

Nghiên cứu tác động của dòng thấm đến sức kháng ma sát cọc

Experimental study on the impact of seepage flow on pile friction resistance

> TS PHAN THÀNH CHIẾN¹, PGS.TS NGUYỄN MINH ĐỨC²

GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật TP.HCM;

¹Email: chienpt@hcmute.edu.vn; ²Email: ducnm@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Dòng thấm trong các hố đào sâu có thể làm tăng áp lực nước lỗ rỗng, giảm ứng suất hiệu quả và làm suy yếu sự kết dính của các hạt đất, dẫn đến giảm sức kháng ma sát của cọc. Nghiên cứu này xem xét tác động của dòng thấm lên sức kháng ma sát của cọc bằng cách sử dụng mô hình thí nghiệm hố đào tường vây thu nhỏ. Thông qua các điều kiện thí nghiệm khác nhau về độ sâu hố đào và mực nước ngầm, sức kháng ma sát của cọc được đánh giá dựa trên phương pháp phân tích ứng suất hiệu quả kết hợp với đo áp lực nước lỗ rỗng và phương pháp đo trực tiếp. Kết quả nghiên cứu cho thấy dòng thấm làm giảm đáng kể sức kháng ma sát của các cọc phía trong hố đào gần tường vây, và hiệu ứng này giảm dần khi khoảng cách đến tường tăng lên. Các yếu tố chính ảnh hưởng đến hiện tượng này bao gồm vị trí cọc, gradient thủy lực, độ sâu hố đào và độ sâu chôn cọc. Mức giảm sức kháng ma sát lớn nhất quan sát được là 91,23%. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng đề xuất mối tương quan thực nghiệm giữa vị trí cọc, sự giảm ma sát và các hệ số an toàn chống hiện tượng thoát nước ngầm, cung cấp những thông tin quan trọng cho việc thiết kế các hố đào sâu ổn định.

Từ khoá: Dòng thấm; sức kháng ma sát cọc; ứng suất hữu hiệu; tường vây; ổn định hố đào.

ABSTRACT

Seepage flow in deep excavations can elevate pore water pressure, reduce effective stress, and weaken soil particle cohesion, leading to a decrease in pile friction resistance. This study examines the impact of seepage on pile friction using a scaled-experimental diagram wall model. By conducting different scenarios of excavation depth and water table, friction resistance of piles was evaluated incorporating both effective stress and pore pressure measurements. The results were validated through direct friction measurements. The study reveals that seepage significantly reduces friction resistance for piles located near the diagram wall, with the effect diminishing as the distance from the wall increases. Key factors influencing this phenomenon include pile location, hydraulic gradient, excavation depth, and embedment depth. The maximum observed reduction in friction resistance was 91.23%. These findings are used to develop an empirical correlation that relates pile location, friction reduction, and safety factors against piping, providing valuable insights for the design of stable deep excavations.

Keywords: Seepage flow; pile friction resistance; effective stress; diagram wall; excavation stability.

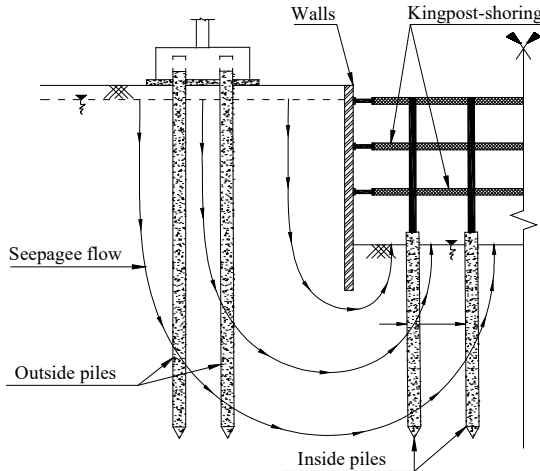
1. GIỚI THIỆU

Ngày nay cùng với sự đô thị hoá mạnh mẽ, các dự án tại đô thị thường bao gồm các hố đào sâu để xây dựng nhiều tầng hầm, bãi đậu xe ngầm hoặc đường hầm (Benmebarek et al., 2005). Do đó, việc đảm bảo ổn định cho các hố đào sâu này là rất quan trọng để đảm bảo tính an toàn và tuổi thọ lâu dài của công trình. Trong các dự án này, hệ thống chống đỡ Kingpost thường được sử dụng để gia cố và ổn định tường hố đào (Peansupap et al., 2021). Trong hệ thống này, như minh họa ở Hình 1, các cọc tạm thời được lắp đặt trong hố đào, đặc biệt trong các phương pháp thi công top-down và semi top-down, để chống đỡ hố đào khi các tầng hầm được xây dựng (Crean & Kelly). Trong các trường hợp có công trình lân cận, các cọc này có thể tương tác với các cọc nền của các tòa nhà hiện hữu gần đó, làm tăng thêm sự phức tạp cho quá trình gia cố.

Trong quá trình thi công hố đào sâu, hệ tường cử và hệ Kingpost được lắp đặt, đào đất bên trong, nước được bơm ra khỏi hố đào, dẫn đến giảm áp lực nước lỗ rỗng và ứng suất tổng của đất nền bên trong hố đào, tạo chênh lệch mực nước giữa trong và ngoài hố đào, hình thành dòng thấm vào trong hố đào. Quá trình thi công đào đất bên trong tiếp tục làm giảm ứng suất tổng của đất. Dòng thấm tác dụng vào ứng suất hiệu quả trong đất, từ đó làm giảm sức kháng ma sát mà đất cung cấp cho cọc, ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chịu tải của cọc (Atkinson, 2007; Hussin, 2006). Do đó, hiểu rõ sự tương tác giữa dòng thấm và sức kháng ma sát của cọc là rất quan trọng đối với sự ổn định tổng thể của hệ thống Kingpost và an toàn của công trình trong quá trình thi công (Reddi, 2003).

Một số nghiên cứu trước đây đã trình bày tác động của dòng thấm đến sự tương tác giữa đất và cọc, trong đó áp lực nước lỗ rỗng

có thể gây ra ma sát âm trên cọc. Hiện tượng này làm tăng độ lún của móng cọc, trong những trường hợp nghiêm trọng, có thể dẫn đến xô lệch hoặc nổi cọc (Jia et al. 2024). Áp lực thấm tăng lên gây ra hiệu ứng hoá lỏng xung quanh cọc, làm giảm độ chặt của đất nền, giảm áp lực ngang của đất truyền lên cọc, từ đó làm giảm sức kháng ma sát của cọc (Tran et al., 2005; Zou et al., 2021). Trong một số trường hợp, phải kể đến ảnh hưởng của dòng thấm và an toàn cho công trình, chiều dài và đường kính cọc thiết kế được tăng lên từ đó ảnh hưởng đến giá thành công trình (Richards et al. 2016).



Hình 1. Dòng thấm tác động lên hệ cọc trong quá trình thi công hố đào sâu

Sức chịu tải cực hạn của cọc (Q_{ult}) bao gồm 2 thành phần: sức chống mũi (Q_p) và sức kháng ma sát (Q_s) (Engineers, 2005). Quá trình thi công hố đào sâu, các cọc tạm có chiều dài ngắn được sử dụng. Sức chịu tải của các cọc này chủ yếu đến từ sức kháng ma sát với đất nền xung quanh. Giá trị Q_s trong đất cát tăng tuyến tính theo độ sâu tới một điểm sâu cực hạn, sau đó giá trị này không đổi (Rajapakse, 2007). Sức chịu tải cực hạn cọc được tính như sau:

$$Q_{ult} = Q_s + Q_p = f_{ms(i)} A_s + q_p A_p \tag{1}$$

trong đó, Q_s : sức kháng ma sát cọc do tương tác giữa cọc và đất nền xung quanh (N); Q_p : sức chống mũi cọc (N); $f_{ms(i)}$: sức kháng ma sát đơn vị (N/m²); A_s : diện tích xung quanh cọc (m²); q_p : sức kháng mũi đơn vị (N/m²); A_p : diện tích mũi cọc (m²).

Sức kháng ma sát đơn vị phụ thuộc vào vị trí tính toán của cọc, được xác định theo công thức sau:

$$f_{ms(i)} = \sigma'_v \times k_0 \times k_{ms} \tag{2}$$

trong đó, k_0 : hệ số áp lực ngang đất; k_{ms} : hệ số ma sát đất và cọc; σ'_v : ứng suất hữu hiệu của đất tại vị trí tính toán (N/m²).

Tác động của dòng thấm lên ứng suất hữu hiệu đất có thể được mô tả như sau: khi dòng thấm di chuyển từ dưới lên trên, làm giảm ứng suất hữu hiệu giữa các hạt đất. Ngược lại, dòng thấm hướng

xuống làm tăng ứng suất hữu hiệu giữa các hạt, tạo thêm áp lực thấm xuống phía dưới (Tanaka & Toyokuni, 1991). Ứng suất hữu hiệu của đất dưới trong môi trường dòng thấm được tính toán bằng như sau:

$$\sigma'_v = \sigma_v - u - i \times \gamma_w \tag{3}$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - u + i \times \gamma_w \tag{4}$$

trong đó, σ_v : ứng suất tổng tại vị trí tính toán (N/m²); u : áp lực nước lỗ rỗng tại vị trí tính toán (N/m²); i : gradient thủy lực; γ_w : trọng lượng riêng nước (N/m³).

Bên cạnh đó, tác động của dòng thấm lên sự ổn định của các hố đào sâu đã được nghiên cứu thực nghiệm bởi Karl Terzaghi vào năm 1943 (McNamee, 1949; Terzaghi, 1943). Trong thí nghiệm này, đáy hố đào phía trong tường vây đã bị đẩy trôi do lực thấm hướng lên ngay cả khi thiết kế đã tính toán đầy đủ áp lực đất và nước theo phương ngang. Thí nghiệm chỉ ra rằng, khu vực xuất hiện hiện tượng xô ngã liên hệ trực tiếp tới chiều sâu của cọc ngầm vào đất nhưng không xem xét đến sức kháng ma sát trên bề mặt của khối đất này. Do đó, các cọc được bố trí trong khu vực xảy ra xô ngã rất có thể các cọc này sẽ bị ảnh hưởng nghiêm trọng hơn so với các cọc khác.

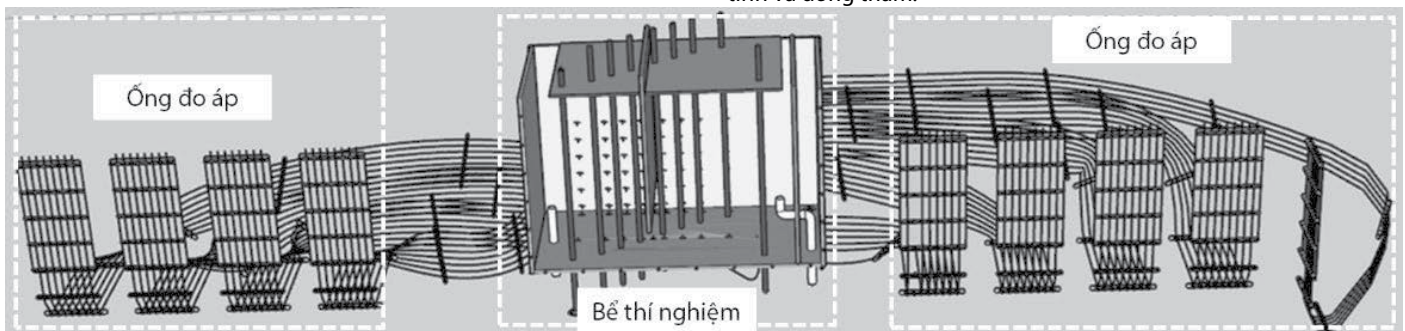
Các nghiên cứu trước đây đã tập trung vào tác động của dòng thấm lên các yếu tố như hệ số an toàn chống xô ngã, áp lực ngang của đất và chuyển vị hố đào. Tuy nhiên, nghiên cứu về ảnh hưởng của dòng thấm lên sức kháng ma sát thân cọc, đặc biệt đối với các cọc nằm trong và ngoài hố đào sâu, vẫn còn hạn chế. Nghiên cứu này trình bày một mô hình thực nghiệm để khảo sát tác động của dòng thấm lên sức kháng ma sát thân cọc bằng cách thay đổi gradient thủy lực, vị trí cọc, độ sâu chôn của tường vây và hệ số an toàn chống xô ngã. Nghiên cứu cũng đưa ra các mối tương quan thực nghiệm đã được phát triển để dự đoán mức giảm sức kháng ma sát dựa trên vị trí cọc và các hệ số an toàn chống xô ngã.

2. CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

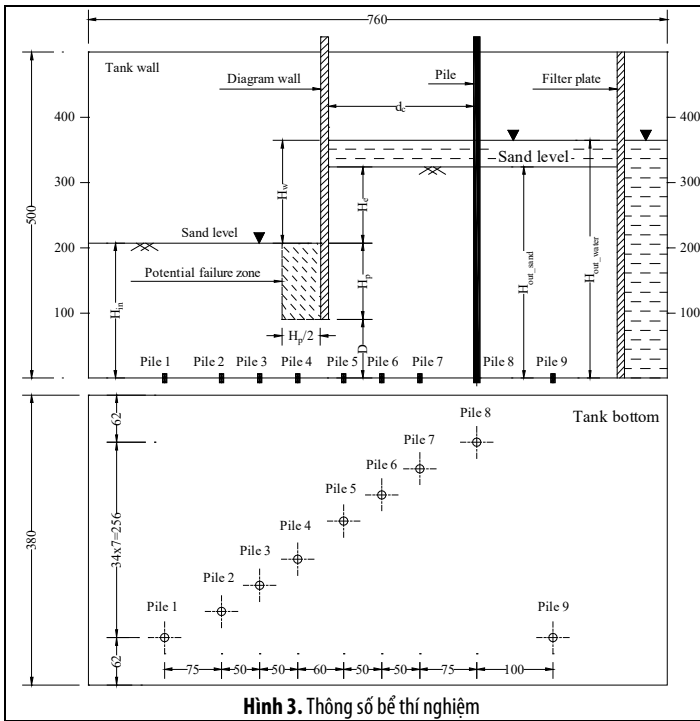
2.1. Mô hình thí nghiệm

Nghiên cứu sử dụng mô hình thực nghiệm thu nhỏ để khảo sát sức kháng ma sát của cọc trong và ngoài tường vây dưới ảnh hưởng của dòng thấm. Hình 2 minh họa hệ thống mô hình, bao gồm: 1 bể thí nghiệm và các hệ thống đo áp.

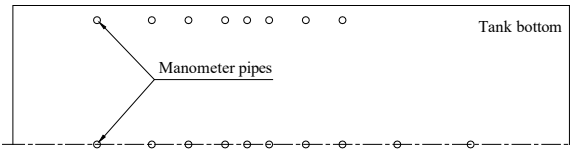
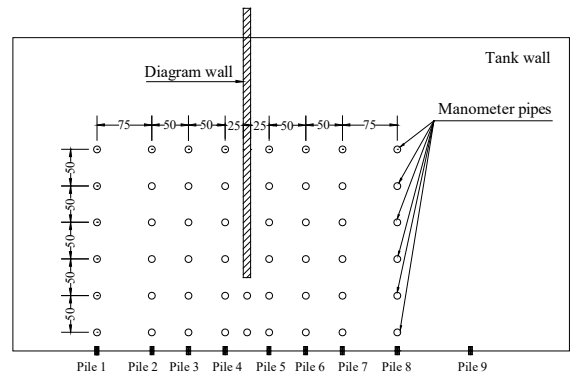
Hình 3 mô tả chi tiết các thông số thí nghiệm. Bể thí nghiệm được làm bằng nhựa acrylic, có kích thước 760mm chiều dài, 380mm chiều rộng và 500mm chiều cao. Trong đó D là khoảng cách từ đáy tường vây đến lớp không thấm nước, H_e là độ sâu hố đào, H_p là độ sâu chôn của tường, H_w là chênh lệch mực nước trong và ngoài hố đào, và d_c là khoảng cách từ cọc đến tường. Tổng số 9 cọc được lắp đặt, áp lực nước lỗ rỗng thay đổi được đo thông qua các ống đo áp. Thí nghiệm được thực hiện trong 3 trường hợp: cát khô, nước tĩnh và dòng thấm.



Hình 2. Tổng thể mô hình thí nghiệm



Hình 3. Thông số bể thí nghiệm



Hình 4. Vị trí ống đo áp

Tổng cộng 68 ống đo áp được sử dụng trong thí nghiệm mô hình, bao gồm 50 ống được kết nối với tường bể và 18 ống được kết nối với đáy bể. Mỗi ống đo có đường kính trong là 3mm. Hình 4 hiển thị sơ đồ bố trí các ống đo.

2.2. Cọc thí nghiệm

Cọc thép được sử dụng trong thí nghiệm có đường kính (D_c) là 12mm, chiều dài 700mm và khối lượng trung bình 648g. Cọc được thiết kế xuyên qua tấm nắp và đáy bể để loại bỏ thành phần sức chống mũi và định tâm di chuyển thân cọc thông qua các ổ bi trượt đảm bảo cọc di chuyển thẳng đứng trong quá trình thí nghiệm. Khoảng cách giữa tâm các cọc, và khoảng cách từ các cọc biên đến thành bể, được thiết kế hơn $4D_c$ để giảm thiểu hiệu ứng nhóm, đảm bảo tính đồng nhất của đất nền xung quanh tất cả các cọc, đồng thời giảm thiểu tác động biên của thành bể (Liu et al., 2023; Zhang et al., 1998). Ngoài ra, một cọc được đặt trong vùng nguy hiểm xói ngầm để mô phỏng điều kiện cực đoan. Đối với bài toán thấm 2D, theo đề xuất của Terzaghi thì vùng nguy hiểm có dạng hình chữ nhật với chiều cao tương ứng với H_p và chiều rộng bằng $H_p/2$ (Harza, 1935; Terzaghi, 1943; Mesri, 1996). Hình 5 minh họa cọc được sử dụng trong nghiên cứu.

Trong nghiên cứu này, sức kháng ma sát cọc được xác định thông qua phương pháp đo trực tiếp và phương pháp tính toán phân tích thông qua hệ thống đo áp lực lỗ rỗng và ứng suất hữu hiệu. Thí nghiệm đo sức kháng ma sát thân cọc được thiết kế dựa trên nguyên tắc hạ cọc, mô phỏng quá trình thi công ép cọc. Phía trên đầu cọc được đặt tải trọng như khối gia tải khi ép cọc. Để đảm bảo tính nhất quán, cọc được hạ với tốc độ không đổi là 0,5 mm/phút.

Hình 5c trình bày sơ đồ tác dụng lực lên cọc. Phương trình cân bằng lực tác dụng lên cọc như sau:

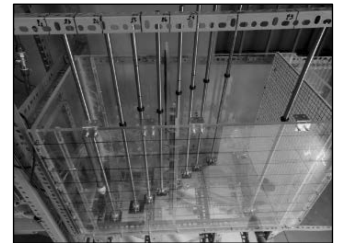
$$F_{ms} + f_{ms1} + f_{ms2} + F = P_1 + P_2 \quad (5)$$

trong đó F : phản lực đầu cọc (N); F_{ms} : sức kháng ma sát thân cọc (N); f_{ms1} , f_{ms2} : ma sát hệ thống tại các ổ bi trượt (N); P_1 : trọng lượng khối tải đầu cọc (N); P_2 : trọng lượng bản thân (N).

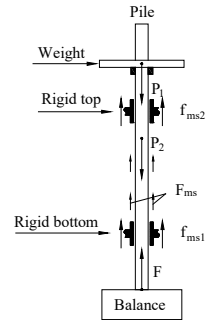
Trong phương pháp đo trực tiếp, phản lực F được đo liên tục thông qua bàn cân phía dưới chân cọc, dữ liệu này được tự động chuyển đến máy tính. Bằng cách trừ đi tổng trọng lượng P_1 , P_2 và ma sát thiết bị $f_{ms1,2}$ từ phản lực đầu cọc F , sức kháng ma sát thân cọc được xác định.



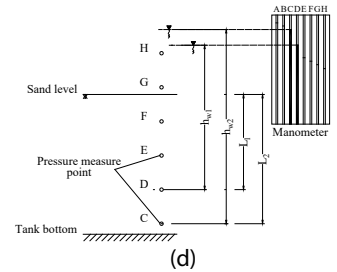
(a)



(b)



(c)



(d)

Hình 5. Mô hình cọc. (a) Cọc trong quá trình thí nghiệm. (b) Cọc ban đầu. (c) Sơ đồ xác định lực tác dụng cọc. (d) Sơ đồ tính toán áp lực nước lỗ rỗng lên cọc

Tuy nhiên, sức kháng ma sát thân cọc này không đều nhau dọc theo thân cọc, giá trị này được tính thông qua biểu thức sau với $f_{ms(i)}$ là sức kháng ma sát đơn vị dọc theo thân cọc (N).

$$F_{ms} = \pi D_c \int_{L_1}^{L_2} f_{ms(i)} \quad (6)$$

Trong điều kiện thí nghiệm cát khô, sức kháng ma sát thân cọc là F_{ms1} , phương trình (6) được biến đổi như sau:

$$F_{ms1} = \pi \times D_c \times k_0 \times k_{ms} \times \gamma_d \times \left(\frac{L_2^2 - L_1^2}{2} \right) \quad (7)$$

Trong điều kiện thí nghiệm nước tĩnh và dòng thấm, sức kháng ma sát thân cọc lần lượt là F_{ms2} và F_{ms3} , phương trình (6) trở thành:

$$F_{ms2,3} = (\pi \times D_c \times k_0 \times k_{ms}) \times \left[\frac{\gamma_{sat} \times (L_2^2 - L_1^2)}{2} - \frac{\gamma_w \times (h_{w2}^2 - h_{w1}^2)}{2} \right] \quad (8)$$

Ngoài ra, hệ số áp lực của đất k_0 và cọc k_{ms} được xác định như sau:

$$k_0 = 1 - \sin \varphi \quad (9)$$

$$k_{ms} = 0,7 \tan \varphi \quad (10)$$

trong đó z : độ sâu tính từ mặt đất (m); γ_d : trọng lượng riêng khô đất (N/m^3); γ_{sat} : trọng lượng riêng bão hòa đất (N/m^3); $L_{1,2}$: khoảng cách đo từ điểm đo áp tới mặt đất (m); $h_{w1,2}$: khoảng cách từ điểm đo áp tới mặt nước (m); φ : góc ma sát trong đất ($^\circ$).

2.3. Vật liệu

Với mục tiêu nghiên cứu là xem xét ảnh hưởng của dòng thấm đến ma sát dọc thân cọc đồng thời để đảm bảo tính nhất quán của vật liệu thí nghiệm, đất cát được xem là loại vật liệu phù hợp để dễ dàng quan sát các hiện tượng cũng như tác động của dòng thấm lên đối tượng nghiên cứu. Cát sử dụng trong thí nghiệm là loại cát sạch, không lẫn tạp chất hữu cơ, và được sàng thông qua rây có kích thước lưới 0,5mm. Cát được phân loại là loại cát cấp phối kém theo tiêu chuẩn USCS (Stevens, 1982). Các tính chất vật lý của cát được trình bày chi tiết trong Bảng 1, với trọng lượng riêng là 2,65 và khối lượng thể tích khô lớn nhất là 1,615 g/cm^3 . Trong thí nghiệm, cát được chuẩn bị ở mức độ đầm nén tương đối $R = 0,90$.

$$R(\%) = \frac{\rho_d}{\rho_{d_max}} \times 100 \quad (11)$$

Bảng 1. Tính chất vật lý cát thí nghiệm

Tính chất	Đơn vị	Giá trị
Thành phần hạt thô	(%)	94,04
Thành phần hạt mịn	(%)	0,96
Khối lượng riêng khô lớn nhất, ρ_{d_max}	(g/cm^3)	1,615
Khối lượng riêng bão hòa, ρ_{sat}	(g/cm^3)	1,944
Góc ma sát trong	độ	30
Tỷ trọng, G_s		2,65
Phân loại theo USCS		SP

Tiến trình thí nghiệm được thực hiện như sau: (1) lắp đặt cọc; bịt kín tất cả các đầu vào và đầu ra ống đo áp bằng giấy lọc. (2) Cát được thêm vào từng lớp dày 50mm, đổ chậm để duy trì cấu trúc hạt rời và được đầm nén đến mức độ đầm nén tương đối mong muốn. (3) Nước đã được khử khí được đưa vào từ từ để bão hòa cát, với một tấm lọc tại đầu vào nước để giảm thiểu sự xáo trộn. (4) Khi mực nước đã ổn định, lưu lượng dòng chảy trong bể được đo đạc. Đặc biệt, trong thí nghiệm, nước khử khí được sử dụng để đảm bảo bão hòa cát nhanh hơn, giảm thời gian thực hiện tổng thể của thí nghiệm đồng thời bảo toàn tính đồng nhất của đầm nén.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Điều kiện thí nghiệm

Các điều kiện thí nghiệm được thiết kế để đảm bảo rằng đất nền vẫn ổn định và không bị ảnh hưởng bởi hiện tượng xói ngầm trong

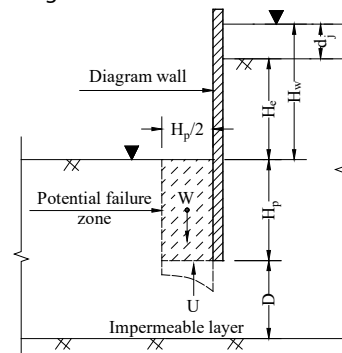
quá trình thí nghiệm. Điều này đảm bảo rằng miền tính toán có ý nghĩa và đáng tin cậy để phân tích. Các điều kiện thí nghiệm được trình bày trong Bảng 2, trong đó H_{in} , H_{out_sand} , H_{out_water} lần lượt là mức cát và mức nước bên trong hố đào (mức cát và mức nước là bằng nhau); mức cát và mức nước bên ngoài hố đào. Khoảng cách từ chân tường vây đến lớp không thấm nước D được cố định ở mức 100mm trong điều kiện cát khô và dòng thấm, và bằng 0 trong điều kiện nước tĩnh.

Bảng 2. Điều kiện thí nghiệm

ID	H_{in} (mm)	H_{out_sand} (mm)	H_{out_water} (mm)
1			300
2	200	300	350
3			400
4			450
5			350
6	200	350	400
7			450
8			350
9	250	350	400
10			450

3.2. Hệ số an toàn chống xói ngầm

Nhiều tác giả trước đây đã nghiên cứu hiện tượng xói ngầm trong đất cát đồng nhất, không có lớp phân tầng ngang giữa đáy hố đào và đáy tường cừ, và các định nghĩa khác nhau về hệ số an toàn chống xói ngầm đã được phát triển như Terzaghi (Terzaghi, 1943), Marsland (Marsland, 1953), Ou (Ou, 2014). Theo Terzaghi, hệ số an toàn chống xói ngầm dựa trên sự cân bằng giữa lực đẩy trôi do dòng thấm và trọng lượng riêng của đất trong vùng nguy hiểm. Hình 6 trình bày cách tính hệ số an toàn chống xói ngầm theo phương pháp Terzaghi và Ou.



Hình 6. Sơ đồ tính hệ số an toàn xói ngầm theo Terzaghi và Ou

Theo Terzaghi, hệ số an toàn chống xói ngầm được xác định như sau:

$$FS = \frac{W}{U} = \frac{H_p \gamma'}{C_0 \gamma_w H_w} \quad (12)$$

trong đó, γ' : trọng lượng riêng đẩy nổi của cát (N/m^3), C_0 : hệ số thực nghiệm (Das & Sobhan, 1990).

Bên cạnh đó, thông qua nhiều kết quả thí nghiệm, tác giả Arthur Marsland năm 1953 (Marsland, 1953) đã đưa ra lược đồ tra hệ số an toàn chống xói ngầm trong một hố đào dựa theo mối liên hệ của các yếu tố cơ bản của một hố đào sâu bao gồm: bề rộng hố đào, độ chênh cao mực nước trong và ngoài hố đào, chiều sâu ngầm tường chắn và khoảng cách từ đáy tường chắn đến lớp không thấm.

Ngoài ra, tác giả Ou (Ou, 2014) vào năm 1998, thông qua mô hình thấm một chiều đơn giản, giá trị gradient thủy lực lớn nhất dựa theo dòng thấm nằm trong lớp cát sét với tường chắn. Từ đó, để xuất hệ số an toàn chống xói ngầm theo biểu thức sau. Để đảm bảo an toàn xói ngầm, tác giả đề xuất giá trị FS không nhỏ hơn 1,5.

$$FS = \frac{\gamma' (H_e + 2H_p + d_j)}{\gamma_w H_w} \quad (13)$$

Bảng 3 là kết quả tính toán hệ số an toàn chống xói ngầm theo các phương pháp. Tất cả các điều kiện thí nghiệm sử dụng lý thuyết của Terzaghi đều cho ra hệ số an toàn lớn hơn 1,0. Tuy nhiên, một số trường hợp không đạt yêu cầu khi áp dụng lý thuyết của Ou. Phương pháp Marsland không cung cấp giá trị FS cho $D/H_w < 1$; do đó, chỉ các điều kiện ID1 và ID8 được đánh giá. Các điều kiện này đều không nhỏ hơn 1,0. Như vậy, theo các phương pháp đánh giá khác nhau thì hệ số an toàn chống xói ngầm sẽ có giá trị khác nhau, có thể đảm bảo hoặc không đảm bảo an toàn, điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc xem xét nhiều lý thuyết khác nhau khi đánh giá hệ số an toàn chống xói ngầm kết hợp với điều kiện thực nghiệm để xác nhận sự xảy ra xói ngầm (Duc & Long, 2022).

Bảng 3. Hệ số an toàn chống xói ngầm

ID	Theo Marsland	Theo Ou	Theo Terzaghi
1	1,00	2,82	2,63
2	-	1,57	1,76
3	-	0,94	1,32
4	-	0,56	1,05
5	-	2,19	1,74
6	-	1,41	1,31
7	-	0,94	1,05
8	1,50	3,76	4,01
9	-	2,19	2,68
10	-	1,41	2,01

3.3. Sức kháng ma sát cọc

Theo phương pháp đo trực tiếp như Hình 5c, sức kháng ma sát của mỗi cọc được đo 10 lần, các phương pháp thống kê được áp dụng để phân tích (Hughes & Hase, 2010). Kết quả hệ số bất định cho tất cả dữ liệu được tính toán dưới 0,3%, cho thấy sự bất định và sai số giữa mỗi các lần đo là rất nhỏ. Kết quả trung bình giá trị sức kháng ma sát cọc theo phương pháp đo trực tiếp được trình bày

Bảng 4. Sức kháng ma sát cọc theo phương pháp đo trực tiếp

ID	Cát khô, F_{ms1} (N)		Nước tĩnh, F_{ms2} (N)		Dòng thấm, F_{ms3} (N)								
	Cọc 1 ~ 4	Cọc 5 ~ 9	Cọc 1 ~ 4	Cọc 5 ~ 9	Cọc 1	Cọc 2	Cọc 3	Cọc 4	Cọc 5	Cọc 6	Cọc 7	Cọc 8	Cọc 9
1	2.25	5.17	1.43	3.25	1.42	1.32	1.22	1.08	4.82	4.61	4.36	4.01	3.47
2	2.25	5.17	1.43	2.23	1.36	1.17	1.00	0.80	4.60	4.38	4.14	3.83	3.27
3	2.25	5.17	1.43	1.36	1.22	0.98	0.78	0.56	4.29	4.10	3.88	3.59	3.10
4	2.25	5.17	1.43	0.71	0.98	0.62	0.38	0.12	4.06	3.91	3.73	3.46	3.04
5	2.25	6.72	1.43	4.23	1.30	1.13	0.99	0.84	6.34	6.09	5.83	5.51	4.91
6	2.25	6.72	1.43	3.20	1.06	0.89	0.74	0.58	6.06	5.81	5.56	5.28	4.71
7	2.25	6.72	1.43	2.17	0.78	0.57	0.42	0.27	5.75	5.45	5.27	4.99	4.53
8	3.56	6.72	2.27	4.27	2.23	2.18	2.05	1.90	6.05	5.89	5.71	5.41	4.99
9	3.56	6.72	2.27	3.20	2.08	1.84	1.69	1.55	5.70	5.56	5.39	5.15	4.83
10	3.56	6.72	2.27	2.17	1.77	1.46	1.27	1.10	5.40	5.25	5.11	4.90	4.63

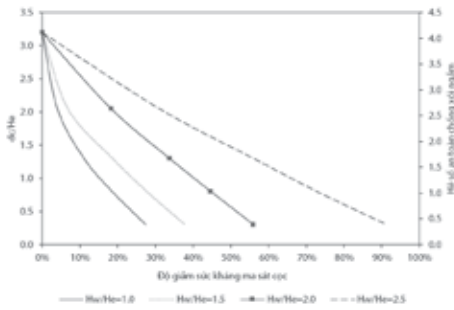
Bảng 5. Sức kháng ma sát cọc theo phương pháp phân tích

ID	Cát khô, F_{ms1} (N)		Nước tĩnh, F_{ms2} (N)		Dòng thấm, F_{ms3} (N)								
	Cọc 1 ~ 4	Cọc 5 ~ 9	Cọc 1 ~ 4	Cọc 5 ~ 9	Cọc 1	Cọc 2	Cọc 3	Cọc 4	Cọc 5	Cọc 6	Cọc 7	Cọc 8	Cọc 9
1	2.17	4.98	1.37	3.13	1.35	1.26	1.16	1.03	4.62	4.41	4.17	3.83	3.30
2	2.17	4.98	1.37	2.14	1.30	1.11	0.96	0.77	4.41	4.18	3.95	3.65	3.11
3	2.17	4.98	1.37	1.31	1.17	0.93	0.75	0.54	4.10	3.92	3.71	3.42	2.95
4	2.17	4.98	1.37	0.68	0.94	0.60	0.37	0.12	3.88	3.72	3.56	3.29	2.89
5	2.17	6.46	1.37	4.07	1.24	1.08	0.94	0.80	6.07	5.81	5.56	5.25	4.68
6	2.17	6.46	1.37	3.08	1.01	0.85	0.71	0.56	5.79	5.55	5.30	5.02	4.48
7	2.17	6.46	1.37	2.09	0.75	0.55	0.41	0.27	5.48	5.20	5.01	4.74	4.31
8	3.43	6.46	2.16	4.07	2.12	2.08	1.96	1.81	5.78	5.62	5.45	5.15	4.74
9	3.43	6.46	2.16	3.08	1.98	1.76	1.61	1.48	5.45	5.30	5.14	4.91	4.59
10	3.43	6.46	2.16	2.09	1.69	1.39	1.21	1.05	5.15	5.00	4.86	4.66	4.40

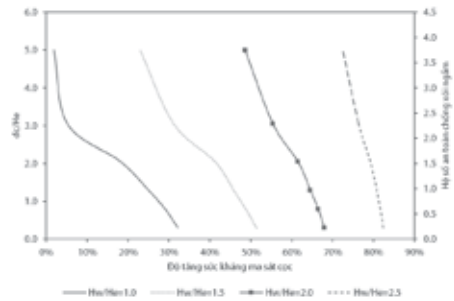
trong Bảng 4. Đối với phương pháp tính toán phân tích, mỗi điều kiện thí nghiệm trong Bảng 2 được tiến hành đo giá trị áp lực nước lỗ rỗng 3 lần và lấy giá trị trung bình và các lực ma sát đã được phân tích tính toán thông qua các Phương trình 5 đến 10 và được trình bày trong Bảng 5.

So sánh giữa Bảng 4 và 5 cho thấy sự sai khác giữa 2 phương pháp đo thay đổi từ 3.25% đến 3.94% trong điều kiện cát khô, 4.31% đến 4.89% trong điều kiện nước tĩnh, và 2.92% đến 4.98% trong điều kiện dòng thấm. Kết quả cho thấy sức kháng ma sát cọc theo 2 phương pháp có sự nhất quán và đáng tin cậy.

Trong 2 bảng cho thấy có sự suy giảm sức kháng ma sát cọc từ 37% đến 86% khi cọc chuyển từ môi trường cát khô sang môi trường nước tĩnh. Kết quả này chủ yếu đến từ sự suy giảm ứng suất hữu hiệu của cát bão hòa. Ngoài ra, chuyển từ môi trường nước tĩnh sang môi trường có dòng thấm làm giảm sức kháng ma sát các cọc bên trong hố đào (cọc 1 đến 4) từ 1,1% đến 91,23%, trong khi ma sát của các cọc bên ngoài hố đào (cọc 5 đến 9) tăng từ 5,18% đến 82,39%. Tác động của dòng thấm đến sức kháng ma sát càng rõ rệt hơn đối với các cọc gần tường vây hơn. Ứng xử của ma sát thành cọc dưới tác động của dòng thấm đối với nhóm các cọc bên trong hố đào (cọc 1 ~ cọc 4) và ngoài hố đào (cọc 5 ~ cọc 9) là tương đối giống nhau khi có biên độ ma sát thay đổi lớn nhất đối với các cọc nằm gần hố đào và ảnh hưởng này giảm dần khi cọc càng xa hố đào. Kết quả cho thấy, khi tăng độ ngậm tường chắn tăng lên 1,5 lần, độ giảm ma sát thành cọc tại vị trí cọc cách tường chắn 30 (mm) nằm về phía trong hố đào giảm đi 25,49%. Bên cạnh đó, với trường hợp tăng 1,5 lần chiều sâu hố đào, biên độ giảm ma sát thành cọc tại vị trí cọc tương tự tăng 16,96%. Đồng thời, trường hợp độ giảm ma sát thành cọc đạt cực đại 91,23% xảy ra đối với trường hợp hố đào có mức cát 20 – 30 (cm) và mức nước 20 – 45 (cm), tương ứng với hệ số an toàn chống xói ngầm đạt cực tiểu, ước tính FS = 0,564 theo phương pháp Ou trong tất cả các trường hợp khảo sát.



Hình 7. Tương quan khoảng cách cọc, độ sâu tường, hệ số an toàn chống xói ngầm và độ giảm ma sát thành cọc



Hình 8. Tương quan khoảng cách cọc, độ sâu tường, hệ số an toàn chống xói ngầm và độ tăng ma sát thành cọc

Dựa vào các thông số ảnh hưởng lớn đến sức kháng ma sát thành cọc bao gồm: vị trí cọc d_c , độ chênh mực nước ngầm trong và ngoài hố đào H_w , chiều sâu hố đào H_e và hệ số an toàn chống xói ngầm, tương quan các mối quan hệ này với độ suy giảm và gia tăng sức kháng ma sát thành cọc được thể hiện lần lượt ở Hình 7 và Hình 8. Sử dụng 2 hình này, độ giảm và tăng ma sát thành cọc trong và ngoài hố đào có thể nhanh chóng được xác định với các thông số đầu vào của công trình.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu thực nghiệm đã khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến ma sát thân cọc trong hố đào sâu ổn định bằng tường chắn, bao gồm chiều sâu hố đào, độ sâu ngầm tường chắn, độ chênh mực nước ngầm, và ảnh hưởng của dòng thấm. Nghiên cứu đã phát triển một mô hình thực nghiệm mô phỏng ảnh hưởng của các điều kiện cát khô, nước tĩnh và dòng thấm đến sức kháng ma sát cọc thép. Nghiên cứu chỉ ra rằng sức kháng ma sát cọc thay đổi đáng kể dưới tác dụng của dòng thấm, đặc biệt là các cọc sát tường chắn với hệ số ổn định chống xói ngầm thấp. Dưới đây là các kết luận chính:

- Sự thay đổi ma sát lớn nhất xảy ra ở các cọc gần tường chắn, và giảm dần khi khoảng cách từ cọc đến tường chắn tăng lên. Biên độ giảm ma sát đạt cực đại 91,23% trong điều kiện tỷ số chênh lệch mực nước và độ sâu hố móng là 0.3 và hệ số an toàn chống xói ngầm đạt giá trị tối thiểu là 0,564.

- Tăng độ sâu ngầm tường chắn thêm 1,5 lần giúp giảm 25,49% độ giảm ma sát tại cọc, trong khi đó tăng chiều sâu hố đào thêm 1,5 lần làm tăng biên độ giảm ma sát tại cùng vị trí cọc thêm 16,96%. Tăng chiều sâu ngầm tường chắn là một giải pháp hữu hiệu để giảm tác động bất lợi của dòng thấm đối với ma sát thân cọc. Phương án này góp phần nâng cao sự ổn định của hố đào sâu và giảm thiểu nguy cơ xói ngầm, yếu tố nguy hiểm có thể gây sập hố đào.

Kết quả nghiên cứu theo phương pháp thực nghiệm nhằm đánh giá ảnh hưởng của dòng thấm đến ma sát thân cọc. Dựa trên quy mô, kích thước nhỏ, tương ứng với quy mô phòng thí nghiệm. Chính vì vậy, các ứng dụng thực tiễn cần thêm các thí nghiệm hiện trường

để kiểm chứng. Thông qua quá trình nghiên cứu cũng như thực hiện các thí nghiệm còn tồn tại một số thiếu sót và hạn chế. Kết quả nghiên cứu chỉ đánh giá được ảnh hưởng của dòng thấm đến ma sát thành cọc đối với các cọc trong và ngoài một hố đào sâu. Vì vậy, kết quả nghiên cứu cần có thêm các so sánh, đánh giá của các nghiên cứu khác dựa trên nội dung nghiên cứu tương tự cũng như ứng dụng các phương pháp mô phỏng khác. Từ đó, củng cố dữ liệu chứng minh cho nhận định dòng thấm làm giảm sức chịu tải của cọc đối với các cọc nằm trong một hố đào sâu. Ngược lại, dòng thấm làm tăng sức chịu tải cọc của các cọc nằm ngoài hố đào.

LỜI CẢM ƠN:

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM đã tài trợ kinh phí để thực hiện nghiên cứu này, mã số đề tài T2024-101.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Atkinson, J. (2007). The Mechanics of Soils and Foundations.
- [2]. Benmebarek, N., Benmebarek, S., & Kastner, R. (2005). Numerical studies of seepage failure of sand within a cofferdam. *Computers and Geotechnics*, 32(4), pp. 264-273.
- [3]. Das, B. M., & Sobhan, K. (1990). Principles of geotechnical engineering.
- [4]. Duc, N. M., & Long, L. D. (2022). The influence of permeability coefficient of sandy soil on the factor of safety against soil piping under sheet pile walls and diaphragm walls. *Journal of Construction*.
- [5]. Engineers, U. S. A. C. (2005). Design of Pile Foundations: University Press of the Pacific.
- [6]. Harza, L. (1935). Uplift and seepage under dams on sand. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 100(1), pp. 1352-1385.
- [7]. Hughes, I., & Hase, T. (2010). Measurements and their uncertainties: a practical guide to modern error analysis: OUP Oxford.
- [8]. Hussin, J. D. (2006). The Foundation Engineering Handbook.
- [8]. Jia, Z., Wu, H., He, S., Zhao, Q., & Zhang, X. (2024). Study of the Pore Water Pressure Development Characteristics of PHC Pipe Piles in Soft Soil Foundations.
- [9]. Liu, B., Wang, X., Liu, C., & Kong, J. (2023). Effect of Relative Stiffness of Pile and Soil on Pile Group Effect.
- [10]. Marsland, A. (1953). Model Experiments to Study the Influence of Seepage on the Stability of a Sheeted Excavation in Sand. *Geotechnique* pp. 223-241.
- [11]. McNamee, J. J. G. (1949). Seepage into a sheeted excavation pp. 229-241.
- [12]. McVay, M., Zhang, L., Molnit, T., & Lai, P. (1998). Centrifuge Testing of Large Laterally Loaded Pile Groups in Sands pp. 1016-1026.
- [13]. Ou, C. Y. (2014). Deep excavation: Theory and practice: Crc Press.
- [14]. Peansupap, V., Nov, P., & Tongthong, T. (2021). Utilization of Building Information Modeling for Arranging the Structural Kingposts pp. 323.
- [15]. Rajapakse, R. J. P. B. H., United Kingdom. (2007). Pile design for structural and geotechnical engineers.
- [16]. Reddi, L. N. (2003). Seepage in soils: principles and applications: John Wiley & Sons.
- [17]. Richards, D. J., Wiggan, C. A., & Powrie, W. (2016). Seepage and pore pressures around contiguous pile retaining walls pp. 523-532
- [18]. Stevens, J. J. C. E. A. (1982). Unified soil classification system pp. 61-62.
- [19]. Tanaka, T., & Toyokuni, E. (1991). Seepage Failure Experiments on Multi Layered Sand Columns: Effects of Flow Conditions and Residual Effective Stress on Seepage Failure Phenomena. *Soils And Foundations* pp. 13-36.
- [20]. Terzaghi, K. (1922). Der grundbruch an stauwerken und seine verhaltung pp. 445-449.
- [21]. Terzaghi, K. (1943). Theoretical soil mechanics.
- [22]. Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice: John wiley & sons.
- [23]. Tran, M. N., Airey, D. W., & Randolph, M. F. (2005). Study of seepage flow and sand plug loosening in installation of suction caissons in sand. Paper presented at the ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference.
- [24]. Zou, X., Cao, X., Zhou, C., Zhou, M., & Zhang, X. (2021). Experimental study on the bearing capacity of large-diameter monopile in sand under water flow condition. *Ocean Engineering*, 224, 108708.