PHÂN TÍCH SỐ ỨNG XỬ CỦA CÔNG TRÌNH ĐƯỜNG TRÊN NỀN ĐẤT YẾU ĐƯỢC XỬ LÝ BẰNG BẤC THẤM KẾT HỢP TRỤ XI MĂNG ĐẤT

NGUYỄN BÁ PHÚ*, NGUYỄN THỊ PHƯƠNG LINH, TRẦN VIỆT PHƯƠNG ĐÔNG, NGUYỄN THỊ HẢI YẾN

Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Công nghiệp thành phố Hồ Chí Minh,

**Tác giả liên hệ: nguyenbaphu@iuh.edu.vn*

DOIs: https://doi.org/10.46242/jstiuh.v61i07.4730

Tóm tắt. Xử lý nền đất yếu luôn là chủ đề rất khó khăn khi thiết kế và thi công các công trình giao thông đi qua các khu vực có lớp đất yếu và chiều dày lớn. Gần đây có một số nơi trên thế giới sử dụng phương pháp gia cố nền bằng cách sử dụng đồng thời bấc thấm và trụ xi măng đất nhằm giảm độ lún và tăng tốc độ cố kết trong nền. Mặc dầu ưu điểm của phương pháp này đề cập nhiều trong các nghiên cứu trước đây, tuy nhiên phương pháp tính toán cho phương pháp này để sử dụng trong thực tế chưa được nhiều sự quan tâm trong lĩnh vực địa kỹ thuật. Bài báo này trình bày một mô hình biến dạng phẳng sử dụng để mô phỏng số cho công trình đường trên nền đất yếu gia cố đồng thời bằng bấc thấm và trụ xi măng đất, trong đó hệ số thấm của đất nền và các thông số trụ xi măng đất (như độ cứng, bề rộng) được chuyển đổi từ trường hợp thực tế sang mô hình tương đương trong bài toán biến dạng phẳng. Các công thức chuyển đổi trong mô hình phẳng dựa vào các nghiên cứu trước đây đối với nền chỉ gia cố bấc thấm hoặc chỉ gia cố trụ xi măng đất. Tuy nhiên sự kết hợp này tạo ra một phương pháp mới để có thể sử dụng trong bài toán biến dạng phẳng để dự báo ứng xử của nền đường được gia cố bằng cách kết hợp bấc thấm và trụ xi măng đất. Vai trò của bấc thấm trong nền hỗn hợp cũng được khảo sát và phân tích qua ứng xử chuyển vị ngang của nền đất. Kết quả phân tích cho thấy độ lún thu được từ mô hình phẳng phù hợp với kết quả quan trắc hiện trường. Bấc thấm được sử dụng trong phương pháp kết hợp có thể làm giảm đáng kể chuyển vị ngang của nền đất yếu. Qua nghiên cứu này, tác giả kiến nghị sử dụng phương pháp xử lý nền đất yếu bằng phương pháp kết hợp trong điều kiện Việt Nam, đặc biệt những công trình đắp cao trên đất yếu có chiều dày lớn như đường dẫn đầu cầu.

Từ khóa. Bấc thấm, trụ xi măng đất, nền đất yếu, lún, chuyển vị ngang.

1 GIỚI THIỆU

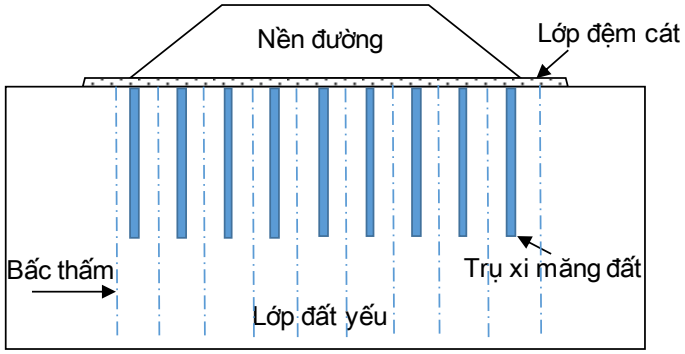
Lún dư kéo dài theo thời gian là hiện tượng khá phổ biến xảy ra ở các công trình giao thông trên nền đất yếu ở Việt Nam cũng như trên thế giới. Lún dư theo thời gian là yếu tố chính có thể làm mất ổn định công trình và ảnh hưởng trực tiếp và đáng kể đến chất lượng khai thác công trình, qua đó làm tăng chi phí bảo dưỡng. Trong kỹ thuật xử lý đất yếu, trụ xi măng đất (trụ XMĐ) và bấc thấm (PVD) là hai giải pháp phổ biến nhất hiện nay. Trụ XMĐ được sử dụng gia cố nền đất nhằm giảm độ lún và tăng sức chịu tải của nền đất, trong khi đó bấc thấm kết hợp với gia tải trước được sử dụng để tăng tốc độ cố kết trong nền [1-3].

Bấc thấm là một loại vật liệu thoát nước thẳng đứng được chế tạo sẵn, cấu tạo bởi lõi bên trong bằng nhựa dẻo và được bọc bên ngoài bởi lớp vải tổng hợp. Lõi bên trong có chức năng như rãnh dẫn nước cho PVD, lớp vải tổng hợp bên ngoài có chức năng bảo vệ lõi bên trong tránh sự xâm nhập từ lớp đất xung quanh [4-5]. Thông thường bấc thấm được cắm xuống đất bằng một ống dẫn hướng bằng thép. Dưới tải trọng bên ngoài sẽ tạo ra sự chênh lệch gradient thủy lực, do đó nước trong lỗ rỗng của đất nền có thể thấm ngang và hướng vào trong bấc thấm, sau đó lượng nước thu từ đất nền xung quanh sẽ được thoát ra ngoài theo phương thẳng đứng, dọc theo chiều dài của bấc thấm. Có thể thấy rằng bấc thấm được gia cố trong nền đóng vai trò như biên thoát nước nhân tạo trong nền và vì thế giảm chiều dài đường thấm của nước lỗ rỗng, từ đó tốc độ cố kết trong nền đất yếu sẽ được tăng lên. Hầu hết các công trình xử lý đất yếu đều sử dụng công nghệ bấc thấm nhằm tăng tốc độc cố kết trong nền. Ưu điểm của công nghệ PVD là thời gian thi công nhanh, thi công dễ dàng. Khi đó độ lún trong nền đất yếu hầu như xảy ra trong giai đoạn thi công. Tuy nhiên nền đất yếu gia cố bấc thấm không thể tăng sức chịu tải của đất nền và sự ổn định mái dốc cho nền đắp như các giải pháp gia cố khác như trụ đá, trụ vôi hay trụ XMĐ. Đặc biệt khi các công trình đường có chiều cao đắp lớn (ví dụ như đường dẫn đầu cầu), vấn đề liên quan đến ổn định nền đắp luôn được quan tâm và đòi hỏi phải có giải pháp an toàn nhất.

© 2023 Trường Đại học Công nghiệp thành phố Hồ Chí Minh

Trong kỹ thuật gia cố nền đất yếu, trụ XMĐ được sử dụng nhằm giảm độ lún tổng của nền đường và tăng độ ổn định mái dốc. Trụ XMĐ được hình thành bởi hỗn hợp đất nguyên trạng nơi gia cố và xi măng được phun xuống nền đất bởi thiết bị khoan phun. Trụ XMĐ có thể được tạo ra bởi phương pháp trộn khô và trộn ướt (sử dụng vữa xi măng). Trụ XMĐ được sử dụng nhằm giảm độ lún tổng của nền đất, tăng sức chịu tải và ổn định của nền đất yếu [6]. Trụ XMĐ thường được lựa chọn để sử dụng vì có tính kinh tế cao, giảm thiểu ô nhiễm môi trường, có khả năng sử dụng vật liệu tại chỗ (đất tự nhiên hiện trạng). Tuy nhiên trụ XMĐ không có chức năng tăng tốc độ cố kết trong nền vì hệ số thấm của trụ XMĐ rất nhỏ so với đất. Do đó, khi chiều dày lớp đất yếu lớn, việc sử dụng trụ xi măng đất sẽ gặp những vấn đề như phải tăng chiều dài trụ, giảm khoảng cách trụ. Khi đó việc sử dụng phương pháp này sẽ tăng chi phí trong xây dựng [7]. Nhìn chung, mặc dầu giải pháp xử lý nền đất yếu bằng trụ XMĐ và bấc thấm đã được sử dụng rất phổ biến hiện nay, tuy nhiên chúng có những nhược điểm khi sử dụng, đó là bấc thấm không thể tăng ổn định nền đắp và trụ xi măng đất không thể tăng nhanh quá trình lún cố kết trong nền.

Gần đây, một số nơi trên thế giới (đặc biệt ở Trung Quốc) đã kết hợp hai phương pháp này nhằm tăng tốc độ cố kết và đồng thời làm giảm độ lún của đất nền, qua đó giảm yếu tố lún dư kéo dài của các công trình giao thông. Xu et al. [8] đề xuất phương pháp xử lý nền đất yếu bằng cách sử dụng kết hợp đồng thời trụ XMĐ và bấc thấm. Trong giải pháp kết hợp này, bấc thấm sẽ được cắm xuống trước khi thi công trụ XMĐ. Trụ XMĐ đóng vai trò để tăng sức chịu tải và giảm độ lún của nền đất yếu, trong khi đó vai trò của bấc thấm là tăng tốc độ cố kết trong nền. Hình 1 minh họa mặt cắt ngang của nền đường khi được gia cố đồng thời trụ XMĐ và bấc thấm, hai loại vật liệu gia cố này có thể bố trí theo sơ đồ hình vuông hoặc tam giác.



Hình 1: Minh họa mặt cắt ngang nền đất yếu gia cố trụ xi măng đất và bấc thấm

Phân tích và dự báo lún cố kết của nền đất yếu dưới công trình luôn là vấn đề thách thức lớn đối với kỹ sư thiết kế trong ngành địa kỹ thuật xây dựng [1-2, 9]. Mặc dầu lý thuyết tính toán cho giải pháp bấc thấm và trụ xi măng đất được đề cập rất nhiều trong các nghiên cứu trước đây [1-5, 10-11], lý thuyết tính toán và phân tích lún cố kết cho giải pháp gia cố nền bằng phương pháp kết hợp giữa bấc thấm và trụ XMĐ vẫn chưa được chú ý nhiều. Đối với lý thuyết tính toán và phân tích ứng xử lún của nền đất yếu gia cố bằng phương pháp kết hợp trụ XMĐ và bấc thấm, có một số đề xuất sử dụng phương pháp lời giải giải tích [12-14] để tính toán độ cố kết trung bình của nền đất. Nhìn chung các lời giải giải tích chỉ phù hợp để tính toán ứng xử lún cố kết một chiều và có thể hợp lý để xét một khối trụ tròn (mô hình đối xứng trục) tại tâm nền đường. Trong khi thực tế chuyển vị ngang cũng như ổn định nền đắp cũng cần phải dự báo nhằm kiểm soát tính an toàn trong khi thi công và khai thác. Thực tế khi đất nền bên dưới bao gồm quá nhiều lớp đất có chiều dày thay đổi phức tạp (nền không đồng nhất) hoặc quá trình thi công diễn ra theo thời gian thì áp dụng lời giải giải tích trở nên khó khăn cho kỹ sư thiết kế. Khi đó mô hình số với ưu điểm có thể xem xét các yếu tố phức tạp trong điều kiện công trình sẽ được đề nghị sử dụng trong thiết kế. Về nguyên tắc, mô hình số ba chiều (3-D) phải được xây dựng để có thể đánh giá các điều kiện thực tế, tuy nhiên mô hình 3-D sẽ tốn nhiều thời gian trong tính toán, mô phỏng [10, 15]. Do đó mô hình biến dạng phẳng (mô hình hai chiều, 2-D) sẽ được ưu tiên để sử dụng.

Đối với bài toán 2-D, các nghiên cứu trước đây [10, 15-17] đã đề xuất một số mô hình số để phân tích cố kết cho nền đất yếu gia cố bấc thấm. Các mô hình 2-D hay sử dụng nhất là mô hình 2-D với hệ số thấm ngang tương đương [10, 16] và hệ số thấm đứng tương đương [17]. Trong số đó, phương pháp mô phỏng theo hệ số thấm tương đương theo phương đứng thường được sử dụng hơn vì tính đơn giản và có thể rút

ngắn thời gian mô phỏng trong sử dụng thực tế. Tuy nhiên phương pháp này chưa được áp dụng cho bài toán gia cố nền bằng giải pháp kết hợp giữa trụ xi măng đất và bấc thấm.

Mục tiêu chính của bài báo này là thiết lập một mô hình số 2-D tương đương để phân tích lún cố kết cho nền đất yếu được gia cố bằng giải pháp trụ xi măng đất và bấc thấm. Mô hình đề xuất sẽ dựa vào mô hình hệ số thấm tương đương theo phương đứng của Chai et al. [17], trong đó xét tới độ cứng của trụ XMĐ trong nền hỗn hợp. Để tìm thấy ưu điểm của giải pháp gia cố nền này, một số yếu tố như sự ổn định của nền đường, chuyển vị ngang sẽ được khảo sát và so sánh trong trường hợp có và không có sử dụng bấc thấm.

2 THIẾT LẬP MÔ HÌNH SỐ TƯƠNG ĐƯƠNG

2.1 Hệ số thấm tương đương theo phương đứng

Đối với nền đất yếu được gia cố bằng bấc thấm, Chai et al. [17] đã xây dựng mô hình số 2-D, trong đó hệ số thấm theo phương đứng được xác định dựa vào phương trình như sau:

$$k_{ve} = \left(1 + \frac{2.5H^2 k_h}{\mu D_e^2 k_v}\right) k_v \tag{1}$$

trong đó, k_h, k_v là lần lượt là hệ số thấm theo phương ngang và phương đứng của nền đất, H là chiều dày của lớp đất yếu được gia cố bấc thấm. D_e là đường kính của khối trụ tròn của bài toán mô hình đối xứng trục [1]. Hệ số μ kể đến ảnh hưởng khoảng cách của bấc thấm, sự xáo trộn trong quá trình cắm bấc thấm, hệ số này được tính toán theo phương trình như sau:

$$\mu = \ln\left(\frac{n}{s}\right) + \frac{k_h}{k_s}\ln(s) - 0.75 + \pi\frac{2H^2 k_h}{3q_w} \tag{2}$$

ở đây, $n = d_e / d_w$, với r_e và r_w lần lượt là đường kính của vùng đất ảnh hưởng và đường kính quy đổi của bấc thấm. q_w là khả năng thoát nước theo phương đứng của bấc thấm. k_s là hệ số thấm của vùng đất bị xáo trộn do quá trình cắm bấc thấm và $s = d_s / d_w$ trong đó d_s là đường kính tương đương của vùng xáo trộn của bấc thấm.

Trong giải pháp gia cố nền bằng trụ XMĐ, vai trò trụ XMĐ hầu như chỉ tăng sức chịu tải và sự ổn định của nền (độ cứng của nền tăng lên do sự tồn tại của trụ xi măng đất), do đó trong nghiên cứu này hệ số thấm của trụ XMĐ được giả sử bằng hệ số thấm của đất tự nhiên (k_h). Thực tế hệ số thấm trụ xi măng đất khác và nhỏ hơn so với đất nền tự nhiên. Tuy nhiên nếu xét một unit cell cho hệ thống trụ xi măng đất, bấc thấm và đất tự nhiên (ví dụ như phương pháp tính của Lu et al. [13]) thì diện tích phần trụ xi măng đất rất nhỏ (vì khoảng cách trụ khá lớn đối với phương pháp xử lý đất yếu này). Do đó sự ảnh hưởng của hệ số thấm trụ xi măng đất đến quá trình cố kết hầu như không đáng kể [13]. Vì lý do này, nhóm tác giả đã giả sử hệ số thấm trụ xi măng đất như đất nền xung quanh nhằm đơn giản quá trình mô phỏng. Do đó trong mô hình 2-D tương đương của nền đất yếu gia cố trụ XMĐ và bấc thấm, hệ số thấm theo phương đứng tương đương sẽ được áp dụng với Phương trình 1 (PT 1).

2.2 Kích thước và độ cứng của trụ XMĐ trong mô hình phẳng

Trong nghiên cứu này, bề rộng tương đương của trụ XMĐ trong mô hình biến dạng phẳng (như Hình 2) thu được bằng cách cân bằng từ tỷ số diện tích giữa hai mô hình biến dạng phẳng và mô hình đối xứng trục. Nguyen et al. [10] cũng sử dụng điều kiện chuyển đổi này đối với bề rộng tương đương của bấc thấm trong mô hình phẳng, và cho kết quả phù hợp với hiện trường. Bề rộng tương đương của trụ xi măng đất mô hình phẳng được cho bởi phương trình sau:

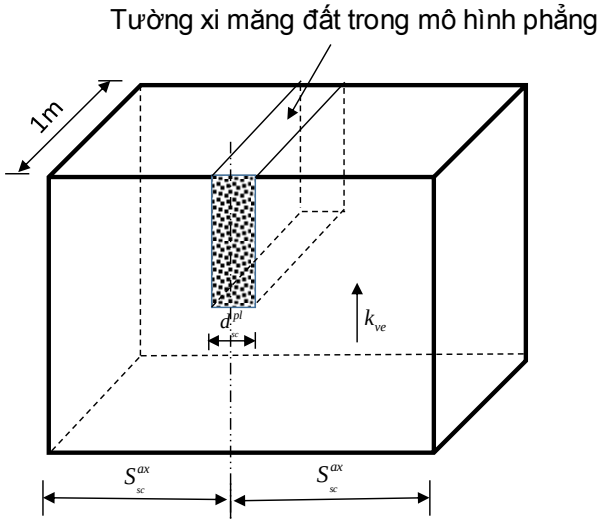
$$d_{sc}^{pl} = C\frac{d_{sc}^{ax}}{S_{sc}^{ax}} \tag{3}$$

ở đây d_{sc}^{ax} và S_{sc}^{ax} lần lượt là đường kính và khoảng cách của trụ XMĐ trong mô hình đối xứng trục (hay là trong trường hợp 3-D); C là hệ số xét tới sơ đồ bố trí của trụ XMĐ, ở đây $C = \pi/4$ khi gia cố trụ XMĐ theo dạng hình vuông và $C = \pi/2\sqrt{3}$ khi gia cố theo dạng hình tam giác.

Deng [4] đề xuất độ cứng tương đương của trụ XMĐ trong mô hình biến dạng phẳng như sau:

$$E_{sc}^{pl} = E_{soil}\left(1-\frac{\pi}{4}\frac{d_{sc}^{ax}}{S_{sc}^{ax}}\right)+E_{sc}^{ax}\frac{\pi}{4}\frac{d_{sc}^{ax}}{S_{sc}^{ax}} \quad (4)$$

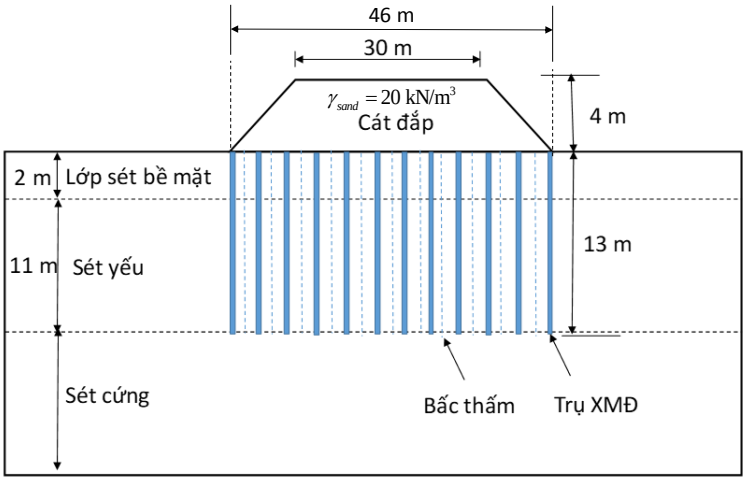
ở đây, E_{sc}^{pl} và E_{sc}^{ax} lần lượt là mô đun đàn hồi của hỗn hợp xi măng đất trong mô hình phẳng và trong mô hình đối xứng trục. E_{soil} là mô đun đàn hồi của đất.



Hình 2: Mô hình biến dạng phẳng cho nền đất yếu gia cố trụ xi măng đất và bấc thấm

2.3 Đánh giá khả năng áp dụng mô hình phẳng cho bài toán thực tế

Để đánh giá khả năng áp dụng mô hình phẳng, trong phần này nhóm tác giả tiến hành phân tích lún cố kết của một trường hợp nền đường được gia cố đồng thời trụ xi măng đất và bấc thấm. Trường hợp nghiên cứu là công trình đường đắp ở Huai-yan, Trung Quốc. Đặc điểm địa chất của các lớp đất dưới công trình đường như sau: lớp sét mặt (Lớp 1) có chiều dày 2 m, bên dưới là lớp đất yếu (Lớp 2) có chiều dày 11 m và tiếp theo là lớp đất sét cứng (Lớp 3). Mực nước ngầm nằm dưới mặt đất tự nhiên 1.5 m. Công trình đường đắp cao 4 m với cát đầm chặt có trọng lượng riêng là 20 kN/m^3. Đất đắp được chia làm hai giai đoạn đắp: 2 m trong gia đoạn 1 được đắp trong 50 ngày, sau đó dành 75 ngày là thời gian chờ cố kết; 2 m còn lại ở giai đoạn 2 đắp trong 50 ngày. Mặt cắt ngang công trình đường đắp được thể hiện như Hình 3, trong đó các kích thước và số liệu dựa trên nghiên cứu của Ye et al. [12].



Hình 3: Mặt cắt ngang nền đường gia cố trụ XMĐ và bấc thấm ở công trình Huai-yan

Để giảm độ lún và tăng tính ổn định công trình đường trên lớp đất yếu, trụ xi măng đất có đường kính 0.5 m, chiều dài 13 m được sử dụng để gia cố. Trước khi thi công trụ xi măng đất, bấc thấm có chiều dài 13 m

được cắm vào nền nhằm tăng tốc độ cố kết cũng như cải thiện khả năng sử dụng tốt hơn cho trụ xi măng đất [18]. Bấc thấm và trụ XMĐ đều được bố trí dạng hình tam giác với khoảng cách 2.2 m. Các thông số để tính hệ số thấm tương đương theo phương đứng của nền trong bài toán phẳng của nền đường được thể hiện như Bảng 1. Chú ý rằng, các giá trị cho ở đây được lấy từ Ye et al. [12].

Bảng 1: Các thông số liên quan đến ứng xử của bấc thấm trong tính toán cố kết

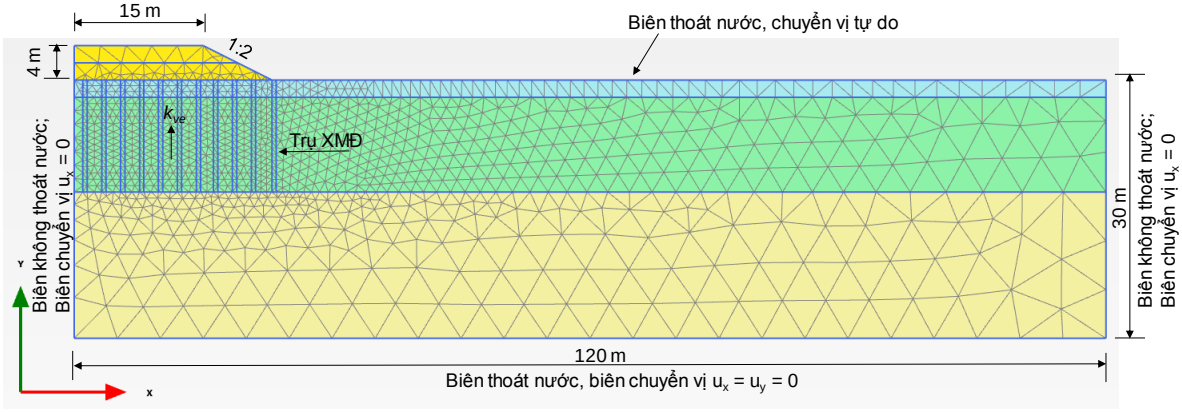
Thông số	Giá trị
d_w (m)	0.05
d_s (m)	0.1
H (m)	13
k_h/k_s	4
q_w (m^3/năm)	120

Trong nghiên cứu này, mô hình số biến dạng phẳng được thực hiện trong phần mềm Plaxis 2D Connect Edition V17 [19]. Mô hình Modified Cam Clay (MCC) được sử dụng để mô phỏng ứng xử các lớp đất sét và sét yếu và mô hình Mohr - Coulomb (MC) được sử dụng mô phỏng ứng xử lớp cát đắp và trụ xi măng đất. Các thông số đầu vào của mô hình được cho từ Bảng 2. Các số liệu được tham khảo từ Chen et al. [18] và Ye et al. [12]. Chiều rộng tương đương của trụ XMĐ được tính quy đổi từ PT (3) là 0.2 m. Ý nghĩa các thông số trong Bảng 2 như sau: e_0 là hệ số rỗng ban đầu của đất; E là mô đun đàn hồi cho mô hình MC; ν là hệ số Poisson; C_k là hệ số xét đến sự giảm hệ số rỗng của đất trong suốt quá trình cố kết, được lấy bằng $0.5e_0$ [20]; λ và κ là chỉ số nén và chỉ số nở theo mô hình MCC; M là độ dốc đường trạng thái tới hạn của mô hình MCC; k_h, k_v, k_{ve} lần lượt là hệ số thấm theo phương ngang, phương đứng và hệ số thấm tương đương được tính theo PT (1).

Bảng 2: Các thông số đầu vào của vật liệu cho mô hình phẳng trong phân tích số

Thông số	Mô hình	Chiều dày	e_0	E (MPa)	ν	C_k	λ	κ	M	$k_h = k_v$ (x10^{-3} m/day)	k_{ve} (x10^{-3} m/day)
Lớp 1	MCC	2	0.6	-	0.25	0.3	0.08	0.02	1.12	5.2	58.96
Lớp 2	MCC	11	1.25	-	0.25	0.6	0.2	0.04	1	0.38	5.23
Lớp 3	MCC	10	1	-	0.25	0.5	0.024	0.006	1	0.38	-
Cát đắp	MC	4	-	30	0.2	-	-	-	-	1000	-
XMĐ	MC	-	-	80	0.2	-	-	-	-	0.38	-

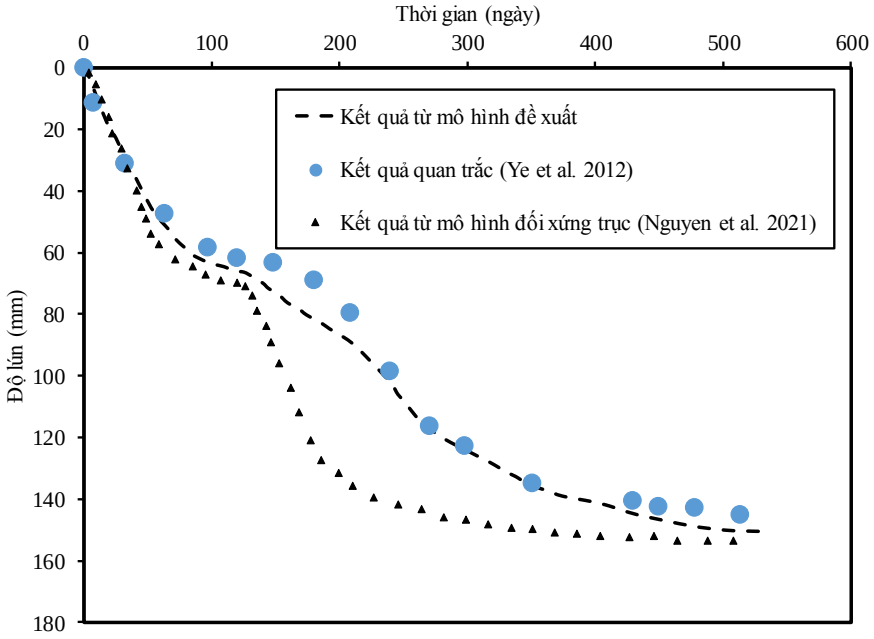
Trong mô hình biến dạng phẳng, phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng với phần tử tam giác 15 nút. Điều kiện biên của mô hình như sau: vì tính đối xứng nên một nửa nền đường được mô phỏng, biên thoát nước được gán ở biên trên và dưới của mô hình trong khi hai bên của mô hình là biên không thấm nước. Chuyển vị đứng và ngang bằng 0 tại biên dưới của mô hình, biên trên được chuyển vị tự do. Chuyển vị ngang tại biên hai bên bị khống chế. Hình 4 thể hiện đặc điểm mô hình phẳng đối với phân tích phần tử hữu hạn cho nền đường gia cố trụ XMĐ và bấc thấm.



Hình 4: Đặc điểm mô hình phẳng tương đương cho nền gia cố bấc thấm và trụ XMĐ

Các giai đoạn tính toán và mô phỏng trong Plaxis lần như sau: (1) tính toán trạng thái đất nền ban đầu; (2) mô phỏng phần tử trụ xi măng đất; (3) đắp tải lần một với chiều cao đắp 2 m trong 50 ngày; (4) tính toán cố kết với 75 ngày; (5) đắp tải lần hai với chiều cao đắp 2 m còn lại cũng trong 50 ngày; (6) tính toán cố kết cho nền.

Hình 5 thể hiện kết quả tính toán lún tại tâm nền đường thu được từ mô hình biến dạng phẳng. Kết quả được so sánh với kết quả quan trắc lún tại hiện trường [12] và kết quả lún thu được từ mô hình đối xứng trục [14]. Kết quả cho thấy độ lún thu được từ mô hình phẳng trong nghiên cứu hiện tại phù hợp với kết quả quan trắc hiện trường. Trong khi đó mô hình đối xứng trục cho kết quả lún lớn hơn kết quả quan trắc và tốc độ cố kết nhanh hơn so với kết quả thu được từ mô hình hiện tại. Điều này được giải thích như sau: trong mô hình đối xứng trục, mặc dầu kích thước và độ cứng của trụ XMĐ được mô phỏng theo thực tế, tuy nhiên bấc thấm được mô phỏng như biên thoát nước (sử dụng phần tử drain-element trong Plaxis). Khi đó các yếu tố như độ cản thấm, sự xáo trộn bị bỏ qua. Do đó tốc độ cố kết trong mô hình đối xứng trục lớn hơn so với mô hình biến dạng phẳng. Do đó có thể thấy rằng, mô hình biến dạng phẳng trong nghiên cứu này có thể áp dụng trong thực tế tính toán cho nền gia cố trụ XMĐ và bấc thấm và cho kết quả hợp lý.



Hình 5: Kết quả lún ở mặt đất tính toán tại tâm nền đường

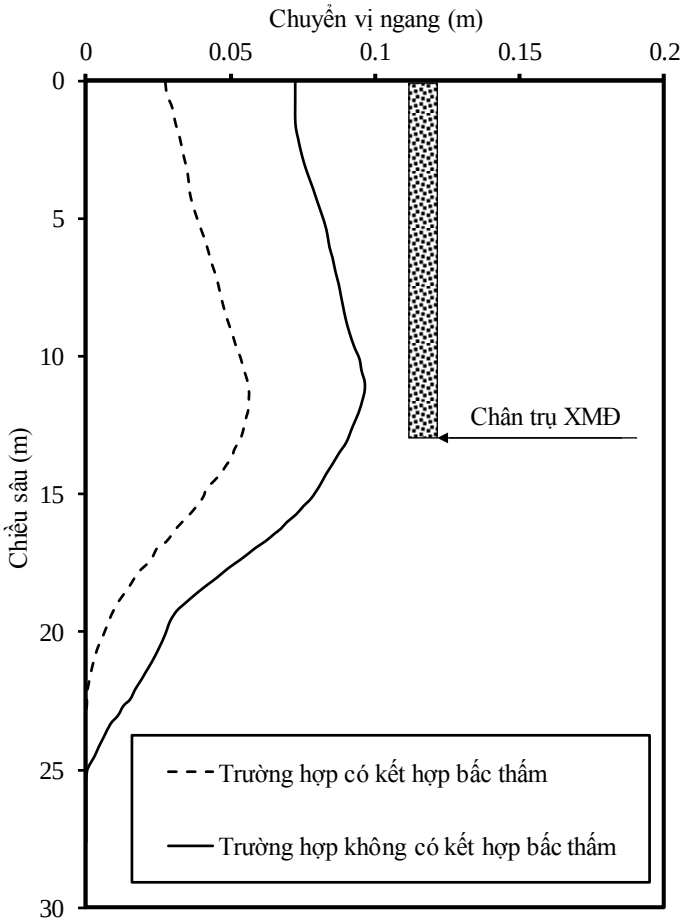
3 ẢNH HƯỞNG CỦA BẤC THẤM ĐẾN ỨNG XỬ CHUYỂN VỊ NGANG CỦA NỀN ĐƯỜNG

Trong phần này, nhóm nghiên cứu tiến hành đánh giá ảnh hưởng của bấc thấm trong nền đường được gia cố bằng phương pháp kết hợp trụ XMĐ và bấc thấm. Để thấy được ảnh hưởng của bấc thấm, mô hình biến dạng phẳng trong nghiên cứu này được sử dụng mô phỏng nền đường cho hai trường hợp có và không có sử dụng bấc thấm. Kết quả chuyển vị ngang tại chân nền đường trong hai trường hợp có và không có sử dụng bấc thấm được so sánh.

Chuyển vị ngang của đất nền thường được quan trắc bằng thiết bị đo chuyển vị ngang (inclinometer) tại chân mái đường đắp. Tuy nhiên số liệu đo chuyển vị ngang của đất nền ở công trình đường đắp ở Huai-yan không được đề cập trong nghiên cứu của Ye et al. [12] và cũng như các nghiên cứu trước đây. Điều này có thể xảy ra vì các thiết bị đo có thể hư hỏng trong quá trình xây dựng. Do vậy chỉ có kết quả phân tích số được trình bày trong trường hợp khảo sát ảnh hưởng của bấc thấm đến chuyển vị ngang của nền. Hình 6 trình bày kết quả số cho chuyển vị ngang của nền đường trong hai trường hợp có (trường hợp sử dụng phương pháp kết hợp) và không có sử dụng bấc thấm (trường hợp chỉ sử dụng trụ XMĐ) tại thời điểm hoàn thành công trình khi chiều cao đắp đạt 4 m (tại thời điểm 175 ngày).

Nhìn chung, chuyển vị ngang trong trường hợp này xảy ra lớn ở khu vực chân của trụ xi măng đất. Kết quả này có thể được giải thích rằng khi kết thúc giai đoạn thi công (ví dụ 175 ngày), áp lực lực nước lỗ rỗng chưa kịp tiêu tán. Điều này dẫn đến sự phát triển cường độ của đất chậm hơn so với phạm vị phía trên có gia cố hoàn toàn bằng trụ xi măng đất. Ngoài ra, trong phạm vi nền có gia cố hoàn toàn trụ xi măng đất (ví dụ từ mặt đất đến 13m), biến dạng cắt xảy ra nhỏ do sự hiện diện của hệ thống trụ xi măng đất. Biến dạng này có xu hướng tăng dần đến chân trụ. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với nghiên cứu trước đây của Ye et al. [21].

Kết quả còn cho thấy rằng tại độ sâu bất kỳ, chuyển vị ngang trong trường hợp không có bấc thấm lớn hơn nhiều so với trường hợp sử dụng bấc thấm. Kết quả này rất phù hợp với một số nghiên cứu trước đây đối với nền đường được xử lý gia cố trụ XMĐ [21-22]. Kết quả có thể giải thích bằng sự phát triển cường độ của hai nền đất có và không có bấc thấm. Trong trường hợp nền gia cố bấc thấm, quá trình cố kết xảy ra nhanh hơn, do đó sự phát triển cường độ trong nền sẽ làm giảm biến dạng cắt dưới tải trọng công trình. Qua đó sẽ làm giảm chuyển vị ngang. Ngoài ra khi có bấc thấm, sự phát triển ứng suất có hiệu trong nền sẽ lớn hơn so với trường hợp không có bấc thấm. Điều này sẽ làm tăng khả năng truyền lực từ đất sang trụ XMĐ (hiện tượng hiệu ứng vòm). Đây cũng là nguyên nhân có thể làm giảm chuyển vị ngang trong nền có bấc thấm.



Hình 6: Chuyển vị ngang của nền đường

4 KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đề xuất một mô hình biến dạng phẳng để phân tích ứng xử của nền đất yếu dưới công trình đường được gia cố bằng phương pháp kết hợp bấc thấm và trụ xi măng đất. Dựa vào kết quả phân tích số của độ lún và chuyển vị ngang thu được từ mô hình đề xuất, kết quả được so sánh với các số liệu quan trắc và kết quả từ mô hình đối xứng trục của tác giả, từ đó có thể rút ra những kết luận chính như sau:

- Sử dụng mô hình biến dạng phẳng trong nghiên cứu này cho kết quả phù hợp với số liệu quan trắc ở hiện trường. Mô hình trong nghiên cứu có khả năng ứng dụng tốt trong thực tế khi tiến hành thiết kế công trình xử lý đất yếu trong trường hợp nền gia cố đồng thời trụ xi măng đất và bấc thấm.
- Sử dụng phương pháp gia cố nền bằng cách kết hợp bấc thấm và trụ xi măng đất có thể tăng tốc độ cố kết trong nền đồng thời giảm đáng kể chuyển vị ngang của nền đất yếu. Điều này làm tăng tính ổn định của công trình trong quá trình thi công cũng như khai thác.
- Kết quả nghiên cứu này cho thấy những lợi ích khi sử dụng phương pháp gia cố nền bằng cách kết hợp bấc thấm và trụ xi măng đất. Do đó kiến nghị sử dụng phương pháp này trong lĩnh vực xử lý nền đất yếu trong điều kiện Việt Nam, đặc biệt những công trình đắp cao trên địa chất đất yếu và có chiều dày lớn như đường dẫn đầu cầu.

5 LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường đại học Công Nghiệp Tp. HCM trong Đề tài có mã số 21.2XD01.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Hansbo, S., "Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains," *10th ICSMFE, Anonymous, ed*., A.A. Balkema, Rotterdam-Boston, 1981, 677-682.
[2] Nguyen, B-P. and Kim, Y-T., "An analytical solution for consolidation of PVD-installed deposit considering nonlinear distribution of hydraulic conductivity and compressibility,". *Engineering Computations.* 36(2): 707-730, 2019.
[3] Nguyen, B.-P., Pradhan, A.M.S., Nguyen, T.H., Doan, N.-P., Nguyen, V.-Q. and Huynh, T.-C., "Large-strain consolidation analysis of PVD-installed soft soil considering the discharge capacity variation according to depth and time," *Engineering Computations*, 38 (4):1652-1676, 2021.
[4] Deng, Y.F., "*Interaction Principle between Deep Mixing Columns and Surrounding Soils and Determination Method of Column Spacing*," Ph.D. Dissertation, Southeast University, Nanjing, China, in Chinese, 2005.
[5] Kim, Y-T., Nguyen, B-P., and Yun, D-H, "Analysis of Consolidation Behavior of PVD-Improved Ground Considering a Varied Discharge Capacity," *Engineering Computations*, 35(3): 1183-1202, 2018.
[6] Zhang Z, Ye G, Xing H., "Consolidation analysis of soft soil improved with short deep mixed columns and long prefabricated vertical drains (PVDs)," *Geosynthetics International* 22(5):1–14, 2015.
[7] Shi, M., Pang, F. & Zhang, B., "Behaviors of pile-supported embankments in highway engineering," *Journal of Southeast University* (English Edition), 21, No. 4, 495–499, 2005.
[8] Xu, C., Ye, G. B., Jiang, Z. S. & Zhou, Q. Z., "Research on mechanism of combined improvement of soft soils based on field monitoring," *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 28, No. 7, 918–921 (in Chinese), 2006.
[9] Kim, Y-T., Nguyen, B-P., and Yun, D-H., "Effect of Artesian Pressure on Consolidation Behavior of Drainage-installed Marine Clay Deposit," *ASCE*'*Journal of Materials in Civil Engineering*: 30(8): 04018156-1-13, 2018.
[10] Nguyen, B-P., Yun, D-H., and Kim, Y-T.,"An Equivalent Plane Strain Model of PVD-Improved Ground*." Computers and Geotechnics* 103: 32-42, 2018.
[11] Nguyen, B-P. and Kim, Y-T., "Radial consolidation of PVD-installed normally consolidated soil with discharge capacity reduction using large-strain theory," *Geotextiles and Geomembranes*, 47(2): *243-254,* 2019.
[12] Ye GB, Zhang Z, Xing HF, Huang MS, Consolidation XC., "A composite foundation with soil- cement columns and prefabricated vertical drains," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 71(1):87–98, 2012.
[13] Lu, M.M., Jing H.W., Zhou, A. and Xie K.H., "Analytical models for consolidation of combined composite ground improved by impervious columns and vertical drains," *Int J Numer Anal Methods Geomech*. 1–18, 2018.
[14] Nguyen BP., Ngo P.C., Nguyen Q.D., Le T.T., Doan NP., "A Consolidation Solution of Soft Soil Deposits Improved with Prefabricated Vertical Drains and Deep Cement Mixing Columns," *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 145. Springer, Singapore, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0053-1_10.
[15] Tran TA, Mitachi T., "Equivalent plane strain modeling of vertical drains in soft ground under embankment combined with vacuum preloading," *Comput Geotech* 35:655–72, 2008.
[16] Indraratna B, Redana IW., "Plane strain modeling of smear effects associated with vertical drains. *J Geotech Geoenviron Eng*, ASCE;123(5):474–8, 1997.
[17] Chai JC, Shen SL, Miura N, Bergado DT., "Simple method of modeling PVD improved subsoil," *J Geotech Geoenviron Eng*. 127(11):965–72, 2001.
[18] Chen, L., Liu, S., Han, J., Zhang, D., "Numerical analysis of consolidation of soft ground improved by the DJM-PVD combined method," *In: Contemporary Topics in Ground Modification*, Problem Soils, and Geo-support, pp. 321e328, 2009. http:// dx.doi.org/10.1061/41023(337)41.

[19] Brinkgreve, R. B. J., Zampich, L.M., and Ragi Manoj, N. 2017. PLAXIS CONNECT Edition V17. Finite Element Code for soil and Rock Analyses. Rotterdam: A. A. Balkema.
[20] Tavenas, F., Tremblay, M., Larouche, G., Leroieil, S., "In-situ measurement of permeability in soft clays," *ASCE Special Conference on Use of In-situ Tests in Geotechnical Engineering*. ASCE, NewYork, 1034–1048, 1986.
[21] Ye GB, Zhang Z, Han J, Xing HF, Huang MS, Xiang PL, "Performance evaluation of an embankment on soft soil improved by deep mixed columns and prefabricated vertical drains," Journal of Performance of constructed facilities (ASCE). 27(5):614–623, 2013.
[22] Liu K.-W, Rowe R. K., "Numerical modelling of prefabricated vertical drains and surcharge on reinforced floating column-supported embankment behavior," Geotextiles and Geomembranes 43: 493–505, 2015.

NUMERICAL ANALYSIS OF EMBANKMENT BEHAVIOR ON SOFT GROUND IMPROVED BY PVD AND SOIL-CEMENT COLUMNS

NGUYEN BA-PHU*, NGUYEN THI PHUONG LINH, TRAN VIET PHUONG DONG, NGUYEN THI HAI YEN
Faculty of Civil Engineering, Industrial University of Ho Chi Minh City
**Corresphonding author: nguyenbaphu@iuh.edu.vn*

Abstract. Soft soil improvement is always a very challenging problem in the design and building for infrastructure construction on soft and thick clay deposits. Recently, there are a number of embankment constructions around the world using the improvement method by combination of prefabricated vertical drains and soil cement columns to reduce settlement and speed up consolidation rate in the soft soils. Although the advantages of this method have been mentioned in the previous studies, the analysis method of this method for applying in the practice has not received much attention in the geotechnical engineering field. This paper presents an equivalent plane strain model in numerical analysis of embankment on soft ground reinforced simultaneously by prefabricated vertical drains and soil cement columns, in which the permeability coefficient of the ground soil and other parameters of soil cement columns (i.e., stiffness, width in plane strain model) are converted from the in-situ condition into the equivalent 2-D model. The conversion formulas in the current model are based on the previous studies for the cases of soft soil reinforced by prefabricated vertical drains only or reinforced by soil cement columns only. However, this combination creates a new solution that can be used in the equivalent plane strain model to predict the behavior of the soft ground improved by combining the prefabricated vertical drains and soil cement columns. The role of the prefabricated vertical drains in the composite foundation is also investigated and analyzed through the horizontal displacement behavior of the subsoil. The analysis results show that the settlement obtained from the presented model is in good agreement with the field data. The prefabricated vertical drains used in the combined method can significantly reduce the lateral displacement of soft ground. By this study, the combined method is recommended to apply in Vietnam, especially for the embankment construction on soft thick clay deposits.

Keywords. Prefabricated vertical drain, soil cement column, soft soil, settlement, lateral displacement.

Ngày nhận bài: 17/03/2022
Ngày chấp nhận đăng: 06/05/2022