■Ngày nhận bài: 02/5/2023 ■Ngày sửa bài: 31/5/2023 ■Ngày chấp nhận đăng: 23/6/2023

Nghiên cứu sự làm việc của nhóm cọc ngắn trên nền địa chất yếu có cát san lấp sử dụng mô hình vật lý thu nhỏ Schneebeli

Study on the behavior of short pile groups on weak geology with sand leveling using a small-scale physical model with Schneebeli analog material

> NGUYỄN SỸ HÙNG[1*], TRẦN THỊ PHƯƠNG HUYỀN[2]. NGUYỄN TIẾN SĨ[1], PHAN THANH VŨ[3]
[1]Khoa Xây dựng, Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật TP.HCM; *Email: sihung.nguyen@hcmute.edu.vn
[2]Khoa Kỹ thuật XD, Trường Đại học SP kỹ thuật Đà Nẵng - Đại học Đà Nẵng; Email: ttphuyen@ute.udn.vn
[3]Trường Đại học Cửu Long

TÓM TẮT

Bài báo này tập trung nghiên cứu ứng xử của nhóm cọc trên nền đất yếu có cát san lấp trên mô hình thu nhỏ 2D sử dụng đất tương tự của Schneebeli. Đồng bằng sông Cưu Long có nhiều khu vực xây dựng nhà thấp tầng trên nền đất yếu, với lớp cát san lấp dày từ 2 - 5m. Phương án sử dụng cọc nhỏ (tiết diện nhỏ hơn 30×30 cm) và ngắn (chiều dài ngắn hơn 5m) đóng trong lớp đất cát có thể áp dụng cho nhà thấp tầng với điều kiện địa chất như trên. Trong mô hình thu nhỏ, chúng tôi sử dụng đất tương tự Schneebeli để thay cho lớp cát san lấp và xốp thay cho lớp đất sét yếu. Các cọc bê tông cốt thép ngắn được thay thế bằng các thanh thép có tiết diện vuông. Thí nghiệm tải thẳng đứng được thực hiện trên các nhóm cọc. Các thông số thí nghiệm được thay đổi trong chương trình thí nghiệm bao gồm khoảng cách cọc s, khoảng cách từ mũi cọc đến ranh giới hai lớp đất H, trong khi bề dày các lớp đất không đổi. Trong trường hợp nhóm cọc không có đài móng, khi khoảng cách cọc s không đổi và khoảng cách từ mũi cọc đến ranh giới hai lớp đất H giảm thì diện tích đất biến dạng dưới mũi cọc giảm. Trong trường hợp H cố định và s tăng thì sự phá hoại của đất dưới mũi cọc ngày càng trở nên cục bộ. Khi nhóm cọc có đài móng sức chịu tải của nhóm cọc tăng lên, tuy nhiên biến dạng thẳng đứng của lớp xốp cũng tăng lên theo cả phương thẳng đứng và phương ngang.

Từ khóa: Vật liệu Schneebeli; nhóm cọc; gia tải thẳng đứng; cát san lấp; đất yếu.

ABSTRACT

This paper focuses on the behavior of pile groups on soft ground with sand leveling on a 2D small-scale model using the analog soil of Schneebeli. The Mekong Delta has many areas where low-rise buildings are built on soft ground with a sand backfill layer of thickness between 2 - 5m. The option of using small (section smaller than 30×30 cm) and short (length shorter than 5m) piles driven into the sandy soil layer can be applied to low-rise buildings with the above geological conditions. In the small-scale model, we use Schneebeli analog soil to replace the leveling sand and foam instead of the weak clay layer. Short reinforced concrete piles are replaced by steel bars with a square cross-section. The vertical loading tests were carried out on 3-piles groups. Experimental parameters are changed in the test program, including the pile spacing s, and the distance from the tip of the pile to the boundary of the two soils, H, whereas the thickness of the soil layers is unchanged. If the pile group has no footing when the pile spacing s is unchanged, and the distance from the tip of the pile to the boundary of the two soils, H decreases, the deformed soil area under the pile tip decreases. If H is fixed and s is increased, soil failure under the pile tips becomes more and more localized. When the pile group has a footing, the bearing capacity of the pile group increases. As a result, however, the vertical deformation of the foam layer also increases in both the vertical and horizontal directions.

Keywords: Schneebeli soil analog; pile group; vertical loading test; sand leveling; weak soil.

1. MỞ ĐẦU

1.1. Cọc ngắn trong đất yếu có cát san lấp

Ở khu vực Đồng bằng sông Cửu Long tồn tại nhiều khu vực có lớp đất mặt rất yếu, dày có thể đến 15 m, thậm chí trên 30 m [1]; điều kiện xây dựng phức tạp, và việc xây dựng nền móng trở nên tốn kém. Trong trường hợp các công trường xây dựng có cát lấp trên nền đất yếu, nền móng có thể bị lún quá mức do cố kết, gây ra sự xuống cấp của công trình.

Sử dụng cát san lấp trên nền đất yếu vừa có ưu điểm vừa có nhược điểm. Lớp cát sẽ đóng vai trò là một dạng tải trọng và là biên thoát nước, làm cho lớp đất yếu bên dưới được cố kết. Độ lún của khu vực cát san lấp sau hai năm đầu có thể đạt từ vài chục cm đến hơn 100 cm tùy theo độ dày của vật liệu san lấp. Sự cố kết của đất yếu có thể làm cho móng nông bị lún hoặc gây ma sát âm cho móng cọc [2, 3]. Tuy nhiên, nếu nền đã được san lấp lâu ngày và độ lún cố kết còn lại không đáng kể thì lớp cát san lấp sẽ trở thành lớp rắn chắc để có thể đặt móng.

Gần đây, cọc ngắn đường kính từ 200 đến 250 mm, dài từ 2 đến 4 mét cắm vào lớp cát san lấp đã được sử dụng làm giải pháp móng trong xây dựng nhà thấp tầng. Tuy nhiên, rất ít công trình nghiên cứu và chứng minh rõ ràng về giải pháp này. Câu hỏi đặt ra là khoảng cách giữa các cọc trong nhóm cọc và khoảng cách từ mũi cọc đến lớp đất yếu có ảnh hưởng như thế nào đến lớp đất yếu; ứng xử của nhóm cọc đài cao và nhóm cọc có đài thấp (bè cọc) khác nhau như thế nào?

Ứng xử nhóm trong móng cọc đã dẫn đến nhiều trường hợp hư hỏng được ghi nhận hoặc độ lún quá mức, mặc dù các thử nghiệm tải trọng được thực hiện trên một cọc đơn lẻ đã chỉ ra sức chịu tải đạt yêu cầu. Một trường hợp điển hình của sự cố nền móng là cọc đơn được đóng vào một lớp đất chặt hoặc cứng bên dưới là đất sét mềm yếu. Lớp đất yếu không chịu ứng suất ở mức độ đáng kể khi cọc đơn chịu tải, nhưng khi tải trọng từ kết cấu bên trên tác dụng lên nhóm cọc, vùng ứng suất sẽ mở rộng xuống đất sét mềm. Khi đó có thể xảy ra hiện tượng lún quá mức hoặc phá hoại cắt tổng thể [4].

Các phương pháp phân tích độ lún của nhóm cọc và khái niệm "Hiệu ứng tương tác" trong nhóm cọc đã được giới thiệu và tiên phong bởi Poulos [5]. Poulos đã nghiên cứu ứng xử của các nhóm cọc, tương tác giữa hai cọc và sự chồng chất của các hiệu ứng riêng lẻ của các cọc liền kề trong các nhóm khi xem xét ảnh hưởng của các tham số như loại nhóm cọc, tỷ lệ L/d, độ sâu tương đối h /L, hệ số Poisson, và khoảng cách s/d (trong đó L là chiều dài cọc, d là đường kính cọc, h là khoảng cách từ mặt đất đến đá cứng, s là khoảng cách giữa các cọc). Một số nhà nghiên cứu đã tiến hành thử tải nhóm cọc tại hiện trường để nghiên cứu hiệu ứng nhóm cọc trong đất sét hoặc cát [6], [7]. Những người khác nghiên cứu nhóm cọc trên các mô hình vật lý nhỏ [8-12]. Tuy nhiên, cơ chế tương tác giữa cọc và đất dưới tác dụng của tải trọng vẫn chưa được làm sáng tỏ, đặc biệt trong trường hợp cọc nằm trong lớp đất tốt nhưng bên dưới là lớp đất yếu.

Để nghiên cứu cơ chế tương tác của nhóm cọc-đất ta có thể nghiên cứu biến dạng của đất nền dưới tác dụng của lực tác dụng lên nhóm cọc. Ekisar và Otani đã sử dụng tia X CT để nghiên cứu hiện tượng tạo vòm trên nền đắp gia cố bằng cọc cứng [13]. While và Bolton đã sử dụng phương pháp Digital Image Correlation để nghiên cứu chuyển vị và đường biến dạng trong quá trình thi công cọc trong mô hình biến dạng phẳng trong đất cát. Họ đã chỉ ra cách biến dạng cắt phát triển ở mũi cọc trong quá trình đóng cọc [14]. Towhata và Aoyama đã sử dụng kiểm tra trực quan & phân tích hình ảnh (PIV) kết hợp với cảm biến xúc giác và phát xạ âm thanh (AE) để nghiên cứu cách mặt đất biến dạng trong vùng tác động đáng kể của tương tác cọc - đất và mối quan hệ tải trọng - lún của cọc nhóm [15]. Các nghiên cứu trên được thực hiện trong các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm và sử dụng đất tự nhiên. Tuy nhiên, những phương pháp này đòi hỏi công nghệ và kỹ thuật phức tạp.

Một cách tiếp cận khác là sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn. Ju [16] đã tiến hành phân tích độ lún bằng phần mềm phần tử hữu hạn PLAXIS 3D cho nhóm cọc. Fuchun et al. thực hiện phân tích độ lún của nhóm cọc sử dụng phần tử hữu hạn PIGLET [17]. Gowthaman và Nasvi đã sử dụng PLAXIS để mô hình hóa các cọc đơn và nhóm cọc trong các lớp cát bụi với độ nén lún khác nhau. Do tính phi tuyến tính ảnh hưởng đến tương tác của nhóm cọc, mô hình LE và MC không dự đoán được ứng xử của nhóm cọc. Tính phi tuyến của đất và các hiệu ứng tương tác được nắm bắt rõ ràng trong mô hình HS và sự kết hợp của cả hai hiệu ứng phi tuyến dẫn đến dự đoán thực sự về ứng xử lún của nhóm cọc [18]. Tuy nhiên, dự đoán độ lún đáng tin cậy của móng cọc vẫn là một vấn đề tồn tại trong những bài toán địa kỹ thuật [16], [19]. Bên cạnh đó, việc lựa chọn mô hình vật liệu phù hợp và các thông số mô hình hóa dựa trên điều kiện địa chất và tải trọng vẫn là một thách thức lớn trong mô phỏng số ứng xử lún của móng cọc [18].

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã nghiên cứu tương tác nhóm cọc - đất, biến dạng của nền đất dưới tác dụng của nhóm cọc bằng cách sử dụng vật liệu tương tự Schneebeli thay cho đất cát và xốp thay cho đất sét, trong một mô hình vật lý 2D thu nhỏ và đơn giản.

1.2. Vật liệu tượng tự Schneebeli

Vật liệu tương tự Schneebeli được giới thiệu vào năm 1956 bởi Schneebeli [20]. Vật liệu này được cấu tạo từ các thanh inox tròn có chiều dài 60mm. Các thanh thép này bao gồm ba đường kính 3mm, 4mm và 5mm với tỷ lệ thể tích lần lượt là 34%, 35% và 31%. Mật độ của vật liệu giao động trong khoảng 6,42 và 6,53 [21].

Thanh Schnebeeli cũng có thể được làm từ các vật liệu khác như gỗ, nhựa hoặc nhôm [22] hoặc thanh thép tròn có cạnh vát [23]. Đường kính của các thanh có thể thay đổi từ 2 mm đến 20 mm. Đối với các vật liệu khác nhau, mật độ của vật liệu và góc ma sát trong sẽ khác nhau tùy thuộc vào mục đích mô hình hóa. Nhận thấy mô hình sử dụng vật liệu Schneebeli rất phù hợp để nghiên cứu ứng xử của đất rời dưới góc độ cơ học vĩ mô cũng như cơ học vi mô.

Schneebeli [20] đã thực hiện các thí nghiệm nén hai trục trên các thanh Schneebeli hợp kim nhôm có bề mặt nhẵn và nhám. Tác giả nhận thấy góc ma sát trong dao động từ 24^0 đến 26^0 với bề mặt nhẵn, ngược lại với bề mặt gồ ghề góc ma sát trong từ 34 đến 35^0. Kastner [24] đã thử nghiệm trên các thanh Schneebeli bằng thép mạ thép không gỉ trong một máy nén ba trục lớn với áp suất buồng cao (lên đến 500 kPa). Góc nội ma sát đo được là 21^0, hệ số Poisson hai chiều là 0,9 và mô đun biến dạng là $E=107500(\ )^{0,5}$.

Dolzhenko [25] đã thực hiện các thí nghiệm nén hai trục trên cùng một vật liệu như trong [20]. Tác giả đã thu được góc nội ma sát là 24^0. Dolzhenko [21] cũng thực hiện thí nghiệm để đo hệ số áp suất tĩnh K0, dao động trong khoảng 0,65 đến 0,74. Bằng cách đếm các thanh trên một đơn vị diện tích, tác giả đề xuất hệ số rỗng của đất tương tự là 0,21 [21].

Mô hình Schneebeli được sử dụng rộng rãi vì những ưu điểm sau [26]:

Đất tương tự Schneebeli thể hiện sự giãn nở thể tích khi bị biến dạng, tương tự như đất cát chặt; Mô đun biến dạng của đất phụ thuộc vào cường độ ứng suất; Đất tương tự nặng hơn đất tự nhiên với mật độ trung bình là 6,2. Điều đó cho phép giảm 1/3 kích thước với trạng thái ứng suất còn lại trong mô hình; Độ lặp lại mô phỏng dễ dàng của các thí nghiệm được đảm bảo; Mô hình không cần giá đỡ bề mặt (chỉ cần giá đỡ 4 góc) vì các thanh tự cân bằng, không giống như khi sử dụng cát thật và tránh hiệu ứng cạnh tiếp xúc. Mô hình này dễ dàng xử lý hình ảnh và đo trường biến dạng bằng cách chia ô vuông hoặc tô màu các thanh.

Tuy nhiên, mô hình Schneebeli vẫn tồn tại một số nhược điểm [26]:

Góc ma sát tương đối nhỏ, chỉ từ 20 - 25^0, trong khi góc ma sát của cát nén là 30 - 40^0; Nó không thể mô phỏng các bài toán 3D, ví dụ bài toán tác dụng vòm lên đầu cọc.

Vật liệu tương tự Schneebeli được sử dụng để mô phỏng đất không dính. Nhiều tác giả đã sử dụng nó để hiểu và đơn giản hóa ứng xử của đất từ 3D sang 2D. Kastner sử dụng Schneebeli để mô hình đào sâu trong đô thị [24], Marsouri [27] sử dụng mô hình này để mô phỏng tường chắn đất nửa cứng, Al Abram [28] và Dolzhenko [2] sử dụng mô hình này để nghiên cứu trường ứng suất khi đào đường hầm. Amina (1996) đã sử dụng mô hình Schneebeli để nghiên cứu gia cố đất bằng vải địa kỹ thuật. Caudron [29] đã nghiên cứu sự sụp đổ của đường hầm dưới lòng đất và tác động lên kết cấu bên trên [30]. A. B. Bolt [31] cũng sử dụng mô hình Taylor-Schneebeli để mô phỏng sự sụp đổ của tường chắn đất phụ thuộc vào điều kiện biên.

Trong nghiên cứu cải tạo đất yếu bằng cọc cứng thẳng đứng bằng mô hình vật lý hai chiều, Jenck [32] đã sử dụng các phần tử Schneebelli, bọt và thép thay vì đất không dính, đất mềm và cọc cứng tương ứng [32].

2. MÔ HÌNH THU NHỎ 2D

2.1. Mô hình vật lý thu nhỏ

Mô hình vật lý thu nhỏ thường được sử dụng khi các thí nghiệm trên mô hình thực không thể thực hiện được hoặc quá tốn kém hoặc rủi ro; khi mô hình mô phỏng bằng phần mềm chưa đủ các phương trình để mô tả hiện tượng. Cụ thể mô hình vật lý thu nhỏ được sử dụng cho các trường hợp sau:

(1) Để nghiên cứu các hiện tượng mới, phức tạp chưa được khám phá, không thể nghiên cứu trong thực địa hoặc mô hình hóa trong các mô phỏng số do thiếu các phương trình mô tả đất một cách chính xác và đầy đủ.

(2) Để kiểm chứng các phương pháp phân tích/thiết kế của các kỹ thuật xây dựng có tính rủi ro cao và kiểm chứng trình tự xây dựng mới hay chuyên biệt.

(3) Để kiểm chứng các cơ chế của sự phá hoại hay sụp đổ; kiểm chứng các giả thuyết hay lý thuyết về phá hoại hoặc sụp đổ.

(4) Để kiểm chứng các khía cạnh khác nhau của thiết kế cho một phương án nền móng mới mà chưa có các quy tắc thực hành hoặc hướng dẫn nào tồn tại. Nói cách khác, giảm sự không chắc chắn trong các giả định thiết kế.

(5) Để hiểu các biến dạng của nền móng trong các trường hợp tải trọng khác nhau [nghĩa là thiết kế trạng thái giới hạn về khả năng sử dụng (SLS)] và liên kết biến dạng với thí nghiệm đất thành phần.

(6) Để phát triển các phương pháp thiết kế từ đó có thể tiêu chuẩn hóa.

(7) Để kiểm chứng các mô hình cấu thành của đất bằng cách thực hiện các thử nghiệm mô hình tỷ lệ có kiểm soát.

Mặc dù các mô hình vật lý có một số ưu điểm, nhưng chúng cũng có một số vấn đề khó giải quyết, chẳng hạn như sự thỏa mãn về tỷ lệ mô hình. Để có thể thay thế cho một mô hình thực tế với quy mô đầy đủ, một mô hình tỷ lệ phải tuân theo quy luật tương tự, đảm bảo tính tương tự của ứng xử cơ học giữa mô hình thu nhỏ và nguyên mẫu liên quan của nó. Các định luật này cho phép áp dụng giải pháp thu được trên một mô hình cho một vấn đề có kích thước thực. Việc thiết lập các định luật tương tự dựa trên sự phân tích thứ nguyên bằng cách xem xét tính bất biến của các phương trình tổng quát của cơ học với sự thay đổi đơn vị. Các phương trình này là các phương trình động lực học tổng quát, phương trình bảo toàn khối lượng và các định luật ứng xử của các vật liệu khác nhau [40].

James [40] phân biệt hai loại mô hình vật lý trong cơ học đất:

1) Bản thân mô hình tỷ lệ là một nguyên mẫu; ứng xử của nó phải đối chiếu với các phương pháp phân tích nhằm cải thiện các phương pháp này. Các kết quả thu được trong các thí nghiệm này thường không áp dụng được cho việc thiết kế các kết cấu thực nhưng lại có tầm quan trọng lớn đối với việc thiết lập các nguyên tắc thiết kế. Khi đó, các quy tắc tương tự không còn quan trọng nữa (Roscoe, 1968).

2) Mô hình vật lý thu nhỏ đáp ứng các nguyên tắc tương tự và có thể dự đoán ứng xử của kết cấu nguyên mẫu thực. Mô hình máy ly tâm thường được áp dụng vì nó cho phép duy trì cùng một mức ứng suất. Các đường tải trọng của kết cấu được tái hiện sau đó.

Sử dụng các mô hình vật lý nhỏ giúp dự đoán định lượng ứng xử của kết cấu thực tế trong khi nhận thức được các giới hạn áp dụng kết quả. Việc sử dụng các phương pháp mô phỏng bằng mô hình thu nhỏ bao gồm tái tạo kết cấu và các điều kiện biên của nó, tải trọng và quy luật ứng xử của nguyên mẫu trong khi tôn trọng các điều kiện tương tự [39]. Các mô hình tỷ lệ cho phép tái tạo nhanh, nhiều lần các kết cấu thực và có thể được gia tải đến điểm phá hoại. Sự lựa chọn các tính chất vật liệu được mở rộng hơn và dễ dàng thay đổi các thông số khác nhau để nghiên cứu ảnh hưởng của chúng.

Thông tin thu được từ các mô hình số và kết quả thử nghiệm là rất quan trọng để phát triển sự hiểu biết về ứng xử của các kết cấu thực tế và các phương pháp để thiết kế chúng một cách hiệu quả; Việc sử dụng các mô hình vật lý có thể giúp nâng cao hiểu biết của chúng ta về cách thức hoạt động của các kết cấu. Điều quan trọng cần nhớ là cả mô hình vật lý và mô hình số đều là những lựa chọn tốt miễn là chúng thể hiện chính xác cấu trúc thực tế.

Các mô hình vật lý có thể được sử dụng kết hợp với các mô hình số như một mô hình kết hợp để tận dụng các lợi ích của từng mô hình. Trong một mô hình lai, người ta có thể có kết nối mô hình số-vật lý hoặc vật lý-số. Chẳng hạn, mô hình số được sử dụng để cung cấp đầu vào cho mô hình vật lý, mô hình này sau đó cung cấp đầu ra của nó làm đầu vào cho cùng một mô hình số hoặc mô hình số khác.

Trong nghiên cứu của chúng tôi, loại mô hình sử dụng là loại đầu tiên được mô tả bởi James (1972) [40]. Mô hình thu nhỏ được đề xuất không tôn trọng nghiêm ngặt các quy tắc tương tự, đặc biệt là hơn là các vật liệu tương tự được đưa vào mô hình. Mục đích của mô hình này không phải là tái tạo định lượng ứng xử của một kết cấu thực mà là tạo thành một cơ sở dữ liệu thử nghiệm sẽ được so sánh với các phương pháp thiết kế và sẽ dùng làm tài liệu tham khảo cho các phương pháp mô hình số. Tuy nhiên, vật liệu tương tự được tạo thành từ các thanh thép nặng hơn so với đất thông thường; mật độ của nó là 62kN/m^3, hạn chế sự biến dạng của sự giống nhau giữa mô hình và nguyên mẫu vì cường độ ứng suất giảm xuống xấp xỉ 3 lần.

2.2. Các vật liệu tương tự sử dụng trong nghiên cứu

Nghiên cứu này sử dụng vật liệu tương tự Schneebeli để mô phỏng lớp cát san lấp. Vật liệu xốp được sử dụng để thay thế lớp đất sét yếu.

Để không phải xác định lại các thông số của vật liệu, nhóm tác giả đã sử dụng vật liệu Schneebeli phổ biến như trong nghiên cứu của Dolzhenko [21]. Trong đó các thanh Schneebeli được làm bằng chất liệu thép không gỉ, có ba đường kính là 3, 4, 5 mm. Chiều dài mỗi thanh là 6mm. Tỷ lệ trọng lượng là 34, 35 và 31% tương ứng với từng đường kính trên (Hình 1). Các thông số của vật liệu tương tự Schneebeli, lấy từ các nghiên cứu trước đây [21], [25].

Hình 1. Hình ảnh vật liệu tương tự Schneebeli

Để xem xét lực dính trong trường hợp đất dính, các phương pháp khác nhau đã được sử dụng. Ghabraie et al. [33] đã sử dụng hỗn hợp cát-thạch cao để mô phỏng các mặt phẳng đệm và địa tầng để nghiên cứu việc đào hầm. Tác giả và cộng sự [34] đã sử dụng thạch cao thay cho các tầng đất để mô phỏng đào đường hầm mỏ. Chemenda et al. [35] đã sử dụng hydrocacbon lỏng và rắn để nghiên cứu sự ổn định trượt lở đất và mái dốc trong không gian ba chiều.

Trong mô hình 2D, đất dính trong mô hình có thể được mô phỏng bằng xốp [32], bọt cao su [36, 37] và than bùn [38]. Trong nghiên cứu này, vật liệu xốp thay thế đất yếu có các thông số như bảng I.

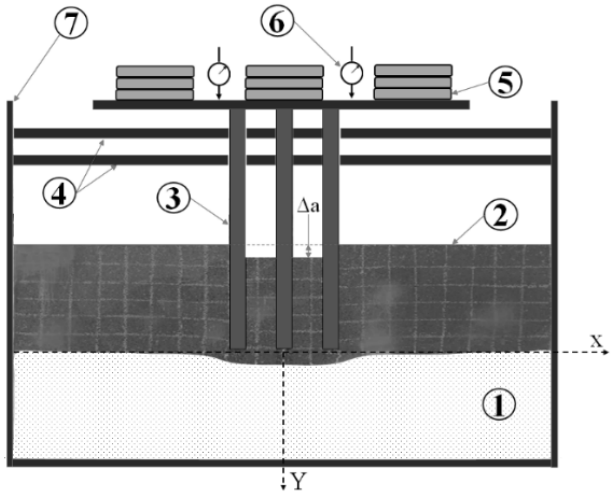
BẢNG I. CÁC THÔNG SỐ TẤM XỐP

Tên chỉ tiêu	Tiêu chuẩn áp dụng	Đơn vị	Kết quả
Trọng lượng riêng	DIN 53420	Kg / m^3	8
Lực nén ở biến dạng 10%	DIN 53421	N / cm^2	3.5

2.3. Kích thước mô hình

Kích thước khung của mô hình là dài 1,0 m, cao 70 cm và rộng 6 cm. Chiều cao của lớp xốp là 30 cm, bề rộng là 6cm bằng chiều dài các thanh Schneebeli. Chiều cao của lớp vật liệu tương tự Schneebeli là 30 cm. Trong mô hình, cọc rỗng thép tiết diện vuông 3x3 cm thay thế cho cọc ngắn BTCT. Nhóm cọc bao gồm ba cọc (Hình 2).

Các cọc được liên kết với dầm chất tải đủ độ cứng để coi như không bị biến dạng khi chịu tải. Tải trọng là các khối thép xếp chồng lên nhau trên dầm tải. Trên bề mặt các lớp xốp và vật liệu Schneebeli kẻ ô vuông 5x5cm để thuận tiện cho việc quan sát trường biến dạng.



Hình 2. Sơ đồ thiết bị thí nghiệm. 1: Lớp xốp; 2: Lớp vật liệu Schneebeli; 3: Các cọc thép; 4: Dầm gắn cọc và trục dẫn hướng; 5: Tải trọng; 6: Đồng hồ chuyển vị; 7: Khung thiết bị.

2.4. Chương trình thí nghiệm

Chương trình thí nghiệm bao gồm 18 thí nghiệm. Trong đó khoảng cách cọc s thay đổi theo 3 giá trị 3D, 6D, 9D trong đó D là đường kính cọc. Khoảng cách H từ đầu cọc đến điểm nối hai lớp vật liệu xốp - Schneebeli là 5cm, 10cm và 15cm. Với mỗi cặp giá trị (S, H) tiến hành 2 thí nghiệm.

Để chuẩn bị thử nghiệm, lớp xốp đầu tiên được đặt vào vị trí. Tiếp theo, các cọc được cố định vào vị trí ban đầu với (S, H) đã được xác định. Sau đó, các thanh Schneebeli được xếp chồng lên nhau bằng tay trên lớp xốp.

BẢNG II. BẢNG TƯƠNG QUAN THÔNG SỐ GIỮA MÔ HÌNH VÀ KẾT CẤU THỰC

Thông số	Thực tế	Mô hình thu nhỏ
Chiều dày lớp cát/ Chiều dày lớp Schneebeli	2.5÷4 m	30 cm
Chiều dày lớp sét/ Chiều dày lớp xốp	10÷50 m	30 cm
Kích thước cọc	20x20÷25x25 cm	3x3cm
Chiều dài cọc	2÷3,5 m	15÷25 cm
Tỷ lệ L/D	8 ÷ 17,5	5÷8

Tải được thực hiện theo từng cấp độ. Chuyển vị thẳng đứng của cọc được đo bằng hai đồng hồ đo, sau đó lấy giá trị trung bình. Cả hai chuyển vị vi sai của bề mặt vật liệu bên ngoài các cọc biên và đường bao biến dạng của bề mặt lớp xốp đều được đo bằng thước thép. Sai số là ± 0,5 mm.

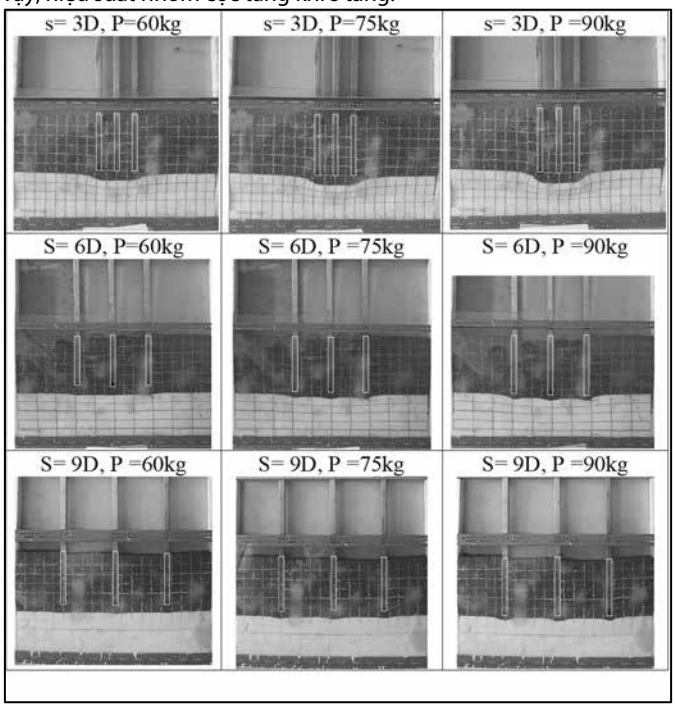
3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

3.1. Đường cong quan hệ biến dạng

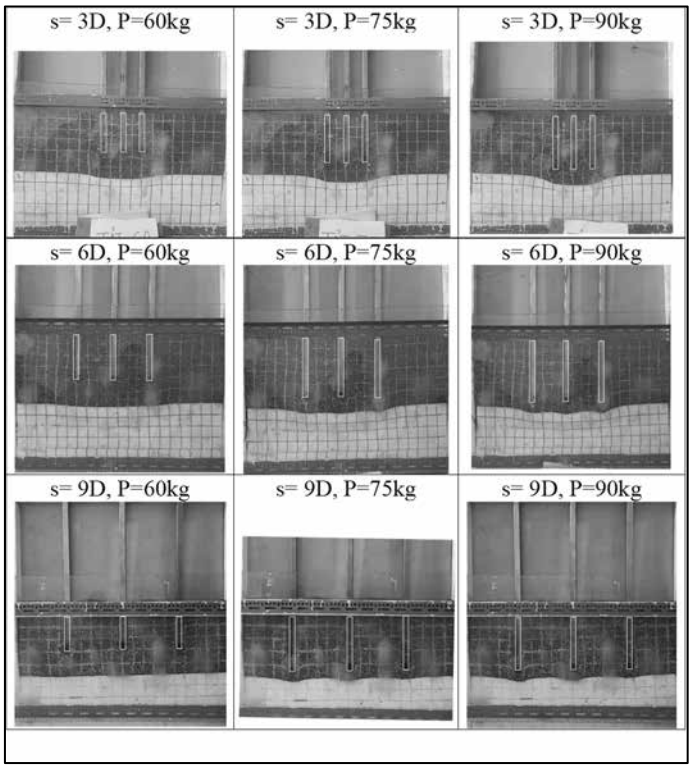
Hình ảnh thí nghiệm, khi H=5cm và H=15cm, khoảng cách cọc s=3D, 6D và 9D, ở tải trọng 60, 75 và 90 kg, được thể hiện trong Hình 3, 4. Các đường cong tải trọng - độ lún được thể hiện trong Hình 5.

Nếu s không đổi, với cùng tải trọng tác dụng, chuyển vị của cọc giảm khi chiều dài cọc tăng, tức là khi H giảm (Hình 5). Điều đó có thể giải thích là do cọc càng dài thì sức chịu tải của cọc càng tăng do lực ma sát càng tăng, và lực ma sát đóng vai trò chi phối đến sức chịu tải của cọc.

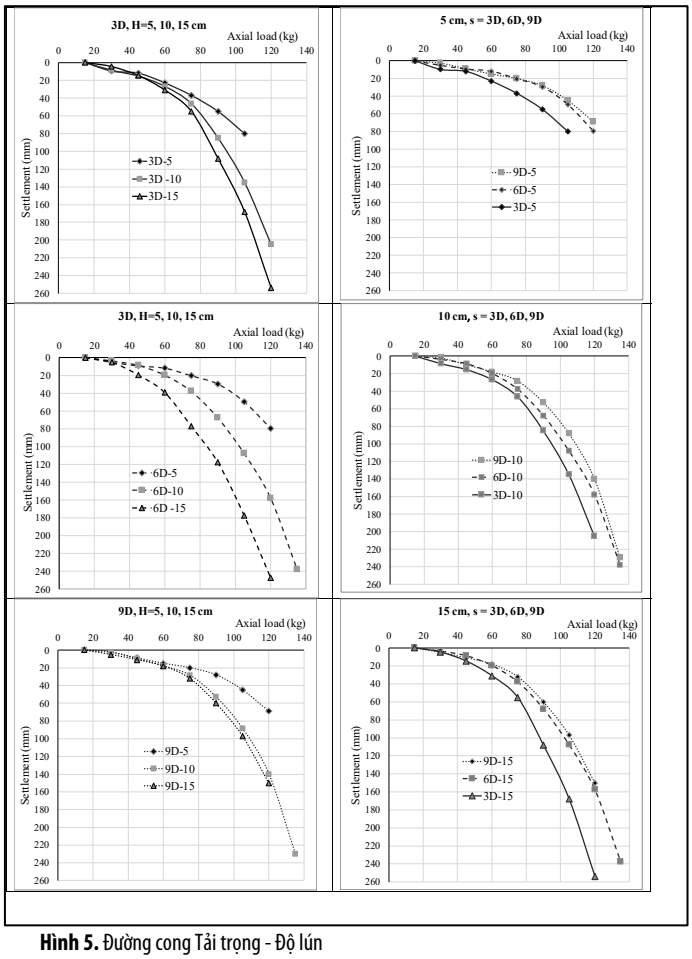
Nếu H không đổi, chuyển vị của các cọc có cùng tải trọng sẽ giảm khi khoảng cách giữa các cọc tăng lên. Tuy nhiên, sự khác biệt về độ dịch chuyển giữa hai trường hợp s=6D và s=9D là tương đối nhỏ. Như vậy, hiệu suất nhóm cọc tăng khi s tăng.



Hình 3. Hình ảnh mô hình với H= 5cm; s và P thay đổi.



Hình 4. Hình ảnh mô hình với H= 15cm; s và P thay đổi.



Hình 5. Đường cong Tải trọng - Độ lún

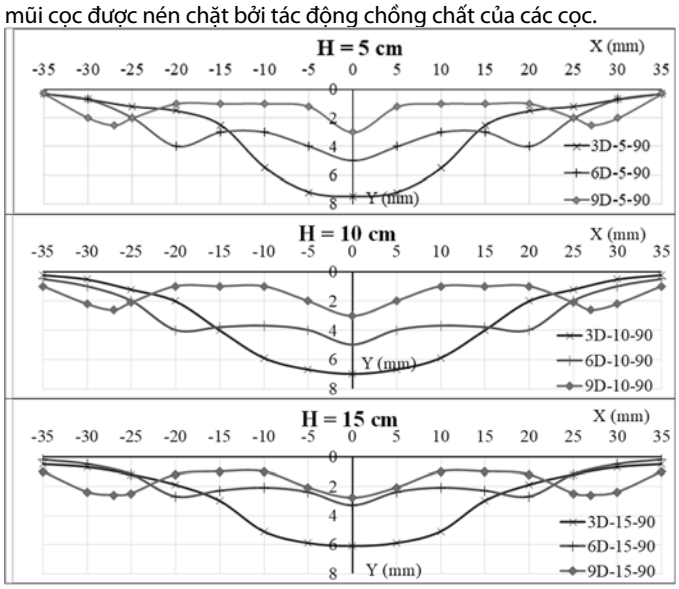
3.2. Biến dạng bề mặt lớp xốp

Đường viền biến dạng của bề mặt xốp tương ứng với các khoảng cách cọc và chiều dài cọc khác nhau ở cấp tải trọng 90 kg được thể hiện trong Hình 6.

Khi khoảng cách giữa các cọc là 3D, đường chuyển vị là một đường cong lõm có một đỉnh tương ứng với chuyển vị lớn nhất tại vị trí tâm cọc. Trong khi với khoảng cách cọc 6D và 9D, đường chuyển vị có ba đỉnh tương ứng với vị trí của ba mũi cọc. Chuyển vị bên dưới đỉnh cọc giữa lớn hơn một chút so với hai bên. Như vậy, trong trường hợp khoảng cách cọc 3D, nhóm cọc làm việc là cọc có đường kính lớn, có hiện tượng tập trung ứng suất rõ rệt. Ngược lại, các cọc có xu hướng làm việc độc lập khi khoảng cách các cọc s=3D và s=6D.

Với cùng tải trọng và chiều dài cọc (tức là khoảng cách H), chuyển vị cực đại sẽ giảm khi khoảng cách giữa các cọc tăng lên. Tuy nhiên, khi H tăng lên, sự khác biệt về độ dịch chuyển lớn nhất sẽ thu hẹp đáng kể. Ví dụ: chênh lệch chuyển vị tối đa giữa khoảng cách cọc 3D và 9D khi tải trọng là 90 kg là 100% khi H=5cm và chỉ 40% khi H=15cm.

Xét trường hợp H = 15 và s = 6D hoặc s = 9D, ở tải trọng 60 - 90 kG, các đường nằm ngang trong vật liệu Schneebeli phía dưới mũi cọc và bề mặt lớp bọt biến thành các đường cong lồi có ba đỉnh dưới ba đỉnh. đầu cọc. Với s=3D, các đường nằm ngang dưới mũi cọc nằm trong vật liệu Schneebeli có dạng giống như trên. Tuy nhiên, bề mặt lớp xốp bị biến dạng thành một đường cong lồi chỉ có một đỉnh nằm dưới tâm cọc. Hiện tượng này rất giống với kết quả của Ikuo Towhata và al. [15] và Gowthaman S. [18]. Do đó, khi s = 3D, vật liệu bên dưới mũi cọc được nén chặt bởi tác động chồng chất của các cọc.



Hình 6. Đường cong biến dạng bề mặt lớp xốp tại P = 90 kG.

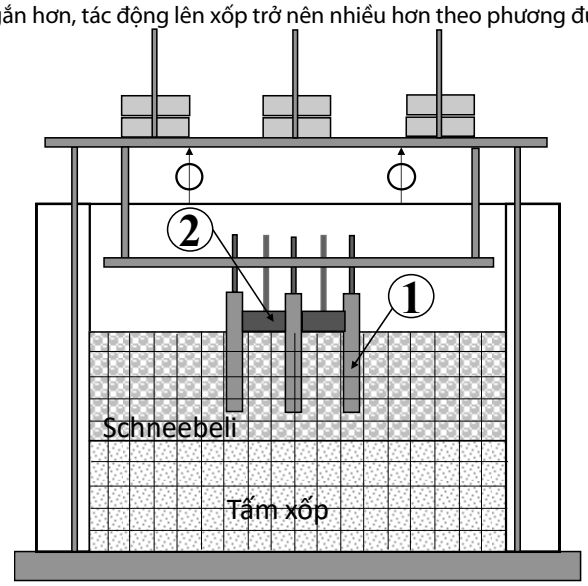
3.3. So sánh móng cọc đài cao và móng cọc có đài

Nghiên cứu cũng đã tiến hành các thí nghiệm với trường hợp móng cọc có đài móng (móng bè cọc) như hình 7. Kết quả cho thấy khoảng cách mũi cọc đến xốp H tăng lên thì sức chịu tải giảm đi (Hình 8), tuy nhiên sự suy giảm là không rõ rệt.

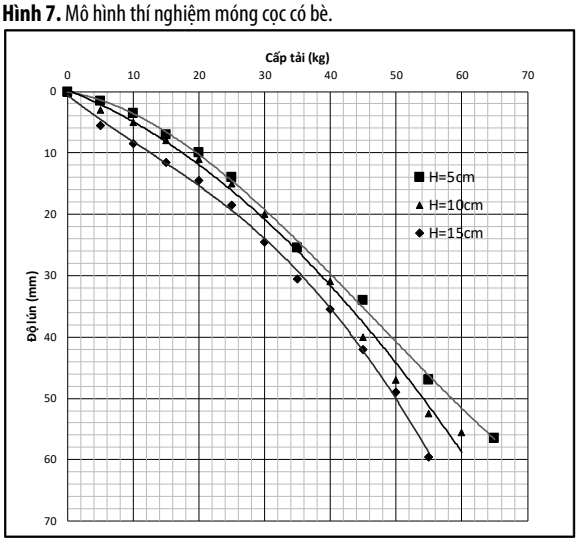
Tuy nhiên nếu so sánh đường cong Tải trọng - Độ lún giữa hai trường hợp có cọc có bè và cọc không bè, sức chịu tải của cọc có bè cao hơn đáng kể. Ví dụ trong trường hợp khoảng cách các cọc là 3D, H= 10cm, chuyển vị ở cấp tải 40kg là 31mm và 46mm tương ứng với trường hợp coc bè cọc và không có bè cọc. Như vậy bè cọc đã tham gia vào khả năng chịu tải của móng một cách đáng kể (Hình 9).

Ở một khía cạnh khác, trong trường hợp cọc có đài móng chuyển vị lớn nhất của lớp xốp hầu như giữ nguyên khi H thay đổi từ 5cm lên

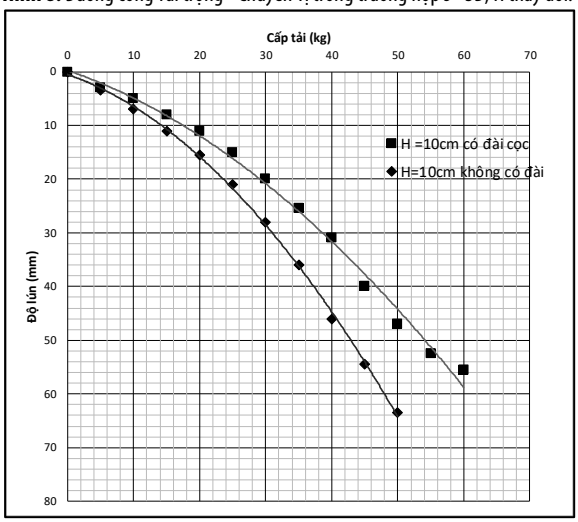
10cm, tuy nhiên tăng đáng kể khi H=15cm (Hình 10). Như vậy khi cọc ngắn hơn, tác động lên xốp trở nên nhiều hơn theo phương đứng.



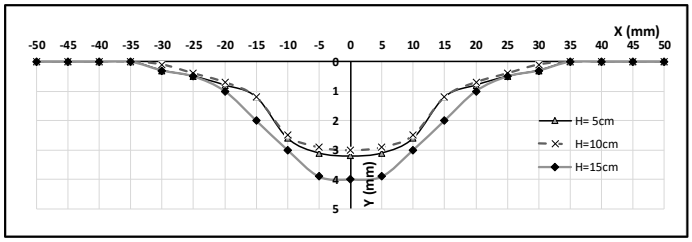
Hình 7. Mô hình thí nghiệm móng cọc có bè.



Hình 8. Đường cong Tải trọng - Chuyển vị trong trường hợp s=3D, H thay đổi.

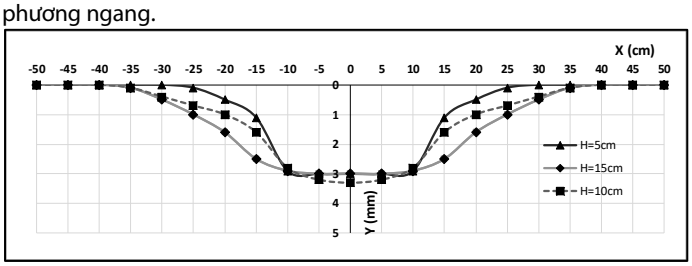


Hình 9. So sánh đường cong Tải trọng - Chuyển vị trong trường hợp cọc có đài và không có đài, khoảng cách các cọc là 3D, H=10cm.



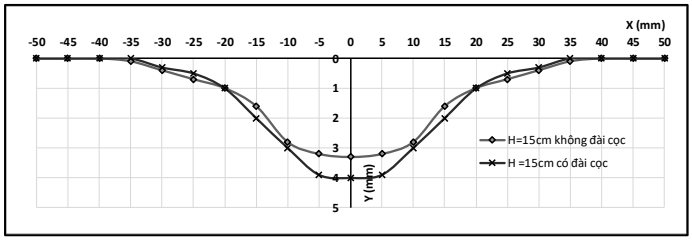
Hình 10. Đường biến dạng xốp trong trường hợp cọc có bè với s= 3D, P=50kG và H thay đổi.

Trong khi đó, ở trường hợp cọc không có đài móng chuyển vị lớn nhất của lớp xốp hầu như giữ nguyên khi H thay đổi từ 5cm lên 15cm, tuy nhiên chuyển vị theo phương ngang tăng đáng kể (Hình 11). Như vậy khi cọc ngắn hơn, tác động lên xốp trở nên nhiều hơn theo phương ngang.



Hình 11. Đường biến dạng xốp trong trường hợp cọc không có bè với s= 3D, P=50kG và H thay đổi.

Khi so sánh hai trường hợp cọc có bè và không bè, sự khác nhau khi H=5 và H=10cm là không đáng kể. Tuy nhiên sự khác nhau là rõ nét khi H=15cm (Hình 12).



Hình 12. Đường biến dạng xốp trong trường hợp cọc không có bè và không có bè, s= 3D, P= 50kG, H=15cm.

4. KẾT LUẬN

Một mô hình vật lý nhỏ tương đối đơn giản, sử dụng vật liệu tương tự Schnibeeli để thay thế đất cát và xốp thay thế đất sét mềm, đã giúp nghiên cứu ứng xử và tương tác giữa nhóm đất-cọc trong trường hợp cọc ngắn nằm trong lớp đất cát phía trên nền đất yếu. lớp đất sét. Chương trình thử tải với ba giá trị H và ba khoảng cách cọc s=3D, 6D và 9D; choc hai trường hợp nhóm cọc có đài (có bè) và không có đài.

Kết quả thí nghiệm cho thấy khả năng chịu tải của nhóm cọc không có đài tăng khi chiều dài cọc tăng (H giảm) và s giảm. Bằng việc vẽ biểu đồ trên bề mặt Schneebeli và vật liệu xốp rồi quan sát, sau đó phân tích sự thay đổi hình dạng của lưới trong quá trình gia tải, nghiên cứu đã chỉ ra được sự tương tác giữa nhóm cọc và đất. Trong trường hợp s= 6D và 9D, cọc có xu hướng làm việc độc lập, biểu hiện bằng biến dạng cục bộ của các đường ngang xung quanh cọc và dưới mũi cọc, kể cả bề mặt hoặc lớp xốp. Tuy nhiên với s=3D biến dạng cục bộ dưới mũi cọc chỉ xảy ra ở phần vật liệu Schneebeli sát mũi cọc. Trong khi đó, toàn bộ vật liệu Schneebeli bên dưới mũi cọc được nén chặt, và bề mặt xốp bị biến dạng thành một đường cong lõm với đỉnh nằm dưới tâm mũi cọc. Qua so sánh chuyển vị cực đại của bề mặt lớp xốp cho thấy khoảng cách s càng nhỏ và khoảng

cách từ đầu cọc đến lớp sét H càng ngắn thì tác động của nhóm cọc lên lớp sét càng rõ rệt.

Trong trường hợp nhóm cọc có đài, sức chịu tải nhóm cọc tăng lên khi chiều dài cọc tăng lên, tương tự như trường hợp nhóm cọc không có đài. Tuy nhiên sức chịu tải của nhóm cọc có đài lớn hơn so với nhóm cọc không có đài móng. Như vậy đất dưới đài móng có tham gia vào sức chịu tải. Biến dạng của lớp xốp tăng lên khi H tăng. Biến dạng lớp xốp khi nhóm cọc có đài lớn hơn so với nhóm cọc không có đài trong cùng điều kiện tải trọng và hình học.

Các kết quả trong nghiên cứu này tương thích với nhiều kết quả nghiên cứu dưới dạng phương pháp phân tích, thực nghiệm hay mô phỏng. Do đó, sử dụng vật liệu Schneebeli và xốp làm vật liệu tương tự cho đất sét và đất rời để mô phỏng các bài toán nhóm cọc nói riêng và một số địa kỹ thuật nền móng khác nói chung là một phương pháp tiềm năng.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này thuộc đề tài mã số T2022-151TĐ được tài trợ bởi Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM năm 2022.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyen Uyen, Soil reinforcing in civil construction. Construction publishing house, Ha Noi, 2009.

[2] V. C. Trinh, "Negative friction on piles and its effect on construction," in The 3rd National Science Conference on Construction Incidents and Damages, 2005.

[3] D. T. Duong, Q. H. Pham, "Testing the neutral surface method in calculating settlement of pile groups," Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) vol. 23(3), pp. 62-68, 2015.

[4] M. Tomlinson, J. Woodward, "Pile design and construction practice", Fifth edition, Taylor & Francis, 2008.

[5] H.G. Poulos, "Analysis of the settlement of pile groups", Geotechnique 4: 449-471. 1968.

[6] A. S. Vesic, "Experiments with Instrumented Pile Groups in Sand, Performance of Deep Foundations", ASTM STP444, 177-222, 1969.

[7] Yu, Ching-Han, "On Design and Construction of Pile Group Foundation of Taipei 101", Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, Vol.42 No.2, pp.56-69, 2011.

[8] S. H. Nguyen, T. P. H. Tran, and Q. M. Pham, "Experimental Study on Pile Group Efficiency in Various Types of Soil Using a Small–Scale Physical Model", CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure, Lecture Notes in Civil Engineering 203, 2022.
https://doi.org/10.1007/978-981-16-7160-9_108

[9] B. V. H. Lan, "Research on the group effect to the capacity and settlement of vertical piles group", Thesis of doctor. Southern institute of water resources research, 2017.

[10] Nihar Gogoi, "A Model Study of Micropile Group Efficiency under Axial Loading Condition", International Journal of Civil Engineering Research. ISSN 2278-3652 Vol. 5, Number 4, pp. 323-332, 2014.

[11] C. Harish, M. Manjunatha, "Experimental study on load settlement behaviors of micro pile under vertical loading", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol. 03, Issue: 07, 2016.

[12] S. Darci, A. Soltani, and M. A. Arjomand, "Experimental Investigations on the Efficiency Coefficient of Pile Groups", International Journal of Advanced Biotechnology and Research, Vol-7, Special Issue3, pp. 2344-2350, 2016.

[13] T. Ekisar, J. Otani and J. Hironaka, "Visualization of soil arching on reinforced embankment with rigid pile foundation using X-ray CT", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 32, 44 – 54, 2012.

[14] D. J. White and M. D. Bolton, "Displacement and strain paths during plane – strain model pile installation in sand", Géotechnique, Vol. 54, No. 6, 375 – 397, 2004.

[15] Aoyama, Shogo, et al. "Application of advanced procedures to model tests on the subsoil behavior under vertical loading of group pile in sand." *Indian Geotechnical Journal* 46.1 (2016): 64-76.

[16] Ju J, "Prediction of the Settlement for the Vertically Loaded Pile Group Using 3D Finite Element Analyses", Journal of Marine Georesources & Geotechnology 33 (3): 264-271, 2013.

[17] Fuchun XUE, Jianlin MA and Liping YAN, "Three-dimensional FEM analysis of bridge pile group settlement in soft soils", Geotechnical Special Publication ASCE 220: 135-143. 2011.

[18] S. Gowthaman, and M. C. M. Nasvi, "2D and 3D Numerical Simulation of Load-Settlement Behaviour of Axially Loaded Pile Foundations." American Journal of Civil Engineering and Architecture, vol. 5, no. 5 (2017): 187-195. doi: 10.12691/ajcea-5-5-2.

[19] B. A. McCabe and B. M. Lehane, "Behaviour of axially loaded pile groups Driven in clayey silt", Journal of Geotechnical and Environmental Engineering: 401-410, 2006.

[20] G. SCHNEEBELI, "Une mécanique pour les terres sans cohésion", Compte rendus des séances de l'Académie des Sciences. Paris:1956, Tome 243, pp. 2647-2673

[21] Dolzhenko Nataliya, "Etude expérimentale et numérique de modèle réduit bidimensionnel du creusement d'un tunnel". Diss. Lyon, INSA, 2002.

[22] R. Gourves and F. Mezghani, "Micromécanique des milieux granulaires approche expérimentale utilisant le modèle de Schneebeli." Revue Française de Géotechnique 42 (1988): 23-34.

[23] B. Terrade, A. S. Colas, and D. Garnier. "Assessing and repairing masonry retaining structures by yield design analysis and experimental modelling." *Structural Analysis of Historical Constructions: Anamnesis, Diagnosis, Therapy, Controls*. CRC Press, 2016. 1407-1414.

[24] R. Kastner, "Excavations profondes en site urbain". Thèse Génie Civil, Lyon: INSA de Lyon, 1982; 409p

[25] N. Dolzhenko, P. Mathieu, R. Kastner, "Modélisation expérimentale et numérique bidimensionelle d'ouvrages souterrains urbains. Réalisation d'essais biaxiaux et oedométrique sur le sol analogique de Taylor-Schneebeli", In : XVIIIème Rencontres de l'AUGC à Lyon, «Aménagement urbain», 2000, 27-28 mai, p 281-288

[26] Jenck, Orianne, "Le renforcement des sols compressibles par inclusions rigides verticales. Modélisation physique et numérique", Diss. INSA de Lyon, 2005.

[27] F. Masrouri, "Comportement des rideaux de soutènement semi-flexibles", Th: Génie Civil, Lyon: INSA de Lyon: 1986; 247p

[28] Al Abram, Ismail, "Etude sur modèle réduit bidimensionnel du champ de déplacement induit par le creusement d'un tunnel à faible profondeur: interaction avec les ouvrages existants", Diss. Lyon, INSA, 1998.

[29] A. Benrabah, J. Gielly, "Behavioural Study of a Reinforced Analogical Soil Under External Loads", Geotextiles and Geomembranes 14 (1996) 43-56

[30] Caudron, Matthieu, "Etude expérimentale et numérique de l'interaction sol-structure lors de l'occurence d'un fontis", Diss. Lyon, INSA, 2007.

[31] A. F. Bolt, E. Dembicki, and G. A. Horodecki. "The failure mechanism of a trench wall caused by additional soil pressure." *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*. 1996. P.63-67

[32] O. Jenck, D. Dias, R. Kastner, "Soft ground improvement by vertical rigid piles two-dimensional physical modelling and comparison with current design methods", Soils and Foundations. Volume 45, Issue 6, December 2005, Pages 15-30

[33] R. G. James, "Some aspects of soil mechanics model testing". In: Parry R. H. G. Ed. Proc. of Stress-strain behaviour of soils. Roscoe Memorial Symposium, 1972, Cambridge, Angleterre. pp 417-440

[34] M. Al Heib, F. Emeriault, and H. L. Nghiem. "On the use of 1g physical models for ground movements and soil-structure interaction problems." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 12.1 (2020): 197-211.

[35] B. Ghabraie, R. Gang, and John V. Smith. "Characterising the multi-seam subsidence due to varying mining configuration, insights from physical modelling." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 93 (2017): 269-279.

[36] He, Man-chao, et al. "Physical modeling of failure process of the excavation in horizontal strata based on IR thermography." *Mining Science and Technology (China)* 19.6 (2009): 689-698.

[37] A. Chemenda, S. Bouissou, D. Bachmann, Three-dimensional physical modeling of deep-seated landslides: new technique and first results. Journal of Geophysical Research, 110 (4) (2005), 10.1029/2004JF000264

[38] Hewlett, W. J., and M. F. Randolph. "Analysis of piled embankments." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. Vol. 25. No. 6. Elsevier Science, 1988.

[39] van Eekelen, J.M. Suzanne, A. Bezuijen, and O. Oung, "Arching in piled embankments; experiments and design calculations." *BGA International Conference on Foundations: Innovations, observations, design and practice: Proceedings of the international conference organised by British Geotechnical Association and held in Dundee, Scotland on 2–5th September 2003*. Thomas Telford Publishing, 2003.

[40] H. G. Kempfert, D. Zaeske, and D. Alexiew, "Interactions in reinforced bearing layers over partial supported." *Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure: Theory and Practice, Planning and Design, Construction and Maintenance: Proceedings of the Twelfth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam, Netherlands, 7-10 June 1999*. Taylor & Francis US, 1999.