

Nghiên cứu đánh giá sức kháng cắt của cọc cát trong giải pháp cọc cát xử lý nền đất yếu với một số chỉ tiêu cơ lý thông qua các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm

The study evaluates the shear resistance of sand columns used in the sand column ground improvement method for soft soil stabilization, based on selected physical and mechanical properties obtained from laboratory

> THS TRẦN ĐỒNG*, TS NGÔ VIỆT ĐỨC, THS NGUYỄN THU HUỖN, THS TRẦN HÙNG ANH

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

Email: dongt@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu sức kháng cắt của cọc cát xử lý nền đất yếu thông qua các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm. Cọc cát được đầm chặt đến độ chặt $K = 0,9$ và đánh giá bằng thí nghiệm cắt trực tiếp, xuyên động DCP và nén ba trục. Kết quả cắt trực tiếp cho thấy sức kháng cắt tuân theo tiêu chuẩn Mohr-Coulomb, với lực dính kết không đáng kể và góc ma sát trong lớn, phản ánh cơ chế chịu cắt chủ yếu do ma sát hạt. Kết quả DCP cho thấy chỉ số xuyên động và sức chịu tải quy ước R_0 tăng theo chiều sâu, phù hợp với sự gia tăng ứng suất hữu hiệu và độ chặt. Thí nghiệm nén ba trục khẳng định ảnh hưởng của độ chặt đến ứng suất lệch cực đại và khả năng chịu cắt của cọc cát. Kết quả nghiên cứu là cơ sở phục vụ thiết kế và đánh giá hiệu quả giải pháp cọc cát trong xử lý nền đất yếu.

Từ khóa: Nền đất yếu; cọc cát; sức kháng cắt; xử lý nền đất yếu; độ chặt; thí nghiệm xuyên động (DCP); thí nghiệm nén ba trục.

ABSTRACT

This study investigates the shear resistance of sand columns for soft ground improvement based on laboratory tests. Sand columns were compacted to a degree of compaction $K = 0.9$ and evaluated using direct shear, dynamic cone penetration (DCP) and triaxial compression tests. Direct shear results indicate Mohr-Coulomb behavior with negligible cohesion and a high internal friction angle, confirming a friction-dominated shear mechanism. DCP results show that the dynamic penetration index and equivalent bearing capacity R_0 increase with depth, consistent with increasing effective stress and compaction degree. Triaxial tests further demonstrate the significant influence of compaction degree on peak deviator stress and shear resistance.

Keywords: Soft ground; sand column; shear resistance; soft ground improvement; degree of compaction; dynamic cone penetration (DCP); triaxial test.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nền đất yếu có sức kháng cắt thấp gây nhiều thách thức trong thiết kế và thi công công trình, trong đó phương pháp cọc cát được ứng dụng rộng rãi nhờ hiệu quả kỹ thuật và kinh tế. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu đánh giá hiệu quả cọc cát thông qua độ lún và sức chịu tải tổng thể, trong khi sức kháng cắt của bản thân cọc cát và mối quan hệ với các chỉ tiêu cơ lý của vật liệu cát vẫn chưa được làm rõ đầy đủ. Nghiên cứu này tập trung đánh giá trực tiếp sức

kháng cắt của cọc cát thông qua các thí nghiệm trong phòng thí nghiệm, qua đó làm rõ mối quan hệ định lượng giữa sức kháng cắt và một số chỉ tiêu cơ lý đặc trưng, góp phần bổ sung cơ sở khoa học cho thiết kế giải pháp cọc cát xử lý nền đất yếu.

Đất có tính chất khác rõ rệt với các loại vật liệu khác, do tính phân tán và tính rỗng của chúng. Do sự thay đổi tải trọng bên ngoài và sự thoát nước nền đất có sự thay đổi về độ ẩm và thể tích. Độ chặt, cường độ... và các đặc trưng biến dạng tất cả đều bị thay đổi

[1]. Kết quả thí nghiệm trong phòng như thí nghiệm cắt trực tiếp [2, 3], nén ba trục (ASTM D2850, AASHTO T296, BS 1377: Part 7: 1990: clause 8) [4], nén đơn với sự hỗ trợ của các thí nghiệm cắt quay bỏ túi (TV), chùy rơi (FC), xuyên tĩnh bỏ túi (PP) và cắt cánh trong phòng [5]... hoặc đo trực tiếp từ các thí nghiệm cắt cánh (BS 1377: Part 9:1990:clause 4.4, ASTM D2573, AASHTO T223 và 22TCN 355-2006) [6], [7], thí nghiệm xuyên tiêu chuẩn (SPT) [8, 9], thí nghiệm xuyên tĩnh (CPT, CPTu) [10, 11]... Cho thấy, càng xuống sâu ứng suất do trọng lượng bản thân càng tăng, độ chặt của đất càng tăng. Thiết lập được tương quan giữa độ chặt và sức chống cắt hoàn toàn có thể xác định được từ trạng thái ứng suất.

2. TIẾN HÀNH THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu

Cát được sử dụng trong nghiên cứu này được lấy từ bãi tập kết vật liệu xây dựng, cung cấp từ các mỏ cát các tỉnh phía Bắc. Cát hạt trung, màu vàng nhạt và không đồng nhất về thành phần hạt theo hệ thống phân loại AASHTO.

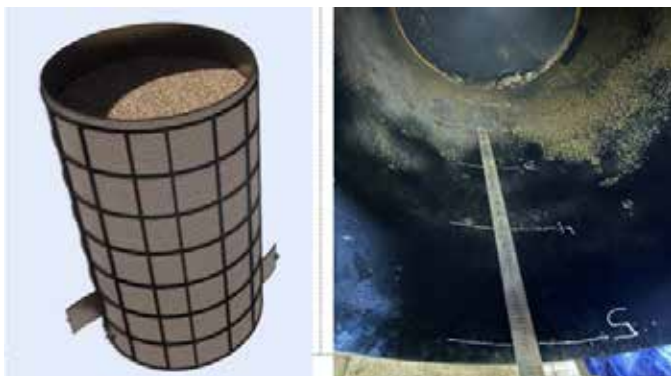
Buồng chứa đất cát được sử dụng ống thép, có độ dày 0,2 mm, đường kính 800 mm và chiều cao 1.500 mm. tấm thép được tạo hình thành hình trụ tròn, gia cố xung quanh bên ngoài bằng hệ thống thanh sắt vuông đặc 10*10, hàn nối dạng ô vuông 150*150 mm (Hình 1).

2.2. Quy trình thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tập trung đánh giá sức chống cắt của cọc cát thông qua việc đầm chặt cát ở độ chặt K90. Khối lượng thể tích đơn vị ướt đất cát ở độ ẩm tối ưu (ASTM D 4253) là 1,95 g/cm³, giá trị khối lượng thể tích đơn vị ướt đất cát ở độ ẩm khô tối ưu tại độ chặt K90 (ASTM D 4254) là 1,75 g/cm³.

Để đạt độ chặt K90, thí nghiệm được hiệu chuẩn trong khuôn nhỏ (đường kính 750 mm và chiều cao 450 mm) thông qua một số lần thử nghiệm. Buồng chứa chia thành 5 lớp, mỗi lớp dày 300 mm. Trộn đều cát và nước theo tỷ lệ thử nghiệm trên khuôn nhỏ. Hỗn hợp được cho vào buồng chứa bằng xô, sử dụng máy đầm tay thực hiện sao cho chiều dày của mẫu đất về đúng vạch 300 mm đã chia sẵn trong buồng chứa.

Nhóm nghiên cứu thực hiện 3 thí nghiệm trong phòng: Thí nghiệm cắt trực tiếp (cắt phẳng), thí nghiệm xuyên động (DCP) và thí nghiệm nén ba trục.



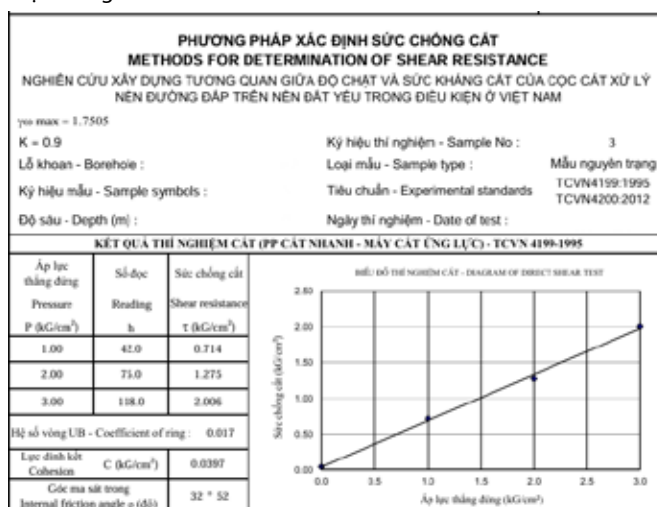
Hình 1. Buồng chứa đất cát được gia công bằng vật liệu thép

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Thí nghiệm cắt trực tiếp (cắt phẳng)

Thông qua thí nghiệm cắt trực tiếp, các tham số quan trọng như góc ma sát trong (φ) và lực dính kết (c) của mẫu cát được đầm chặt trong phòng có thể được xác định một cách trực tiếp, từ đó đánh giá được mức độ cải thiện về mặt cơ học của nền đất sau khi xử lý.

Để đánh giá được sức kháng cắt của đất cát chính xác hơn trong thực tiễn, nhiều nghiên cứu liên quan đến thí nghiệm cắt trực tiếp. Nhóm tác giả Islam et Al. [12] được các kết quả thí nghiệm, quan sát thấy rằng đối với mỗi tập hợp tải trọng, khi kích thước hạt tăng lên, góc ma sát trong cũng như ứng suất cắt ngang tối đa tăng lên đối với cát đồng nhất và tương tự cũng được nhận thấy ở cát có cấp phối không đồng nhất, cấp phối càng tốt hơn thì độ bền cắt cao hơn. Nhóm tác giả Cerato & Lutenege [13] cho kết quả góc ma sát tăng lên với độ chặt trong đất tăng trong mỗi ba hộp. Góc ma sát dư ở thể tích không đổi có xu hướng giảm hoặc giữ nguyên khi kích thước hộp thí nghiệm tăng, tùy thuộc vào loại cát và độ chặt tương đối.



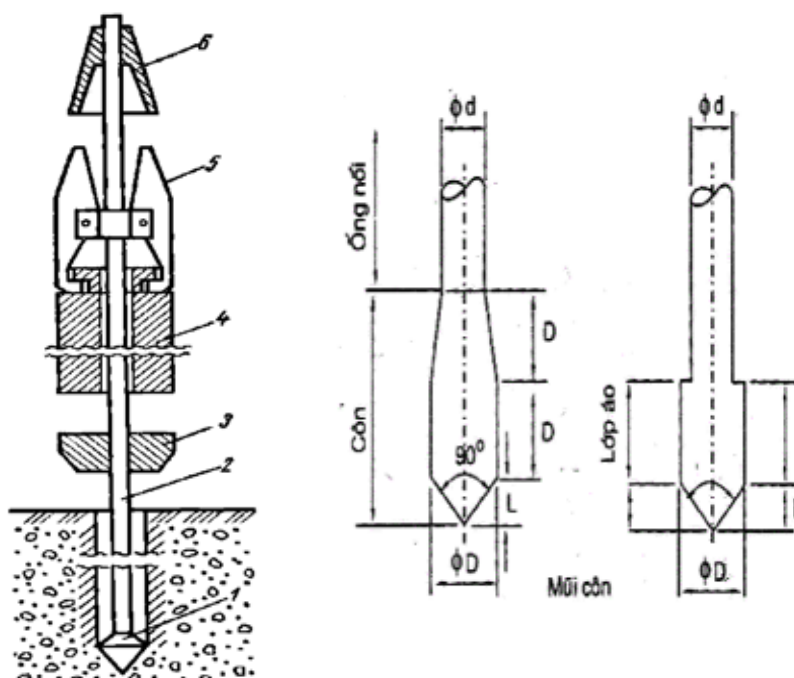
Hình 2. Kết quả thí nghiệm cắt trực tiếp với độ chặt K90

Nhóm nghiên cứu thực hiện thí nghiệm, kết quả thí nghiệm cắt phẳng nhanh cho thấy sức kháng cắt của cọc cát tăng tuyến tính theo ứng suất pháp, phù hợp với tiêu chuẩn phá hoại Mohr-Coulomb. Khi áp lực thẳng đứng tăng từ 1,0 đến 3,0 kG/cm², sức kháng cắt tăng từ 0,714 lên 2,006 kG/cm². Đường bao phá hoại xác định được lực dính kết rất nhỏ ($C \approx 0,04$ kG/cm²) và góc ma sát trong lớn ($\varphi \approx 32^{\circ}52'$), chứng tỏ cơ chế chịu cắt chủ yếu của cọc cát là ma sát giữa các hạt. Với hệ số độ chặt $K = 0,9$ và hệ số rỗng nhỏ, cọc cát thể hiện khả năng cải thiện đáng kể sức kháng cắt của nền đất yếu, tạo cơ sở cho việc áp dụng trong thiết kế và tính toán nền đường đắp tại Việt Nam.

3.2. Thí nghiệm xuyên động (DCP)

Phương pháp xuyên động DCP là phương pháp thí nghiệm được tiến hành bằng cách đưa mũi xuyên hình chóp nón vào đất nhờ năng lượng của búa đóng vào đầu cần xuyên. Giá trị chỉ số DCP được tính bằng cách chia tổng độ sâu thâm nhập tính bằng mm cho số lần gõ (mm/lần gõ) và được báo cáo cho mỗi mẫu.

Theo SNip 448-72[14], sức kháng xuyên động được xác định qua số búa cần thiết (n) để đẩy mũi xuyên đi vào đất một độ sâu nhất định ($s = 10$ cm), từ đó xác định cường độ sức kháng xuyên động giả định (N) và sức kháng xuyên động đơn vị (qd). Theo TCXD 112:1984 và EN ISO 22476-3 [15], sức kháng xuyên động qd được tính theo công thức được gọi là công thức Hà Lan (Sanglerat 1972; Cassan 1988).



Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm xuyên động (a) và mũi cùn (b)

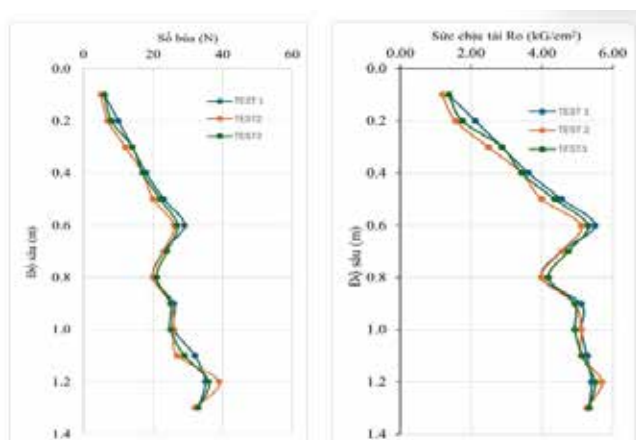
Kết quả sau khi tiến hành thí nghiệm tại phòng thí nghiệm Trường Đại học Mở - Địa chất, hiệu chỉnh và xử lý như sau:

Bảng 1. Biểu thí nghiệm xuyên động DCP trong đất cát, độ chặt K90

BIỂU THÍ NGHIỆM XUYÊN ĐỘNG THEO ĐỘ CHẶT K90						
PP thí nghiệm: BS 1377: Part 1: 1990: 3.2						
Chiều sâu (m)	Thí nghiệm lần 1		Thí nghiệm lần 2		Thí nghiệm lần 3	
	Số búa	Sức chịu tải quy ước R_0 (kG/cm^2)	Số búa	Sức chịu tải quy ước R_0 (kG/cm^2)	Số búa	Sức chịu tải quy ước R_0 (kG/cm^2)
0,1	6	1,37	5	1,19	6	1,37
0,2	10	2,12	7	1,56	8	1,75
0,3	14	2,87	12	2,49	14	2,87
0,4	18	3,62	17	3,43	17	3,43
0,5	23	4,55	20	3,99	22	4,36
0,6	29	5,50	26	5,11	27	5,30
0,7	23	4,55	23	4,55	24	4,74
0,8	20	3,99	20	3,99	21	4,18
0,9	26	5,11	25	4,93	25	4,93
1,0	26	5,11	26	5,11	25	4,93
1,1	32	5,27	27	5,12	29	5,14
1,2	35	5,40	39	5,70	36	5,55
1,3	33	5,33	32	5,27	33	5,33

Kết quả thí nghiệm xuyên động DCP cho thấy sự biến thiên tương đối đồng nhất của số búa xuyên theo chiều sâu đối với ba lần thí nghiệm (TEST 1-TEST 3), phản ánh độ tin cậy và tính lặp lại tốt của chương trình thí nghiệm. Trong khoảng độ sâu từ 0,1 đến khoảng 1,2 m, số búa N có xu hướng tăng dần theo chiều sâu, cho thấy mức độ đầm chặt và khả năng kháng xuyên của cọc cát được cải thiện rõ rệt ở các lớp sâu hơn.

Sự phân bố sức chịu tải quy ước R_0 theo chiều sâu có xu hướng tương đồng với kết quả số búa xuyên. Giá trị R_0 tăng dần từ lớp nông xuống lớp sâu, đạt giá trị lớn nhất tại độ sâu khoảng 1,1 - 1,3 m, phản ánh hiệu quả truyền năng lượng đầm chặt và sự gia tăng mức độ chặt của cọc cát theo chiều sâu. Sự sai khác giữa các đường cong R_0 của ba thí nghiệm là không lớn, chứng tỏ tính ổn định của phương pháp thí nghiệm và độ đồng nhất tương đối của mẫu cọc cát.

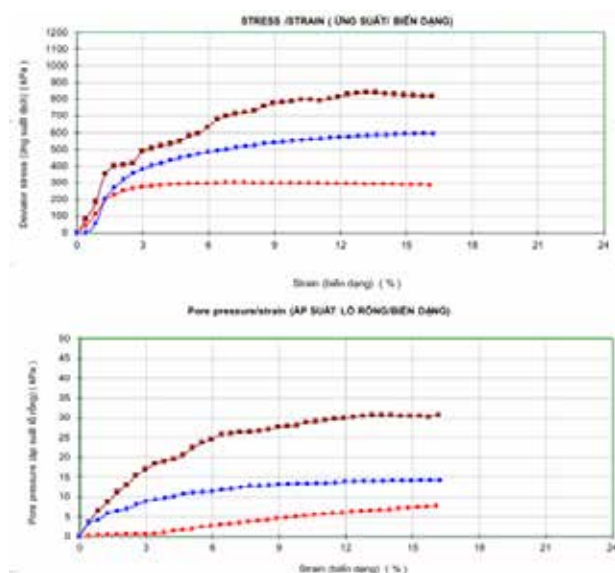


Hình 4. Đồ thị quan hệ giữa số búa - sức chịu tải - độ sâu ở độ chặt K90

3.3. Thí nghiệm nén ba trục

Đối với đất cát, thường áp dụng thí nghiệm CD hoặc CU, vì đất cát có khả năng thoát nước nhanh, phù hợp với điều kiện thoát nước hoàn toàn trong thực tế thi công cọc cát.

Theo nhóm tác giả Đỗ Minh Toàn và Nguyễn Thị Nụ [38], việc thí nghiệm trong phòng với mẫu đất được lấy từ độ sâu nhất định nào đó, quá trình lấy mẫu sẽ làm thay đổi trạng thái ứng suất tự nhiên tương tự như việc dỡ tải trong thí nghiệm cố kết. Tác giả Nguyễn Thu Hà [39] nhận thấy rằng, theo sơ đồ cắt nhanh không thoát nước (UU), nếu thay đổi tốc độ cắt, cắt càng nhanh thì sức kháng cắt của đất càng nhỏ. Thí nghiệm theo sơ đồ cắt nhanh cố kết (CU) và cắt chậm cố kết hoàn toàn (CD) thì khi thay đổi tốc độ cắt không làm ảnh hưởng đến sức kháng cắt của đất.



Hình 5. Đồ thị quan hệ giữa ứng suất - biến dạng - áp suất lỗ rỗng ở độ chặt K90

Các đường cong ứng suất lệch - biến dạng thu được từ thí nghiệm nén ba trục cho thấy cát ở trạng thái đầm chặt cao thể hiện khả năng chịu cắt lớn và biến dạng ổn định. Ứng suất lệch tăng nhanh ở giai đoạn đầu khi biến dạng còn nhỏ, sau đó phát triển chậm dần và đạt giá trị cực đại ở mức biến dạng tương đối lớn, phản ánh đặc trưng chịu cắt của cát đầm chặt. Giá trị ứng suất lệch cực đại tăng rõ rệt khi áp lực bao tăng, cho thấy vai trò chi phối của ma sát trong và sự sắp xếp chặt chẽ của bộ khung hạt.

Diễn biến áp suất lỗ rỗng theo biến dạng cho thấy áp suất lỗ rỗng dương được sinh ra trong suốt quá trình gia tải, song tốc độ tăng tương đối nhỏ, đặc biệt đối với mẫu có độ chặt cao. Điều này chứng tỏ xu hướng giãn nở bị hạn chế và khả năng thoát nước hiệu quả của cát đầm chặt, góp phần duy trì và nâng cao sức chống cắt.

4. KẾT LUẬN

Kết quả ba thí nghiệm trong phòng cho thấy sức kháng cắt của cọc cát có mối quan hệ chặt chẽ với các chỉ tiêu cơ lý đặc trưng, đặc biệt là độ chặt, góc ma sát trong và trạng thái ứng suất.

Kết quả thí nghiệm cắt trực tiếp, xuyên động DCP và nén ba trục cho thấy sức kháng cắt của cọc cát đầm chặt K90 chủ yếu được hình thành từ ma sát trong giữa các hạt, với lực dính kết không đáng kể và góc ma sát trong tương đối lớn.

Các chỉ tiêu kháng xuyên (số búa N, sức chịu tải quy ước R_0) có mối tương quan rõ rệt với trạng thái ứng suất và độ chặt của cọc cát, cho phép sử dụng thí nghiệm DCP như một công cụ đánh giá nhanh sức kháng cắt trong phòng thí nghiệm.

Thí nghiệm nén ba trục cho thấy cát đầm chặt có khả năng duy trì ứng suất hữu hiệu lớn và phát triển áp suất lỗ rỗng ở mức thấp, góp phần nâng cao và ổn định sức chống cắt trong quá trình chịu tải.

Các kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học để xây dựng các mối tương quan thực nghiệm giữa sức kháng cắt và các chỉ tiêu cơ lý của cọc cát, phục vụ thiết kế và đánh giá hiệu quả xử lý nền đất yếu bằng giải pháp cọc cát trong điều kiện Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Tiêu chuẩn ngành 22TCN 262-2000 - Quy trình khảo sát thiết kế nền đường ở độ đắp trên nền đất yếu.
- [2] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 4199-1995 - Đất xây dựng - Phương pháp xác định sức chống cắt trong phòng thí nghiệm ở máy cắt phẳng.
- [3] ASTM D3080 - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions 1, doi: 10.1520/D3080_D3080M-11.
- [4] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 8868:2011 - Thí nghiệm xác định sức kháng cắt không cố kết - không thoát nước và cố kết - thoát nước của đất dính trên thiết bị nén ba trục.
- [5] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 8725-2012 - Đất xây dựng công trình Thủy lợi - Phương pháp xác định sức chống cắt của đất hạt mịn mềm yếu bằng thí nghiệm cắt cánh ở trong phòng.
- [6] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 10184_2021 Đất xây dựng - Thí nghiệm cắt cánh hiện trường cho đất dính.
- [7] Tiêu chuẩn ngành 22 TCN 355-06 - Quy trình thí nghiệm cắt cánh hiện trường.
- [8] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 9351:2022 - Đất xây dựng - Phương pháp thí nghiệm hiện trường - Thí nghiệm xuyên tiêu chuẩn (SPT).
- [9] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 9351:2012 - Đất xây dựng: Phương pháp thí nghiệm hiện trường - Thí nghiệm xuyên tiêu chuẩn (SPT).
- [10] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 9352_2012 - Đất xây dựng - Thí nghiệm xuyên tĩnh (CPT).
- [11] Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 9846_2013 - Quy trình thí nghiệm xuyên tĩnh có đo nước lỗ rỗng (CPTu).
- [12] Islam Mohammad Nurul and Al. Effect of particle size on the shear strength behaviour of sands. Australian Geomechanics, vol. 46 no. 3, pp. 75 - 85, 2011.
- [13] A. B. Cerato and A. J. Lutenegeger. Specimen Size and Scale Effects of Direct Shear Box Tests of Sands. Geotechnical Testing Journal, vol. 29, no. 6, pp. 507-516, Sep. 2006, doi: 10.1520/GTJ100312.
- [14] ASTM D6951-03: Sử dụng thiết bị chùy xuyên động (DCP) cho mặt đường có chiều sâu không lớn.
- [15] TCXD 112:1984: Hướng dẫn thực hành khảo sát đất xây dựng bằng thiết bị mới - thí nghiệm xuyên động.
- [16] Đỗ Minh Toàn and Nguyễn Thị Nụ. Đặc điểm sức kháng cắt của đất loại sét yếu amQ2 phân bố ở các tỉnh ven biển đồng bằng sông Cửu Long. Tạp chí KHKM Mỏ - Địa chất, số 42/2013, tr. 36-43, 2013.
- [17] Nguyễn Thu Hà. Một số kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ đắp gia tải đến biến dạng và khả năng chịu tải của nền đường đắp trên đất yếu. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng, số 11(96), quyển 1, tr. 26-31, 2015.