

NGHIÊN CỨU LÝ THUYẾT VÀ THỰC NGHIỆM QUÁ TRÌNH NÉN CHẶT CƠ HỌC NỀN ĐẤT YẾU GIA CỔ BẰNG CỌC CÁT BIỂN - XI MĂNG

Tạ Đức Thịnh^{1,*}, Nguyễn Văn Phóng¹, Nguyễn Thành Dương¹,
Nguyễn Trọng Dũng¹, Hồ Anh Cường²

¹Trường Đại học Mở - Địa chất

²Trường Đại học Giao thông vận tải

Tóm tắt

Công nghệ cọc cát biển - xi măng gia cố nền đất yếu là công nghệ mới, được phát triển trên cơ sở công nghệ cọc cát và công nghệ cọc đất - xi măng. Hiệu quả nâng cao sức chịu tải và giảm độ lún nền công trình là nhờ tác dụng nén chặt cơ học của cọc, tác dụng gia tăng cường độ cọc và đất yếu xung quanh cọc cũng như tác dụng cố kết thoát nước nền đất yếu. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm ở hiện trường về tác dụng nén chặt cơ học nền đất yếu bằng cọc cát biển - xi măng. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra, sau khi gia cố nền đất yếu bằng cọc cát biển - xi măng, các chỉ tiêu cơ lý đặc trưng cho quá trình nén chặt cơ học của đất nền đã thay đổi đáng kể theo hướng có lợi cho công tác xây dựng, theo đó, hệ số rỗng của đất giảm đến 7,27%, hệ số nén lún giảm đến 3,13%, góc ma sát trong tăng đến 8,47%, lực dính kết tăng đến 15,65%, sức kháng xuyên động và mô đun tổng biến dạng của đất tăng từ 5,8% đến 10,70% tùy thuộc vào loại đất yếu.

Từ khóa: Cọc cát biển - xi măng, nền đất yếu, nén chặt, hệ số rỗng, hệ số nén lún, sức kháng cắt, sức kháng xuyên động.

1. Đặt vấn đề

Đất yếu phân bố khá rộng rãi ở nước ta, nhất là tại các vùng ven biển. Đặc điểm chung của đất yếu là có độ ẩm cao, hệ số rỗng lớn, tính biến dạng cao và sức kháng cắt nhỏ (Nguyễn Ngọc Bích, 2011). Để đảm bảo ổn định cho công trình trên nền đất yếu, nhất thiết phải tiến hành gia cố, xử lý nền trước khi xây dựng.

Hiện nay có khá nhiều công nghệ gia cố nền đất yếu. Các công nghệ gia cố sâu được sử dụng phổ biến là bác thấm, cọc cát và cọc đất - xi măng. Hầu hết các công trình giao thông, dân dụng và công nghiệp, thủy lợi... xây dựng trên nền đất yếu đều ứng dụng các công nghệ này để gia cố nền (Bergado và nnk., 1996; Nguyễn Uyên, 2013). Tuy nhiên, việc ứng dụng các công nghệ này vào thực tiễn xử lý nền đất yếu không phải lúc nào cũng mang lại hiệu quả kinh tế - kỹ thuật cao do tồn tại một số hạn chế, bất cập như: cọc cát thường gây ra tiếng ồn lớn khi thi công, bị biến dạng ngang lớn, nguồn cát sông khan hiếm, đắt đỏ; bác thấm bị giảm hiệu quả thoát nước do hiệu ứng xáo trộn, phải nhập khẩu nên giá thành cao; cọc đất - xi măng không có tác dụng nén chặt vùng đất xung quanh cọc, việc tính toán độ lún và sức chịu tải của cọc khi dưới mũi cọc phân bố đất yếu còn có ý kiến khác nhau... (Nguyễn Châu Lâm, 2009; Tạ Đức Thịnh, 2017).

Để phát huy ưu điểm và khắc phục những hạn chế của bác thấm, cọc cát và cọc đất - xi măng, nhóm nghiên cứu đề xuất công nghệ cọc cát biển - xi măng dựa trên việc cải tiến và tích

* Ngày nhận bài: 28/02/2022; Ngày phản biện: 21/3/2022; Ngày chấp nhận đăng: 12/4/2022

* Tác giả liên hệ: Email: taducthinh@humg.edu.vn

hợp hai công nghệ cọc cát và cọc đất - xi măng. Công nghệ mới này rất phù hợp để gia cố nền đất yếu phục vụ xây dựng công trình hạ tầng giao thông vùng ven biển nhờ sử dụng cát biển tại chỗ làm vật liệu cọc, góp phần hạn chế sử dụng cát sông vốn đang ngày càng khan hiếm và bảo vệ môi trường sinh thái. Cơ sở lý thuyết của công nghệ là dựa vào các quá trình nén chặt đất, quá trình gia tăng cường độ của cọc và đất yếu xung quanh cọc, quá trình cố kết thoát nước của đất nền (Tạ Đức Thịnh và nnk., 2021). Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu tập trung nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm ở hiện trường làm sáng tỏ tác dụng nén chặt cơ học nền đất yếu của cọc cát biển - xi măng.

2. Nghiên cứu lý thuyết quá trình nén chặt nền đất yếu gia cố bằng cọc cát biển - xi măng

Bản chất của công nghệ cọc cát biển - xi măng gia cố nền đất yếu là dùng thiết bị chuyên dụng đưa vật liệu hỗn hợp gồm cát biển, xi măng trộn khô vào nền đất yếu dưới dạng cọc tiết diện tròn, không lấy đất ở trong nền ra. Lượng vật liệu này sẽ chiếm thể tích lỗ rỗng của đất yếu làm cho tổng thể tích lỗ rỗng của đất nền giảm đi, các hạt đất được sắp xếp lại và nền đất được nén chặt. Quá trình nén chặt đất có thể đánh giá định lượng như sau:

Xét một khối đất ở trạng thái tự nhiên gồm 3 pha: rắn, lỏng và khí. Nếu gọi thể tích ban đầu của khối đất là V_o , thể tích hạt rắn ban đầu là V_{ho} , thể tích lỗ rỗng ban đầu là V_{ro} , ta có:

$$V_o = V_{ho} + V_{ro} \quad (1)$$

Sau khi gia cố khối đất bằng cọc cát biển - xi măng, thể tích mới của khối đất sẽ là V , thể tích hạt rắn sẽ là V_h , thể tích lỗ rỗng sẽ là V_r , tương tự (1) ta có:

$$V = V_h + V_r \quad (2)$$

Như vậy, sự thay đổi thể tích của khối đất trước và sau khi gia cố là:

$$\Delta V = V_o - V$$

$$\text{hay là:} \quad \Delta V = (V_{ho} + V_{ro}) - (V_h + V_r) \quad (3)$$

Vì thể tích hạt rắn sau khi gia cố là không đổi so với trước khi gia cố, nghĩa là $V_{ho} = V_h$, cho nên ta có:

$$\Delta V = V_{ro} - V_r,$$

$$\text{hay là:} \quad \Delta V = \Delta V_r \quad (4)$$

Biểu thức (4) cho thấy: sự thay đổi thể tích khối đất trước và sau khi gia cố bằng cọc cát biển - xi măng chính là sự thay đổi thể tích lỗ rỗng trong khối đất.

Như vậy, về lý thuyết có thể thấy, sau khi gia cố nền đất yếu bằng cọc cát biển - xi măng, thể tích lỗ rỗng của đất sẽ giảm đi, nền đất được nén chặt, kèm theo đó là hệ số rỗng giảm, hệ số nén lún giảm, sức kháng cắt (được đặc trưng bởi góc ma sát trong và lực dính kết) sẽ tăng lên (Tạ Đức Thịnh và nnk., 2021).

3. Nghiên cứu thực nghiệm tác dụng nén chặt nền đất yếu của cọc cát biển - xi măng

Để làm sáng tỏ tác dụng nén chặt nền đất yếu của cọc cát biển - xi măng, nhóm nghiên cứu đã phối hợp với Công ty Cổ phần tư vấn khảo sát xây dựng Đông Phương tiến hành nghiên cứu thực nghiệm ở hiện trường tại Khu Công nghiệp Đại Dương, thành phố Hải Dương, tỉnh Hải Dương.

3.1. Nghiên cứu tác dụng nén chặt nền đất yếu bằng thí nghiệm mẫu đất

3.2.1. Phương pháp và trình tự các bước nghiên cứu

Trong nghiên cứu này nhóm tác giả sẽ tiến hành so sánh sự thay đổi các chỉ tiêu cơ lý đặc trưng cho quá trình nén chặt tức thời nền đất yếu trước khi gia cố và ngay sau khi gia cố bằng cọc cát biển - xi măng, bao gồm: khối lượng thể tích tự nhiên, khối lượng thể tích khô, độ lỗ rỗng, hệ số rỗng, hệ số nén lún, sức kháng cắt của đất nền.

Trình tự các bước tiến hành nghiên cứu như sau:

1) Khoan xác định địa tầng, lấy mẫu đất yếu trước khi gia cố và thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ lý đặc trưng cho quá trình nén chặt đất theo các tiêu chuẩn hiện hành;

2) Gia cố nền đất yếu bằng cọc cát biển - xi măng;

3) Khoan lấy mẫu đất yếu ngay sau khi gia cố và thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ lý đặc trưng cho quá trình nén chặt đất nền theo các tiêu chuẩn hiện hành;

4) So sánh các giá trị chỉ tiêu cơ lý đặc trưng cho quá trình nén chặt đất nền trước và ngay sau khi gia cố, từ đó đánh giá được tác dụng nén chặt nền đất yếu của cọc cát biển - xi măng.

3.2.2. Kết quả nghiên cứu

* Khoan lấy mẫu và thí nghiệm mẫu đất nền

Thiết bị khoan lấy mẫu đất được sử dụng là máy khoan XJ-100. Kết quả khoan khảo sát đã xác định được địa tầng tại vị trí nghiên cứu đến độ sâu 7,0m, theo thứ tự từ trên xuống dưới gồm các lớp đất sau:

1) Lớp 1: Cát lấp, đất ruộng lẫn tạp chất, dày 0,6m

2) Lớp 2: Sét pha, màu xám vàng, xám ghi, trạng thái dẻo mềm, dày 0,7m

3) Lớp 3: Sét pha, màu xám ghi, trạng thái dẻo chảy, dày 1,3m

4) Lớp 4: Cát pha, màu xám đen, lẫn vỏ sò, kẹp cát mịn, trạng thái dẻo, dày 4,3m

* Thi công cọc thí nghiệm

Cọc thí nghiệm được thi công bằng thiết bị Robot ép cọc TP30 (hình 1), đường kính cọc 0,3m, chiều dài cọc 7,0m, khoảng cách giữa các cọc 0,9m (hình 2). Vật liệu cọc gồm cát biển lấy ở Hải Phòng, xi măng PCB40 Nghi Sơn có các chỉ tiêu kỹ thuật thỏa mãn Tiêu chuẩn TCVN 6260-2009. Hàm lượng xi măng trong hỗn hợp vật liệu cọc thí nghiệm là 5%.



Hình 1. Thiết bị Robot ép cọc TP300

Hình 2. Cọc cát biển - xi măng ở hiện trường

* Kết quả thí nghiệm mẫu đất trước khi gia cố và ngay sau khi gia cố

Kết quả thí nghiệm xác định các chỉ tiêu cơ lý của đất nền trước khi gia cố và ngay sau khi gia cố được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Kết quả xác định các chỉ tiêu cơ lý của đất nền trước và ngay sau khi gia cố

Thời điểm lấy mẫu	KL thể tích tự nhiên	KL thể tích khô	Độ lỗ rỗng	Hệ số rỗng	Hệ số nén lún	Góc ma sát trong	Lực dính kết
	γ	γ	n	e	a_{1-2}	ϕ	c
	g/cm^3	g/cm^3	%	-	cm^2/kG	độ	kG/cm^2
<i>Lớp 2: Sét pha, xám nâu, dẻo mềm (độ sâu lấy mẫu 0,8-1,0m)</i>							
Trước gia cố	1,92	1,46	45,5	0,836	0,032	12°45'	0,161
Ngay sau khi gia cố	1,94	1,51	43,9	0,781	0,031	13°11'	0,169
Sự thay đổi %	+1,04	+3,42	-3,51	-6,58	-3,13	+5,30	+4,97
<i>Lớp 3: Sét pha, xám ghi, dẻo chảy (độ sâu lấy mẫu 1,8-2,0m)</i>							
Trước gia cố	1,88	1,41	47,4	0,901	0,035	10°15'	0,151
Ngay sau khi gia cố	1,90	1,43	46,8	0,881	0,034	11°01'	0,157
Sự thay đổi %	+1,06	+1,42	-1,27	-2,22	-2,86	+8,47	+3,97
<i>Lớp 4: Cát pha lẫn vỏ, xám đen, trạng thái dẻo, xen kẹp cát mịn (độ sâu lấy mẫu 3,4 - 3,6m)</i>							
Trước gia cố	1,88	1,42	46,8	0,880	0,035	10°15'	0,115
Ngay sau khi gia cố	1,90	1,47	46,2	0,816	0,034	10°39'	0,133
Sự thay đổi (%)	+1,06	+3,52	-1,28	-7,27	-2,86	+2,36	+15,65

Từ bảng 1 nhận thấy, tác dụng nén chặt tức thời đất nền của cọc cát biển - xi bay được thể hiện khá rõ qua sự thay đổi một số chỉ tiêu như: khối lượng thể tích tăng từ 1,04% (sét pha dẻo chảy) đến 1,06% (cát pha dẻo), hệ số rỗng giảm từ 2,22% (sét pha dẻo chảy) đến 7,27% (cát pha dẻo), hệ số nén lún giảm từ 2,86% (cát pha dẻo) đến 3,13% (sét pha dẻo mềm), góc ma sát trong tăng từ

2,36% (cát pha dẻo) đến 8,47% (sét pha dẻo chảy), lực dính tăng từ 3,97% (sét pha dẻo chảy) đến 15,65% (cát pha dẻo). Tác dụng nén chặt trong đất cát pha dẻo (lớp 4) cao nhất, tiếp đến là đất sét pha dẻo mềm (lớp 2), cuối cùng là đất sét pha dẻo chảy (lớp 3).

3.2. Nghiên cứu tác dụng nén chặt nền đất yếu bằng thí nghiệm xuyên động

3.2.1. Phương pháp và thiết bị thí nghiệm

Để đánh giá tác dụng nén chặt, nhóm tác giả so sánh giá trị sức kháng xuyên động (DCP) của nền đất yếu ở thời điểm trước khi gia cố và ngay sau khi gia cố bằng cọc cát biển - xi măng. Quá trình triển khai thí nghiệm DCP tại hiện trường tuân thủ nghiêm ngặt các tiêu chuẩn kỹ thuật TCXD 112:1984 và ASTM D6951/D6951M -18.

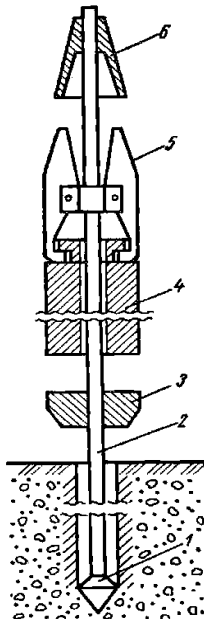
Trình tự các bước tiến hành như sau:

- 1) Thí nghiệm xuyên động nền đất yếu trước khi gia cố;
- 2) Gia cố nền bằng cọc cát biển - xi măng;
- 3) Thí nghiệm xuyên động nền đất yếu ngay sau khi gia cố;
- 4) So sánh giá trị sức kháng xuyên động của nền đất yếu trước gia cố và ngay sau khi gia cố cọc, từ đó đánh giá được tác dụng nén chặt tức thời nền đất yếu của cọc cát biển - xi măng.

Nguyên lý của thí nghiệm xuyên động DCP là đóng vào đất một mũi xuyên hình chóp nón được gắn vào đầu cần xuyên. Toàn bộ cần và mũi xuyên được đóng vào đất nhờ búa có trọng lượng tiêu chuẩn, rơi tự do từ độ cao cố định. Kết quả xuyên động chịu ảnh hưởng có tính quyết định bởi các thông số kỹ thuật của thiết bị xuyên.

3.2.2. Thiết bị thí nghiệm

Thiết bị thí nghiệm (DCP) được sản xuất bởi hãng Tecnotest (Italy). Sơ đồ cấu tạo của thí nghiệm được biểu diễn trên hình 3.



Hình 3. Sơ đồ thiết bị thí nghiệm DPT

1. Mũi xuyên; 2. Cần xuyên

3. Đe; 4. Búa; 5. Cáp búa; 6. Bộ phận định vị

Các bộ phận cơ bản thiết bị thí nghiệm xuyên động bao gồm:

- Mũi xuyên: Là bộ phận rất quan trọng ảnh hưởng đến kết quả xuyên. Hiện nay, mũi xuyên được tiêu chuẩn hóa có đường kính đáy mũi 74mm, góc chóp nón 60°. Một số nước phương Tây sử dụng mũi xuyên có góc đỉnh 90°. Mũi xuyên được cấu tạo theo hai dạng: cấu trúc dương và cấu

trúc âm. Mũi xuyên cấu trúc dương được cấu tạo đầu trên có ren để liên kết với cần xuyên. Mũi xuyên có cấu trúc âm không có bộ phận liên kết với cần. Khi xuyên hết chiều sâu thiết kế, cần xuyên được kéo lên và để mũi xuyên lại trong đất. Hình 3 là mũi xuyên động có góc đỉnh 90°.

- Cần xuyên: Thường có chiều dài 1.000 hay 1.500mm. Đường kính cần được chế tạo nhỏ hơn đường kính mũi xuyên từ 1,6 - 2 lần để làm giảm ma sát giữa cần và đất. Cần và mũi xuyên được chế tạo bằng thép đặc biệt, không bị biến dạng khi xuyên.

- Búa: Là bộ phận đóng để đưa cần và mũi xuyên vào đất. Trọng lượng búa có thể khác nhau theo từng loại thiết bị và được chọn phù hợp với điều kiện đất nền. Búa có thể được đóng bằng thủ công hoặc thiết bị cơ khí.

- Đe: Khi búa rơi đập vào đe và truyền lực tác động của búa vào cần và mũi xuyên để đưa mũi xuyên vào đất. Đe cũng được chế tạo từ loại thép tốt để tránh hư hỏng khi búa đập liên tục trong quá trình xuyên.

3.2.3. Cách tiến hành thí nghiệm

Trước khi tiến hành xuyên động phải lắp đặt thiết bị xuyên đúng vị trí thiết kế và kiểm tra toàn bộ thiết bị. Trong quá trình xuyên phải đóng liên tục, búa phải rơi tự do và đúng chiều cao quy định, độ nghiêng cần xuyên ≤ 2%, nhịp đập của búa 20 - 60 búa/phút, tốt nhất là 30 búa/phút. Quá trình xuyên được tiến hành liên tục đến độ sâu thiết kế hoặc khi tốc độ xuyên giảm rõ rệt, chỉ được ngừng xuyên để nối cần.

Trong quá trình thí nghiệm, tất cả số liệu thí nghiệm (số búa/10cm) được ghi lại và sau đó tính toán, phân tích để xác định sức kháng xuyên động (q_d). Sử dụng kết quả thí nghiệm trực tiếp tại hiện trường để xác định các thông số cần thiết như bảng 2 và biểu diễn bằng các biểu bảng.

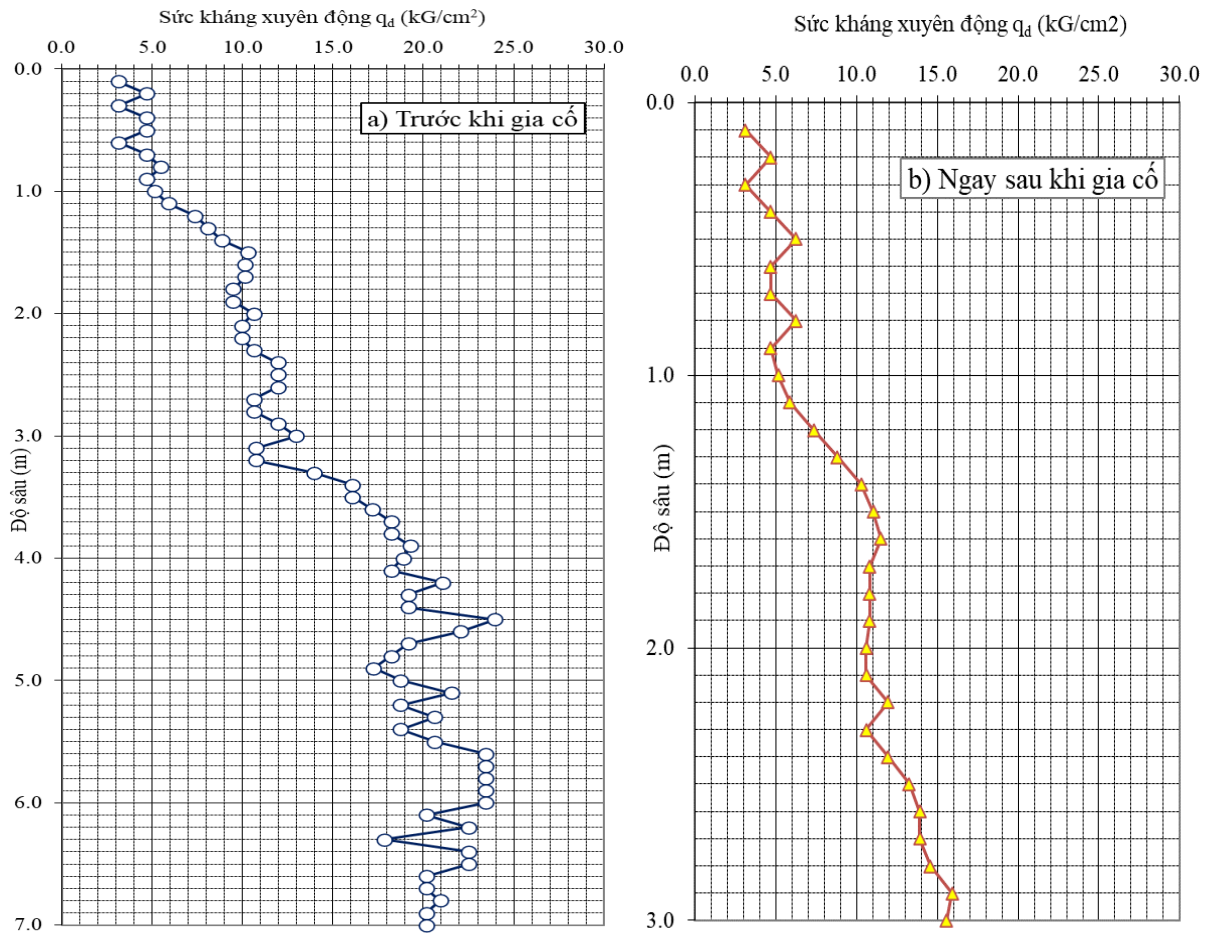
Bảng 2. Các thông số của thí nghiệm DCP

STT	Các thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Cách xác định
1	Độ sâu		m	Đo trực tiếp
2	Số đọc	n	búa	Đo trực tiếp
3	Số búa/10cm	N1	búa	N1 = 10n/s (với s = 10cm)
4	Sức kháng hiệu chỉnh	N	búa	N = N1/(α+β-1)
5	Sức kháng xuyên động	q _d	kG/cm ²	$q_d = \frac{k_m \cdot \Pi_o \cdot \Phi \cdot N}{s}$
trong đó: - α là hệ số hiệu chỉnh ma sát - β là hệ số hiệu chỉnh trọng lượng cần - k _m là hệ số xét tới tổn thất năng lượng, phụ thuộc trọng lượng búa và cần - Π _o là hệ số xét đến ảnh hưởng của thiết bị được áp dụng (tính cho loại búa 10kg, chiều cao rơi búa 50cm) - Φ là hệ số xét đến ảnh hưởng của ma sát giữa cần và đất - A là diện tích mũi xuyên (cm ²).				

3.2.4. Kết quả thí nghiệm

* Trước khi gia cố nền

Kết quả thí nghiệm xuyên động đất nền trước khi gia cố nền được biểu diễn trên hình 4a và tổng hợp trong bảng 3.



Hình 4. Biểu đồ kết quả thí nghiệm DCP trước khi gia cố nền (a) và ngay sau khi gia cố (b)

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm xuyên động trước khi gia cố nền

Chỉ tiêu	Ký hiệu	Đơn vị	Lớp 1	Lớp 2	Lớp 3	Lớp 4
Sức kháng xuyên động	q_d	kG/cm^2	3,90	5,12	9,69	17,24
Mô đun tổng biến dạng (theo G. K. Bondaric)	E_o	kG/cm^2	12,05	15,83	29,94	53,26
Sức chịu tải quy ước (theo CHuΠ II.15 - 74)	R_o	kG/cm^2	0,54	0,63	0,98	1,54

Từ bảng 3 cho thấy, các lớp đất 1, 2, 3 đều có $E_o < 50kG/cm^2$, $R_o < 1,0 kG/cm^2$. Do đó, công tác đánh giá hiệu quả gia cố nền chủ yếu tập trung trong các lớp đất này.

* Ngay sau khi gia cố nền

Kết quả thí nghiệm xuyên động đất nền ngay sau khi gia cố được biểu diễn trên hình 4b và trong bảng 4.

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm xuyên động ngay sau khi gia cố nền

Chỉ tiêu	Ký hiệu	Đơn vị	Lớp 1	Lớp 2	Lớp 3
Sức kháng xuyên động	q_d	kG/cm^2	3,90	5,61	10,72
Mô đun tổng biến dạng (Theo G. K. Bondaric)	E_o	kG/cm^2	12,05	17,34	33,13
Sức chịu tải quy ước (Theo CHuΠ II.15 - 74)	R_o	kG/cm^2	0,54	0,67	1,05

3.2.5. Đánh giá tác dụng nén chặt tức thời ngay sau khi gia cố nền

Tác dụng nén chặt đất nền tức thời được đánh giá thông qua giá trị chỉ tiêu sức kháng xuyên động, mô đun tổng biến dạng và sức chịu tải quy ước của lớp đất 2 (sét pha, dẻo mềm) và lớp đất 3 (sét pha, dẻo chảy) ở thời điểm trước khi gia cố và ngay sau khi gia cố (bảng 5).

Bảng 5. Giá trị sức kháng xuyên động, mô đun tổng biến dạng và sức chịu tải của đất nền ở thời điểm trước khi gia cố và ngay sau khi gia cố

Chỉ tiêu đánh giá	Lớp 2 (sét pha, dẻo mềm)			Lớp 3 (sét pha, dẻo chảy)		
	Trước gia cố	Ngay sau gia cố	Gia tăng	Trước gia cố	Ngay sau gia cố	Gia tăng
q_d (kG/cm ²)	5,12	5,61	9,50%	9,69	10,72	10,70%
E_o (kG/cm ²)	15,83	17,34	9,50%	29,94	33,13	10,70%
R_o (kG/cm ²)	0,63	0,67	5,80%	0,98	1,05	7,90%

Từ bảng 5 nhận thấy, cọc cát biển - xi măng có tác dụng nén chặt đất tức thời ngay sau khi gia cố nền, thể hiện rõ rệt thông qua các chỉ tiêu: sức kháng xuyên động q_d và mô đun tổng biến dạng E_o đều tăng 9,50% trong lớp 2, tăng 10,70% trong lớp 3; sức chịu tải quy ước tăng 5,80% trong lớp 2 và tăng 7,90% trong lớp 3.

4. Kết luận

Từ những kết quả nghiên cứu nêu trên có thể rút ra một số kết luận sau đây:

- Cọc cát biển - xi măng gia cố nền đất yếu là công nghệ mới, được phát triển trên cơ sở công nghệ cọc cát và công nghệ cọc đất - xi măng. Một trong các cơ sở lý thuyết của cọc cát biển - xi măng nâng cao sức chịu tải và giảm độ lún của nền là quá trình nén chặt cơ học đất nền làm gia tăng cường độ của đất yếu xung quanh cọc.

- Kết quả thí nghiệm trong phòng cho thấy sau khi gia cố nền đất yếu bằng cọc cát biển - xi măng, các chỉ tiêu cơ lý đặc trưng cho quá trình nén chặt cơ học nền đất yếu đã thay đổi theo hướng có lợi cho công tác xây dựng, theo đó, hệ số rỗng của đất giảm 7,27%, hệ số nén lún giảm 3,13%, góc ma sát trong tăng 8,47%, lực dính kết tăng 15,65%;

- Kết quả thí nghiệm hiện trường xuyên động DCP cho thấy sức kháng xuyên động và mô đun tổng biến dạng tăng từ 5,8% đến 10,70%.

Tài liệu tham khảo

Bergado, D. T., Chai, J.C., Alfaro M.C., 1996. Những biện pháp kỹ thuật mới cải tạo đất yếu trong xây dựng, Nhà xuất bản Giáo dục, Hà Nội.

Nguyễn Ngọc Bích, 2011. Các phương pháp cải tạo đất yếu trong xây dựng, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.

Nguyễn Uyên, 2013. Xử lý nền đất yếu trong xây dựng, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.

Nguyễn Châu Lân, 2009. Cải tạo nền đường trên đất yếu bằng cọc xi măng đất, *Tạp chí Địa kỹ thuật*, tập 13, số 2, tr.40-57.

Tạ Đức Thịnh, 2017. Bàn về phương pháp tính toán sức chịu tải và độ lún của nền đất yếu gia cố bằng cọc đất - xi măng, *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất*, số 58, kỳ 5, ISSN 1859-1469, tr.386-390.

Tạ Đức Thịnh, Nguyễn Thành Dương, Nguyễn Trọng Dũng, Đặng Quang Huy, Hồ Anh Cường, Nguyễn Tấn Sơn, 2021. Nghiên cứu đề xuất công nghệ cọc cát biển - xi măng - tro bay xử lý nền đất yếu phục vụ xây dựng vùng ven biển Đồng bằng sông Cửu Long. *Tạp chí Xây dựng*, số 10/2021, ISN 2734-9888, trang 126-132.