

Mô hình hóa và phân tích sức chịu tải của nền đất yếu gia cố cọc xi măng đất dưới tác dụng của nền đường đắp sử dụng mô hình Mohr-Coulomb và phương pháp FEM

Numerical modeling and analysis of the bearing capacity of soft soil reinforced with soil cement columns under embankment loading using the Mohr-coulomb model and the Finite element method (FEM)

> TS ĐÀO PHÚC LÂM^{1*}, THS LÊ HỮU VƯƠNG², THS NGUYỄN HỮU BÌNH³

¹Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

²Ban Quản lý dự án Cảng Hàng không ACV

³Công ty Cổ phần Xây dựng & Nhân lực Việt Nam

Email: *lamdp@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để đánh giá ảnh hưởng của đường kính và khoảng cách cọc xi măng đất đến sức chịu tải của nền đất yếu dưới nền đường đắp, với mô hình vật liệu Mohr-Coulomb. Kết quả cho thấy tăng đường kính hoặc giảm khoảng cách cọc đều cải thiện đáng kể sức chịu tải và giảm độ lún. Mối quan hệ này được thể hiện qua tỷ lệ diện tích thay thế (As), trong đó As cao hơn tương ứng với sức chịu tải lớn hơn. Những kết quả này là cơ sở quan trọng cho việc thiết kế tối ưu hệ cọc xi măng đất.

Từ khóa: Cọc xi măng đất, sức chịu tải nền đất yếu, phương pháp phần tử hữu hạn, tỷ lệ diện tích thay thế.

ABSTRACT

This paper employs the finite element method (FEM) to assess the influence of the geometric parameters of cement-soil columns—specifically diameter and spacing—on the bearing capacity of soft soils reinforced beneath subgrades, using the Mohr-Coulomb constitutive model. The results indicate that increasing the column diameter or reducing the spacing significantly enhances bearing capacity while reducing settlement. This relationship is effectively characterized by the replacement area ratio (As), where a higher As corresponds to greater bearing capacity. These findings provide a critical basis for the optimal design of cement-soil column reinforcement systems.

Keywords: Cement-soil columns, bearing capacity of soft soil, finite element method (FEM), replacement area ratio (As).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việt Nam là một quốc gia có nhiều vùng đất yếu, đặc biệt là tại các lưu vực sông lớn như sông Hồng và sông Mê Kông, cũng như dọc theo các dòng sông và bờ biển. Việc xây dựng cơ sở hạ tầng, bao gồm cả các tuyến đường giao thông, trên nền đất yếu với điều kiện địa chất phức tạp đặt ra những thách thức đáng kể, đòi hỏi các giải pháp gia cố nền đất yếu phù hợp và tiên tiến để đảm bảo sức chịu tải, độ lún cho phép và độ ổn định của công trình.

Công nghệ cọc xi măng đất (cọc đất-xi măng) đã nổi lên như một giải pháp hiệu quả và được áp dụng rộng rãi tại Việt Nam cho nhiều mục đích, bao gồm gia cố nền đường. Công nghệ này có những ưu điểm nổi bật như khả năng xử lý đến độ sâu lớn, phù hợp với nhiều loại đất yếu (từ cát thô đến bùn sét yếu) và có thể thi công trong điều kiện hiện trường khó khăn (chật hẹp, ngập nước). Việc gia tăng cường độ của cọc bằng cách tăng hàm lượng xi măng cũng giúp cọc đạt sức chịu tải lớn.

Tuy nhiên, việc áp dụng công nghệ cọc xi măng đất vẫn còn một số hạn chế, dẫn đến hiệu quả chưa tối ưu và thiết kế đôi khi chưa tối ưu về kinh tế, kỹ thuật. Một trong những nguyên nhân chính được xác định là do sự thiếu rõ ràng về ảnh hưởng trực tiếp của các thông số hình học của cọc, cụ thể là đường kính và khoảng cách giữa các cọc xi măng đất. Thực tế đã chỉ ra rằng, các tham số này có ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử cơ học của nền đường đắp, bao gồm sức mang tải, độ lún và tính ổn định tổng thể. Điều này gây khó khăn trong việc dự báo chính xác ứng xử của nền và lựa chọn phương án thiết kế gia cố tối ưu.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về cọc xi măng đất, tập trung vào ảnh hưởng của hàm lượng xi măng hoặc công nghệ thi công, nhưng các nghiên cứu chuyên sâu về ảnh hưởng định lượng của đường kính và khoảng cách cọc xi măng đến ứng xử cơ học của nền đường đắp còn tương đối hạn chế. Sự thiếu hiểu biết rõ ràng này cản trở việc thiết kế tối ưu phương án gia cố nền đất yếu bằng công nghệ trộn sào.

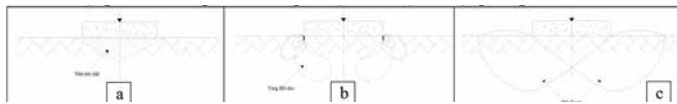
Nhằm làm rõ khoảng trống kiến thức trên, nghiên cứu này tập trung vào việc phân tích định lượng ảnh hưởng của đường kính và khoảng cách cọc xi măng đất đến ứng xử cơ học của nền đường

đắp. Các mục tiêu cụ thể của nghiên cứu là làm rõ ảnh hưởng của các tham số này đến sức chịu tải, độ lún và kết quả phân tích ổn định tổng thể của nền sau gia cố.

Để đạt được mục tiêu này, nghiên cứu sử dụng phương pháp mô hình hóa số thông qua phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), cụ thể là phần mềm Plaxis 2D. Một nghiên cứu tham số (parametric study) được tiến hành để đánh giá định lượng ảnh hưởng của đường kính và khoảng cách cọc đến ứng xử cơ học của nền. Kết quả sơ bộ chỉ ra rằng cả đường kính và khoảng cách cọc (hay mật độ gia cố) đều có ảnh hưởng đáng kể đến sức chịu tải của nền phức hợp, với việc tăng đường kính hoặc giảm khoảng cách (tăng mật độ gia cố) sẽ làm tăng sức chịu tải.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Quan sát Hình 1 dưới đây, ta thấy rằng đất nền sẽ trải qua các giai đoạn biến dạng: Ban đầu là nén chặt tuyến tính (Hình 1a), sau đó chuyển sang phi tuyến với sự phát triển của các vùng biến dạng dẻo cục bộ (Hình 1b). Khi tải trọng tác dụng, p, vượt quá tải trọng giới hạn, p_{gh}, các vùng biến dạng dẻo này sẽ phát triển rộng và nối liền với nhau, dẫn đến sự phá hoại của đất nền (trượt theo mặt trượt và trôi ra ngoài), làm nền đất mất ổn định và mất khả năng chịu tải (Hình 1c). Sự làm việc này phản ánh đặc trưng của đất yếu là có độ bền, độ ổn định thấp, tính biến dạng lớn và không có khả năng ổn định khi chịu tải trọng công trình.



Hình 1. Các giai đoạn làm việc của đất nền

Dựa trên cơ chế làm việc của nền đất, nhiều lý thuyết tính toán và dự báo sức chịu tải đã được phát triển, trong đó có nhóm phương pháp giải tích. Các biểu thức tính sức chịu tải trong nhóm này chủ yếu dựa trên các nghiên cứu nền tảng về móng nông của Prandtl (1921), Reissner (1924) và đặc biệt là Terzaghi (1943). Những lý thuyết này xem xét hiện tượng chọc thủng của một nêm đất xuyên qua một bán không gian đồng nhất, không có trọng lượng, trong điều kiện biến dạng phẳng.

Phương pháp Prandtl: Prandtl (1921) cho rằng, tại mặt trượt cuối cùng đất nền dưới đáy móng hình thành khối lăng thể trượt acbd gồm ba vùng (Hình 2a): Vùng I: Vùng chủ động; Vùng II: Vùng chuyển tiếp; Vùng III: Vùng bị động.

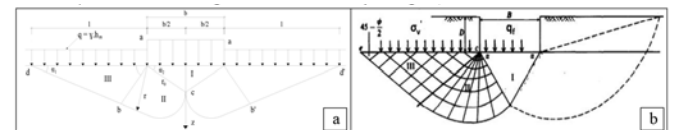
Theo Prandtl (1921), sức chịu tải của đất nền được xác định như sau:

$$q_c = c^1 N_c \tag{1}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi' \tag{2}$$

Trong đó:

- N_c, N_q - Hệ số sức chịu tải của đất nền phụ thuộc vào góc ma sát trong của đất nền;
- c' - Lực dính kết của đất nền (kN/cm²);
- φ' - Góc ma sát trong của đất nền dưới đáy móng (độ).



Hình 2. Sơ đồ sức chịu tải của đất nền theo: a) - Prandtl và b) - Terzaghi

Tương tự như phương pháp của Prandtl, Terzaghi cho rằng tại trạng thái phá hủy thì khối đất nền dưới đáy móng hình thành ba vùng: Vùng I, vùng II và vùng III.

Sức chịu tải cực hạn của đất nền theo Terzaghi được xác định như sau:

$$Q_u = cN_{cs} + \gamma DN_q + 0.5\gamma BN_y \tag{3}$$

Trong đó:

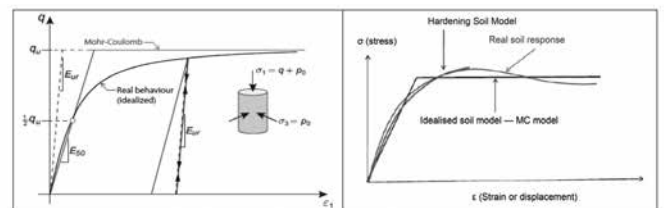
- D - Chiều sâu của móng;
- B - Chiều rộng của móng;
- N_c, N_q, N_y - Hệ số sức mang tải của đất nền (theo Terzaghi) phụ thuộc vào góc ma sát trong của đất nền.

Công nghệ xử lý nền bằng cọc xi măng đất, về bản chất là tạo ra các cột hình trụ bằng cách trộn sâu đất nguyên trạng với xi măng. Quá trình cứng hóa và phát triển cường độ của hỗn hợp đất-xi măng diễn ra thông qua quá trình ninh kết, tạo ra các hợp chất bền vững liên kết các hạt đất, hình thành nên khoáng chất hóa cứng nền đất. Việc đưa các cột vật liệu có cường độ và độ cứng cao hơn đáng kể vào nền đất yếu nguyên trạng sẽ cải thiện đáng kể ứng xử cơ học của nền đất yếu.

Sự cải thiện này thể hiện ở chỗ nền đất gia cố sẽ hạn chế các vùng biến dạng dẻo cục bộ dưới tác dụng của tải trọng, giảm sự liên kết (hay sự phát triển và lan rộng) giữa các vùng biến dạng dẻo, từ đó ngăn ngừa sự phá hoại của đất nền (như trượt hoặc trôi ra ngoài) mà thường xảy ra nhanh chóng và gây mất khả năng chịu tải đối với nền đất yếu chưa xử lý. Kết quả là nền đất gia cố bằng cọc xi măng đất (hay còn gọi là nền phức hợp - composite ground) có sức chịu tải lớn hơn so với nền thiên nhiên.

Để dự báo và phân tích chính xác ứng xử cơ học mới này của nền đất sau khi được gia cố bằng cọc xi măng đất trong các bài toán địa kỹ thuật, đặc biệt là dưới tải trọng nền đường đắp, việc sử dụng các phương pháp phân tích tiên tiến như phương pháp số là rất cần thiết. Cơ sở của phương pháp số là thực hiện rời rạc hóa miền liên tục của bài toán và giải bài toán xấp xỉ trên các miền con (phần tử). Tuy nhiên, độ chính xác của kết quả phân tích phụ thuộc rất lớn vào khả năng mô tả đúng tính chất và ứng xử của vật liệu đất nền (bao gồm cả nền đất yếu nguyên trạng và hỗn hợp đất-xi măng đã cứng hóa) trong mô hình số.

Đây chính là lý do cần phải lựa chọn mô hình đất nền (hay mô hình vật liệu) phù hợp. Các mô hình đất nền là các mô hình toán học được sử dụng để biểu thị quan hệ ứng suất-biến dạng và tiêu chuẩn phá hoại của đất. Các mô hình phổ biến như mô hình Mohr-Coulomb (MC) và mô hình Hardening Soil (HS). Mô hình MC (Hình 3a) là mô hình đàn hồi-dẻo lý tưởng, dựa trên tiêu chuẩn phá hoại Mohr-Coulomb và định luật Hooke, với giả định đất có ứng xử đàn hồi tuyến tính cho đến khi đạt trạng thái chảy, sau đó là dẻo lý tưởng. Mô hình này sử dụng năm tham số cơ bản: Mô-đun đàn hồi E, hệ số Poisson ν , lực dính c, góc ma sát trong φ và góc nở ψ . MC phù hợp cho các bài toán tổng quan, yêu cầu mô hình đơn giản và số lượng tham số đầu vào hạn chế. Ngược lại, mô hình HS (Hình 3b) được phát triển để khắc phục các hạn chế của MC, cho phép mô phỏng ứng xử đàn hồi-dẻo phi tuyến với độ cứng phụ thuộc ứng suất và trạng thái biến dạng. Mô hình này sử dụng các mô-đun cát tuyến (E_{50}^{ref}), mô-đun gia tải lại (E_{ur}^{ref}) và tham số m mô tả sự phụ thuộc độ cứng theo cấp tải, nhờ đó phản ánh tốt hơn ứng xử phi tuyến thực tế của đất nền, đặc biệt trong các bài toán đào sâu hoặc có chu trình tải - dỡ tải phức tạp.



Hình 3. Mô hình đất nền khi gia cố cọc xi măng đất: a) - Mohr-coulomb; b) - Hardning Soil

Tuy nhiên, trong phạm vi nghiên cứu ảnh hưởng của đường kính và khoảng cách cọc xi măng đất đến sức chịu tải của nền gia cố

dưới nền đường đắp, mô hình Mohr-Coulomb đã được lựa chọn. Lý do là vì mục tiêu chính của nghiên cứu tập trung vào đánh giá ảnh hưởng tương đối của các tham số kết cấu cọc, thay vì mô phỏng chi tiết toàn bộ quá trình làm việc phi tuyến của nền đất. Việc sử dụng mô hình MC cho phép đạt được kết quả phân tích có ý nghĩa định tính và một phần định lượng với độ tin cậy chấp nhận được, đồng thời giảm yêu cầu về dữ liệu đầu vào và độ phức tạp tính toán. Như vậy, MC được xem là lựa chọn hợp lý, cân bằng giữa độ chính xác cần thiết và tính khả thi trong khuôn khổ bài báo.

Đối với các bài toán đánh giá ổn định và sức chịu tải của nền đất, phần mềm Plaxis sử dụng kỹ thuật suy giảm cường độ phi-c (phi-c reduction) để xác định hệ số an toàn. Phương pháp này liên tục giảm các tham số cường độ đất (góc ma sát trong ϕ và lực dính c) đến khi mô hình mất ổn định, qua đó xác định được sức chịu tải cực hạn và cơ chế phá hoại tiềm năng của nền đất. Công thức xác định hệ số ổn định trong phương pháp này:

$$\sum M_{sf} = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{reduced}} = \frac{c}{c_{reduced}} \quad (4)$$

Quá trình này được thực hiện tự động qua lệnh Load advancement number of steps trong Plaxis. Hệ số $\sum M_{sf}$ được tăng từng bước nhỏ (thường là 0,1), đến khi không thể duy trì trạng thái cân bằng và xuất hiện cơ chế phá hoại (shear band), xem thêm Hình 4.



Hình 4. Minh họa quá trình suy giảm cường độ phi-c trong Plaxis, mô phỏng mối quan hệ giữa hệ số suy giảm $\sum M_{sf}$ và lực không cân bằng trong kết cấu. Khi $\sum M_{sf}$ tăng đến một giá trị tới hạn (~1,6), lực không cân bằng tăng vọt, biểu hiện cho cơ chế phá hoại bắt đầu xảy ra

3. THÔNG SỐ ĐỊA KỸ THUẬT, MÔ HÌNH SỐ VÀ XÂY DỰNG BÀI TOÁN CHO MÔ HÌNH SỐ

3.1. Thông số địa chất và mô hình số

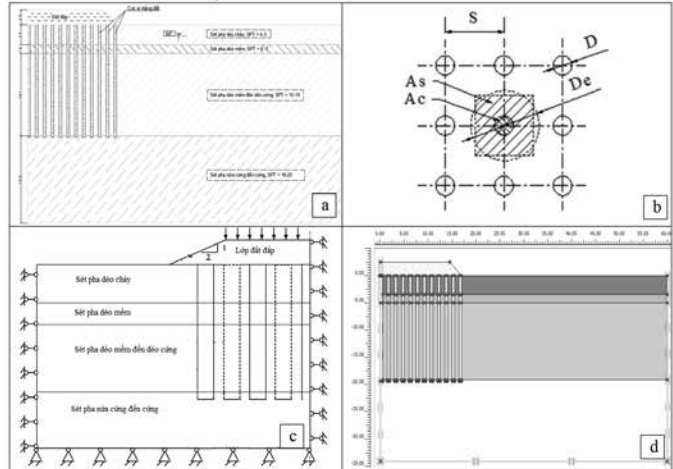
Các thông số cơ bản về điều kiện địa chất, kích thước và điều kiện biên của mô hình được trình bày trong Hình 5. Theo đó, lớp đất đắp có chiều cao trung bình 2,5 m, mái dốc 1:2; Lớp 1: Sét pha dẻo chảy bề dày trung bình 3,5 m; Lớp 2: Sét pha dẻo mềm; bề dày trung bình 1,5 m; Lớp 3: Sét pha dẻo mềm đến dẻo cứng, bề dày trung bình 14,1 m; Lớp 4: Sét pha nửa cứng đến cứng. Bảng thông số cho lớp đất đắp và cọc xi măng đất thể hiện tại Bảng 1 và 2, trong đó thông số của cọc xi măng đất được tham khảo từ kết quả nghiên cứu của (Han et al., 2007) với giá trị mô-đun đàn hồi của cọc xi măng đất được tính như sau (Bruce, 2001):

$$E = 100q_u \quad (5)$$

Trong đó: q_u - Cường độ kháng nén nở hông của cọc xi măng đất

Theo các tiêu chuẩn thiết kế và thi công cọc xi măng đất gia cố nền đất yếu cho thể đắp, cọc xi măng đất có thể bố trí đều theo lưới tam giác hoặc ô vuông (Maclean & Lewis, 1963; TCVN 9403:2012). Trong bài báo này, tác giả sử dụng mô hình bài toán cọc xi măng đất bố trí mạng ô vuông (Hình 5b) với khoảng cách giữa các cọc xi măng đất và đường kính thay đổi. Mô hình số nghiên cứu được xây dựng bằng phần mềm Plaxis 2D với bài toán đối xứng trục, trong đó kích thước (Hình 5d) và điều kiện biên mô hình được thể hiện (Hình 5c). Biên trái và biên phải mô hình bị khống chế chuyển vị ngang, chỉ có thành phần chuyển vị đứng; biên dưới cùng bị khống chế cả chuyển vị ngang và chuyển vị đứng. Kích thước mô hình cụ thể như sau:

- Chiều rộng khối đắp (1/2): 18,0 m;
- Chiều rộng mô hình: 60,0 m;
- Chiều cao mô hình: 35,0 m.



Hình 5. Mô hình số bài toán: a) - Phân bố các lớp địa chất và kích thước mô hình; b) - Cọc xi măng đất bố trí mạng ô vuông; c) - Điều kiện biên mô hình nghiên cứu và d) - Mô hình hóa trong Plaxis

Bảng 1. Thông số địa kỹ thuật của vật liệu đất

Thông số	Đơn vị	Lớp đất			
		Sét pha dẻo chảy	Sét pha dẻo mềm	Sét pha dẻo mềm đến dẻo cứng	Sét pha nửa cứng đến cứng
Chiều dày	m	3,5	1,5	14,1	15,0
Lực dính kết	kN/m ²	5	10	13,5	17,5
Góc ma sát trong	Độ	10	14	17	18,5
Góc lệch	Độ	0	0	0	0
Dung trọng tự nhiên	kN/m ³	16,5	17	17,5	18
Dung trọng khô	kN/m ³	10,5	12,2	13,0	13,5
Mô-đun đàn hồi, E	kN/m ²	2.500	3.700	8.000	13.500
Hệ số poisson's u	-	0,3	0,3	0,3	0,3
Hệ số thấm	m/ngày	8,64E-5	7,5E-5	6,8E-5	7,0E-6

Bảng 2. Thông số lớp đất đắp và cọc xi măng đất (Han et al., 2007)

Thông số	Đơn vị	Vật liệu	
		Lớp đất đắp	Cọc xi măng đất
Lực dính kết	kN/m ²	15	150
Góc ma sát trong	Độ	30	37
Góc lệch	Độ	0	7
Dung trọng tự nhiên	kN/m ³	20	22
Dung trọng khô	kN/m ³	19	21
Mô-đun đàn hồi, E	kN/m ²	10.000	35.000
Hệ số poisson's u	-	-	-
Hệ số thấm	m/ngày	1	4E-5

3.2. Xây dựng các bài toán cho mô hình số

Để làm rõ hơn sự ảnh hưởng của đường kính và khoảng cách cọc xi măng đất tới khả năng gia cố nền, trong bài báo này, tác giả sử dụng phương pháp nghiên cứu tham số với các thông số cho từng bài toán như sau:

a) Bài toán “Ảnh hưởng của đường kính cọc”

Trong bài toán này, khoảng cách giữa các cọc xi măng đất không thay đổi còn đường kính cọc được thay đổi với các giá trị lần lượt từ 0,5 đến 1,0 m, đây là những đường kính đã và đang được sử dụng khá phổ biến khi cọc xi măng đất được áp dụng để gia cố nền đất yếu; các bài toán cụ thể được trình bày trong Bảng 3. Tổng cộng có tất cả 18 bài toán.

Bảng 3. Các bài toán ảnh hưởng đường kính cọc

TT	Bài toán	Khoảng cách giữa các cọc, m	Đường kính cọc, m
1	1	1,0	0,5
2			
3			
4			
5			
6			
7	2	2,0	0,5
8			
9			
10			
11			
12			
13	3	3,0	0,5
14			
15			
16			
17			
18			

b) Bài toán “Ảnh hưởng của khoảng cách cọc”

Bài toán hai được xây dựng để đánh giá ảnh hưởng của khoảng cách giữa các cọc xi măng đất (từ tim cọc đến tim cọc) đến sức chịu tải của nền gia cố, trong đó đường kính cọc không đổi còn khoảng cách giữa các cọc thay đổi, cụ thể các bài toán được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Các bài toán đánh giá ảnh hưởng khoảng cách giữa các cọc

TT	Bài toán	Đường kính cọc, m	Khoảng cách giữa các cọc, m
1	1	0,5	1,0
2			
3			
4	2	0,8	1,0
5			
6			
7	3	1,0	1,0
8			
9			

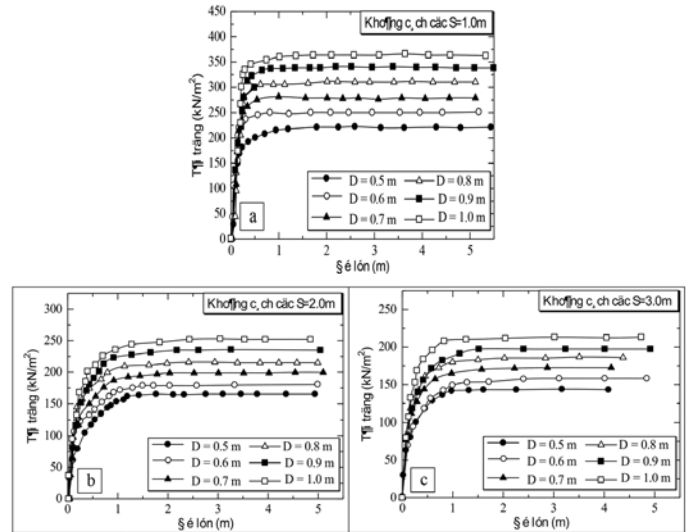
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Ảnh hưởng của đường kính đến sức chịu tải của nền

Kết quả tính toán sức chịu tải của nền sau khi gia cố bằng cọc

xi măng đất với các đường kính khác nhau được trình bày tại Hình 6. Nhìn chung, nền gia cố luôn có sức chịu tải cao hơn nền thiên nhiên và giá trị này tăng đáng kể khi đường kính tăng từ 0,5 m lên 1,0 m. Cụ thể:

- Khoảng cách cọc $S = 1,0$ m: Sức chịu tải tăng mạnh, từ 225 lên 370 kN/m^2 .
- Khoảng cách cọc $S = 2,0$ m: Sức chịu tải tăng từ 160 lên 260 kN/m^2 .
- Khoảng cách cọc $S = 3,0$ m: Sức chịu tải tăng từ 145 lên 225 kN/m^2 .



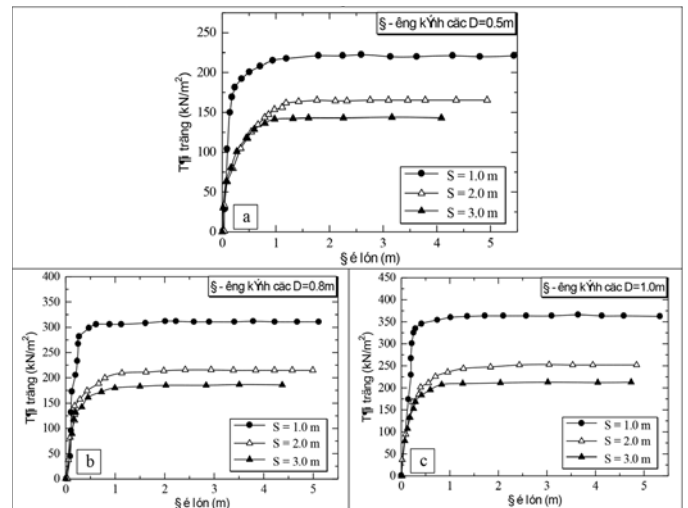
Hình 6. Ảnh hưởng của đường kính đến sức chịu tải của nền: a) $S=1,0$ m, b) $S=2,0$ m, c) $S=3,0$ m

Kết quả cho thấy hiệu quả gia cố phụ thuộc rõ rệt vào đường kính cọc, đặc biệt khi cọc được bố trí với mật độ cao.

4.2. Ảnh hưởng của khoảng cách cọc

Kết quả mô phỏng cho thấy, khoảng cách giữa các cọc xi măng đất ảnh hưởng nghịch chiều so với đường kính cọc (Hình 7): Khi khoảng cách tăng từ 3,0 m xuống 1,0 m, sức chịu tải của nền gia cố giảm và ngược lại. Hiệu ứng này phản ánh rõ qua các trường hợp sau:

- Với $D = 0,5$ m: Sức chịu tải giảm từ 225 kN/m^2 xuống 145 kN/m^2 ;
- Với $D = 0,8$ m: Giảm từ 305 kN/m^2 xuống 190 kN/m^2 ;
- Với $D = 1,0$ m: Giảm từ 370 kN/m^2 xuống 210 kN/m^2 .



Hình 7. Ảnh hưởng của khoảng cách đến sức mang tải: a) - $D = 0,5$ m; b) - $D = 0,8$ m; c) - $D = 1,0$ m

Sự suy giảm này được lý giải bởi tỷ lệ phân bố diện tích cọc trong nền: Khi khoảng cách giữa các cọc tăng, tỷ lệ này giảm, dẫn đến mật độ gia cố thấp hơn, nền đất yếu đóng vai trò lớn hơn trong việc tiếp nhận tải trọng, làm giảm tổng thể sức chịu tải.

4.3. Mối tương quan giữa mật độ gia cố và sức chịu tải của nền

Theo (D.T.Bergado, et al, 1994), mật độ gia cố được thể hiện qua thông số tỷ lệ diện tích thay thế đất nền tự nhiên bằng cọc xi măng đất, do cọc xi măng đất bố trí mạng ô vuông nên mật độ a_p được xác định như sau:

$$a_p = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{s}\right)^2 \quad (6)$$

Trong đó:

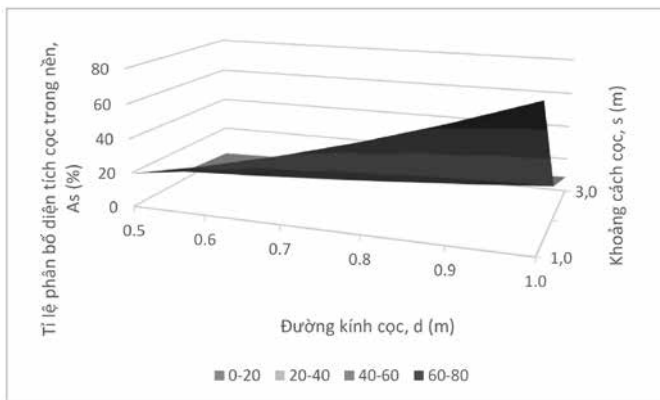
d - Đường kính cọc;

s - Khoảng cách giữa các cọc.

Bảng 5 và Hình 8 trình bày tỷ lệ phân bố diện tích cọc trong nền theo đường kính cọc (d) và khoảng cách cọc (s).

Bảng 5. Tỷ lệ phân bố diện tích cọc trong nền đất (%)

TT	Đường kính	Tỷ lệ diện tích thay thế, a_p (%)		
		S = 1,0 m	S = 2,0 m	S = 3,0 m
1	0,5	0,1963	0,0491	0,0218
2	0,6	0,2827	0,0707	0,0314
3	0,7	0,3848	0,0962	0,0428
4	0,8	0,5027	0,1257	0,0559
5	0,9	0,6362	0,1590	0,0707
6	1,0	0,7854	0,1963	0,0873



Hình 8. Tỷ lệ phân bố diện tích cọc trong nền gia cố theo d và s (%)

Nói cách khác, khi khoảng cách giữa các cọc giảm, tỷ lệ diện tích cọc so với khối đất gia cố tăng lên, nghĩa là diện tích đất tự nhiên được thay thế bởi cọc xi măng đất lớn hơn. Vì cường độ chịu nén của cọc xi măng đất cao hơn đất nền tự nhiên, việc tăng tỷ lệ này góp phần nâng cao sức chịu tải tổng thể của khu vực nền gia cố.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) kết hợp với mô hình vật liệu Mohr-Coulomb để phân tích ảnh hưởng của các thông số hình học chủ yếu, bao gồm đường kính và khoảng cách cọc xi măng đất đến sức chịu tải của nền đất yếu được gia cố dưới tải trọng nền đường đắp. Phương pháp số này cho phép đánh giá chi tiết mối quan hệ giữa các tham số cọc và hiệu quả gia cố nền.

Kết quả nghiên cứu cho thấy sức chịu tải nền gia cố tăng rõ rệt khi tăng đường kính cọc và giảm khoảng cách giữa các cọc, đồng thời độ lún nền giảm tương ứng. Tỷ lệ diện tích thay thế (A_s), tổng hợp từ các tham số hình học được xác định là yếu tố quan trọng

phản ánh hiệu quả gia cố. Mối quan hệ định lượng giữa A_s và khả năng chịu tải giúp cung cấp cơ sở cho việc tối ưu hóa thiết kế cọc xi măng đất.

Nghiên cứu này góp phần làm rõ ảnh hưởng tương đối của các tham số cọc trong thiết kế gia cố nền đường đắp trên đất yếu, đồng thời chứng minh tính khả thi và hiệu quả của mô hình Mohr-Coulomb trong phân tích các bài toán địa kỹ thuật phức tạp. Tuy nhiên, giới hạn của nghiên cứu là chưa xét đến ảnh hưởng của các yếu tố phi hình học và các mô hình vật liệu phi tuyến cao cấp hơn, cũng như chưa có thử nghiệm thực tế để xác nhận kết quả mô phỏng.

Đề xuất trong tương lai là mở rộng nghiên cứu bằng cách áp dụng các mô hình vật liệu tiên tiến hơn như Hardening Soil, bổ sung dữ liệu thực nghiệm và xem xét các tác động tải trọng động, nhằm nâng cao độ chính xác và tính thực tiễn của phương pháp thiết kế gia cố nền.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Abusharar, S. W., Zheng, J.-J., & Chen, B.-G. (2009), Finite element modeling of the consolidation behavior of multi-column supported road embankment, *Computers and Geotechnics*, 36(4), 676-685.
- [2]. Brinkgreve, R. B. (2005), Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application, In *Soil constitutive models: Evaluation, selection and calibration*, pp.69-98.
- [3]. Bruce, D. A. (2001), *An Introduction to the Deep Mixing Methods as Used in Geotechnical Applications, Volume III: The Verification and Properties of Treated Ground*.
- [4]. Burd, H. J., & Frydman, S. (1997), Bearing capacity of plane-strain footings on layered soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(2), 241-253.
- [5]. Chai, J.-C., Shrestha, S., Hino, T., Ding, W.-Q., Kamo, Y., & Carter, J. (2015), 2D and 3D analyses of an embankment on clay improved by soil-cement columns, *Computers and Geotechnics*, 68, 28-37.
- [6]. D.T.Bergado, et al. (1994), Những biện pháp kỹ thuật mới cải tạo đất yếu trong xây dựng, NXB. Giáo dục, Bản dịch của Nguyễn Uyên, Trịnh Văn Cường.
- [7]. Han, J., Oztoprak, S., Parsons, R. L., & Huang, J. (2007), Numerical analysis of foundation columns to support widening of embankments, *Computers and Geotechnics*, 34(6), 435-448.
- [8]. Maclean, D. J., & Lewis, W. A. (1963), British practice in the design and specification of cement-stabilized bases and subbases for roads, *Highway Research Record*, 36.
- [9]. Manoharan, N., & Dasgupta, S. P. (1995), Bearing capacity of surface footings by finite elements. *Computers & Structures*, 54(4), 563-586.
- [10]. Mitchell, J. K., & Freitag, D. R. (1959), A review and evaluation of soil-cement pavements, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 85(6), 49-73.
- [11]. Ni, P., Yi, Y., & Liu, S. (2019), Bearing capacity of composite ground with soil-cement columns under earth fills: Physical and numerical modeling, *Soils and Foundations*, 59(6), 2206-2219.
- [12]. Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1974), *Foundation engineering*, vol.10, Wiley New York.
- [13]. TCVN 9403:2012 (2012), Tiêu chuẩn Quốc gia, Gia cố nền đất yếu - Phương pháp trụ đất xi măng, Viện khoa học công nghệ xây dựng - Bộ Xây dựng.
- [14]. TCVN 9906:2014 (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.
- [15]. Terashi, M. (1997), Theme lecture: Deep mixing method-Brief state of the art. *Proc. 14th ICSMFE*, 4, 2475-2478.
- [16]. Von Soos, P. (1990), *Properties of soil and rock*, Grundbautaschenbuch Part, 4.