Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng NUCE 2019. 13 (3V): 55–63

ĐÁNH GIÁ SỨC CHỊU TẢI CỌC KHOAN NHỒI TRONG LỚP ĐÁ NỨT NẺ TỪ KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN

Lê Đức Tiến[a,*], Đặng Hoài Dương[a], Nguyễn Châu Lân[b], Bùi Tiến Thành[b], Nguyễn Ngọc Long[b]

[a]*Sở Giao thông Vận tải tỉnh Quảng Trị, 73 Quốc lộ 9, Phường 5, Đông Hà, Quảng Trị, Việt Nam*
[b]*Đại học Giao thông Vận tải, Số 3 đường Cầu Giấy, quận Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 02/05/2019, Sửa xong 03/07/2019, Chấp nhận đăng 04/07/2019

Tóm tắt

Khi thiết kế cọc khoan nhồi vào lớp đá phong hoá nứt nẻ (Intermediate Geo Materials, IGM) thường có những vấn đề chưa được thống nhất. Theo tiêu chuẩn Việt Nam, trong trường hợp này sức chịu tải được tính cho đất và đá. Điều đó dẫn tới khi cọc khoan nhồi thi công vào tầng đá phong hóa nứt nẻ sẽ được tính như là đất hoặc đá. Trong bài báo này sẽ trình bày tính toán sức kháng tại thân cọc và mũi cọc trong lớp đá phong hóa theo đặc trưng của lớp IGM thông qua kết quả thí nghiệm nén tĩnh và thí nghiệm nhổ cho cọc khoan nhồi đường kính 0,8m có phần mũi cọc trong lớp đá phong hóa nứt nẻ. Trong các thí nghiệm này, các thiết bị đo biến dạng theo thân cọc và chuyển vị được gắn dọc theo thân cọc khoan. Kết quả tính toán từ thí nghiệm nén và nhổ được sử dụng để hệ số hiệu chỉnh cho các công thức tính toán sức kháng ma sát đơn vị và sức kháng mũi cọc khi thi công cọc vào tầng IGM.

Từ khoá: sức kháng cọc khoan nhồi; tầng phong hóa nứt nẻ; thí nghiệm nén tĩnh.

EVALUATION OF THE BEARING CAPACITY OF DRILLED SHAFT IN WEATHERED ROCK FROM THE TEST RESULTS AND THE FINITE ELEMENTS MODEL

Abstract

Weathered rock or IGM (Intermediate Geo Materials) is still a controversy in designing bearing capacity of bored pile. At present, Vietnamese standards separately define the load capacity in soils and rocks. That leads to both underestimation and overestimation in case IGM assumed to be soil and rock respectively. In this paper, the calculation in a project in Central Vietnam was based on experienced equations. Furthermore, static load tests compression tests were conducted for bored piles with 0.8 m in diameter which installed in the weathering rock. In these test, instruments were installed including the strut meter, straingage and extensometers which were distributed along bored piles to measure a side bearing capacity and tip capacity of the piles. Results can be used to corrected side resistance and tip resistance in case when pile is installed in IGM layer.

Keywords: weathered rock; IGM; bearing capacity; static load test.

https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(3V)-06 © 2019 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Cọc khoan nhồi là loại cọc phổ biến áp dụng cho móng sâu của nhà cao tầng hoặc móng cho công trình cầu [1–3]. Hiện nay ở nước ta việc thiết kế cọc khoan nhồi thường tuân thủ theo TCVN 10304:2014 hoặc 11823-10:2017 được áp dụng theo tiêu chuẩn AASHTO LRFD [4] đối với ngành giao thông vận tải hoặc theo tiêu chuẩn Việt Nam. Trong các tiêu chuẩn này việc dự tính sức chịu tải

*Tác giả chính. *Địa chỉ e-mail:* ductiensogtvtqt@gmail.com (Tiến, L. Đ.)

của cọc được chia ra làm hai trường hợp, khi cọc đặt vào đất thì sử dụng các công thức liên quan đến sức kháng của nền đất như góc ma sát trong của đất rời, sức kháng nén có nở hông trong điều kiện không thoát nước qu cho đất dính, sử dụng kết quả thí nghiệm hiện trường như CPT, SPT... còn khi cọc ngàm vào đá thì có thể sử dụng sức kháng nén của đá qu. Tuy nhiên đối với khu vực miền Trung ví dụ như tỉnh Quảng Trị, trong nhiều trường hợp cọc khoan nhồi khi thi công vào tầng đá phong hoá mạnh, cường độ nhỏ hơn so với đá nhưng lại lớn hơn nhiều so với đất, điều này dẫn tới khó khăn trong việc áp dụng tiêu chuẩn tính toán cũng như kiểm tra. Trên thế giới, hiện nay nhiều tác giả đưa ra khái niệm đất trung gian hoặc đất chuyển tiếp (Intermediate Geological Material-IGM) vào tính toán thiết kế, như vậy có thể sử dụng kết quả thí nghiệm SPT- N hoặc có thể sử dụng kết quả thí nghiệm nén nở hông qu để xác định sức chịu tải cho cọc trong trường hợp này [4–8].

Các tiêu chuẩn thiết kế cọc khoan nhồi ở Việt Nam và ngành giao thông vận tải như tiêu chuẩn Thiết kế cầu 22 TCN-272-05 cũng chưa đề cập nhiều đến phương pháp tính toán khi cọc khoan nhồi được thi công vào lớp đá phong hoá nứt nẻ [9]. Tác giả Vũ Công Ngữ cũng giới thiệu loại đất IGM này dựa vào tiêu chuẩn của Mỹ, tuy nhiên chưa trình bày nhiều về việc dự tính sức chịu tải của cọc khoan nhồi cho lớp đất này [2]. Điều này gây khó khăn cho việc tính toán thiết kế cọc khoan nhồi vào tầng đá phong hoá nứt nẻ.

Thí nghiệm nén tĩnh đo biến dạng dọc thân cọc đã được áp dụng từ những năm 1969 cho các cọc bê tông cốt thép đúc sẵn ở rất nhiều nước trên thế giới để xác định mức độ huy động ma sát bên dọc thân cọc. Đến những năm 1980 các nghiên cứu thực nghiệm trên cọc khoan nhồi cũng được tiến hành, đề xuất các phương pháp phân tích ngược để xác định đường truyền tải trong cọc từ đó xác định được ma sát bên đơn vị cũng như sức kháng mũi đơn vị của cọc [5, 6, 8, 10]. Ngoài ra việc nghiên cứu sức chịu tải của cọc khoan nhồi có đo biến dạng thân cọc cũng được nghiên cứu [11–17].

Tiêu chuẩn LRFD 2012 hoặc tiêu chuẩn TCVN 11823-10:2017 [18] đã đưa vào định nghĩa lớp đất trung gian giữa đất và đá tương tự như lớp đá phong hoá nứt nẻ, tuy nhiên trong thực tế việc tính toán và áp dụng vẫn còn nhiều vấn đề, ngoài ra chưa có nghiên cứu thực nghiệm cho sức chịu tải của cọc khoan nhồi khi đặt vào tầng đá phong hóa nứt nẻ tại Việt Nam.

Do vậy bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu sức chịu tải cọc khi thi công vào tầng đá phong hoá nứt nẻ ở khu vực Quảng Trị, thông qua kết quả thí nghiệm nén tĩnh cọc có đo ứng suất, biến dạng theo thân cọc và mũi cọc. Từ kết quả phân bố ứng suất đo được trong thí nghiệm nén tĩnh xác định lại mô hình làm việc của cọc trong nền có tầng đá phong hóa nứt nẻ, từ đó đề xuất các kiến nghị để có ứng xử phù hợp khi thiết kế cọc trong tầng đá phong hóa nứt nẻ.

2. Thí nghiệm nén tĩnh và nhổ cọc khoan nhồi khi đặt vào tầng phong hóa nứt nẻ

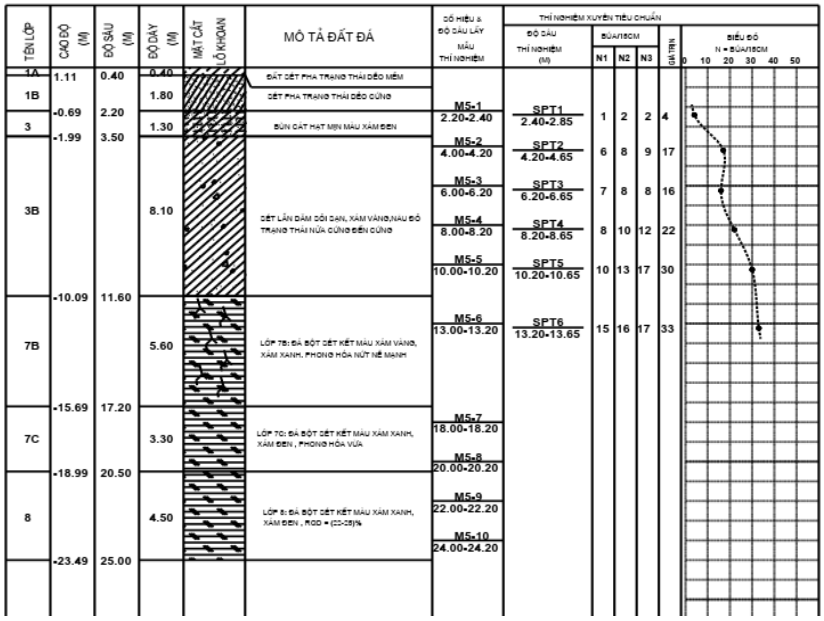
2.1. Hình trụ lỗ khoan tại vị trí thí nghiệm nén và nhổ cọc

Hình 1 mô tả các lớp đất, chiều dày các lớp, chỉ số SPT theo độ sâu. Chỉ tiêu cơ lý cơ bản của các lớp được trình bày tại Bảng 1.

2.2. Thí nghiệm nén tĩnh cọc

Thí nghiệm nén cọc cho cọc T6-1. Cọc thí nghiệm đều có đường kính 800 mm, chiều dài 14,5 m được đặt vào lớp 7 là lớp bột kết sét kết, phong hóa mạnh có chỉ số RQD = 20%; cường độ nén 1 trục q_u = 6,7 Mpa.

Tại mỗi cọc có gắn các thiết bị đo dọc theo thân cọc để quan trắc và phân tích sức kháng ma sát và sức kháng mũi cọc theo độ sâu, dự tính được sức chịu tải của cọc khi thi công vào lớp đá phong hóa.



Hình 1. Hình trụ lỗ khoan tại vị trí thí nghiệm cọc

Bảng 1. Tham số đầu vào của các lớp đất đá theo mô hình FB-pier

Lớp	Chiều dày (m)	Sức kháng cắt không thoát nước S_u (kPa)	Mô đun khối (kPa)	Trọng lượng riêng (kN/m^3)	Cường độ kháng nén mẫu đá, q_u (kPa)	RQD (%)	Hệ số mô đun (Em/Ei)
Sét pha, dẻo cứng	2,2	24	-	18	-	-	-
Bùn cát mịn, xám	1,3	36	-	18	-	-	-
Sét pha sỏi dăm	8,1	180	-	18	-	-	-
Lớp 7: Đá bột kết sét kết phong hóa mạnh	5,6	-	398844	19	6700	20	0,05

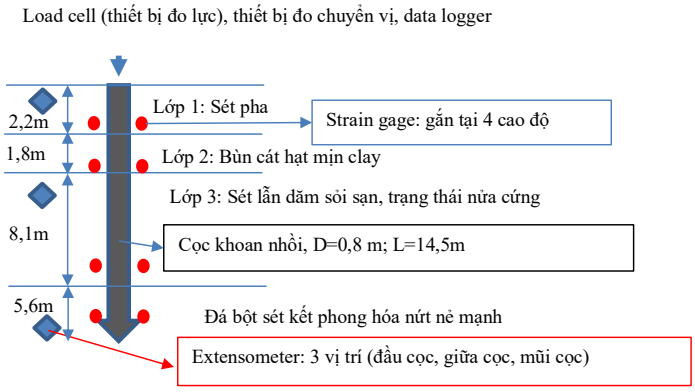
a. Bố trí thiết bị đo

Các thiết bị đo bao gồm đo chuyển vị đầu cọc, đo lực tác dụng bằng loadcell, đo biến dạng thân cọc (extensometer), đo biến dạng của bê tông (strain gage) được chỉ ra như Hình 2.

Thiết bị đo chuyển vị đầu cọc (DT-100A; KYOWA, JAPAN) có độ chính xác 0,01 mm và hành trình tối đa là 10 cm, được nối với hệ thống đo số liệu tự động, được cố định vào dầm chuẩn để ghi lại chuyển vị của đầu cọc trong suốt quá trình thí nghiệm. Có 4 thiết bị đo chuyển vị ở đầu cọc (Hình 3).

Thiết bị đo biến dạng của cọc (Extensometer) là 3 thanh thép được lắp ở các độ sâu khác nhau và kéo lên đỉnh cọc, tại đỉnh cọc sẽ gắn thiết bị đo chuyển vị trên các đỉnh của thanh thép này. Mỗi 1 cọc gắn 3 thiết bị Extensometer và mỗi độ sâu gắn 1, tổng cộng có 3 thiết bị đo biến dạng của cọc: tại đỉnh cọc, giữa cọc và mũi cọc như chỉ ra trên Hình 2 và Hình 4.

Thiết bị đo biến dạng của bê tông (strain gage) được lắp đặt vào vị trí của cốt thép dọc chủ tại các độ sâu khác nhau được dùng để đo biến dạng của bê tông tại các cao độ gắn thiết bị. Mỗi cọc được bố trí tại 4 độ sâu khác nhau và mỗi độ sâu gắn 2 thiết bị, tổng cộng có 8 thiết bị đo biến dạng của bê tông (Hình 2 và Hình 5).



Hình 2. Bố trí các đầu đo biến dạng dọc theo thân cọc



Hình 3. Thiết bị đo chuyển vị đầu cọc



Hình 4. Thiết bị đo biến dạng của cọc



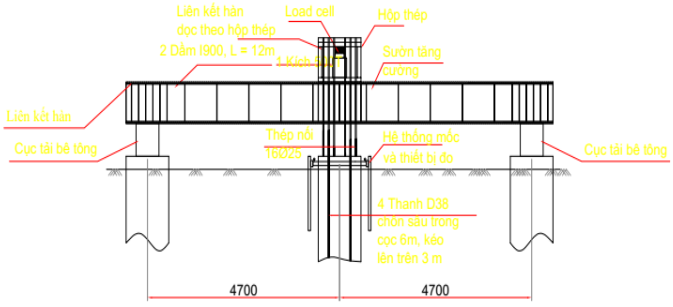
Hình 5. Thiết bị đo biến dạng bê tông

b. Trình tự thí nghiệm nén cọc

Tiến hành lắp đặt thiết bị thí nghiệm và hệ gia tải cho cọc. Tải trọng tác dụng vào đầu cọc ứng với mỗi cấp tải trọng khác nhau tương ứng với % của tải trọng thiết kế. Trình tự gia tải theo tiêu chuẩn TCVN 9393:2012. Tải trọng thử lấy 150% tải trọng thiết kế. Sức chịu tải tính toán của cọc khi chịu nén Ptk = 153 tấn [15]. Trình tự gia tải là 25%Ptk; 50%Ptk; 75%Ptk; 100%Ptk; 125%Ptk; 150%Ptk.

c. Thí nghiệm nhổ cọc

Thí nghiệm nhổ cọc được thực hiện cho cọc T6-2. Cọc nhổ cũng có đường kính D800 mm, chiều dài 14,5 m và được đặt vào lớp 7 là lớp bột kết sét kết, phong hóa mạnh tương tự như cọc nén (xem Hình 6 và Hình 7). Sức chịu tải cọc nhổ là 130 tấn. Đối với thí nghiệm nhổ, tải trọng thí nghiệm được lấy tối đa 200% sức chịu tải nhổ để kiểm tra khả năng chịu tải của cọc khi vào lớp đá phong hóa. Trình tự gia tải là 25%Ptk; 50%Ptk;75%Ptk; 100%Ptk; 125%Ptk; 150%Ptk; 175%Ptk và 200%Ptk.



Hình 6. Sơ đồ bố trí thí nghiệm nhổ cọc



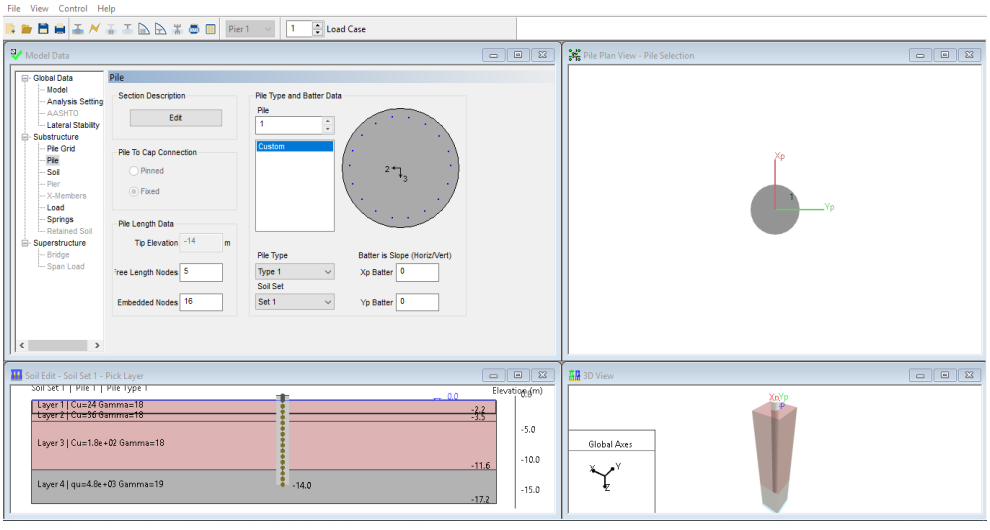
Hình 7. Thí nghiệm nhổ cọc

3. Phân tích bài toán phần tử hữu hạn bằng phần mềm FB-pier

3.1. Mô hình phần tử hữu hạn và thông số trong phần mềm FB-pier

Phần mềm Fb-pier là phần mềm phần tử hữu hạn cho phép mô phỏng thí nghiệm nén tĩnh và nhổ cọc. Việc mô hình phần tử hữu hạn cho cọc được thực hiện bằng cách phân chia cọc ra 21 phần tử, với 5 nodes thuộc phần chiều dài tự do, và 16 nodes cho phần được chôn dưới mặt đất. Ý tưởng là mô hình bao gồm mô phỏng cọc (Pile) cùng với phần đầu cọc dài tự do (Free Length). Gắn với mũ cọc (Cap) là nơi chịu tác dụng của tải trọng (Load Case) tương đương với các cấp tải thí nghiệm.

Cọc được mô phỏng với chiều dài 14,8 m bao gồm độ dài tự do (Free length) là 0,8 m và chiều sâu chôn cọc là 14 m (Hình 8). Khối lượng riêng và đường kính cọc được khai báo lần lượt thông qua mục Section Properties.



Hình 8. Mô hình cho phần tử cọc (Pile)

Các lớp đất đá được nhập vào mô hình như ở Bảng 1, các số liệu được lấy từ tài liệu khảo sát kỹ thuật. Mô hình tương tác giữa cọc và đất được mô hình như các lò xo với phương ngang được mô tả là đường cong p-y và phương thẳng đứng được mô hình là đường cong t-z.

Riêng lớp dưới cùng là đá bột kết phong hóa mạnh tạo thành phiến, được mô phỏng dưới dạng Đá (Rock), mô hình Weak Rock (Reese) với cách tính toán (Axial/Tosional) dạng Drilled Shaft IGM và

Hyperbolic.

Tải trọng tính toán thông qua FB-Pier được chia làm nhiều bước tải/cấp tải khác nhau (Load case). Có thể lựa chọn điểm đặt tải ở vị trí các nodes khác nhau, cũng như là giá trị của chúng và chiều (+/−) phụ thuộc vào mục đích nén hay nhổ tải trọng.

3.2. Trình tự mô phỏng thí nghiệm nén và nhổ trong phần mềm FB-pier

Mô phỏng thí nghiệm nén tĩnh trong phần mềm FB-pier gồm: 6 cấp tải (Load Case) theo trình tự thí nghiệm nén tĩnh T6-1. Mô phỏng thí nghiệm nhổ cọc cũng được tiến hành theo 8 cấp theo thí nghiệm nhổ cọc cho cọc T6-2.

Phân tích số liệu thu được như biến dạng của bê tông và biến dạng của cọc với các giai đoạn gia tải. Theo nguyên lý vật liệu, lực tác dụng ở mỗi độ sâu được tính toán theo công thức:

$$P = \varepsilon_c E_c A_c \tag{1}$$

trong đó A_c là diện tích phần bê tông, là phần diện tích mặt cắt ngang của cọc và diện tích cốt thép; E_c là mô đun đàn hồi của bê tông; ε_c là biến dạng của bê tông ở mỗi độ sâu được xác định bằng cảm biến (strain gage).

Lấy hiệu của hai giá trị lực truyền ở độ sâu đó, chia cho diện tích xung quanh giữa độ sâu đó, lực ma sát đơn vị được tính theo biểu thức:

$$f = (P_i - P_{i-1})/A = (P_i - P_{i-1})/\pi DL \tag{2}$$

trong đó P_i là lực tại cao độ thứ i; P_{i-1} là lực tại cao độ thứ $i-1$; A là diện tích xung quanh; D là đường kính cọc; L là khoảng cách 2 vị trí gắn cảm biến (straingage).

Chuyển vị của cọc được đo đạc bằng cách đo độ lún đầu cọc và chuyển vị tại các mức cao độ.

4. So sánh kết quả thí nghiệm hiện trường và phương pháp phần tử hữu hạn FB-pier

4.1. Kết quả thí nghiệm nén và nhổ tại hiện trường

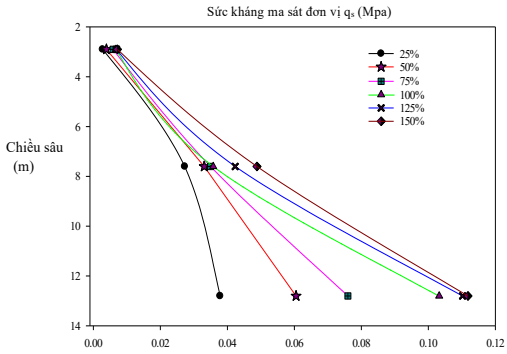
Kết quả thí nghiệm nén và nhổ được vẽ biểu đồ tải trọng với độ lún được trình bày trong tài liệu [15].

Cọc thí nghiệm T6-1, D800 mm được thí nghiệm nén đến tải trọng 230 tấn. Độ lún ứng với cấp tải lớn nhất là 1,43 mm nhỏ hơn so với giới hạn cho phép của TCVN 9393:2012 (10% đường kính cọc: 800 × 10% = 80 mm).

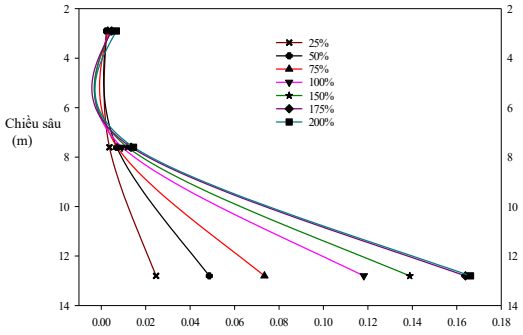
Cọc thí nghiệm T6-2, 800 mm được thí nghiệm nhổ đến tải trọng 260 tấn. Chuyển vị ứng với cấp tải lớn nhất là 11,32 mm nhỏ hơn so với giới hạn cho phép theo quy định TCVN 9393:2012 (10% đường kính cọc: 800 × 10% = 80 mm).

4.2. Kết quả sức kháng thành bên theo độ sâu

- Từ thí nghiệm đo biến dạng thân cọc có thể vẽ được biểu đồ sức kháng thành bên cho của cọc theo chiều sâu khi chịu nén như Hình 9. Tương tự cũng có thể xác định được biểu đồ sức kháng bên khi cọc chịu kéo theo Hình 10.



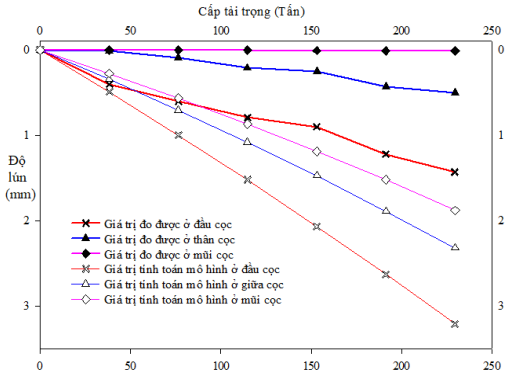
Hình 9. Biểu đồ sức kháng thành bên theo độ sâu ứng với các cấp tải trọng khác nhau của thí nghiệm nén cọc (cấp tải lớn nhất 230 tấn)



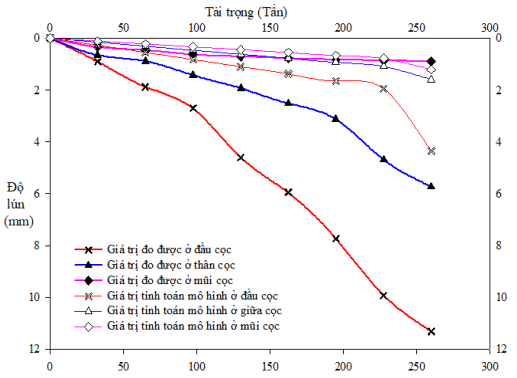
Hình 10. Biểu đồ sức kháng thành bên theo độ sâu ứng với các cấp tải trọng khác nhau của thí nghiệm nhổ cọc (cấp tải lớn nhất 260 tấn)

a. So sánh mô phỏng với kết quả thí nghiệm nén và nhổ tại hiện trường

Kết quả tính toán bằng phần mềm FB-pier cho thí nghiệm nén cọc cho thấy kết quả độ lún và tải trọng của cọc khá tương đồng với cấp tải trọng nhỏ và trung bình. Kết quả mô hình cho giá trị độ lún lớn hơn so với kết quả thực tế ở cấp tải trọng cuối cùng (Hình 11). Tuy nhiên giá trị này cũng có độ lệch không nhiều, như vậy mô hình tính toán có thể coi là chấp nhận được. Hình 12 là kết quả tính toán bằng phần mềm FB-pier cho thí nghiệm nhổ cọc cho thấy kết quả độ lún và tải trọng của cọc khá tương đồng với cấp tải trọng nhỏ và trung bình. Tuy nhiên giá trị này cũng có độ lệch khá nhiều ở đầu cọc.



Hình 11. Kết quả so sánh tính toán phần mềm FB-Pier với kết quả thực tế đối với thí nghiệm nén tĩnh



Hình 12. Kết quả so sánh tính toán phần mềm FB-Pier với kết quả thực tế đối với thí nghiệm nhổ cọc

Cả hai thí nghiệm nén và nhổ đều cho thấy giá trị độ lún của cọc vào lớp đá phong hoá nứt nẻ khá bé, lý do là thí nghiệm chưa được tiến hành đến tải trọng phá hoại.

b. Giải thích kết quả

Ngoài ra có thể so sánh sức kháng đơn vị tại mũi cọc và thành cọc cho riêng lớp đá phong hóa bằng thí nghiệm hiện trường và phần mềm. Đối với thí nghiệm nén: kết quả cho thấy đối với riêng lớp đá phong hóa dưới cùng thì giá trị qs khá tương đồng, tuy nhiên sức kháng mũi cọc thì có sự chênh lệch (như Bảng 2). Đối với thí nghiệm kéo tại mũi cọc cũng có sự tương đồng tốt, tuy nhiên tại vị trí đầu cọc thì có sự sai khác (Bảng 3).

Bảng 2. So sánh kết quả thí nghiệm nén với kết quả tính toán theo FB-pier

Phương pháp tính toán	Khi tính theo phần mềm FB-pier			Tính toán theo thí nghiệm thực tế		
	Đầu cọc (tại lớp sét pha dẻo cứng)	Thân cọc (sét pha sỏi)	Mũi cọc (Đá bột sét kết)	Đầu cọc (tại lớp sét pha dẻo cứng)	Thân cọc (sét pha sỏi)	Mũi cọc (Đá bột sét kết)
Sức kháng ma sát đơn vị q_s (MPa)	0,00828	0,0514	0,1096	0,0072	0,0488	0,1118
Sức kháng mũi cọc đơn vị q_p (MPa)	-	-	0,4800	-	-	0,7094

Bảng 3. So sánh kết quả thí nghiệm nhổ với kết quả tính toán theo FB-pier

Phương pháp tính toán	Khi tính theo phần mềm FB-pier			Tính toán theo thí nghiệm thực tế		
	Đầu cọc (tại lớp sét pha dẻo cứng)	Thân cọc (sét pha sỏi)	Mũi cọc (Đá bột sét kết)	Đầu cọc (tại lớp sét pha dẻo cứng)	Thân cọc (sét pha sỏi)	Mũi cọc (Đá bột sét kết)
Sức kháng ma sát đơn vị q_s (MPa)	0,0095	0,015	0,1511	0,0068	0,0145	0,1662

4.3. Hiệu chỉnh hệ số công thức quy trình 11823-2017

Dễ dàng nhận thấy, kết quả tính toán lí thuyết theo quy trình TCVN 1823-2017 cần được hiệu chỉnh để áp dụng một cách hiệu quả. Phương pháp hiệu chỉnh là sử dụng hệ số điều chỉnh, gọi là hệ số suy giảm A và B với lí thuyết như sau:

$$q_s(thucte) = Aq_s(tinhtoan) \tag{3}$$

$$q_p(thucte) = Bq_p(tinhtoan) \tag{4}$$

Hệ số suy giảm kiến nghị là $A = 0{,}81$ và $B = 0{,}78$. Khi đó, có thể tính toán cho sức kháng bên và mũi đơn vị:

- Sức kháng thành bên:

$$q_s(kiennghi) = 0{,}81\alpha\varphi q_u \tag{5}$$

trong đó q_u là cường độ kháng nén của đá nguyên dạng; φ là hệ số điều chỉnh xét đến mức độ có khe nối, nứt; α là hệ số thực nghiệm.

- Sức kháng mũi cọc:

$$q_p(kiennghi) = 2{,}34q_u k_{sp} d \tag{6}$$

trong đó q_u là cường độ nén một trục của đá; k_{sp}, d là các hệ số xem quy trình TCVN 1823-2017.

Tuy nhiên các hệ số này cần có thêm nhiều thí nghiệm để đưa ra giá trị một cách tin cậy, có thể đưa vào thực tế tại Việt Nam.

5. Kết luận

Dựa vào kết quả thí nghiệm nén tĩnh và thí nghiệm nhổ cọc có gắn các thiết bị đo dọc theo thân cọc và mô hình thí nghiệm cọc theo phần mềm FB-pier có thể đưa ra một số kết luận như sau:

- Khi gắn thiết bị đo biến dạng dọc theo thân cọc có thể vẽ được biểu đồ sức kháng ma sát theo độ sâu.

- Thí nghiệm nén và nhổ cọc có đo biến dạng dọc được tiến hành, xác định được sức kháng đơn vị tại mũi cọc, thành cọc khi cọc đặt vào tầng phong hóa nứt nẻ. Dựa vào giá trị tính toán có thể hiệu chỉnh được công thức tính toán sức kháng ma sát và sức kháng mũi cọc theo TCVN 11823-10:2017 khi cọc thi công vào tầng phong hóa nứt nẻ.

- Kiến nghị được các hệ số hiệu chỉnh công thức sức kháng ma sát đơn vị và mũi cọc. Tuy nhiên cần có thêm các nghiên cứu thực nghiệm khác để kiểm chứng và đưa vào sử dụng.

- Phần mềm FB-pier có thể mô hình cho loại đất đá phong hoá IGM, có thể sử dụng trong giai đoạn thiết kế cơ sở khi thiết kế sức chịu tải cho cọc khoan nhồi vào tầng phong hóa nứt nẻ.

Tài liệu tham khảo

[1] Khánh, N. V. (2011). Improving load bearing capacities of bored piles using jet cleaning and pile toe grouting (post-grouting) - A method effectively applied in Hanoi. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD)-ĐHXD*, 5(2):112–114.

[2] Ngữ, V. C., Thái, N. (2004). *Móng cọc – phân tích và thiết kế*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.

[3] Thành, T. Q., Nam, N. T., Nhì, N. N. (2014). Research on determining the reasonable operating parameters of bored pile drilling machines to fit extended bottom bucket. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD)-ĐHXD*, 8(1):7–13.

[4] AASHTO (2012). *Standard specifications for highway bridges*. Washington, D.C.

[5] Bica, A. V. D., Prezzi, M., Seo, H., Salgado, R., Kim, D. (2013). Instrumentation and axial load testing of displacement piles. *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, 167(3):238–252.

[6] Fellenius, B. H., Harris, D. E., Anderson, D. G. (2004). Static loading test on a 45 m long pipe pile in Sandpoint, Idaho. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(4):613–628.

[7] Johnston, I. W. (1995). Rational determination of the engineering properties of weak rocks. In *Geotechnical Engineering Advisory Panel: Proceedings of the Institution of Civil Engineers*.

[8] Papageorgiou, O. (1997). *Soft rocks. Geotechnical engineering of hard soils-soft rocks*. Athens, Greece.

[9] Tiêu chuẩn ngành 22 TCN 272:2005. *Tiêu chuẩn thiết kế cầu*. Bộ Giao thông Vận tải.

[10] Fellenius, B. H., Haagen, T. (1969). New pile force gauge for accurate measurements of pile behavior during and following driving: Research note. *Canadian Geotechnical Journal*, 6(3):356–362.

[11] Brown, M. J., Hyde, A. F. L., Anderson, W. F. (2006). Analysis of a rapid load test on an instrumented bored pile in clay. *Géotechnique*, 56(9):627–638.

[12] Fellenius, B. H. (2011). Capacity versus deformation analysis for design of footings and piled foundations. *Geotechnical Engineering*, 42(2):70–77.

[13] Hayes, J., Simmonds, T. (2002). Interpreting strain measurements from load tests in bored piles. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Piling and Deep Foundations*, 663–669.

[14] Hải, H. T. (2011). Nghiên cứu sử dụng đường cong t-z dự báo quan hệ tải trọng-độ lún của cọc khoan nhồi ở khu vực Hà Nội. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây Dựng - IBST*, 1:1–7.

[15] Tiến, L. Đ., Lân, N. C., Thành, B. T., Long, N. N., Bình, N. Đ. (2019). Nghiên cứu sức chịu tải của cọc khoan nhồi khi đặt vào tầng phong hóa nứt nẻ khu vực Quảng Trị. *Tạp chí Cầu đường Việt Nam*, 23(4): 10–13.

[16] Lee, J. S., Park, Y. H. (2008). Equivalent pile load–head settlement curve using a bi-directional pile load test. *Computers and Geotechnics*, 35(2):124–133.

[17] Salgado, R., Kim, D. (2013). *Instrumentation and axial load testing of displacement piles*. Lyles School of Civil Engineering Faculty Publications.

[18] TCVN 11823-10:2017. *Tiêu chuẩn quốc gia về thiết kế cầu đường bộ*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.