

Ảnh hưởng của từ biến và hệ số thấm trong xử lý nền đất yếu bằng bắc thấm kết hợp với gia tải trước và bơm hút chân không

Lê Trọng Nghĩa^{1,2}, Nguyễn Trung Kiên^{1,2*}, Nguyễn Minh Trung^{1,2}

¹ Khoa Kỹ thuật Xây Dựng, Trường Đại học Bách Khoa (HCMUT)

² Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

TỪ KHOÁ

Bắc thấm
Xử lý nền
Từ biến
Hút chân không
Gia tải trước

TÓM TẮT

Việc dự báo chính xác độ lún cổ kết sơ cấp và thứ cấp trong nền đất mềm bão hòa là yếu tố then chốt trong thiết kế xử lý nền đất yếu. Nghiên cứu này cho thấy kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn (FEM) 2D và 3D cho phương pháp gia tải trước kết hợp hút chân không và bắc thấm (PVD) cùng với việc sử dụng hai mô hình đất Soft Soil (SS) và Soft Soil Creep (SSC). Kết quả cho thấy, việc sử dụng mô hình đất có xét đến từ biến cho độ lún bề mặt tương đồng với kết quả quan trắc thực tế, trong khi mô hình đất yếu bỏ qua lún thứ cấp do từ biến dẫn đến có sự sai lệch về kết quả đánh giá. Mô hình cũng góp phần khẳng định độ lún thứ cấp do từ biến ảnh hưởng nhiều đến kết quả bài tính xử lý nền. Sự so sánh giữa kết quả của mô hình 2D và 3D càng khẳng định tầm quan trọng của việc hiệu chỉnh hệ số thấm khi chuyển từ bài toán đối xứng trục sang bài toán phẳng để đảm bảo độ chính xác mô hình và hiệu quả kinh tế - kỹ thuật trong xử lý nền đất yếu bằng bắc thấm kết hợp với gia tải trước và bơm hút chân không.

KEYWORDS

PVD
Soil improvement
Creep
Vacuum preloading
Surcharge preloading

ABSTRACT

Accurate prediction of both primary and secondary consolidation settlements in saturated soft soils is critical for the ground improvement method. This study presents 2D and 3D finite element method of vacuum - surcharge preloading combined with prefabricated vertical drains (PVDs), conducting two soil models: Soft Soil (SS) and Soft Soil Creep (SSC). The results demonstrate that the SSC soil model settlement predictions that closely match field observations data, whereas the SS model, which neglects soil creep - significantly underestimates settlement. Furthermore, comparison of 2D and 3D simulations highlights the necessity of calibrating soil permeability when converting from axisymmetric to plane-strain calculation to ensure both modeling accuracy and cost-effective in soft soil improvement with the use of PVDs and vacuum-surcharge preloading.

1. Giới thiệu

Lún cổ kết là một hiện tượng cơ học đất quan trọng. Sự lún cổ kết xảy ra khi áp lực nước lỗ rỗng thặng dư trong đất bão hòa giảm dần theo thời gian do sự gia tăng ứng suất hữu hiệu, dẫn đến sự thay đổi thể tích, hình dạng khung hạt đất và độ lún của nền đất. Tốc độ và giá trị độ lún cổ kết chịu ảnh hưởng chủ yếu bởi hệ số thấm của đất. Trong các loại đất hạt rời có tính thấm cao như cát và sỏi, quá trình lún diễn ra gần như tức thì. Ngược lại, ở các loại đất hạt mịn như sét và bùn sét, có hệ số thấm rất thấp, quá trình lún cổ kết tự nhiên cùng với từ biến do trọng lượng bản thân đất nền diễn ra chậm và có thể kéo dài từ nhiều tháng đến hàng trăm, hàng nghìn năm. Hiện tượng từ biến là sự biến dạng chậm xảy ra theo thời gian của vật liệu đất dưới tác dụng của ứng suất không đổi, đặc biệt phổ biến trong đất sét bão hòa nước và có ảnh hưởng lớn trong quá trình lún dài hạn của nền đất, nhất là dưới tải trọng duy trì lâu dài. Hậu quả của việc nền đất lún cổ kết kéo dài cùng với độ lún dư do từ biến gây ra thường

bao gồm sự cố nền móng, nứt gãy kết cấu, nghiêng lệch công trình, và phá hoại các kết cấu ngầm. Do đó, việc dự báo chính xác độ lún cổ kết cũng như độ lún do từ biến là công tác thiết yếu trong thiết kế và thi công công trình xây dựng.

Nền móng của các công trình xây dựng trên nền đất yếu thường đặt ra các vấn đề cần phải giải quyết như sức chịu tải của nền nhỏ, độ rỗng và tính nén lún lớn. Tại khu vực miền Nam Việt Nam, điều kiện địa chất đặc trưng tạo bởi các lớp đất bùn sét yếu, khá dày có độ nén lún lớn và khả năng chịu tải thấp. Thực tế này đòi hỏi phải có công nghệ thích hợp và tiên tiến để xử lý nền đất yếu phục vụ nền đất hạn chế lún ảnh hưởng đến kết cấu công trình khi đưa vào vận hành sử dụng. Mục đích của việc xử lý nền đất yếu là làm tăng sức chịu tải của nền đất, cải thiện một số tính chất cơ lý của đất yếu như giảm hệ số rỗng, giảm tính nén lún, tăng độ chặt, tăng trị số mô đun biến dạng, tăng cường độ chống cắt của đất, giảm tính thấm của đất đảm bảo ổn định cho nền đất yếu.

Với hiện trạng của Việt Nam, nguồn cát dùng trong giải pháp đắp

*Liên hệ tác giả: nguyentrungkien@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 14/05/2025, sửa xong ngày 12/06/2025, chấp nhận đăng ngày 13/06/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2025.980>

đất dễ gia tải trước xử lý nền được khai thác từ cát sông. Việc khai thác bờ bãi này những năm gần đây đã gây hậu quả nghiêm trọng cho lưu vực các dòng sông, ảnh hưởng đến dòng chảy và địa tầng gây sụt lún, xói mòn. Nguồn cát san lấp sử dụng cho giải pháp gia tải trước đang dần khan hiếm, do đó, biện pháp xử lý nền bằng gia tải trước kết hợp hút chân không và hệ thống bắc thấm (PVD) đã dần được áp dụng phổ biến trong các công tác xử lý nền đặc biệt là cho các công trình quy mô lớn như bến cảng, nền đường do hiệu quả cao, tính kinh tế đồng thời khắc phục được hạn chế của giải pháp truyền thống.

Bài báo này thực hiện mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trong không gian ba chiều (3D) và trong bài toán phẳng (2D) cho nền đất yếu đã xử lý bằng phương pháp gia tải trước kết hợp hút chân không và bắc thấm PVD cho dự án cảng Phước An, Đồng Nai. Ứng xử của nền đất bùn sét yếu khi xử lý nền được mô phỏng theo 2 trường hợp: mô hình đất yếu có xét đến từ biến (Soft Soil Creep) và mô hình đất yếu (Soft Soil). Mô hình 3D được hiệu chỉnh và phân tích ngược từ số liệu quan trắc thực tế ghi nhận tại hiện trường, sau đó được sử dụng để đánh giá độ lún nền cũng như quá trình từ biến sinh ra khi gia tải xử lý nền đối với bài toán 3D và bài toán phẳng 2D.

2. Giới thiệu về dự án

Dự án “Cảng Phước An và Khu dịch vụ hậu cần Cảng (Logistic)” với mục đích đảm bảo nền đất yếu sau khi xử lý có thể chịu được tải trọng khai thác của bãi container, đường nội bộ và các khu vực khác với diện tích san lấp là 296.928,7m² và diện tích xử lý nền là 291.517,1m² (Hình 1) [1].



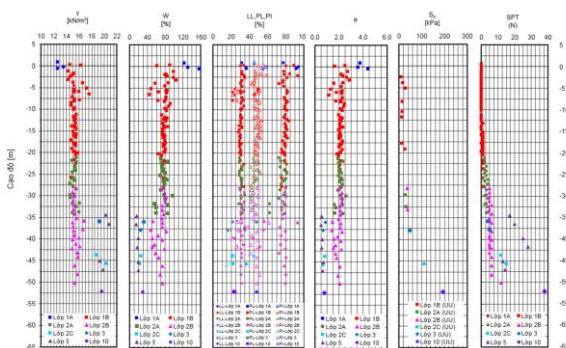
Hình 1. Dự án “Cảng Phước An và Khu dịch vụ hậu cần Cảng (Logistic)” [1].

Các lớp địa tầng của dự án được tổng hợp từ báo cáo khảo sát địa chất công trình có thể tóm tắt thành các lớp đất cơ bản theo Bảng 1, các kết quả thí nghiệm địa chất tại hiện trường và trong phòng được thể hiện qua Hình 2.

Dự án nền cảng được thiết kế xử lý nền với chiều cao đắp đến 4,5 m cùng áp lực bơm hút chân không 70 kPa, được duy trì ổn định trong màng kín khí (Hình 3) kết nối với hệ thống lưới bắc thấm PVD đứng và ngang theo thông số Bảng 2.

Bảng 1. Các lớp địa tầng của nền cảng [2].

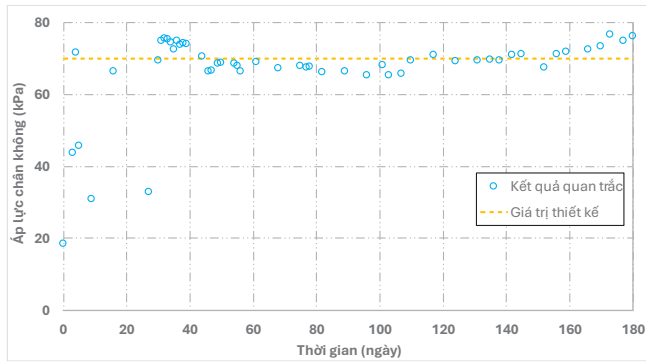
STT	Mô tả	Bề dày (m)
1B	Sét, lẫn hữu cơ, màu xám đen, tính dẻo siêu cao, trạng thái chảy	1,5-1,8
2A	Sét, đôi chỗ lẫn hữu cơ và vỏ sò, màu xám xanh, xám đen, tính dẻo rất cao, trạng thái dẻo chảy	20,0-29,5
2B	Sét, đôi chỗ lẫn hữu cơ, màu xám xanh, xám đen, tính dẻo rất cao, trạng thái dẻo mềm	6,0-14,0
3	Sét, màu xám xanh, xám đen, tính dẻo rất cao, trạng thái dẻo mềm đến dẻo cứng	8,0-23,9
5	Cát pha bụi, màu xám trắng, kết cấu chặt vừa.	4,0



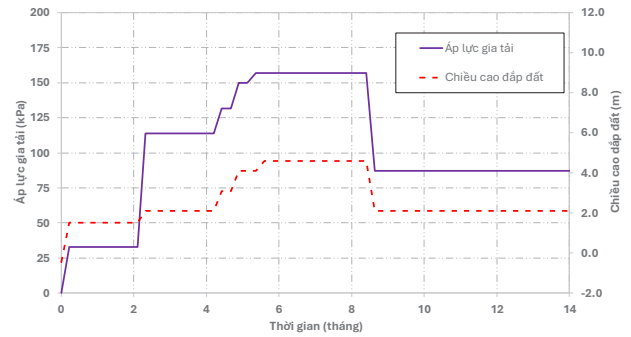
Hình 2. Kết quả thí nghiệm địa chất hiện trường và trong phòng [2].

Bảng 2. Thông số bắc thấm xử lý nền [3].

Thông số	Ký hiệu	Giá trị (m)
Bề dày bắc thấm	a	0,004
Bề rộng bắc thấm	b	0,1
Đường kính tương đương của bắc thấm	d _w	0,066
Lưới bố trí bắc thấm	Hình vuông	
Bước bố trí bắc thấm	1m x 1m	
Chiều dài của bắc thấm	35m	



Hình 3. Kết quả quan trắc áp lực hút chân không trong bấc thấm.



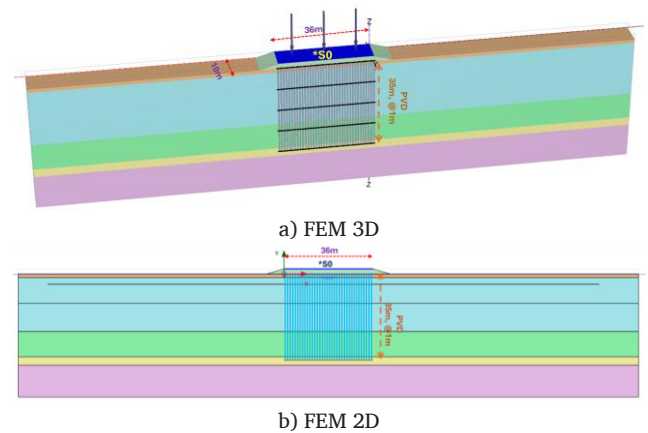
Hình 4. Lộ trình gia tải và áp lực gia tải theo hồ sơ thiết kế [3].

3. Phương pháp phân tích

Trong nghiên cứu này, ứng xử của nền đất yếu được xử lý bằng bấc thấm đứng (PVD) kết hợp với gia tải trước và bơm hút chân không được phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trong bài toán 3D. Mô hình 3D được xây dựng nhằm mô phỏng toàn diện và sát thực tế các yếu tố như trình tự thi công theo từng giai đoạn, ứng xử biến dạng đàn hồi - dẻo, quá trình tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng thẳng đứng, cũng như độ lún cố kết dài hạn trong thời gian xử lý 180 ngày với lộ trình gia tải và áp lực gia tải theo hồ sơ thiết kế xử lý nền (Hình 4).

Phương pháp số không thể mô phỏng kỹ thuật hút chân không như phương pháp thực tế là tạo áp lực âm trong lòng bấc thấm để hút nước lên. Thay vào đó, phương pháp giảm chiều cao mực nước ngầm được sử dụng để mô phỏng hiệu ứng bơm hút chân không. Cụ thể, mực nước ngầm được giảm theo chiều cao head của bấc thấm kết hợp phương pháp phân tích tương tác dòng chảy - biến dạng hoàn toàn (FCFDA) được thực hiện với điều kiện biên thấm và biến dạng phù hợp. Với phương pháp này, việc giảm 7,0 m chiều cao mực nước tương đương với áp suất hút chân không 70,0 kPa. Ngoài ra, các lớp đất đắp gia tải bù lún được quy đổi thành các tải trọng đứng theo cao độ của thiết kế. Mô hình mô phỏng xử lý nền cảng bằng bấc thấm thể hiện qua Hình 5.

Ứng xử của nền đất yếu được mô phỏng với 2 loại mô hình đất: mô hình từ biến đất yếu (Soft Soil Creep) và mô hình đất yếu (Soft Soil). Các thông số đầu vào của mô hình đất được xác định từ các thí nghiệm trong phòng, cụ thể ở đây là thí nghiệm nén cố kết một chiều (1D) để xác định được các chỉ số nén C_c , chỉ số nở C_s . Tuy nhiên, Kết quả khảo sát địa chất tại dự án không thực hiện thí nghiệm nén cố kết đến giai đoạn nén thứ cấp để ghi nhận hệ số nén thứ cấp C_{α} . Độ lún cố kết thứ cấp quan trọng hơn độ lún cố kết sơ cấp khi xét đến loại đất bùn sét yếu khả năng chịu nén cao. Vì vậy, tác giả sử dụng biểu thức thực nghiệm theo Mesri et.al (1977) cho tỷ số của $C_{\alpha}/C_c \approx 0,04 \pm 0,01$ [4]. Từ bài toán lặp trong mô phỏng, bài báo này tìm được tỷ số phù hợp cho kết quả bài toán khu vực nền cảng Đồng Nai $C_{\alpha}/C_c \approx 0,038$ để sử dụng trong đánh giá ứng xử của nền đất.



Hình 5. Mô hình FEM 3D và 2D dùng để phân tích.

Hệ số thấm ngang của nền đất khi chưa xử lý ($k_x = k_y$) được xác định thông qua tỷ số thực nghiệm với hệ số thấm ngang k_z , chọn $k_x = k_y = 2k_z$ dành cho đất dính. Tuy nhiên, đối với việc xử lý nền bằng bấc thấm, các nghiên cứu trước đây đã cho thấy, trong quá trình thi công bấc thấm đã xuất hiện vùng xáo trộn (smear zone) do tác động từ việc cắm bấc thấm vào nền đất khi thi công làm giảm tính thấm ngang của nền. Vì vậy, tham khảo các nghiên cứu trước, giá trị hệ số thấm ngang k_x, k_y do hiệu ứng của vùng xáo trộn này được giả định giảm đi 1/2 so với đất xung quanh khu vực chưa được xử lý [5, 6]. Thông số đất nền sử dụng trong bài báo này được thể hiện tại Bảng 3.

4. Phân tích kết quả từ mô hình phần tử hữu hạn và giá trị quan trắc thực tế

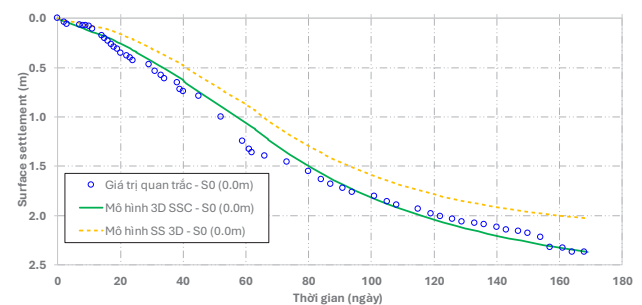
4.1. Độ lún của nền từ kết quả mô phỏng 3D

Kết quả so sánh giữa mô hình 3D sử dụng mô hình đất Soft Soil Creep (SSC) và số liệu quan trắc cho thấy độ lún bề mặt tại tâm diện vùng xử lý theo thời gian 180 ngày có sự tương đồng cao. Các bấc thấm trong mô hình được khai báo bằng phần tử Drain với áp lực hút chân không phù hợp với dữ liệu thực tế. Sai lệch độ lún tại thời điểm kết thúc xử lý (ngày thứ 180) chỉ khoảng 1,7 %, cho thấy độ tin cậy của mô hình SSC trong phản ánh quá trình cố kết và lún thứ cấp của nền đất yếu. Điều này được thể hiện qua Hình 6.

Bảng 3. Thông số đất nền.

Thông số	1	2A	2B	3	5
Ứng xử	Undrained A	Undrained A	Undrained A	Undrained A	Drained
γ_{unsat} (kN/m ³)	15,3	15,3	15,5	19,70	20,2
PI (%)	46,9	45,0	43,4	22,5%	0,0
γ_{sat} (kN/m ³)	15,41	15,47	16,41	19,71	20,75
e_{init}	2,13	2,10	1,95	0,76	0,57
N SPT	1	3	6	5	20
c' (kPa)	6,55	11,04	10,05	4,70	2,20
ϕ' (deg)	24,28	25,46	27,38	29,50	31,50
ψ (deg)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5
E_{ref}^{50} (MPa)	-	-	-	15,6	44,0
$E_{\text{ref}}^{\text{oed}}$ (MPa)	-	-	-	15,6	44,0
$E_{\text{ref}}^{\text{ur}}$ (MPa)	-	-	-	46,8	132,0
m	1,00	0,98	0,96	0,78	0,55
v_{ur}	0,15	0,15	0,15	0,15	0,2
C_c	0,949	0,849	0,866		-
C_s	0,104	0,077	0,075		-
$C_\alpha = 0.038C_c$	0,036	0,032	0,033		-
k_x, k_y (m/day)	5,84E-5	1,65E-6	2,74E-4	5E-3	5E-3
k_z (m/day)	2,92E-5	8,25E-7	1,37E-4	2,5E-3	5E-3
R_{inter}	0,7	0,7	0,7		0,8

Tuy nhiên, khi sử dụng mô hình đất Soft Soil (SS) với cùng bộ thông số địa chất, tải trọng và lịch trình gia tải, kết quả độ lún có sự sai lệch đáng kể so với quan trắc, đặc biệt sau ngày thứ 90. Trong Hình 6, mô hình SS chỉ phản ánh quá trình lún sơ cấp, trong khi mô hình SSC mô phỏng sự xuất hiện của từ biến và lún thứ cấp, kết quả độ lún của hai mô hình bắt đầu có sự khác biệt rõ rệt. Từ ngày thứ 91 trở về sau, độ lún của mô hình SSC vẫn tiếp tục đi theo kết quả quan trắc và bám sát vào lộ trình lún của quan trắc, đồng nghĩa tại thời điểm này của quá trình mô phỏng xử lý đã có sự tham gia xuất hiện nhiều của từ biến sinh ra độ lún thứ cấp. Chênh lệch độ lún giữa mô hình SS và dữ liệu quan trắc thực tế đạt tới 13,4 %. Theo khuyến nghị của PLAXIS, từ biến xuất hiện đồng thời với ứng suất hữu hiệu, kể cả ứng suất sinh ra do trọng lượng bản thân đất [7]. Trong các thí nghiệm trong phòng, ứng suất do trọng lượng bản thân của đất được bỏ qua và ứng suất hữu hiệu được xét đến do tải trọng ngoài. Tuy vậy, khi áp dụng vào thực tế các công trình cũng như ứng dụng cụ thể trong nghiên cứu, ứng suất hữu hiệu của đất đều sinh ra với ứng suất của trọng lượng bản thân. Vì vậy, từ biến sẽ xuất hiện ngay cả khi không có sự sinh ra của tải trọng ngoài. Do đó việc xét đến từ biến trong mô hình là cần thiết để dự báo lún dài hạn chính xác hơn.



Hình 6. Độ lún bề mặt của nền đất từ mô hình FEM 3D và kết quả quan trắc thực tế.

4.2. Độ lún của nền từ kết quả mô phỏng 2D

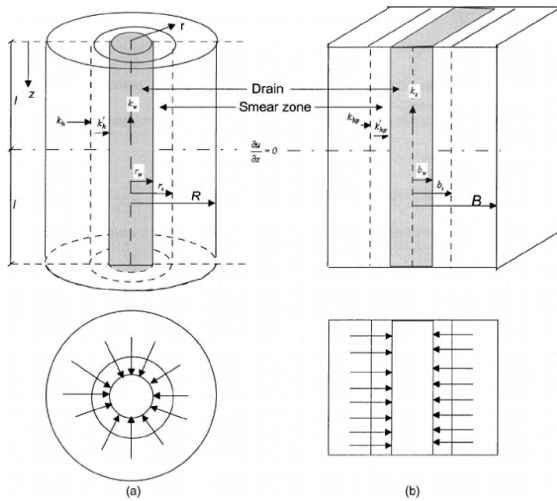
Trong các dự án quy mô lớn, khi mô hình tiêu tốn nhiều tài nguyên tính toán, mô hình 2D dạng bài toán phẳng (plane strain) được xem là một lựa chọn thay thế hợp lý. Tuy nhiên, để đạt được mức độ cổ kết tương đương với mô hình 3D đối xứng trục, cần tiến hành hiệu chỉnh hệ số thấm ngang của lớp đất nguyên trạng và lớp đất đã xử lý bằng bắc thấm. B. Indraratna (2005) [8] đã đề xuất một phương pháp quy đổi từ bài toán đối xứng trục (3D) sang bài toán

*Liên hệ tác giả: nguyentrungkien@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 14/05/2025, sửa xong ngày 12/06/2025, chấp nhận đăng ngày 13/06/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2025.980>

phẳng (2D) thông qua việc điều chỉnh hệ số thấm của vùng đất xáo trộn và vùng đất nguyên dạng bao quanh bắc thấm, đồng thời tiến hành so sánh giữa hai loại mô hình. Kết quả B. Indraratna nghiên cứu cho thấy các đại lượng như độ lún, áp lực nước lỗ rỗng thẳng dư và chuyển vị ngang trong mô hình 2D và 3D có sự tương đồng nhất định. Nhờ đó, trong trường hợp mô phỏng với số lượng lớn phần tử “line drain”, việc sử dụng mô hình 2D không chỉ giúp tiết kiệm đáng kể chi phí và thời gian tính toán mà vẫn đảm bảo độ chính xác cần thiết so với mô hình 3D thực tế (Hình 7).



a) Khi xét ảnh hưởng vùng xáo trộn

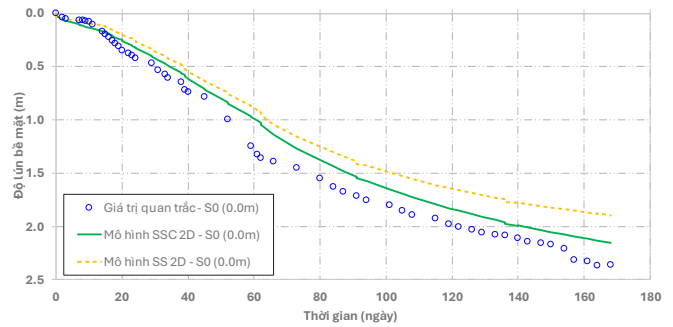
$$\frac{k_{s,ps}}{k_{h,ps}} = \frac{\beta}{\frac{k_{h,ps}}{k_{h,ax}} \left[\ln\left(\frac{n}{s}\right) + \frac{k_{h,ax}}{k_{s,ax}} \ln(s) - \frac{3}{4} \right] - \alpha}$$

b) Khi không xét ảnh hưởng vùng xáo trộn

$$\frac{k_{hp}}{k_h} = \frac{\frac{2}{3} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2}{\ln n - 0.75}$$

Hình 7. Quy đổi bài toán bắc thấm từ đối xứng trục 3D về bài toán phẳng 2D [8].

Kết quả mô phỏng bằng mô hình 2D sử dụng mô hình đất Soft Soil Creep (SSC) cho thấy độ lún tại tâm vùng xử lý có sự sai lệch so với số liệu quan trắc thực tế, khi áp dụng biểu thức quy đổi hệ số thấm từ bài toán 3D sang bài toán phẳng 2D theo biểu thức hình 7b, với mức chênh lệch khoảng 7.3 % tại thời điểm kết thúc xử lý (ngày thứ 180). Khi so sánh với mô hình đất Soft Soil (SS) trong cùng điều kiện địa chất, tải trọng và quá trình gia tải, kết quả độ lún thể hiện sự khác biệt rõ hơn. Trong 90 ngày đầu, cả hai mô hình SS và SSC đều phản ánh xu hướng lún tương đồng với số liệu thực tế. Tuy nhiên, từ ngày thứ 91 trở đi, mô hình SSC tiếp tục bám sát kết quả quan trắc nhờ khả năng mô phỏng lún thứ cấp do từ biến. Trong khi đó, mô hình SS không thể hiện được đặc điểm này, dẫn đến chênh lệch độ lún lên tới 18.7 % vào cuối giai đoạn xử lý (Hình 8).



Hình 8. Độ lún bề mặt của nền đất từ mô hình FEM 2D và kết quả quan trắc thực tế.

5. Kết luận

Dựa trên biểu đồ so sánh kết quả mô phỏng, ta có thể nhận thấy rằng khi sử dụng cùng mô hình đất Soft Soil Creep trong 2D và 3D, cả hai phương pháp đều phản ánh được ảnh hưởng của hiện tượng từ biến trong giai đoạn lún thứ cấp. Điều này cho phép mô hình dự đoán chính xác hơn về độ lún cuối cùng của nền đất sau xử lý so với trường hợp sử dụng mô hình Soft Soil chỉ xem xét quá trình lún sơ cấp và cho kết quả độ lún tăng chậm hơn về sau do không xét đến tác động từ biến. Kết quả mô phỏng từ bài toán 2D và 3D cho thấy sự sai lệch nhất định so với số liệu quan trắc độ lún thực tế. Nguyên nhân chủ yếu là do sự khác biệt giữa các thông số đầu vào trong mô hình, bao gồm hệ số thấm, chỉ số nén (C_c) và nở (C_s) so với điều kiện thực tế ngoài hiện trường. Ngoài ra, việc mô hình hóa bắc thấm trong bài toán phẳng 2D không thể hiện đầy đủ vùng ảnh hưởng thoát nước xung quanh lõi bắc thấm như thực tế, dẫn đến sự khác biệt trong khả năng phân bố ứng suất hữu hiệu trong quá trình xử lý và sự tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng thẳng dư. Cụ thể, trong 2D, phần tử “line drain” sử dụng để mô phỏng các bắc thấm được giả định là một đường biên thấm nước kéo dài vô hạn, dẫn đến việc toàn bộ vùng nền đất được xem như có điều kiện thoát nước lý tưởng không bị giới hạn, so với trong thực tế, các bắc thấm được bố trí theo bước thiết kế. Việc áp dụng phương pháp quy đổi hệ số thấm từ mô hình 3D đối xứng trục sang mô hình phẳng 2D theo đề xuất của Indraratna et al. (2005) vẫn cho giá trị độ lún thấp hơn so với cả mô hình 3D và số liệu quan trắc thực tế. Điều này cho thấy cần thực hiện việc hiệu chỉnh hệ số thấm khi chuyển đổi điều kiện mô hình hóa. Hệ số thấm là thông số chi phối trực tiếp quá trình cố kết, ảnh hưởng đến áp lực nước lỗ rỗng, độ lún và tốc độ xử lý nền. Việc lựa chọn giá trị phù hợp không chỉ giúp nâng cao độ chính xác của mô hình mà còn góp phần đảm bảo hiệu quả kinh tế - kỹ thuật trong thiết kế và thi công xử lý nền đất yếu.

Lời cảm ơn

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1]. POSTCOARST, “Phuoc An Port, the connecting route to the port, and the Port Logistics Service Area,” [Trực tuyến].
<https://www.portcoast.com.vn/projects/phuoc-an-port-and-logistic-zone>
- [2]. PORTCOAST, “Phuoc An Port and Logistics service area project (phase 1), Dong Nai province – Soil Investigation Report” (2021).
- [3]. PORTCOAST, “Phuoc An Port and Logistics service area project (phase 1), Dong Nai province - Construction Design Documents” (2021).
- [4]. Mesri, G., Stark, T. D., Ajlouni, M. A., & Chen, C. S., “Secondary compression of peat with or without surcharging,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 411-421, (1997).
[doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:5\(411\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:5(411))
- [5]. Bo, M. W., Chu, J., Low, B. K., and Choa, V., “*Soil improvement: Prefabricated vertical drain techniques*, ” Singapore :Thomson , p. 341, 2003.
- [6]. Hansbo, S., “Aspects of vertical drain design; Darcian or non-Darcian flow,” *Geotechnique*, 47(5), 983-992, 1997.
doi.org/10.1680/geot.1997.47.5.983.
- [7]. PLAXIS, “*PLAXIS 3D Manuals CONNECT Edition*”, Bentley Systems Inc., Exton, Pennsylvania, USA, 2023.
- [8]. Indraratna, B., Sathananthan, I., Rujikiatkamjorn, C., & Balasubramaniam, A. S., “Analytical and numerical modeling of soft soil stabilized by prefabricated vertical drains incorporating vacuum preloading,” *International Journal of Geomechanics*, 5(2), 114-124, 2005.
[doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2005\)5:2\(114\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2005)5:2(114)).