) phần lớn các giá trị đều nhỏ hơn 1. Điều này cho thấy, $q_u^f < q_u^l$ phản ánh sự khác biệt giữa điều kiện kiểm soát phòng thí nghiệm và điều kiện thi công thực tế.



Hình 2. Biểu đồ thể hiện sự phân tán tỷ lệ q_u^f/q_u^l

Sự dao động tỷ lệ q_u^f/q_u^l trong kết quả thí nghiệm là khá rộng, từ 0,34 đến 1,46. Phần lớn giá trị nằm trong khoảng 0,4 - 0,8, cho thấy xu thế chung là cường độ hiện trường thấp hơn nhiều so với cường độ mẫu phòng thí nghiệm. Có sự khác biệt rõ giữa các cọc thử và giữa các lớp sâu. Ví dụ, tại độ sâu 2-3 m, P1.1 tỷ lệ đạt 1,22, trong khi cùng độ sâu tại P2.1 chỉ khoảng 0,41. Điều này phản ánh tính không đồng nhất của quá trình trộn và phân bố xi măng trong đất, cũng như sự khác biệt về đặc tính địa chất tại các vị trí thi công khác nhau. Có một số điểm vượt quá 1 tức là cường độ hiện trường cao hơn mẫu phòng, đặc biệt cọc P1.1 tại độ sâu 5-6 m tỷ lệ q_u^f/q_u^l là 1,46. Hiện tượng này có thể do sự tập trung xi măng cục bộ, mức độ nén chặt đất nền tốt hơn do máy trộn sâu tạo được các vùng đất này. Cũng có trường hợp vùng đất có độ ẩm, tính dẻo hoặc hạt mịn đặc thù, phản ứng giữa xi măng và đất diễn ra thuận lợi hơn. Vì vậy trong thiết kế cần tính đến hệ số an toàn cao hoặc hiệu chỉnh cường độ dựa trên phạm vi số liệu lớn, tin cậy cho từng khu vực thi công.

4. Kết luận và kiến nghị

Thí nghiệm trong phòng cho thấy cường độ kháng nén và mô đun biến dạng tại 50% cường độ cực đại của đất xi măng phát triển phù hợp với quy luật thủy hóa xi măng. Hiện trường, kết quả hai chỉ tiêu này biến động lớn theo chiều sâu và vị trí thi công, phản ánh tính không đồng nhất của cọc xi măng đất trong thi công thực tế.

Sự phân tán lớn của cường độ và tỷ lệ q_u^f/q_u^l khẳng định sự khác biệt giữa điều kiện kiểm soát trong phòng và điều kiện thi công thực tế, đồng thời cho thấy cần có nhiều số liệu hiện trường để có giá

trị đại diện đáng tin cậy, nâng cao hệ số an toàn trong thiết kế. Trong nghiên cứu này, tại lớp đất số 1 chiều sâu 0-12m khu vực Long Mỹ - Hậu Giang tỷ lệ q_u^f/q_u^l ghi nhận được là 0,40 đến 0,80 cao hơn so với khuyến nghị của tiêu chuẩn TCVN 9403:2012 (0,2-0,5) .

Trong thi công cọc xi măng đất cần tăng cường kiểm soát chất lượng thi công, đặc biệt là độ đồng đều trong quá trình trộn và phân bố xi măng theo chiều sâu, để giảm sự phân tán của cường độ.

Tăng số lượng cọc thử và đa dạng vị trí thí nghiệm hiện trường để có tập dữ liệu lớn hơn, qua đó xác định hệ số tương quan q_u^f/q_u^l mang tính đại diện. Cần mở rộng phạm vi nghiên cứu với các tổ hợp chất kết dính khác nhau như xi măng-tro bay, xi măng-xỉ lò cao nhằm tận dụng ưu điểm của từng vật liệu, cải thiện cường độ dài hạn, đồng thời giảm chi phí và phát thải CO₂ so với việc chỉ sử dụng xi măng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Terashi, M. (1997). *Deep mixing method – Brief state of the art. Theme lecture, Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE)*, Hamburg, Vol. 4, pp. 2475–2478.
- [2] EuroSoilStab (2002). *Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils- Design guide: Soft soil stabilization*. CT97-0351, Project No. BE 96-3177, IHS BRE Press, Watford, UK.
- [3] J. Kowal, M. Nowak, and P. Zieliński (2021), "20-years of deep soil mixing in Poland and lessons learned", presented at the *Int. On-Line Conf. Deep*

- Mixing 2021, Best Practice and Legacy*, 1–17 June 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.12592.28160.
- [4] Federal Highway Administration (2013). *Design manual: Deep mixing for embankment and foundation support (FHWA-HRT-13-046)*. Turner-Fairbank Highway Research Center, U.S. Department of Transportation.
- [5] Puppala, A. J., Madhyannapu, R. S., Nazarian, S., Yuan, D., & Hoyos, L. (2008). *Deep mixing for expansive clay soils: Evaluation of cracking and performance of pavement (Report No. FHWA/TX-08/0-5179-1)*. Department of Civil Engineering, University of Texas at Arlington & Department of Civil and Environmental Engineering, University of Texas at El Paso. Sponsored by Texas Department of Transportation.
- [6] Ruffing, D. G., Andromalos, K. A., Payne, D. R., & Schindler, R. M. (2021). *Overview of soil mixing practices in the U.S. in contaminated sites*. In *Proceedings of the Deep Mixing 2021 Conference* (pp. 1–17). Online Conference: Geo-Solutions.
- [7] Kitazume M., Orano K., Miyajima S. (2000), *Centrifuge Model Tests on Failure Envelope of Column Type deep Mixing Method Improved Ground*, Soils Found., Vol. 40, no. 4, pp. 43 - 55, doi: 10.3208/sandf.40.4_43.
- [8] TCVN 9403:2012, Gia cố nền đất yếu – Phương pháp cọc xi măng đất.
- [9] TCVN 9906:2014, Công trình thủy lợi – Cọc xi măng đất thi công theo phương pháp Jet – Grouting – yêu cầu thiết kế thi công và nghiệm thu cho xử lý nền đất yếu.
- [10] H. F. W. Taylor (1997), *Cement Chemistry*, 2nd ed. London, U.K.: Thomas Telford.
- [11] S. H. Chew, A. H. M. Kamruzzaman and F. H. Lee (2004), “*Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays*”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 130, no. 7, pp. 696–706.
- [12] N. Miura, K. Kishimoto and H. Kawaguchi (2001), “*Strength Development in Silty Clay Stabilized with Calcium Carbide Residue*”, *Soils and Foundations*, vol. 41, no. 1, pp. 1–12.
- [13] S. Horpibulsuk, N. Miura, K. Jamsawang and H. Kawaguchi (2004), “*Engineering behavior of cement-stabilized silty clay*”, *Soils and Foundations*, vol. 44, no. 1, pp. 1–11.
- [14] Horpibulsuk, S, Miura, N., & Nagaraj, T. S. (2011). *Strength development in cement admixed Bangkok clay: Laboratory and field investigations*. *Soils and Foundations*, 51(2), 239–251.
- [15] Kim, B.-C., Jo, Y.-S., Jang, Y.-S., & Kim, B. (2018). *Laboratory study of uniaxial compressive strength for mixed soil specimens of jet-grout simulation*. In *Proceedings of the 11th International Conference on Geosynthetics (ICG 11)*, Seoul, Korea. SAMBO Engineering Co., LTD. & Department of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University, Korea.
- [16] Vo Nguyen, P. H., Tran, T.-D., & Nguyen, P.-C (2023). *Effect factors on unconfined compressive strength of soil-cement columns: The case study of Ba Ria, Vung Tau, Vietnam*. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13(2), 10352–10356.