

PHÂN TÍCH ỨNG XỬ CỔ KẾT NỀN ĐẤT YẾU GIA CỔ PVD CÓ XÉT ĐẾN SỰ GIẢM KHẢ NĂNG THOÁT NƯỚC PHI TUYẾN THEO CHIỀU SÂU

Nguyễn Bá Phú^{a,*}

^aKhoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh,
12 đường Nguyễn Văn Bảo, quận Gò Vấp, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 27/05/2020, Sửa xong 22/06/2020, Chấp nhận đăng 30/06/2020

Tóm tắt

Nhiều nghiên cứu cho thấy rằng tốc độ cổ kết nền đất yếu có gia cố bắc thấm (PVD) chịu ảnh hưởng trực tiếp tới khả năng thoát nước của PVD. Tuy nhiên, khả năng thoát nước của PVD (q_w) thường giảm đáng kể theo độ sâu cắm bắc, điều này dẫn đến làm chậm quá trình cổ kết trong nền. Bài báo này tiến hành phân tích cổ kết thấm đối xứng trục của khối đất trụ tròn có gia cố PVD, trong đó q_w được xem như giảm phi tuyến theo chiều sâu cắm PVD. Kết quả phân tích cho thấy rằng sự giảm phi tuyến theo chiều sâu của q_w gây cản trở đáng kể cho quá trình cổ kết của đất nền, và kết quả này thể hiện rõ hơn ở độ sâu lớn hơn trong nền đất yếu. Tuy nhiên, q_w càng lớn thì sự ảnh hưởng này càng nhỏ. Lời giải giải tích được sử dụng phân tích các công trình thực tế với trường hợp chiều dày lớp đất yếu lớn, kết quả cho thấy rằng việc dự đoán ứng xử cổ kết xét đến sự giảm phi tuyến của q_w cho kết quả phù hợp với dữ liệu quan trắc tại hiện trường.

Từ khoá: khả năng thoát nước; ứng xử cổ kết; độ thấm của đất; nền gia cố bắc thấm; lời giải giải tích.

ANALYSIS OF CONSOLIDATION BEHAVIOR OF PVD-IMPROVED GROUND CONSIDERING NON-LINEAR REDUCTION OF DISCHARGE CAPACITY WITH DEPTH

Abstract

Many researchers reported that consolidation rate of prefabricated vertical drain (PVD)-installed ground is closely related to the discharge capacity of PVD (q_w), which decreases with increasing lateral effective stress. Therefore, the consolidation procedure of PVD-improved ground can be delayed due to the reduction of q_w . This paper carried out an analysis of consolidation of PVD-improved ground considering a variation of q_w , in which the nonlinear reduction of q_w with depth was considered. The analysis results indicated that the consolidation of PVD-improved ground was significantly delayed with nonlinear reduction of q_w . This result was obvious at deep depth in ground. The result also showed that when the q_w increased, the effects of reduction of q_w with depth on consolidation behavior were insignificant. The analysis was performed on field behavior of embankments on soft deposits with a thick soft ground. The results obtained from the analytical solution considering the nonlinear reduction of q_w were in good agreement with the observed data.

Keywords: discharge capacity; consolidation behavior; hydraulic conductivity; PVD-improved ground; analytical solution.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(3V\)-08](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(3V)-08) © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Bắc thấm (PVD) kết hợp với gia tải trước hoặc bơm hút chân không thường được sử dụng trong kỹ thuật gia cố nền đất yếu nhằm tăng tốc độ cổ kết và cường độ của nền đất yếu [1–7]. Trong quá

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: nguyenbaphu@iuh.edu.vn (Phú, N. B.)

trình cổ kết của nền đất yếu, nước lỗ rỗng thoát theo phương ngang đến PVD, lượng nước sau đó được dẫn lên trên mặt thoát nước theo lõi của PVD. Do đó có thể thấy rằng, hiệu quả làm việc của PVD và ứng xử cổ kết của nền đất yếu phụ thuộc vào khả năng thoát nước của PVD (q_w).

Dựa vào những nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm, kết hợp với dữ liệu quan trắc ngoài hiện trường, kết quả cho thấy rằng q_w phụ thuộc nhiều yếu tố như lõi thoát nước, tiết diện ngang, áp lực hông từ nền xung quanh [8]. Qua kết quả thí nghiệm về q_w của một số loại PVD, Hansbo [9]; Rixner và cs. [10]; Chai và cs. [11] đều cho rằng q_w giảm đáng kể theo độ sâu cắm PVD. Indraratna và Redana [12] cho rằng các yếu tố liên quan đến q_w ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả dự đoán ứng xử cổ kết của đất nền. Do đó q_w cần xem xét trong thiết kế xử lý nền đất yếu.

Gần đây, một số lời giải giải tích được phát triển [13, 14] để xem xét ảnh hưởng của sự giảm q_w theo chiều sâu đến sự cổ kết của đất. Deng và cs. [13] giả định rằng q_w giảm tuyến tính theo chiều sâu. Kim và cs. [14] cho thấy rằng khi xét q_w giảm phi tuyến theo chiều sâu, kết quả dự đoán độ lún theo mô hình phẳng của Chai và cs. [15] phù hợp với độ lún quan trắc hơn so với giả thuyết q_w giảm tuyến tính. Lời giải của Kim và cs. [14], tuy được kiểm chứng tốt qua mô hình biến dạng phẳng của Chai và cs. [15], việc áp dụng trực tiếp lời giải này cho phân tích cổ kết khối đất đơn vị gia cố PVD (unit cell) chưa được thực hiện. Điều này có thể giải thích bởi việc xem xét sự giảm q_w qua nhiều lớp đất trong lời giải giải tích là rất khó khăn. Do đó mức độ ảnh hưởng của sự giảm khả năng thoát nước đến quá trình cổ kết chưa được làm rõ trong nghiên cứu của Kim và cs. [14]. Một vấn đề khác cần xem xét là mức độ ảnh hưởng của q_w phụ thuộc như thế nào vào loại PVD và giá trị q_w ban đầu của PVD.

Dựa vào lời giải của Kim và cs. [14], nghiên cứu này tiến hành đánh giá mức độ ảnh hưởng của sự giảm q_w theo chiều sâu cắm PVD, trong đó giá trị q_w ban đầu của PVD được xem xét. Lời giải giải tích với sự giảm phi tuyến của q_w được áp dụng để phân tích cổ kết khối đất đơn vị gia cố PVD có chiều dày lớn ở khu vực Cảng Busan và nền đường khu vực Yangsan, Hàn Quốc.

2. Ứng xử cổ kết của nền đất yếu gia cố PVD với sự giảm phi tuyến của q_w

2.1. Sự giảm phi tuyến của q_w theo chiều sâu và phương trình cổ kết với PVD

Hansbo [9], Rixner và cs. [10] cho thấy rằng q_w của PVD giảm đáng kể theo chiều tăng của áp lực hông của đất nền (hay chiều sâu cắm PVD). Các kết quả cho thấy sự giảm q_w có tính phi tuyến theo chiều sâu cắm PVD. Deng và cs. [13] đề xuất một lời giải cổ kết với giả định rằng q_w giảm tuyến tính theo chiều sâu theo phương trình như sau:

$$q_{wz} = q_{wo} \left(A_1 - A_2 \frac{z}{H} \right) \quad (1)$$

trong đó A_1, A_2 là các hệ số. Có thể thấy rằng lời giải này chứa nhiều thông số khó xác định, điều này dẫn đến bất tiện trong tính toán thiết kế xử lý đất yếu bằng PVD.

Kim và cs. [14] giả thuyết rằng sự giảm q_w theo chiều sâu cắm PVD là phi tuyến theo phương trình chỉ phụ thuộc một hệ số α như sau:

$$q_{wz} = q_{wo} \left(1 - \alpha \frac{z}{H} \right)^2 \quad (2)$$

trong đó q_{wz} là khả năng thoát nước của PVD tại độ sâu z ; q_{wo} là khả năng thoát nước của bắc thấm tại mặt đất ($z = 0$); H là chiều sâu cắm PVD; α là hệ số giảm khả năng thoát nước của PVD với $0 \leq \alpha \leq 1$. Có thể thấy rằng, nếu $\alpha = 0$, khả năng thoát nước là hằng số theo chiều sâu cắm bắc

($q_{wz} = q_{wo}$), khi đó lời giải sẽ tương đương với lời giải của Hansbo [1]. Nếu $\alpha = 1$, khả năng thoát nước của bậc bằng không (0) tại độ sâu H .

Dựa vào lời giải giải tích cơ bản của Hansbo [1], Kim và cs. [14] phát triển công thức tính áp lực nước lỗ rỗng thẳng dư trung bình trong lăng trụ theo phương bán kính như sau:

$$\bar{u}_r = u_0 e^{-8T_h/\mu} \quad (3)$$

trong đó u_0 là áp lực nước lỗ rỗng thẳng dư tại thời điểm ban đầu ngay sau khi chất tải (trong lời giải giải tích của Hansbo [1], tải đặt lên công trình được giả định là tức thời), $T_h = C_h t / (4r_e^2)$ với $C_h = k_h / (m_v \gamma_w)$, m_v là hệ số nén thể tích; μ là hệ số được tính như sau:

$$\mu = \mu_n + \mu_s + \mu_r \quad (4)$$

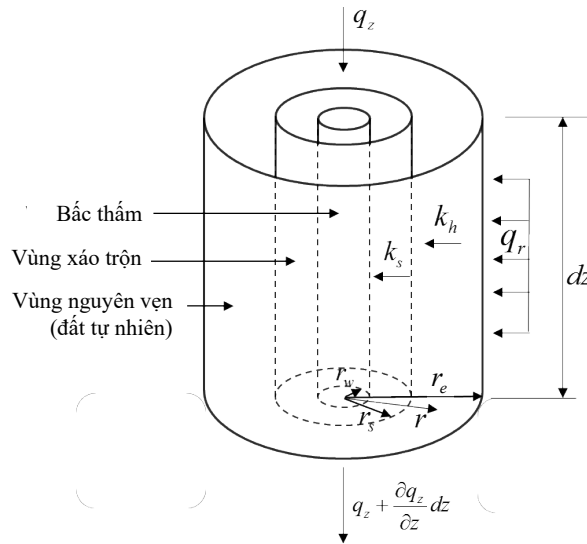
trong đó μ_n, μ_s , và μ_r lần lượt là hệ số xét đến ảnh hưởng của khoảng cách cắm PVD, sự xáo trộn của đất do qua trình cắm PVD và độ cản thấm. Các giá trị này lần lượt được tính như sau:

$$\mu_n = \ln(n) - 0,75 \quad (5)$$

$$\mu_s = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \ln(s) \quad (6)$$

$$\mu_r = \frac{2\pi k_h L^2}{q_{wo} A^2} \left[\ln \frac{H}{H - \alpha z} - \frac{\alpha z (1 - \alpha)}{H - \alpha z} \right] \quad (7)$$

trong đó $n = r_e / r_w$; $s = r_s / r_w$; r_e, r_s, r_w lần lượt là bán kính của lăng trụ tròn (hay bán kính vùng ảnh hưởng), vùng đất bị xáo trộn do quá trình thi công PVD, và bán kính tương đương của PVD; k_h và k_s lần lượt là hệ số thấm theo phương ngang của vùng đất không xáo trộn và xáo trộn; H là chiều sâu lớp đất yếu. Hình 1 thể hiện mô hình cho lời giải cổ kết theo phương ngang với khối đất lăng trụ tròn có gia cố PVD.



Hình 1. Mô hình cho lời giải cổ kết với khối đất lăng trụ tròn gia cố bằng cọc cát (Kim và cs. [14])

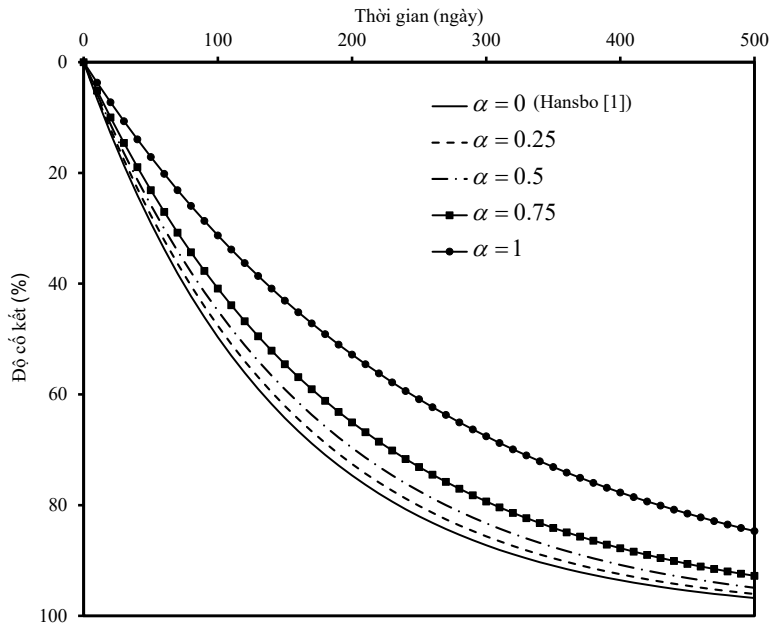
Phương trình (7) cho thấy rằng độ cản thấm phụ thuộc vào hệ số α . Hệ số này thể hiện mức độ giảm q_w theo chiều sâu cắm PVD trong đất yếu. Lưu ý rằng độ cản thấm của PVD có thể tính trung bình trong cả chiều dày lớp đất yếu như sau:

$$\bar{\mu}_r = \int_{z=0}^{z=L} \mu_r dz = \frac{2\pi k_h H^2}{q_{wo} \alpha^2} \left[\frac{2(1-\alpha)}{\alpha} \ln(1-\alpha) + (2-\alpha) \right] \quad (8)$$

2.2. Đánh giá mức độ ảnh hưởng của sự giảm q_w đến tốc độ cố kết của đất yếu

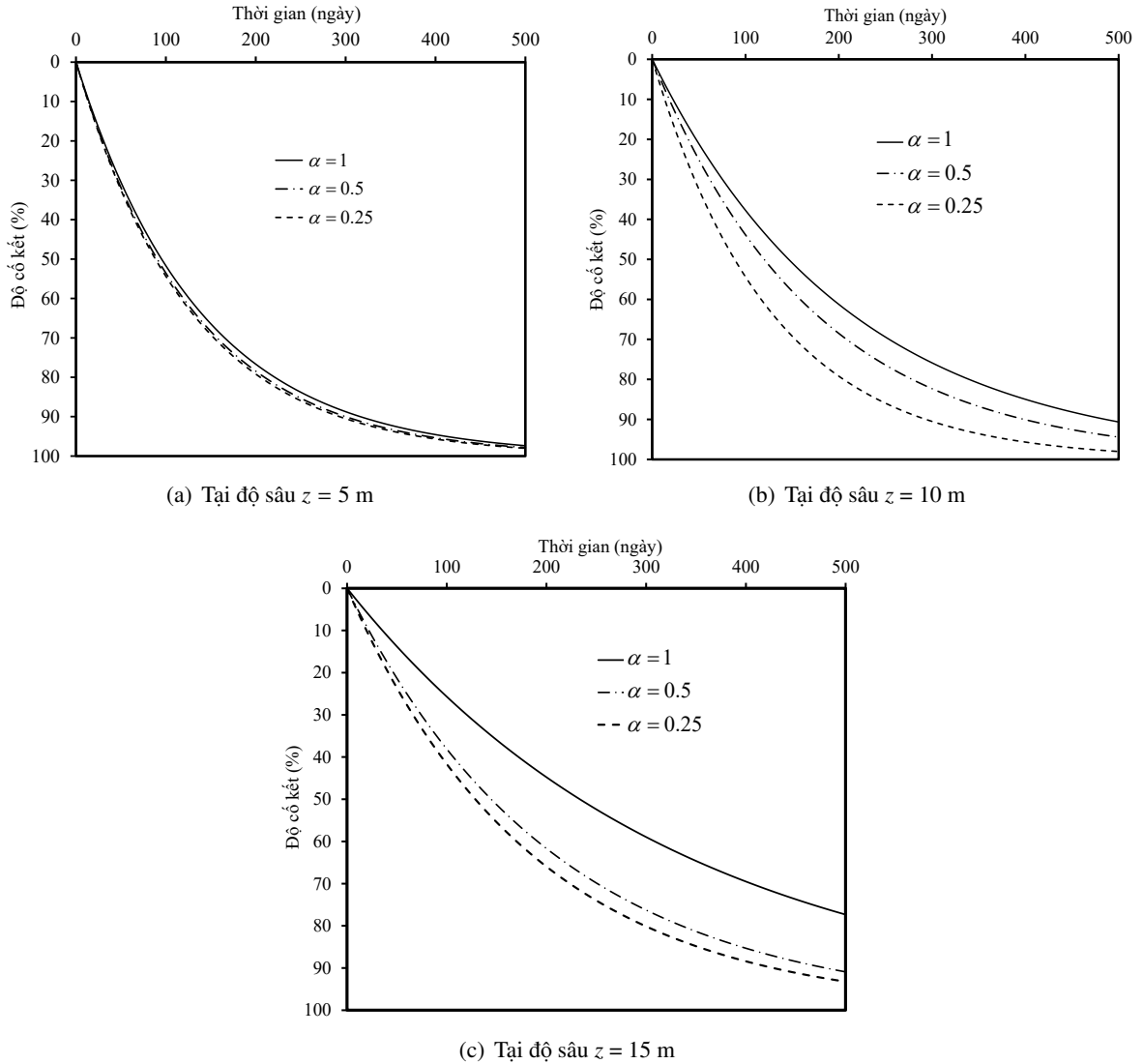
Trong phần này, lời giải cố kết của nền đất yếu sẽ được phân tích nhằm đánh giá mức độ ảnh hưởng của sự giảm q_w đến tốc độ cố kết, trong đó sự giảm phi tuyến của q_w được xem xét. Trong nghiên cứu này, các thông số lớp đất yếu và PVD được giả định như sau: $H = 20$ m; $r_e = 0,85$ m; $r_w = 0,025$ m; $d_s = 0,2$ m; $k_h = 1 \times 10^{-4}$ m/ngày; $k_h/k_s = 11$; $q_{wo} = 100$ m³/năm; $m_v = 0,003$ m²/kN. Tải trọng tác dụng lên lớp đất yếu được giả định tức thời với giá trị $\Delta\sigma_v = 100$ kN/m².

Hình 2 trình bày kết quả phân tích độ cố kết trung bình theo chiều sâu của đất nền theo mức độ giảm q_w theo chiều sâu thông qua hệ số α . Kết quả cho thấy rằng khi giá trị α càng lớn (hay độ giảm q_w theo chiều sâu càng lớn), độ cố kết tại một thời điểm phân tích càng nhỏ. Điều này cho thấy rằng quá trình cố kết của đất bị trì hoãn do sự giảm q_w . Khi hệ số $\alpha = 0$, độ cố kết của đất nền gần như đạt 100% tại thời điểm 500 ngày. Kết quả này phù hợp với lời giải Hansbo [1] khi bỏ ảnh hưởng của sự giảm q_w . Các kết quả cho thấy rằng sự giảm q_w làm giảm đáng kể đến tốc độ cố kết của đất nền.



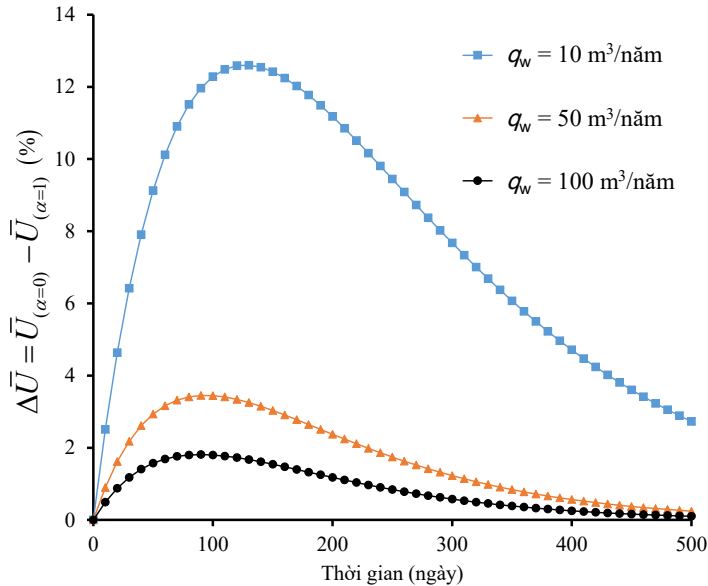
Hình 2. Ảnh hưởng mức độ giảm q_w của PVD đến độ cố kết của đất

Hình 3 cho thấy kết quả phân tích cố kết của đất yếu theo các chiều sâu khác nhau ($z = 5$ m, $z = 10$ m, $z = 15$ m). Kết quả cho thấy rằng sự giảm q_w theo chiều sâu ảnh hưởng đáng kể đến sự cố kết của nền đất. Khi hệ số α tăng (tức độ giảm q_w theo chiều sâu tăng), sự cố kết nền đất theo chiều sâu bị trì hoãn. Kết quả này thể hiện rõ rệt theo chiều sâu. Khi chiều sâu càng lớn, sự khác biệt độ cố kết với hệ số α càng rõ ràng.



Hình 3. Ảnh hưởng sự giảm q_w đến quá trình cố kết theo những độ sâu khác nhau

Hình 4 phân tích mức độ ảnh hưởng đến quá cố kết của đất nền theo các giá trị khác nhau của q_w . Mức độ ảnh hưởng được thể hiện qua độ chênh lệch độ cố kết giữa giá trị $\alpha = 0$ và $\alpha = 1$ ($\Delta \bar{U} = \bar{U}_{(\alpha=0)} - \bar{U}_{(\alpha=1)}$), ở đây các độ cố kết được tính trung bình theo chiều sâu lớp đất. Kết quả cho thấy rằng khi khả năng thoát nước càng lớn thì ảnh hưởng của sự giảm q_w của PVD theo chiều sâu càng nhỏ. Điều này hợp lý với lý thuyết cố kết với PVD vì khi q_w lớn thì độ cản thấm rất nhỏ. Đáng chú ý rằng sự khác biệt độ cố kết nhỏ hơn 2% ($\bar{U}_{(\alpha=0)} - \bar{U}_{(\alpha=1)} < 2\%$) khi q_w lớn hơn 100 m³/năm. Chai và Miura [16] cũng cho thấy rằng khi q_w lớn hơn 100 m³/năm, độ cản thấm của PVD là nhỏ. Trong nghiên cứu này, kết quả phân tích cho thấy rằng khi q_w lớn hơn 100 m³/năm, ảnh hưởng của sự giảm q_w theo chiều sâu là không đáng kể.



Hình 4. Mức độ ảnh hưởng đến quá trình cố kết theo các giá trị q_w của PVD

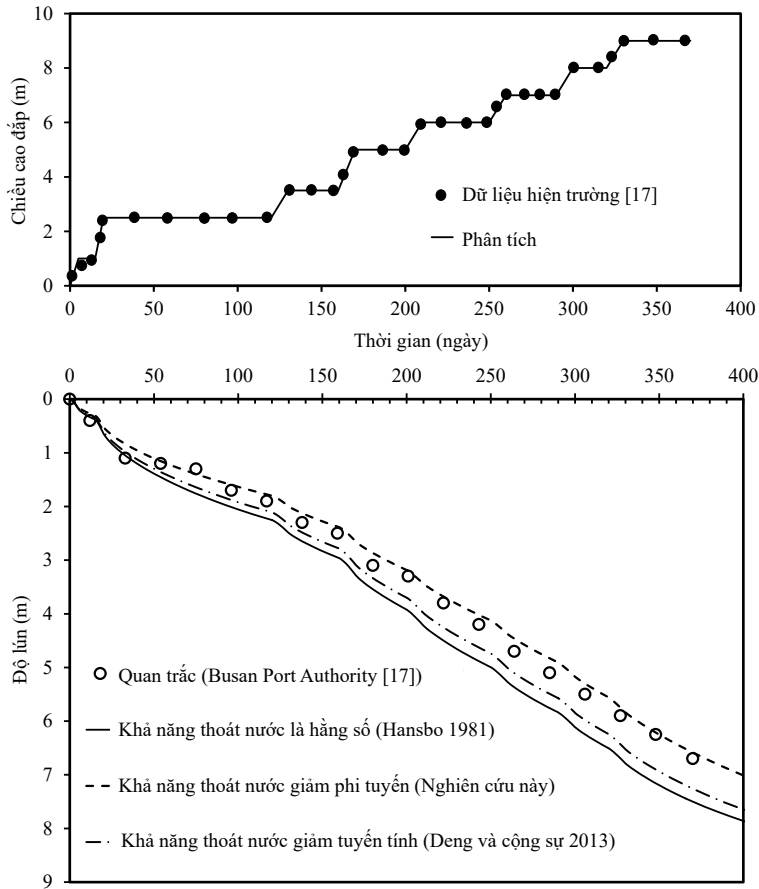
3. Phân tích cố kết nền đất yếu có chiều dày lớn có gia cố PVD bằng lời giải giải tích xét đến sự giảm phi tuyến của q_w

Kim và cs. [14] phát triển lời giải giải tích cho khối đất gia cố PVD xét đến sự giảm phi tuyến của q_w . Tuy lời giải đã được kiểm chứng tốt qua mô hình biến dạng phẳng (2-D plane strain model) của Chai và cs. [15], việc áp dụng trực tiếp lời giải này cho phân tích cố kết khối đất đơn vị gia cố PVD (unit cell) vẫn chưa được thực hiện. Do vậy việc đánh giá khả năng ứng dụng lời giải này cần được kiểm chứng. Qua đó thấy được ảnh hưởng sự giảm q_w theo chiều sâu vùng gia cố đối với quá trình dự báo lún của nền đất yếu có gia cố PVD, đặc biệt khi chiều dày lớp đất yếu lớn.

3.1. Phân tích cố kết nền đường khu vực Cảng Busan

Phần này tiến hành phân tích cố kết nền đất yếu có gia cố PVD, trong đó chiều sâu gia cố đến 46 m cho trường hợp công trình xây dựng cảng Busan, bên phía tây. Đặc điểm nền đất yếu và bậc thấm được trình bày bởi Busan Port Authority [17]. Các thông số có thể tóm tắt như sau: nền được đắp cao 9 m với dung trọng đất đắp được giả sử là 20 kN/m^3 ; PVD được cắm sâu đến 46 m theo sơ đồ lưới hình vuông với khoảng cách PVD là 1,4 m. Các thông số liên quan đến đặc điểm gia cố PVD như sau: $r_w = 0,026 \text{ m}$; $r_e = 0,791 \text{ m}$; $s = r_s/r_w = 9,6$; $k_h = 2,29 \times 10^{-4} \text{ m/ngày}$; $k_h/k_s = 2$; $q_{wo} = 50 \text{ m}^3/\text{năm}$. Nền đất yếu có các thông số như sau: dung trọng bão hòa $\gamma_{sat} = 14,5 \text{ kN/m}^3$; chỉ số nén $C_c = 1,1$, hệ số rỗng ban đầu $e_0 = 1,57$, nền đất yếu xem như cố kết thường với hệ số quá cố kết $\text{OCR} = 1$. Mức nước ngầm được giả định tại đỉnh lớp đất yếu.

Hình 5 cho thấy rằng kết quả phân tích độ lún của nền đường dựa vào sự giảm phi tuyến của q_w khá phù hợp với số liệu quan trắc ở hiện trường. Trong khi các lời giải trước đây của Hansbo [1], Deng và cs. [13] cho giá trị độ lún lớn hơn nhiều so với giá trị quan trắc. Điều này cho thấy rằng sự khác biệt giữa các lời giải là đáng kể khi chiều dày lớp đất yếu lớn. Kết quả này cho thấy tính hợp lý của lý thuyết cần xét đến, vì rõ ràng khi PVD cắm vào lớp đất yếu có chiều dày lớn thì sự giảm q_w càng rõ ràng hơn do áp lực hông ép vào PVD lớn hơn.

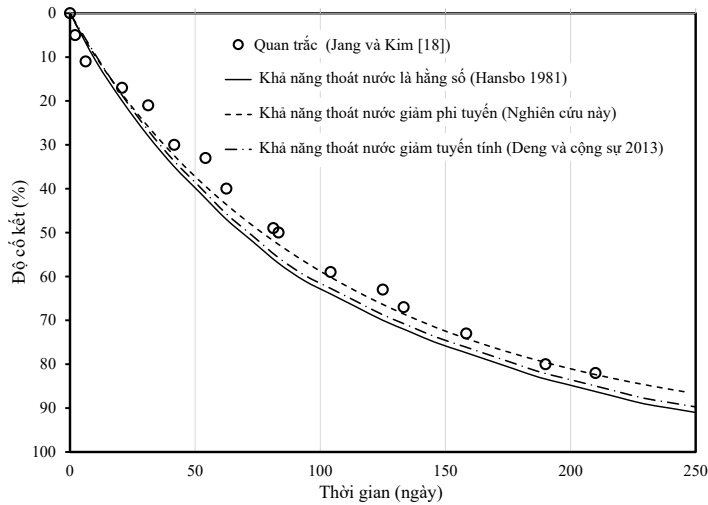


Hình 5. Kết quả phân tích của độ lún nền đường ở cảng Busan

3.2. Phân tích cấu kết nền đường khu vực Yangsan

Để cho thấy khả năng ứng dụng của lời giải giải tích xét đến sự khả năng thoát nước theo chiều sâu, phần này tiến hành phân tích độ cố kết theo thời gian cho nền đất yếu có gia cố PVD ở khu vực Yangsan (Hàn Quốc). Nền đường Yangsan được xử lý nền đất yếu bằng PVD với chiều sâu gia cố đến 25 m. Đặc điểm nền đất yếu và bắc thấm được trình bày bởi Jang và Kim [18]. Nền được đắp cao 5 m với dung trọng đất đắp được giả sử là 20 kN/m^3 . PVD được bố trí theo sơ đồ lưới hình vuông với khoảng cách PVD là 1 m. Đặc điểm khối đất hình trụ tròn đơn vị được gia cố PVD như sau: $r_w = 0,03 \text{ m}$; $q_{wo} = 50 \text{ m}^3/\text{năm}$; $r_e = 0,565 \text{ m}$. Ảnh hưởng của sự xáo trộn đất do thi công PVD được bỏ qua trong trường hợp nghiên cứu này [18]. Nhìn chung, dưới nền đường Yangsan có nhiều lớp sét yếu với đặc điểm khác nhau. Tuy nhiên để thuận tiện trong phân tích độ cố kết đối với khối đất đơn vị hình trụ tròn, cần giả sử rằng có duy nhất một lớp đất yếu và có các thông số như sau: dung trọng bão hòa $\gamma_{sat} = 16 \text{ kN/m}^3$; $k_h = 4 \times 10^{-4} \text{ m/ngày}$; chỉ số nén $C_c = 0,8$, hệ số rỗng ban đầu $e_0 = 1,8$.

Hình 6 trình bày kết quả phân tích độ cố kết theo thời gian của nền đất yếu có gia cố PVD. Giống như trường hợp ban đầu, so với lời giải của Hansbo [1], Deng và cs. [13], kết quả phân tích độ cố kết dựa vào sự giảm phi tuyến của q_w cho kết quả phù hợp với số liệu quan trắc ở hiện trường. Kết quả này một lần nữa cho thấy tính hợp lý của lời giải giải tích có xét đến sự giảm khả năng thoát nước theo chiều sâu, và có thể vận dụng trong tính toán thiết kế thực tế.



Hình 6. Kết quả phân tích của độ cố kết nền đường ở khu vực Yangsan

4. Kết luận

Bài báo phân tích cố kết nền đất yếu có gia cố PVD, trong đó có xét đến sự giảm q_w theo chiều sâu cắm PVD. Sự giảm q_w được xem xét như sự phân bố phi tuyến theo chiều sâu của PVD. Từ một số kết quả thu được trong nghiên cứu này, có thể rút ra một số kết luận có khả năng ứng dụng trong thực tiễn như sau:

- Sự giảm q_w theo chiều sâu cắm PVD làm trì hoãn quá trình cố kết trong đất. Kết quả này thể hiện rõ ràng hơn ở những độ sâu lớn hơn trong nền đất yếu.

- Khi chiều sâu cắm PVD lớn, sự khác biệt giữa các lời giải là đáng kể, với các trường hợp nghiên cứu của bài báo này, lời giải giải tích có xem xét sự giảm phi tuyến quả q_w cho kết quả phù hợp với số liệu quan trắc hơn so với các lời giải còn lại. Do đó độ giảm q_w theo dạng phi tuyến (theo giá trị α) cần được xác định qua các thí nghiệm để xem xét trong tính toán thiết kế xử lý nền đất yếu bằng phương pháp PVD kết hợp gia tải trước.

- Khi q_w càng lớn, ảnh hưởng của sự giảm q_w đến quá trình cố kết càng giảm. Trong nghiên cứu này, kết quả cho thấy khi q_w lớn hơn $100 \text{ m}^3/\text{năm}$ thì mức độ ảnh hưởng đến quá trình cố kết là không đáng kể.

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Công Nghiệp TP. Hồ Chí Minh cho đề tài mã số 20/1.2 XD03.

Tài liệu tham khảo

- [1] Hansbo, S. (1981). [Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains](#). *Proceeding of the 10th ICSMFE*, Rotterdam-Boston, 3:677–682.
- [2] Kim, Y.-T., Nguyen, B.-P., Yun, D.-H. (2018). [Effect of artesian pressure on consolidation behavior of drainage-installed marine clay deposit](#). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8):04018156.

- [3] Nguyen, B.-P., Do, T.-H., Kim, Y.-T. (2020). Large-strain analysis of vertical drain-improved soft deposit consolidation considering smear zone, well resistance, and creep effects. *Computers and Geotechnics*, 123:103602.
- [4] Nguyen, B.-P., Kim, Y.-T. (2019). An analytical solution for consolidation of PVD-installed deposit considering nonlinear distribution of hydraulic conductivity and compressibility. *Engineering Computations*, 2(36):707–730.
- [5] Nguyen, B.-P., Kim, Y.-T. (2019). Radial consolidation of PVD-Installed normally consolidated soil with discharge capacity reduction using large-strain theory. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(2):243–254.
- [6] Nguyen, B.-P., Do, T.-H., Kim, Y.-T. (2020). Large-strain analysis of vertical drain-improved soft deposit consolidation considering smear zone, well resistance, and creep effects. *Computers and Geotechnics*, 123:103602.
- [7] Dong, P. H. (2018). Influence of vertical drains on improving dredged mud by vacuum consolidation method. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 12(5):63–72.
- [8] Tran-Nguyen, H. H., Edil, T. B., Schneider, J. A. (2010). Effect of deformation of prefabricated vertical drains on discharge capacity. *Geosynthetics International*, 17(6):431–442.
- [9] Hansbo, S. (1983). *Discussion Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, 3:1148–1149.
- [10] Rixner, J. J., Kraemer, S. R., Smith, A. D. (1986). *Prefabricated vertical drains*. Engrg. Guidelines, FHWA/RD-86/168, Vol. I, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- [11] Chai, J.-C., Miura, N., Nomura, T. (2004). Effect of hydraulic radius on long-term drainage capacity of geosynthetics drains. *Geotextiles and Geomembranes*, 22(1-2):3–16.
- [12] Indraratna, B., Redana, I. W. (2000). Numerical modeling of vertical drains with smear and well resistance installed in soft clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(1):132–145.
- [13] Deng, Y.-B., Xie, K.-H., Lu, M.-M., Tao, H.-B., Liu, G.-B. (2013). Consolidation by prefabricated vertical drains considering the time dependent well resistance. *Geotextiles and Geomembranes*, 36:20–26.
- [14] Kim, Y. T., Nguyen, B.-P., Yun, D.-H. (2018). Analysis of consolidation behavior of PVD-improved ground considering a varied discharge capacity. *Engineering Computations*.
- [15] Chai, J.-C., Shen, S.-L., Miura, N., Bergado, D. T. (2001). Simple method of modeling PVD-improved subsoil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(11):965–972.
- [16] Chai, J. C., Miura, N. (2002). Long-term transmissivity of geotextile confined in clay. *Proceedings of the Seventh International Conference on Geosynthetics*, Nice, France, Balkema Publishers, 1:155–158.
- [17] Busan Port Authority (2016). *Construction design report of west container terminal phase 2-5*. 50–59. (in Korean).
- [18] Jang, Y. S., Kim, Y. W. (2000). A study of installation depth of vertical drain for weak clay soils with artesian pressure using 3-D numerical flow model. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 20 (1-C):39–46.