

Đánh giá độ lún của nền đất yếu được gia cố bằng trụ đất xi măng dưới nền nhà công nghiệp huyện Vũng Liêm, tỉnh Vĩnh Long

Evaluation of settlement behavior of soft soil improved by cement deep mixing columns under an industrial building in Vung Liem district, Vinh Long province

Lâm Ngọc Quý^{1,*} và Lương Thành Minh²

¹Khoa Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Miền Tây;

²Trung tâm Xây dựng và Giao thông, Sở Xây dựng tỉnh Vĩnh Long.

*Tác giả liên hệ: lamngocqui@mtu.edu.vn

■Nhận bài: 09/05/2025 ■Sửa bài: 13/06/2025 ■Duyệt đăng: 12/08/2025

TÓM TẮT

Việc sử dụng trụ đất xi măng để gia cố nền được áp dụng ở nhiều nơi có địa chất yếu như Đồng Bằng Sông Cửu Long và đặc biệt là tỉnh Vĩnh Long, nơi có lớp đất yếu dày từ 20 m đến 40 m, có chỗ lên tới 50 m. Nội dung bài báo thực hiện tính toán độ lún của nền tự nhiên và nền được gia cố bằng trụ đất xi măng cho nền nhà công nghiệp ở huyện Vũng Liêm, tỉnh Vĩnh Long. Kết quả nghiên cứu cho thấy giá trị độ lún sau khi gia cố nền được tính toán bằng giải tích và mô phỏng bằng phần mềm Plaxis lần lượt là 12,2 cm và 13,31 cm đều không thỏa độ lún giới hạn theo TCVN 9362:2012.

Từ khóa: Đất yếu, độ lún, gia cố nền, trụ đất xi măng, Plaxis.

ABSTRACT

The application of cement deep mixing (CDM) columns for ground improvement has been widely implemented in regions with weak geological conditions, such as the Mekong Delta, particularly in Vinh Long Province, where the thickness of soft soil layers ranges from 20 m to 40 m, and in some areas reaches up to 50 m. This study focuses on calculating the settlement of both the natural ground and the CDM-improved ground beneath the foundation of an industrial building located in Vung Liem District, Vinh Long Province. The results indicate that the post-improvement settlement values obtained through analytical calculation and Plaxis numerical simulation are 12.2 cm and 13.31 cm, respectively—both of which exceed the allowable settlement limit specified in TCVN 9362:2012.

Keywords: Weak geological, settlement, ground improvement, cement deep mixing (CDM), Plaxis.

1. GIỚI THIỆU

Trụ đất xi măng được nghiên cứu và phát triển vào khoảng những năm 1960 bởi Thụy Điển và một giáo sư người Nhật Tenox Kyushu của Đại học Tokyo. Trụ đất xi măng đem lại hiệu quả kinh tế cao và phù hợp với điều kiện địa chất tại Việt Nam, đặc biệt là địa chất có nhiều loại đất yếu như khu vực ĐBSCL. Trụ đất xi măng sử dụng cốt liệu chính là đất nguyên trạng tại nơi gia cố và xi măng được phun xuống nền đất bằng thiết bị

khoan. Trong một số điều kiện áp dụng nhất định thì trụ đất xi măng có thể làm móng sâu thay thế cho cọc nhồi, cọc ống, cọc ép [1].

Ngoài ra trụ đất xi măng còn được ứng dụng rộng rãi như: làm tường trong đất (khi xây dựng tầng hầm nhà cao tầng), gia cố nền đất yếu, tường chống thấm cho đê đập, chống trượt mái dốc, gia cố nền đường, móng cầu dẫn,... Nhờ các phản ứng hóa học – vật lý xảy ra khi sử dụng xi măng trộn cường chế với đất nền làm cho nền đóng rắn thành một thể

trụ đất xi măng có độ ổn định cao. Công trình có độ sâu hố móng từ 3 đến 6m thì ứng dụng trụ đất xi măng làm kết cấu chống giữ sẽ thu được kết quả tốt [2].

Trụ đất xi măng mang lại những ưu điểm nổi bật như [2][3]:

- Khả năng xử lý sâu đến 50m và phù hợp với nhiều loại đất yếu.

- Tăng sức chịu tải của đất nền.

- Tăng khả năng chống trượt của mái dốc.

- Giảm ảnh hưởng chấn động đối với công trình xung quanh.

- Đối với đất rời tránh được hiện tượng bị biến loãng.

- Vùng đất bị ô nhiễm sẽ được khoanh vùng, cô lập để xử lý.

- Giúp ổn định và chống đỡ thành hố đào sâu.

- Có thể thi công trong điều kiện mặt bằng ngập nước, chật hẹp.

- Giảm độ sụt lún cho công trình đang thi công và sau khi đưa vào sử dụng, đảm bảo tuổi thọ và vẻ mỹ quan công trình.

- Tạo điều kiện thi công hố móng rất thoáng vì tường không cần thanh chống.

- Biện pháp thi công nhanh chóng, đơn giản.

- Sử dụng vật liệu có sẵn tại địa phương, cốt liệu chính là đất tại chỗ nên chi phí giá thành thấp, mang lại hiệu quả kinh tế cao.

- Vì tự động hóa nên chất lượng thi công không phụ thuộc vào yếu tố con người.

- So với thi công cọc nhồi thì công trường nơi thi công trụ đất xi măng không gây ô nhiễm môi trường và mất vệ sinh, phù hợp với phương án thiết kế móng nhà cao tầng trong đô thị.

Một số hạn chế của Trụ đất xi măng [2]:

- Thiết bị phục vụ thi công quá đắt (một thiết bị chuyên thi công trụ đất xi măng khoảng 3,5 tỷ VND chưa kể đến thiết bị bơm vữa xi măng và trạm trộn).

- Do chiều dài cọc lớn hơn so với các phương án móng cọc nên độ lún lớn hơn nhưng vẫn trong giới hạn cho phép.

- Công nghệ thi công bắt buộc phải có hệ thống quy chuẩn, phải nghiêm ngặt trong quá trình thi công và nghiệm thu, kiểm tra hoàn thiện.

- Trụ đất xi măng không có khả năng tăng tốc độ cố kết trong nền vì hệ số thấm của trụ rất nhỏ so với đất.

- Trụ đất xi măng thường có cường độ chịu kéo nhỏ hơn rất nhiều so với cường độ chịu nén vì vậy không được sử dụng kiểu kết cấu tường chắn lợi dụng trọng lượng bản thân.

- Trụ đất xi măng không thể ứng dụng tại các khu vực địa chất hàm lượng hữu cơ cao, đất có chứa hàm lượng axit fulvic, axit humic.

Theo các số liệu thống kê, công nghệ thi công trụ đất xi măng được Nhật Bản và các nước vùng Scandinavia (Bắc Âu) ứng dụng và phát triển nhiều nhất. Hiệp hội CDM (Nhật Bản) đã thống kê được có 2.345 dự án trong giai đoạn 80 đến 96, sử dụng 26 triệu m³ hỗn hợp – xi măng đất. Tại Trung Quốc, từ cuối năm 1960 cho đến nay tổng khối lượng trộn sâu ở nước này đã vượt trên 1 triệu m³, được ứng dụng nhiều vào các công trình bến cảng (Cảng Thiên Tân được xây dựng hoàn thành năm 1990), móng của tường chắn bến tàu, móng kè,...[4].

Ở các nước như Thổ Nhĩ Kỳ, Malaysia cũng đã có những nghiên cứu để ứng dụng trụ đất xi măng gia cố nền đất yếu tại địa điểm thực hiện một số dự án xây dựng trọng điểm ở những quốc gia này [5][6]. Việc sử dụng phương pháp trụ đất xi măng gia cố nền đất yếu để thi công các tuyến đường giao thông cũng được nghiên cứu [7], điển hình như thi công đường cao tốc Tokai Kanjo ở Nhật Bản. Địa chất tuyến đường này là chất thải chôn lấp nên gây nhiều khó khăn trong công tác thi công, qua việc thực hiện các thí nghiệm trong phòng, phân tích chính xác các chỉ tiêu cơ lý của đất, các tác giả đã đưa ra tỷ lệ trộn phù hợp để có thể ứng dụng giải pháp trụ đất xi măng thi công đường giao thông tại khu vực địa chất trên.

Những năm 1969 và 1970 Thụy Điển đã viện trợ cho Viện Khoa học Công nghệ xây dựng ở nước ta máy thi công đi theo công nghệ trụ đất xi măng. Trong giai đoạn này nước ta chưa ứng dụng nhiều phương pháp trụ đất xi măng, chủ yếu ứng dụng vào công trình đường và một số công trình nhà ở Hà Nội. Lý do công nghệ trụ đất xi măng không được sử dụng nhiều tại thời điểm này vì giá thành xi măng cao, nhu cầu xử lý nền đất yếu công trình xây dựng trong những năm này còn thấp.

Cho đến nay phương pháp trụ đất xi măng được ứng dụng thực tế vào nhiều dự án xây dựng dân dụng, chủ yếu vào mục đích xử lý đất yếu. Tiêu biểu như xây dựng khu đô thị Phú Mỹ Hưng, Building Sai Gon Times Square, dự án Nhiệt điện Ô Môn,...

Ngoài những nghiên cứu ứng dụng nêu trên, trụ đất xi măng còn được nghiên cứu để gia cố nền công trình nhà công nghiệp. Điển hình là tác giả Vương Hồng Sơn đã nghiên cứu sử dụng trụ đất xi măng để xử lý nền đất yếu dưới công trình nhà công nghiệp tải trọng lớn, tác giả đã áp dụng tính toán vào khu công nghiệp Phú Mỹ I, tỉnh Bà Rịa – Vũng Tàu. Tác giả đã kết luận có thể xem xét áp dụng đối với các công trình nhà công nghiệp có tải trọng và điều kiện địa chất tương tự vị trí đã tính toán [8].

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Bài báo sử dụng phương pháp toán học: tính toán độ lún của nền tự nhiên và nền gia cố bằng cọc xi măng đất theo các phương pháp giải tích và phương pháp phần tử hữu hạn. Kết hợp với phương pháp phân tích số liệu nhằm đưa ra các nhận xét, kết luận.

2.1. Tính lún bằng phương pháp giải tích

Tính toán độ lún của đất nền tự nhiên chưa được gia cố khi có tải trọng phân bố đều tác dụng khắp bề mặt theo phương pháp lớp tương đương [9]. Tính lún như độ lún của lớp tương đương hoàn toàn đồng nhất có hệ số nén lún bằng trị số trung bình các hệ số nén lún của các lớp đất trong nền, được xác định bằng công thức (1).

$$S = a_{0m} h_s P \tag{1}$$

Trong đó:

P là tải trọng tác dụng lên nền;

H = 2h_s là chiều dày vùng đất chịu lún tương đương, h_s = A.ω.b

$$A = \frac{(1 - \mu_0)^2}{1 - 2\mu_0}$$

(trong nền có lớp đất sét thì chọn μ = 0,3);

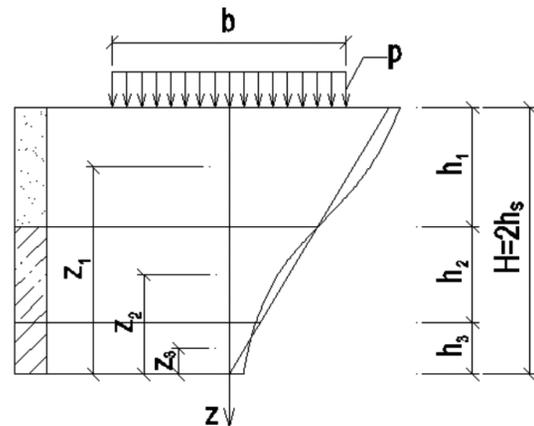
ω là hệ số được tra bảng, phụ thuộc vào α = l/b và h/b;

Hệ số a_{0m} được xác định như sau:

$$a_{0m} = \frac{\sum_{i=1}^n a_{0i} h_i z_i}{2h_s^2}$$

a_{0i} là hệ số nén tương đối của mỗi lớp đất thứ i; a_{0i} = $\frac{a}{1 + \epsilon_1}$ (với a là hệ số nén lún và ε là hệ số rỗng của lớp đất thứ i);

z_i là khoảng cách từ điểm có độ sâu H = 2h_s đến điểm giữa của lớp đất đang xét.



Hình 1. Sơ đồ tính toán độ lún theo phương pháp lớp tương đương [9]

Độ lún của nền gia cố được tính theo tiêu chuẩn TCVN 9403:2012 [10] với độ lún tổng S của nền gia cố được xác định bằng tổng độ lún của bản thân khối gia cố và độ lún của đất dưới khối gia cố được xác định theo công thức (2).

$$S = S1 + S2 \tag{2}$$

Trong đó:

S1 - độ lún bản thân khối gia cố;

S₂ - độ lún của đất chưa gia cố, dưới mũi cọc.

Độ lún của bản thân khối gia cố, S₁ được tính theo công thức (3).

$$S_1 = \frac{qH}{E_{tb}} = \frac{qH}{aE_c + (1-a)E_s} \quad (3)$$

Trong đó:

q - tải trọng công trình truyền lên khối gia cố;

H - chiều sâu của khối gia cố;

a - tỷ số diện tích, $a = (nA_c / BL)$;

n là tổng số cọc,

A_c - diện tích tiết diện cọc,

B, L - kích thước khối gia cố;

E_c - mô đun đàn hồi của vật liệu cọc; Có thể lấy E_c = (50 đến 100) C_c với C_c là sức kháng cắt của vật liệu cọc;

E_s - Mô đun biến dạng của đất nền giữa các cọc. (Có thể lấy theo công thức thực nghiệm E_s = 250C_u, với C_u là sức kháng cắt không thoát nước của đất nền).

- Độ lún của khối đất chưa gia cố, dưới mũi cọc S₂ được tính theo nguyên lý cộng lún từng lớp.

Để thiên về an toàn, tải trọng (q) tác dụng lên đáy khối gia cố xem như không thay đổi suốt chiều cao của khối

Các thông số E_c, C_c, E_s, C_u xác định từ kết quả thí nghiệm mẫu hiện trường cho kết quả phù hợp thực tế hơn.

2.2. Tính lún bằng phương pháp phần tử hữu hạn (mô phỏng bằng phần mềm Plaxis 2D)

PLAXIS [11] là một chương trình phần tử hữu hạn, được phát triển để phân tích biến dạng, độ ổn định và dòng chảy nước ngầm trong kỹ thuật địa kỹ thuật. Đây là một phần của phạm vi sản phẩm PLAXIS, một bộ chương trình phần tử hữu hạn được sử dụng trên toàn thế giới cho kỹ thuật và thiết kế địa kỹ thuật. PLAXIS bắt đầu được phát triển vào năm 1987 tại Đại học Công nghệ Delft theo sáng kiến của Bộ Công trình Công cộng và Quản lý Nước

Hà Lan (Rijkswaterstaat). Mục đích ban đầu là phát triển một mã phần tử hữu hạn 2D để sử dụng để phân tích các bờ kè sông trên đất mềm của vùng đất thấp Hà Lan. Trong những năm tiếp theo, PLAXIS đã được mở rộng để bao gồm hầu hết các lĩnh vực khác của kỹ thuật địa kỹ thuật. Do các hoạt động liên tục phát triển, công ty PLAXIS (Plaxis BV) đã được thành lập vào năm 1993. Tính đến năm 2018, PLAXIS là một phần của Bentley Systems, Incorporated, một công ty có trụ sở tại Hoa Kỳ chuyên về phần mềm để lập kế hoạch, thiết kế và bảo trì các dự án cơ sở hạ tầng.

Mô hình Mohr-Coulomb là một trong những mô hình đàn hồi tuyến tính hoàn toàn dẻo. Mô hình xem đất chỉ làm việc trong giai đoạn đàn hồi với quan hệ giữa ứng suất và biến dạng là tuyến tính, quan hệ này tuân theo định luật Hooke. Khi trạng thái đàn hồi của đất vượt quá giới hạn thì xem như đất bị phá hoại hoàn toàn. Trong mặt phẳng, tiêu chuẩn phá hoại của mô hình Mohr - Coulomb như công thức (4).

$$\tau'_f = \sigma'_f \tan \varphi' + c' \quad (4)$$

Phương trình mặt chảy dẻo trong không gian ứng suất có dạng:

$$f = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \varphi' - c' \cos \varphi' \quad (5)$$

Các thông số đầu vào của mô hình Mohr - Coulomb bao gồm:

E - Mô đun đàn hồi của vật liệu (kN/m²)

v - hệ số Poisson ;

φ - góc ma sát trong (độ);

c - cường độ kháng cắt (kN/m²);

ψ - góc dẫn nở của vật liệu (độ).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc điểm địa chất khu vực huyện Vũng Liêm

Theo báo cáo kết quả khoan địa chất, địa tầng tại vị trí huyện Vũng Liêm được phân thành các lớp đất sau:

- Lớp 1: Đất sét pha, màu xám nâu, chảy đến dẻo chảy; dày 19,5 m.

- Lớp 2: Đất sét, sét pha, màu xám nâu đỏ nâu vàng, dẻo mềm đến dẻo cứng; dày 17 m.

- Lớp 3: Đất cát pha, màu nâu vàng nâu đỏ, chặt vừa; dày 13,5 m.

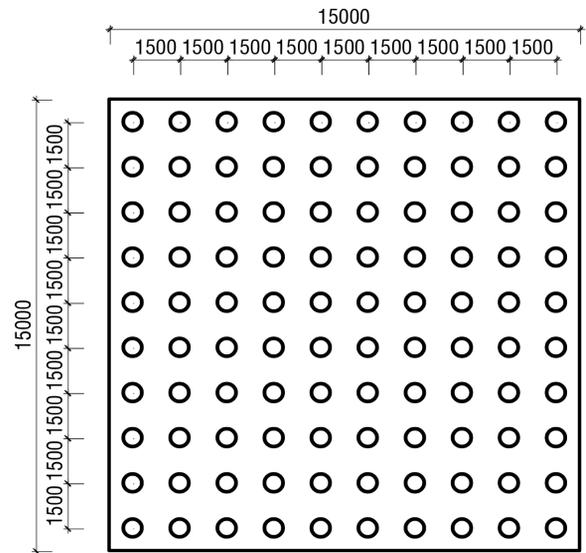
- Các chỉ tiêu cơ lý cơ bản của các lớp đất được trình bày như Bảng 1.

Bảng 1: Giá trị chỉ tiêu cơ lý của các lớp đất

Tính chất cơ lý	Ký hiệu	Đơn vị	Lớp đất		
			1 (Sét pha)	2 (Sét)	3 (Cát pha)
Độ ẩm	W	%	38,53	32,11	20,18
Dung trọng tự nhiên	γ	kN/m ³	17,90	19,0	20,11
Dung trọng đẩy nổi	γ'	kN/m ³	8,09	9,10	10,5
Tỷ trọng hạt	G_s	-	2,673	2,724	2,681
Hệ số rỗng	e_0	-	1,008	0,734	0,602
Độ bão hòa	S_r	%	96,4	97,8	59,8
Giới hạn chảy	W_L	%	35,03	42,1	-
Giới hạn dẻo	W_p	%	25,54	23,46	-
Chỉ số dẻo	I_p	%	11,49	18,66	-
Độ sệt	I_L	-	1,3	0,46	-
Góc ma sát trong	ϕ	độ	4°15'	15°42'	20°23'
Lực dính	C	kN/m ²	8,3	26,7	2,0
Hệ số nén lún	a_{1-2}	m ² /kN.10 ⁻²	0,074	0,022	0,010
Mô đun biến dạng	E_{1-2}	kN/m ²	1657	2939	7473

3.2. Số liệu tải trọng tác dụng lên nền

Đánh giá khả năng tác dụng tương hỗ giữa các trụ và chi phí xây dựng hợp lý thì khoảng cách giữa các trụ được lấy từ 2D ÷ 3D. Từ đó chọn sơ bộ khoảng cách giữa các trụ là: S = 1,5 (m). Chọn diện tích nền tính toán điển hình: A=15×15=225 (m²). Số trụ trong nền là: n = 100 (trụ) như Hình 2.



Hình 2. Phân bố trụ ĐXM D600, khoảng cách lưới cọc 1,5 x 1,5 (m)

Theo một số thiết kế nhà công nghiệp trong nước, nếu không sử dụng phương án móng sâu để chịu tải trọng công trình thì sau khi thực hiện gia cố nền bằng trụ đất xi măng, sẽ tiến hành san lấp thêm 0,5m đá dăm trước khi thi công sàn nền. Do đó, tác giả chọn tải trọng tác dụng lên nền đất để đưa vào tính toán như Hình 3, bao gồm:

- Tải trọng sử dụng: $P_{sdmax} = 15\text{kN/m}^2$

- Nền bê tông cốt thép dày 0,2m:

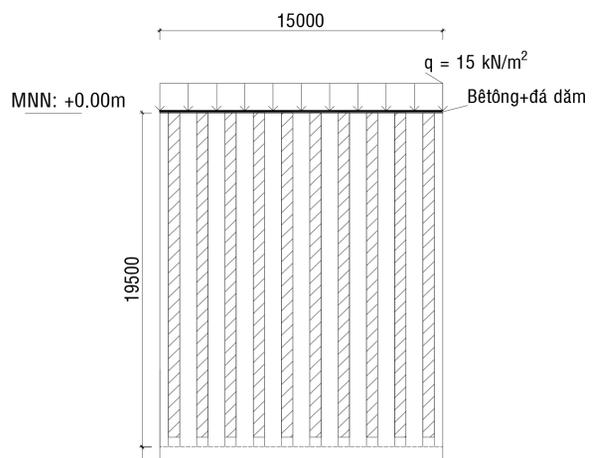
$$P_{bt} = 1,1\gamma_{bt}h = 1,1 \times 25 \times 0,2 = 5,5 \text{ kN/m}^2$$

- Nền đá dăm dày 0,5m:

$$P_{đá} = 1,2\gamma_{đá}h = 1,2 \times 20 \times 0,5 = 12 \text{ kN/m}^2$$

- Tổng tải trọng tính toán tác dụng lên nền tại cao độ đỉnh trụ XMD:

$$P_{tt} = P_{sdmax} + P_{đá} + P_{bt} = 15 + 5,5 + 12 = 32,5 \text{ kN/m}^2.$$



Hình 3. Sơ đồ trụ đất xi măng gia cố nền

3.3. Mô phỏng tính toán độ lún của nền bằng phần mềm Plaxis 2D.

dùng để mô phỏng Plaxis được trình bày như Bảng 2.

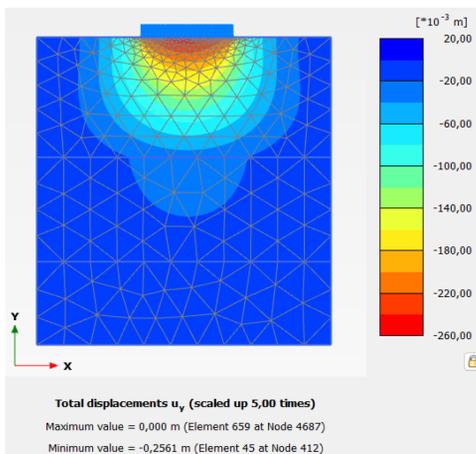
Thông số đầu vào của vật liệu đất và cọc

Bảng 2: Thông số đầu vào của vật liệu

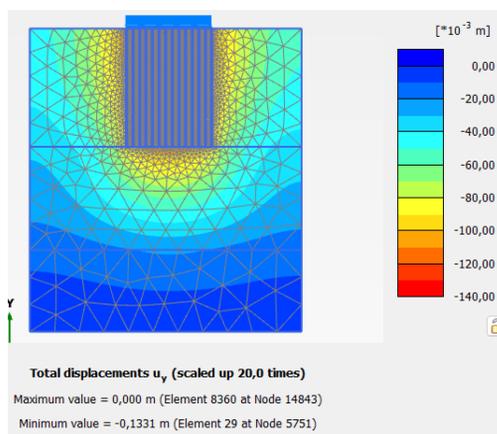
TT	Đặc trưng	Ký hiệu	Đơn vị	Lớp 1 (Bùn sét)	Lớp 2 (Sét)	Lớp 3 (Cát pha)	Trụ XMĐ
1	Mô hình	-	-	MC	MC	MC	MC
2	Ứng xử của đất	-	-	Undrained A	Undrained A	Undrained A	Undrained A
3	Dung trọng tự nhiên	γ_{unsat}	kN/m ³	17,90	19,0	20,11	19
4	Dung trọng bão hòa	γ_{sat}	kN/m ³	18,09	19,10	20,50	-
5	Module đàn hồi	E'	kN/m ²	1657	2939	7473	122300
6	Hệ số nở hông	ν		0,3	0,3	0,26	0,25
7	Lực dính	c	kN/m ²	8,3	26,7	2,0	366,9
8	Góc ma sát trong	φ	độ	4°15'	15°42'	20°23'	30
9	Góc giãn nở	ψ	độ	-	-	-	-

Hình ảnh kết quả mô phỏng tính toán độ lún cho nền tự nhiên và nền gia cố bằng phần mềm Plaxis được thể hiện như Hình 4 và Hình 5.

Kết quả tính toán độ lún của nền tự nhiên và nền được gia cố bằng trụ đất xi măng được trình bày như Bảng 3.



Hình 4. Độ lún của nền tự nhiên khi chưa gia cố trụ đất xi măng, S= 25,56 cm



Hình 5. Độ lún của nền gia cố trụ đất xi măng, S= 13,31 cm

Bảng 3: Kết quả tính toán độ lún của nền tự nhiên và nền gia cố theo các phương pháp

Trường hợp / Phương pháp	Độ lún chưa xử lý gia cố nền (cm)	Độ lún sau khi xử lý nền (cm)	
Giải tích	16,2	S ₁ =3,8	S ₂ =8,4
Plaxis 2D	25,61	S ₁ =2,26	S ₂ =11,05
Kết Luận: [S _{gh}]=12cm	Không thỏa	Không thỏa	

4. KẾT LUẬN

Kết quả tính toán độ lún của nền tự nhiên và nền có gia cố trụ đất xi măng bằng phương pháp lý thuyết và mô phỏng bằng phần mềm Plaxis 2D lần lượt là (16,2; 25,61) cm và (12,2; 13,31) cm. Như vậy, có thể kết luận rằng, khi sử dụng trụ đất xi măng có đường kính D = 600 mm gia cố lớp đất yếu có bề dày 19,5 m với khoảng cách giữa các trụ là 1,5 m không phù hợp với địa chất khu vực huyện Vũng

Liên, tỉnh Vĩnh Long do không thỏa độ lún giới hạn của nền nhà công nghiệp theo TCVN 9362:2012 [12].

Mặc dù tổng độ lún nền vượt quá giới hạn cho phép nhưng độ lún trong phạm vi khối gia cố S_1 ở cả hai trường hợp tính toán giải tích và Plaxis lần lượt là (3,8; 2,26) cm. Do đó, tác giả đưa ra kiến nghị sau:

- Nếu chiều dày vùng nền chịu nén lún nằm trong phạm vi gia cố (19,5 m) thì khả năng ứng dụng loại trụ đất xi măng này là khá cao.

- Nếu xét theo TCVN [10] thì với thông số trụ đất xi măng như trên thì phù hợp cho nền có tải trọng sử dụng là 29,5 kN/m².

- Trường hợp cần gia cố cho nền có tải trọng sử dụng cao hơn thì cần nghiên cứu thêm một số giải pháp: tăng đường kính trụ; giảm khoảng cách giữa các trụ hoặc tăng chiều dài của trụ đất xi măng cắm vào lớp đất tốt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Đ. H. Đạo và P. C. Thọ, “Cọc đất xi măng – giải pháp nền móng thân thiện môi trường cho công trình xây dựng,” Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Tập 96, Số 11, 2015.

[2] L. T. Diệu, “Nghiên cứu giải pháp gia cố nền cho các công trình dân dụng khu vực thành phố Sóc Trăng,” Luận văn thạc sĩ, Trường Đại học Thủy Lợi, 2017.

[3] Đ. T. M. Dung và L. T. Q. Khải, “Công nghệ xử lý nền đất yếu khu vực Đồng bằng sông Cửu Long,” Tạp Chí Của Bộ Xây Dựng, 2022.

[4] T. V. Long, “Nghiên cứu ứng dụng trụ đất xi

măng gia cố nền công trình xây dựng trên địa bàn thành phố Hội An – Quảng Nam,” Luận văn thạc sĩ, Trường Đại học Thủy Lợi.

[5] Z. Xue, W. Zhang, X. Zhao and J. Chen, “Utilization of cement deep mixing pile for soft soil foundation: a malaysian case study,” *Frontiers in Materials*, Vol. 11, 2024. DOI:10.3389/fmats.2024.1484228.

[6] M I. Onur, H. O. Kilic and A. Tuncan, “A case study on soil improvement with deep soil mixing application,” *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-14, 2016. DOI:10.14455/ISEC.res.2016.45.

[7] H. Tsuchiya, M. Nishida, Y. Toonishi and K. Miho, “Application of deep mixing method to soft cohesive soil residue (slime),” *Japanese Feotechnical Society Special Publication*, Vol. 11, No. 8, pp. 319-324, 2024. DOI: 10.3208/jgssp.vol11.DS-4-06.

[8] V. H. Sơn, “Nghiên cứu giải pháp xử lý nền đất yếu dưới công trình nhà công nghiệp tải trọng lớn,” Luận văn thạc sĩ, Trường Đại học Bách Khoa, 2011

[9] V. Phán và P. L. M. Phượng, “Cơ học đất”. Hà Nội: NXB Xây dựng Hà Nội, 2011

[10] TCVN 9403:2012 – Gia cố nền đất yếu – Phương pháp trụ đất xi măng, Bộ Khoa học và công nghệ, 2012.

[11] Reference Manual, Plaxis 3D CONNECT Edition V20, Bêttley Co., 2020

[12] TCVN 9362:2012-Tiêu chuẩn thiết kế nền nhà và công trình, Bộ Khoa học và công nghệ, 2012.