Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ
Số chuyên đề: Khoa học và Công nghệ cho sự phát triển bền vững của vùng Đồng bằng sông Cửu Long
ISSN 1859-2333 | e-ISSN 2815-5599

DOI:10.22144/ctujos.2026.092

HIỆU QUẢ XỬ LÝ NỀN ĐẤT YẾU BẰNG BẤC THẤM KẾT HỢP HÚT CHÂN KHÔNG VÀ GIA TẢI TRƯỚC: NGHIÊN CỨU TRƯỜNG HỢP TẠI KHU CÔNG NGHIỆP CÔNG NGHỆ CAO LONG THÀNH

Phạm Hữu Hà Giang[1*], Lê Ngọc Tân[1], Trần Đức Khanh[1], Bùi Quang Trung[2], Nguyễn Trung Nghĩa[2], Đào Xuân Bằng[3] và Huỳnh Văn Hiệp[4]
[1] Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam
[2]Công Ty TNHH Nền móng Mê Kông, Việt Nam
[3]Công ty TNHH Thế giới Kỹ thuật, Việt Nam
[4] Trường Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Trà Vinh, Việt Nam
**Tác giả liên hệ (Corresponding author): phhgiang@ctu.edu.vn*

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 10/03/2026
Sửa bài (Revised): 03/04/2026
Duyệt đăng (Accepted): 08/05/2026

Title: *Effectiveness of Soft Ground Improvement Using Prefabricated Vertical Drains Combined with Vacuum Preloading and Surcharge Loading: A Case Study at Long Thanh High-Tech Industrial Park, Vietnam*

Author(s): *Pham Huu Ha Giang[1]*, Le Ngoc Tan[1], Tran Duc Khanh[1], Bui Quang Trung[2], Nguyen Trung Nghia[2], Dao Xuan Bang[3] and Huynh Van Hiep[4]*

Affiliation(s): *[1]College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam; [2]Mekong Foundation Limited Company, Viet Nam; [3]Technical World Limited Company, Viet Nam; [4]College of Engineering and Technology, Tra Vinh University, Viet Nam*

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu xử lý nền đất yếu bằng bấc thấm (PVD) kết hợp hút chân không và gia tải trước tại khu công nghiệp Long Thành, Đồng Nai. Hiệu quả xử lý được đánh giá thông qua số liệu quan trắc hiện trường kết hợp phân tích giải tích và mô phỏng số. Kết quả cho thấy các chỉ tiêu cơ lý của đất được cải thiện rõ rệt sau xử lý. Cụ thể, độ ẩm tự nhiên giảm 25,5% và hệ số rỗng giảm 29,2%, trong khi sức kháng cắt không thoát nước và áp lực tiền cố kết tăng lần lượt 20,1% và 26,0%, cho thấy nền đất trở nên chặt hơn và khả năng chịu tải được nâng cao. Số liệu quan trắc cho thấy nền đạt khoảng 90% độ cố kết sau khoảng 70 ngày khi áp dụng hệ số vượt tải thiết kế khoảng 1,2 lần tải khai thác. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy khi tăng hệ số vượt tải lên khoảng 1,4 lần, thời gian đạt độ cố kết mục tiêu có thể rút ngắn khoảng 15%, trong khi tổng độ lún thay đổi không đáng kể.

Từ khóa: *Bấc thấm (PVD), đất yếu, hút chân không, gia tải trước, quan trắc*

ABSTRACT

This paper presents a case study on the improvement of soft ground using prefabricated vertical drains (PVD) combined with vacuum preloading and surcharge loading at Long Thanh Industrial Park, Dong Nai, Vietnam. The effectiveness of the treatment was evaluated using field monitoring data, analytical analysis, and numerical simulation. The results indicated that the geotechnical properties were significantly improved after treatment. Specifically, the natural water content decreased by 25.5%, and the void ratio decreased by 29.2%. In comparison, the undrained shear strength and preconsolidation pressure increased by 20.1% and 26.0%, respectively, indicating that the soil became denser and its bearing capacity was significantly enhanced. Field monitoring data show that the ground reached approximately 90% degree of consolidation after about 70 days when applying a surcharge load with an overload ratio of about 1.2 times the design service load. The results also showed that when the overload ratio is increased to about 1.4 times, the time required to reach the target degree of consolidation can be reduced by approximately 15%, while the total settlement changes insignificantly.

Keywords*: Field monitoring, prefabricated vertical drain (PVD), soft soil, surcharge preloading, vacuum*

1. GIỚI THIỆU

Miền Nam Việt Nam, đặc biệt là các khu vực đồng bằng thuộc Đông Nam Bộ và Đồng bằng sông Cửu Long, được đặc trưng bởi sự phân bố rộng rãi của các lớp đất yếu hình thành từ trầm tích trẻ trong điều kiện địa hình thấp và bão hòa nước kéo dài (Vu, 2022). Các lớp đất sét mềm và bùn sét tại đây thường có sức kháng cắt thấp, hệ số rỗng lớn và khả năng nén lún cao, từ đó gây ra hai thách thức chính đối với công trình xây dựng: nguy cơ mất ổn định trong giai đoạn thi công khi gia tải nhanh và hiện tượng lún dư kéo dài trong giai đoạn khai thác (Pham et al., 2013, 2015). Đối với các công trình hạ tầng như đường giao thông, khu công nghiệp, bến bãi và nền san lấp quy mô lớn, các đặc điểm địa kỹ thuật này có thể dẫn đến biến dạng lún lớn nếu nền đất không được xử lý phù hợp.

Trong thực hành địa kỹ thuật, các giải pháp xử lý đất yếu thường hướng tới việc tăng tốc quá trình cố kết thông qua hai cơ chế chính: gia tăng ứng suất hữu hiệu và rút ngắn đường thấm của nước lỗ rỗng. Trong số đó, phương pháp bấc thấm (Prefabricated Vertical Drains – PVD) kết hợp gia tải trước được áp dụng rộng rãi nhằm thúc đẩy quá trình tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng. Tuy nhiên, đối với các nền đất có cường độ rất thấp, quá trình gia tải bằng đắp thường phải tiến hành theo từng giai đoạn nhằm bảo đảm ổn định, làm kéo dài thời gian xử lý nền. Việc kết hợp bấc thấm với công nghệ hút chân không được xem là một bước phát triển của phương pháp PVD truyền thống, trong đó ứng suất hữu hiệu trong nền được tăng lên thông qua việc giảm áp lực nước lỗ rỗng dưới hệ màng kín mà không cần gia tăng đáng kể ứng suất tổng (Vu & Wang, 2009).

Hiệu quả của phương pháp này đã được ghi nhận trong nhiều nghiên cứu thực nghiệm và quan trắc hiện trường. Nghiên cứu của Pham et al. (2015) cho thấy sau quá trình xử lý bằng PVD kết hợp hút chân không, các chỉ tiêu trạng thái của đất như độ ẩm và hệ số rỗng giảm đáng kể, trong khi áp lực tiền cố kết tăng lên rõ rệt. Các nghiên cứu khác cũng ghi nhận sự gia tăng đáng kể của sức kháng cắt không thoát nước sau xử lý, trong một số trường hợp tăng từ một đến nhiều lần so với trạng thái ban đầu (Koirala et al., 2022).

Gần đây, Phan et al. (2025) đã phân tích vai trò của áp lực hút chân không trong xử lý nền đất yếu bằng hệ thống bấc thấm. Kết quả cho thấy mức hút 70–90 kPa có thể giúp nền đạt trên 90% độ cố kết và làm tăng tốc quá trình cố kết khoảng 1,5–2 lần so với phương pháp gia tải trước truyền thống, đồng thời cải thiện sự truyền ứng suất hữu hiệu trong vùng xử lý. Tuy nhiên, trong thực tế thi công, việc duy trì áp lực hút ở mức cao thường bị giới hạn bởi điều kiện thiết bị và khả năng vận hành của hệ thống bơm hút, do đó, giải pháp hút chân không thường được kết hợp với gia tải trước để đạt mức ứng suất hữu hiệu mong muốn trong nền đất.

Bên cạnh việc đạt được độ cố kết yêu cầu trong giai đoạn thi công, kiểm soát lún dư trong giai đoạn khai thác cũng là một mục tiêu quan trọng trong thiết kế xử lý nền đất yếu. Để đạt được điều này, nguyên lý gia tải vượt mức (overstressing) thường được áp dụng nhằm tạo ra một mức ứng suất tạm thời lớn hơn tải trọng khai thác, qua đó làm tăng áp lực tiền cố kết và đưa nền đất sang trạng thái quá cố kết đối với tải trọng làm việc của công trình (Ho et al., 2016; Rujikiatkamjorn & Indraratna, 2023). Trạng thái quá cố kết này giúp hạn chế lún dư và lún thứ cấp khi công trình đi vào khai thác. Trong thực hành thiết kế tại Việt Nam, hệ số gia tải vượt mức thường được lựa chọn khoảng 1,2 lần tải trọng khai thác theo các khuyến nghị trong tiêu chuẩn hiện hành.

Tuy nhiên, đối với hệ xử lý kết hợp bấc thấm và hút chân không, hiệu quả của gia tải vượt mức không chỉ phụ thuộc vào chiều cao đắp mà còn chịu ảnh hưởng bởi sự tương tác giữa áp lực hút chân không, tiến độ gia tải và khả năng truyền ứng suất trong nền đất. Mặc dù nhiều nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của phương pháp PVD kết hợp hút chân không và gia tải trước, các nghiên cứu sử dụng số liệu quan trắc thực tế của một dự án cụ thể để đánh giá lại và tối ưu hóa hệ số gia tải vượt mức vẫn còn hạn chế.

Xuất phát từ bối cảnh đó, bài báo này trình bày một nghiên cứu trường hợp tại Khu công nghiệp Công nghệ cao Long Thành, Đồng Nai. Số liệu quan trắc hiện trường kết hợp với phân tích giải tích và mô phỏng phần tử hữu hạn được sử dụng trong nghiên cứu nhằm đánh giá hiệu quả xử lý nền bằng phương pháp bấc thấm kết hợp hút chân không và gia tải trước. Đồng thời, nghiên cứu xem xét ảnh hưởng của việc tăng hệ số gia tải vượt mức đến quá trình cố kết của nền đất nhằm đánh giá khả năng rút ngắn thời gian xử lý và giảm lún dư trong giai đoạn khai thác đối với các công trình xây dựng trên nền đất yếu.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Phương pháp nghiên cứu trong bài báo này được xây dựng theo hướng nghiên cứu trường hợp, kết hợp giữa khảo sát – quan trắc hiện trường, phân tích số liệu địa chất trước và sau gia cố, tính toán giải

tích và mô phỏng số nhằm đánh giá toàn diện hiệu quả gia cố nền đất yếu.

2.1. Phạm vi nghiên cứu và địa chất

Khu vực nghiên cứu thuộc Dự án Khu Công nghiệp Công nghệ cao Long Thành, nơi nền đất yếu phân bố với chiều dày lớn, chủ yếu gồm các lớp sét mềm đến rất mềm, bùn sét và sét pha, bão hòa nước. Kết quả khảo sát địa chất ban đầu cho thấy chỉ số SPT thấp, mô đun biến dạng nhỏ và cường độ kháng cắt không thoát nước thấp, không đáp ứng yêu cầu chịu tải của công trình nếu không xử lý nền.

Hình 1. Vị trí nghiên cứu

Phạm vi nghiên cứu tập trung vào một đoạn nền điển hình được lựa chọn để triển khai giải pháp gia cố. Các thông số địa chất trước và sau gia cố được thu thập thông qua thí nghiệm trong phòng, thí nghiệm hiện trường được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số địa chất trước và sau gia cố nền

STT	W (%)	γ (kN/m³)	e_0	S_u (kPa)	P_c (kPa)
Trước	81,9	14,40	2,2	18,0	60,1
Sau	61,0	16,1	1,6	21,6	75,7

2.2. Phương pháp giải tích

Phương pháp giải tích được áp dụng theo hướng đánh giá hiệu quả xử lý thông qua độ cố kết theo thời gian. Trong toàn bộ quy trình, nền được phân lớp trong phạm vi xử lý và các tham số đầu vào (nén lún, cố kết) được chuẩn hóa theo từng lớp; hình học mạng bấc thấm và các đại lượng quy đổi d_e, d_w được xác định theo TCVN 9355:2013 và các lý thuyết nghiên cứu của các tác giả Indraratna and Rujikiatkamjorn (2007).

Tải trọng làm việc dài hạn dùng trong phân tích lún được xác định từ tổ hợp các thành phần gồm tải trọng do chiều cao đắp, phần hiệu chỉnh theo độ lún của nền trong quá trình cố kết, ảnh hưởng của mực nước ngầm, lớp cát đắp bù hữu cơ và hoạt tải khai thác. Trong bài báo này, biểu thức tải trọng dài hạn chỉ nhằm làm rõ cơ sở hình thành tải trọng tính toán của dự án, trong khi các giá trị cụ thể được trình bày trong phần dữ liệu đầu vào của từng kịch bản tính toán.

Theo lý thuyết, độ lún tổng cộng của nền bao gồm lún tức thời, lún cố kết sơ cấp và lún thứ cấp. Tuy nhiên, đối với nền xử lý bằng PVD kết hợp hút chân không và gia tải trước, thành phần chi phối trong giai đoạn xử lý chủ yếu là lún cố kết sơ cấp (Nghĩa et al., 2025). Do đó, phân tích giải tích trong nghiên cứu này tập trung ước lượng độ lún và độ cố kết của nền dưới tác dụng kết hợp của gia tải và hút chân không, từ đó so sánh giữa phương án thi công thực tế và phương án tăng mức gia tải vượt mức.

Hai bài toán được thiết lập nhằm đánh giá ảnh hưởng của gia tải vượt mức đối với hiệu quả cố kết của nền đất yếu xử lý bằng bấc thấm. Bài toán thứ nhất mô phỏng phương án đã thi công để kiểm tra mức độ phù hợp giữa kết quả tính toán và số liệu quan trắc thực tế. Bài toán thứ hai giữ nguyên điều kiện nền và sơ đồ xử lý, nhưng thay đổi mức gia tải vượt mức nhằm đánh giá khả năng cải thiện hiệu quả cố kết. Cách tiếp cận này cho phép sử dụng số liệu quan trắc hiện trường để hiệu chỉnh kết quả tính toán giải tích, thay vì chỉ áp dụng các công thức lý thuyết một cách độc lập.

Trong nghiên cứu này, hệ số vượt tải được xét với hai mức 1,2 và 1,4 lần tải khai thác. Giá trị này được lựa chọn theo khuyến nghị của TCVN 9355:2013, được sử dụng trong các trường hợp tính toán nhằm đánh giá ảnh hưởng của gia tải đến quá trình cố kết của nền đất yếu.

Bảng 2. Các trường hợp tính toán

Giai đoạn	Mục tiêu tính toán
Bài toán 1	Kiểm chứng tải trọng thiết kế
Bài toán 2	Kiểm chứng tải trọng vượt tải

Mục tiêu của nghiên cứu là xác định độ lún theo thời gian $s(t)$của nền đất yếu thông qua độ lún cuối cùng Δsvà độ cố kết $U(t)$, có xét đến ảnh hưởng của hút chân không và bấc thấm. Phương pháp sử dụng là lời giải giải tích của bài toán cố kết.

Độ lún theo thời gian:

$$s(t) = \Delta s \cdot U(t) \qquad (1)$$

Độ lún cuối cùng theo lý thuyết cố kết một chiều của Karl Terzaghi:

$$\Delta s = \frac{C_c H}{1+e_0} \log\left(\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma + p_0}{\sigma_0'}\right) \quad (2)$$

Quá trình cố kết theo thời gian được xác định theo Rujikiatkamjorn and Indraratna (2007):

$$U = 1 - u^* \qquad (3)$$

Độ cố kết tương đương $U_{t,vac}$, là mức độ cố kết cần đạt để tạo ra cùng độ lún như trường hợp chỉ gia tải. Theo cách quy đổi thông dụng, có thể viết:

$$U_{t,vac} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma + p_0} U_1(t) \qquad (4)$$

Trong đó p_0 là áp lực hút chân không hiệu dụng (độ lớn chân không áp lên nền, xét theo trị tuyệt đối), còn $\Delta\sigma$ là áp lực gia tải. Ý nghĩa của $U_{t,vac}$ là: khi hút chân không cung cấp thêm phần tải tương đương p_0, thì để đạt cùng mức lún mục tiêu như trường hợp chỉ gia tải, nền không cần phải đạt tới mức độ cố kết lớn.

2.3. Phương pháp mô phỏng số

Mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được thực hiện bằng phần mềm Plaxis 2D nhằm mô phỏng chi tiết quá trình gia cố nền có xét đến điều kiện thi công thực tế (Hình 2). Mô hình số cho phép đánh giá độ lún thời gian, đồng thời là cơ sở để đối sánh với kết quả quan trắc và tính toán giải tích.

Hệ thống xử lý nền bao gồm bấc thấm đứng, hệ thống bơm hút chân không với màng kín khí và lớp gia tải bằng vật liệu đắp. Gia tải được thực hiện theo từng giai đoạn, tương ứng với các bước thi công đắp nền (Bảng 3). Áp lực hút chân không theo thiết kế áp dụng với giá trị mục tiêu 60 kPa; tuy nhiên, số liệu quan trắc hiện trường cho thấy áp suất này thay đổi do một số điều kiện khách quan.

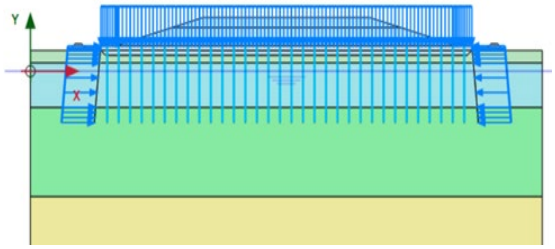
Bảng 3. Trường hợp mô phỏng

Trường hợp	Áp lực hút chân không (kPa)	Thời gian tích lũy (ngày)	Chiều cao đất đắp (m)
Thực nghiệm	0	0	0
	67	30	0,59
	75	60	0,66
	85	90	0,66
	85	120	0,65
	85	136	0,64
Thiết kế	60	71,5	1,74
Thiết kế vượt tải	60	60,5	2,09

Mô hình được xây dựng dựa trên điều kiện địa tầng, thông số kỹ thuật và các tính chất cơ lý của nền đất thực tế (Bảng 1). Các lớp đất yếu được mô phỏng bằng mô hình Mohr–Coulomb, trong khi bấc thấm được biểu diễn bằng phần tử thoát nước tương đương.

Quá trình thi công được mô phỏng theo trình tự thực tế, gồm vét bùn, thi công khuôn đường, san lấp mặt bằng và đắp gia tải theo từng lớp. Quá trình hút chân không được mô hình hóa bằng các giai đoạn tải phân bố đều tương ứng với các mức áp lực hút khác nhau. Phân tích cố kết theo thời gian được thực hiện với bước thời gian nhỏ nhằm đảm bảo ổn định và độ chính xác của mô hình.

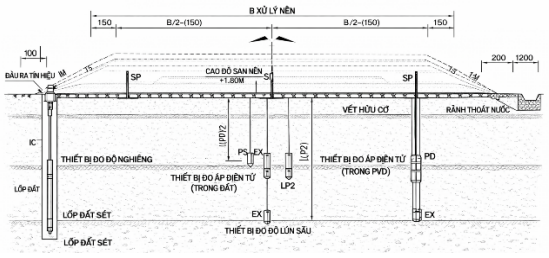
Kết quả mô phỏng được đánh giá thông qua độ lún và mức độ cố kết, đồng thời so sánh với kết quả giải tích và số liệu quan trắc hiện trường để kiểm chứng độ tin cậy. Mô hình phần tử hữu hạn không chỉ tái hiện quá trình xử lý nền mà còn được sử dụng để đối chiếu xu hướng lún theo thời gian với số liệu quan trắc. Sự tương đồng giữa kết quả mô phỏng và số liệu thực đo cho thấy mô hình phản ánh hợp lý ứng xử của nền đất, đồng thời củng cố độ tin cậy của dữ liệu quan trắc sử dụng trong nghiên cứu.



Hình 2. Mô hình Plaxis 2D

2.4. Phương pháp quan trắc hiện trường

Hệ thống quan trắc được bố trí nhằm theo dõi liên tục độ lún, áp lực hút chân không và áp lực nước lỗ rỗng trong suốt quá trình thi công. Các bàn lún được lắp đặt tại tim và hai mép đường để xác định biến dạng thẳng đứng của nền, đồng hồ đo áp lực hút chân không được đặt dưới lớp màng kín khí nhằm kiểm soát áp lực hút tác dụng và áp kế nước lỗ rỗng được bố trí tại đáy bấc thấm để đánh giá quá trình tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng dư. Dữ liệu được ghi nhận định kỳ trong toàn bộ quá trình thi công (Hình 3). Hệ thống quan trắc trên tuyến được chia thành ba vùng, mỗi vùng gồm một số mặt cắt đại diện. Tại mỗi mặt cắt, bố trí ba điểm quan trắc theo phương ngang gồm tim và hai mép đường. Trong nghiên cứu này, số liệu tại vị trí tim của một mặt cắt điển hình được sử dụng để phân tích ứng xử của nền đất trong khu vực nghiên cứu.



Hình 3. Mặt cắt bố trí thiết bị quan trắc

Trong thực tế, áp lực hút chân không có thể suy giảm do tổn thất trong hệ thống ống, độ kín của màng phủ hoặc hiệu suất bơm, làm ảnh hưởng đến hiệu quả cố kết. Vì vậy, số liệu quan trắc được sử dụng để theo dõi quá trình cố kết, đối chiếu với kết quả giải tích và mô phỏng số, đồng thời làm cơ sở đánh giá mức gia tải vượt mức trong các kịch bản nghiên cứu.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Sự thay đổi các chỉ tiêu cơ lý của đất sau xử lý nền

Để đánh giá hiệu quả xử lý nền đất yếu, các thông số cơ lý của đất trước và sau gia cố được tổng hợp, tính giá trị trung bình và xác định tỷ lệ chênh lệch nhằm phân tích định lượng mức độ cải thiện của nền. Kết quả so sánh được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. So sánh thông số địa chất trước và sau khi xử lý nền

Thông số địa chất	Giá trị trung bình		Chênh lệch (%)
	Trước	Sau	
W (%)	81,9	61,0	-25,5
γ (kN/m³)	14,4	16,1	11,8
e_0	2,2	1,6	-27,0
S_u (kPa)	18,0	21,6	20,0
P_c (kPa)	60,1	75,7	26,0

Kết quả cho thấy độ ẩm tự nhiên (W) và hệ số rỗng (e_0) giảm đáng kể sau xử lý, lần lượt 25,5% và 27,0%, phản ánh quá trình thoát nước và nén chặt cấu trúc đất trong giai đoạn cố kết. Sự thay đổi này phù hợp với cơ chế làm việc của hệ bấc thấm kết hợp hút chân không và gia tải trước, trong đó bấc thấm rút ngắn đường thoát nước, còn áp lực hút chân không làm tăng gradient thủy lực và gia tăng ứng suất hữu hiệu trong nền đất.

Xu hướng giảm của W và e_0 cũng tương đồng với các nghiên cứu thực nghiệm trước đây, khi Pham et al. (2015) ghi nhận độ ẩm và hệ số rỗng sau xử lý thường giảm còn khoảng 70% giá trị ban đầu, trong khi Koirala et al. (2022) báo cáo mức giảm độ ẩm từ 1,5 đến 28% tùy điều kiện địa chất. Giá trị giảm độ ẩm (W) 25,5% trong nghiên cứu này nằm trong khoảng hiệu quả cao của các kết quả thực nghiệm.

Sự gia tăng dung trọng ướt γ từ 14,4 lên 16,1 kN/m³ (11,8%) cho thấy nền đất đã chuyển sang trạng thái đặc chắc hơn, phù hợp với xu hướng giảm độ rỗng và hàm lượng nước trong đất. Ngoài ra, việc cải thiện đáng kể cấu trúc rỗng này cũng phù hợp với kết quả của Nguyen et al. (2023), Wu et al. (2013) khẳng định rằng tổ hợp hút chân không và bấc thấm không chỉ thúc đẩy tốc độ cố kết mà còn làm thay đổi trạng thái đất từ rất mềm sang cứng vừa, tạo điều kiện thuận lợi cho giai đoạn khai thác lâu dài.

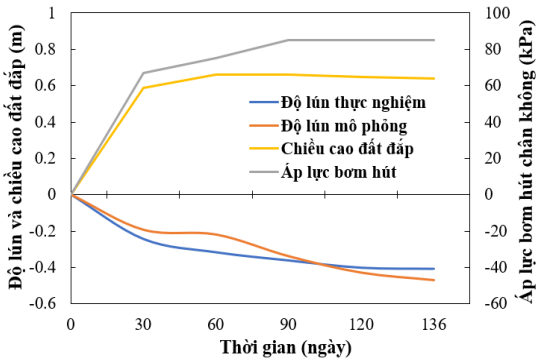
Về mặt cơ học, sức kháng cắt không thoát nước Su tăng 20,0%, cho thấy khả năng chịu cắt của nền đất được cải thiện sau xử lý. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu quan trắc hiện trường của Indraratna (2010), trong đó phương pháp kết hợp cố kết bằng hút chân không có thể làm tăng đáng kể sức kháng cắt và rút ngắn thời gian cố kết. Đồng thời, áp lực tiền cố kết P_c tăng 26,0% cho thấy nền đất đã trải qua mức ứng suất hữu hiệu lớn hơn trong quá trình xử lý. Điều này phản ánh xu hướng gia tăng mức độ tiền cố kết của nền, qua đó góp phần giảm nguy cơ lún tiếp diễn khi công trình đưa vào khai thác.

Nhìn chung, sự thay đổi đồng thời của W, e_0, γ, S_u và P_c cho thấy nền đất đã trải qua quá trình cố kết hiệu quả, đồng thời các kết quả thu được phù hợp với xu hướng được ghi nhận trong các nghiên cứu thực nghiệm trước đây về xử lý nền đất yếu bằng bấc thấm kết hợp hút chân không.

3.2. Kết quả quan trắc lún trong quá trình xử lý nền

Trong dự án này, quá trình xử lý nền được theo dõi trong 136 ngày thông qua hệ thống quan trắc hiện trường. Kết quả quan trắc về áp lực hút chân không, chiều cao đất đắp và độ lún nền theo thời gian được tổng hợp trong (Bảng 5).

Để kiểm chứng độ tin cậy của số liệu quan trắc, một mô hình phần tử hữu hạn (FEM) được xây dựng bằng phần mềm PLAXIS 2D với các thông số địa chất và điều kiện tải tương ứng với dự án. Kết quả mô phỏng lún theo thời gian được so sánh với số liệu quan trắc nhằm đánh giá mức độ phù hợp giữa mô hình tính toán và ứng xử của nền ngoài hiện trường (Hình 4).



Hình 4. Kết quả quan trắc so với mô phỏng trường hợp tải trọng 1,2 so với tải khai thác

Bảng 5. Bảng kết quả quan trắc với hệ số vượt tải 1,2

Thời gian (Ngày)	Áp lực bơm hút (kPa)	Chiều cao đất đắp (m)	Độ lún thực nghiệm (m)	Độ lún mô phỏng (m)
0	0	0	0	0
30	67	0,59	-0,24	-0,19
60	75	0,66	-0,32	-0,21
90	85	0,66	-0,36	-0,33
120	85	0,65	-0,40	-0,42
136	85	0,64	-0,41	-0,47

Kết quả cho thấy trong giai đoạn đầu (0–60 ngày), độ lún quan trắc tăng nhanh, đạt khoảng −0,32 m, tương ứng với thời điểm áp lực hút chân không tăng từ 67 lên 75 kPa và chiều cao đất đắp đạt khoảng 0,66 m. Đây là giai đoạn quá trình cố kết diễn ra mạnh do sự kết hợp giữa tải trọng gia tải và áp lực hút chân không, làm tăng ứng suất hữu hiệu và thúc đẩy quá trình thoát nước trong nền đất yếu. Sau 60 ngày, tốc độ lún giảm dần khi áp lực hút chân không đạt khoảng 85 kPa và duy trì ổn định trong các giai đoạn tiếp theo. Điều này cho thấy quá trình tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng trong nền đất đã diễn ra đáng kể và nền bắt đầu chuyển sang giai đoạn cố kết chậm. Đến thời điểm 136 ngày, độ lún quan trắc đạt khoảng −0,41 m, trong khi mô phỏng cho giá trị −0,47 m, với sai khác khoảng 14,6%.

Sự sai khác giữa kết quả mô phỏng và quan trắc có thể xuất phát từ các yếu tố thực tế như sự biến động áp lực hút chân không trong quá trình thi công. Tuy nhiên, xét về xu hướng phát triển lún theo thời gian, mô hình tính toán vẫn phản ánh tương đối hợp lý quá trình cố kết của nền đất. Cả kết quả quan trắc và mô phỏng đều cho thấy nền đất đạt mức độ cố kết khoảng U ≈ 90% vào cuối giai đoạn xử lý, với tốc độ lún giảm dần và có xu hướng ổn định.

Kết quả này cho thấy mô hình FEM có khả năng mô phỏng tương đối chính xác ứng xử cố kết của nền đất yếu khi xử lý bằng bấc thấm kết hợp hút chân không, đồng thời có thể sử dụng để phân tích và đánh giá các kịch bản hệ số vượt tải khác nhau.

Kết quả quan trắc cũng cho thấy với hệ số vượt tải khoảng 1,2 lần tải khai thác, nền đất đã đạt độ cố kết mục tiêu U ≈ 90% đáp ứng yêu cầu xử lý của dự án. Mức độ cố kết này phù hợp với các kinh nghiệm thực tế trong xử lý nền đất yếu bằng bấc thấm kết hợp hút chân không, khi nhiều dự án được xem là đạt yêu cầu khi độ cố kết lớn hơn 90% và lún dư nhỏ hơn giới hạn thiết kế (Nụ, 2016; TCVN 9355, 2013). Đồng thời, hệ số vượt tải này cũng đảm bảo các yêu cầu về ổn định thi công và ổn định lâu dài của nền theo các khuyến nghị thiết kế hiện hành. Tuy nhiên, việc phương án hiện tại đáp ứng yêu cầu kỹ thuật chưa đồng nghĩa với việc đó là mức vượt tải tối ưu cho mục tiêu rút ngắn thời gian xử lý và nâng cao trạng thái tiền cố kết của nền đất. Các nghiên cứu trước đây cho thấy ngoài áp lực hút chân không, gia tải bổ sung bằng đất đắp vẫn đóng vai trò quan trọng trong việc tăng ứng suất hữu hiệu, thúc đẩy quá trình cố kết và rút ngắn thời gian xử lý, mặc dù mức gia tải này luôn bị giới hạn bởi điều kiện ổn định của nền (Fan et al., 2023).

3.3. Ảnh hưởng của hệ số vượt tải đến quá trình cố kết của nền đất

Kết quả tính toán bằng phương pháp giải tích (AM) và mô phỏng phần tử hữu hạn (FEM) đối với hai trường hợp hệ số vượt tải 1,2 và 1,4 lần tải khai thác được trình bày trong (Bảng 6).

Bảng 6. Kết quả tính toán

Trường hợp	1,2 lần tải khai thác		1,4 lần tải khai thác	
	AM	FEM	AM	FEM
P (kPa)	60	60	60	60
Q (kPa)	65	65	80	80
U (%)	90	90	90	90
t (ngày)	71,5	71,5	60,5	60,5
S_t (m)	-0,389	-0,410	-0,389	-0,390

Kết quả cho thấy khi giữ nguyên áp lực hút chân không P = 60 kPa và độ cố kết mục tiêu U = 90%, việc tăng tải trọng đắp từ Q = 65 kPa lên 80 kPa đã làm giảm thời gian đạt độ cố kết yêu cầu từ 71,5 ngày xuống 60,5 ngày, tương đương rút ngắn khoảng 11 ngày (≈15,4%). Trong khi đó, tổng độ lún cuối cùng hầu như không thay đổi, cho thấy việc tăng vượt tải chủ yếu làm gia tăng tốc độ cố kết của

nền đất trong hệ xử lý bằng bấc thấm kết hợp hút chân không và gia tải trước.

Xu hướng này phù hợp với các nghiên cứu của Rujikiatkamjorn và Indraratna (2007, 2023), cho thấy việc gia tăng tổng tải trọng tác dụng (bao gồm gia tải và áp lực hút chân không) làm tăng gradient áp lực nước lỗ rỗng theo phương ngang, từ đó thúc đẩy dòng chảy hướng tâm về bấc thấm và đẩy nhanh quá trình tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng thặng dư. Ngoài ra, các nghiên cứu gần đây về phương pháp bấc thấm kết hợp với hút chân không (VCM-PVD) cũng cho thấy phương pháp này có thể tăng tốc độ cố kết đáng kể so với gia tải truyền thống. Trong bối cảnh đó, mức rút ngắn 15,4% thời gian cố kết khi chỉ tăng một phần tải trọng đắp được xem là phù hợp với xu hướng dự báo của các mô hình lý thuyết và thực nghiệm.

Trong phạm vi trường hợp nghiên cứu này, việc tăng hệ số vượt tải từ 1,2 lên 1,4 được xem là phù hợp với mục tiêu thiết kế thực tế, vì vừa góp phần rút ngắn thời gian xử lý, vừa hạn chế phát sinh tải đắp dư cần dỡ bỏ sau xử lý. Kết quả tính toán cho thấy chỉ cần tăng tải trọng đắp từ 65 kPa lên 80 kPa đã có thể cải thiện đáng kể thời gian xử lý, trong khi áp lực hút chân không vẫn giữ nguyên ở 60 kPa. Điều này cho thấy đối với điều kiện địa chất của dự án, việc tăng vượt tải ở mức hợp lý có thể nâng cao hiệu quả cố kết mà không cần áp dụng các mức gia tải quá lớn.

Từ góc độ kỹ thuật, kết quả này cho thấy hệ số vượt tải 1,4 lần tải khai thác có thể được xem là một phương án hợp lý hơn trong trường hợp nghiên cứu, vì giúp rút ngắn thời gian xử lý nền trong khi không làm thay đổi đáng kể đặc trưng biến dạng của nền đất. Nhìn chung, việc kết hợp số liệu quan trắc thực tế với phân tích tính toán cho thấy tiềm năng cải thiện hiệu quả xử lý nền thông qua điều chỉnh hệ số vượt tải theo hướng hợp lý, góp phần tối ưu hóa thiết kế xử lý nền đất yếu.

4. KẾT LUẬN

Hiệu quả xử lý nền đất yếu bằng giải pháp bấc thấm kết hợp hút chân không và gia tải trước thông qua trường hợp nghiên cứu tại khu công nghiệp Long Thành được đánh giá trong nghiên cứu. Kết quả phân tích cho thấy các chỉ tiêu cơ lý của đất sau xử lý được cải thiện rõ rệt. Cụ thể, độ ẩm tự nhiên giảm 25,5%, hệ số rỗng giảm 27,0%, trong khi sức kháng cắt không thoát nước tăng 20,0% và áp lực tiền cố kết tăng 26,0%, phản ánh trạng thái đất trở nên chặt hơn và có khả năng chịu tải tốt hơn.

Số liệu quan trắc lún cho thấy nền đất đạt độ cố kết mục tiêu theo yêu cầu thiết kế, với xu hướng phát triển lún phù hợp với cơ chế cố kết của hệ xử lý bấc thấm kết hợp hút chân không và gia tải trước.

Kết quả phân tích ảnh hưởng của hệ số vượt tải cho thấy khi tăng hệ số vượt tải từ 1,2 lên 1,4 lần tải khai thác có thể rút ngắn 15% thời gian đạt độ cố kết mục tiêu mà không làm thay đổi đáng kể tổng độ lún của nền đất. Điều này cho thấy việc điều chỉnh hệ số vượt tải trong phạm vi hợp lý có thể góp phần nâng cao hiệu quả xử lý nền đất yếu và tối ưu hóa thiết kế trong các điều kiện địa chất tương tự.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Fan, L., Xun, Z., & Peng, S. (2023). A Comparative Case Study on Drainage Consolidation Improvement of Soft Soil under Vacuum Preloading and Surcharge Preloading. *Applied Sciences (Switzerland), 13*(9), 5782. https://doi.org/10.3390/app13095782

Ho, S. T., Bum, K. T., & Dat, N. T. (2016). Ground Improvement via Vacuum Consolidation Method in Vietnam. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 47*(4)*,* 80-88. *https://doi.org/10.14456/seagj.2016.8*

Indraratna, B. (2010). Recent advances in the application of vertical drains and vacuum preloading in soft soil stabilisation. *Australian Geomechanics Journal, 45*(2), 1–44.

Koirala, N., Soralump, S., & Sartsin Phakdimek. (2022). Observations from Ground Improvement Using Vacuum Consolidation Method. *Civil Engineering and Architecture*, *10*(2), 771–783. https://doi.org/10.13189/cea.2022.100303

Nghĩa, L. T., Kiên, N. T., & Trung, N. M. (2025). Ảnh hưởng của từ biến và hệ số thấm trong xử lý nền đất yếu bằng bấc thấm kết hợp gia tải trước và hút chân không. *Vật Liệu và Xây Dựng*, *15*(3)*,* 11-16. https://doi.org/10.54772/jomc.03.2025.980

Nguyen, N. T., Nguyen, A. T., & Tran, V. T. N. (2023). Combined prefabrication vertical drain (PVD) with variable preloading and vacuuming method to improve soft ground in the Mekong Delta. *International Journal of Scientific Research in Science*, *10*(3), 455–463. https://doi.org/10.32628/IJSRSET23103140

Nụ, N. T. (2016). Ứng dụng phương pháp xử lý nền đất yếu bằng bấc thấm kết hợp hút chân không và gia tải trước tại nhà máy nhiệt điện Long Phú

- Sóc Trăng. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất,* 55, 46–54.

Pham, V. L., Bergado, D. T., Nguyen, L. V., & Balasubramaniam, A. S. (2013). Design and performance of soft ground improvement using PVD with and without vacuum consolidation. In *Geotechnical Engineering, 44*(4), 36–51.

Pham, V. L., Nguyen, L. V., Bergado, D., & Balasubramaniam, A. S. (2015). Performance of PVD improved soft ground using vacuum consolidation methods with and without airtight membrane. *Geotextiles and Geomembranes*, *43*(6), 111. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.05.007

Phan, M. S., Tran, D. K., Le, N. T., Pham, M. T., & Pham, H. H. G. (2025). An evaluation of vacuum pressure effects in ground improvement using prefabricated vertical drain (PVD). *Journal of Construction,* (7)*, 276–280*.

Rujikiatkamjorn, C., & Indraratna, B. (2007). Analytical solutions and design curves for vacuum-assisted consolidation with both vertical and horizontal drainage. *Canadian Geotechnical Journal, 44*(2), 188–200. https://doi.org/10.1139/T06-111

Rujikiatkamjorn, C., & Indraratna, B. (2023). Application of vertical drains and vacuum preloading for stabilising soft ground for transport infrastructure. *Smart Geotechnics for Smart Societies*, 269-277. https://doi.org/10.1201/9781003299127-23

Bộ Khoa học và Công nghệ. (2013). *Gia cố nền đất yếu bằng bấc thấm - Thiết kế, thi công và nghiệm thu* (TCVN 9355:2013).

Vu, M. Q., & Wang, T. B. (2009). Vacuum Preloading With Vertical Drains Theory and Recent Developments - Applications. *Geotechnical Research Institute, Hohai University*.

Vu, N. B. (2022). Characteristics of Clay Soft Soil in the Mekong Delta of Vietnam and Improvement Result with Cement. *Iraqi Geological Journal*, *55*(1A), 64–73. https://doi.org/10.46717/igj.55.1A.5Ms-2022-01-24

Wu, Y. J., Yuan, Y. C., & Chai, J. C. (2013). Performance of vacuum consolidation in a thick clayey deposit in Shanghai. *Lowland Technology International*, *15*, 23–30. https://doi.org/10.14247/lti.15.2_23