BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ MÔI TRƯỜNG

VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI VIỆT NAM
VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI MIỀN NAM

LÊ THÀNH TRUNG

NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG TĂNG SỨC CHỊU TẢI CỌC KHOAN NHỒI KHI PHỤT VỮA DỌC THÂN CỌC

Ngành: Địa kỹ thuật xây dựng

Mã số: 9 58 02 11

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Thành phố Hồ Chí Minh - 2026

Công trình được hoàn thành tại:

Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam

Người hướng dẫn khoa học**:**

1. TS. Bạch Vũ Hoàng Lan
2. PGS.TS. Nguyễn Nghĩa Hùng

Người phản biện 1: PGS.TS. Lê Bá Vinh

Người phản biện 2: PGS.TS. Dương Hồng Thẩm

Người phản biện 3: PGS.TS. Trương Quang Thành

Luận án được bảo vệ tại Hội đồng đánh giá luận án cấp Viện, họp tại: Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam, số 658 Võ Văn Kiệt, Phường Chợ Quán, Thành phố Hồ Chí Minh

Vào hồi: …….giờ Ngày ….tháng….năm 2026

Có thể tìm hiểu luận án tại :

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Thư viện Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam
- Thư viện Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Lý do lựa chọn đề tài

Công nghệ phụt vữa cọc khoan nhồi đã triển khai gần hai thập kỷ tại Việt Nam, tuy nhiên vẫn chưa có tiêu chuẩn thiết kế; Các tính toán chủ yếu dựa vào công thức kinh nghiệm hoặc tài liệu nước ngoài, chưa thực sự phù hợp điều kiện địa chất địa phương. Do vậy, nghiên cứu này có tính cấp thiết, nhằm đóng góp những kết quả cụ thể về tính hiệu quả của công nghệ phụt vữa cọc khoan nhồi làm việc trong nền đất cát tại TP.HCM, Việt Nam.

2.Mục đích của đề tài

Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng vữa phụt đến sự gia tăng sức chịu tải của cọc khoan nhồi làm việc trong nền cát:

- Ảnh hưởng của hàm lượng vữa phụt đến giá trị sức kháng thành đơn vị của cọc, nhằm xác định hàm lượng vữa hiệu quả.
- Đề xuất công thức dự báo sức kháng thành đơn vị của cọc nhồi có phụt vữa từ giá trị tương ứng của cọc không phụt.
- Đề xuất giải pháp mô phỏng đường cong tải trọng – độ lún (P-S) của cọc có phụt vữa bằng Plaxis, thông qua giá trị đường kính quy đổi ($D_{qđ}$) và hệ số tương tác (R_{inter}).

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Cọc khoan nhồi BTCT có đường kính 0,4 m, chiều dài 3,0 m; làm việc trong nền đất cát mịn, trạng thái rời tại phường Tân Uyên, TP.HCM.
- Nghiên cứu giá trị sức kháng thành và sức chịu tải của cọc khi thay đổi hàm lượng vữa phụt; không xét đến ảnh hưởng tải trọng ngang, áp lực phụt và cấp phối vữa.

4. Nội dung nghiên cứu

Nội dung bao gồm: (1) Tổng quan nghiên cứu khả năng tăng sức chịu tải cọc khoan nhồi khi phụt vữa dọc thân; (2) Cơ sở lý thuyết về cách xác định sức kháng thành của cọc khoan nhồi khi phụt vữa dọc thân cọc; (3) Thiết kế, thi công, thí nghiệm và phân tích kết quả TN nén tĩnh các cọc; (4) Đề xuất, hiệu chỉnh và kiểm chứng công thức dự báo sức kháng thành đơn vị. (5) Mô phỏng số thí nghiệm nén tĩnh bằng phần mềm Plaxis 3D, đề xuất giải pháp mô phỏng cọc phụt vữa.

5. Phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp lý thuyết: Phân tích, tổng hợp tài liệu.
- Phương pháp thực nghiệm: Thí nghiệm nén tĩnh cọc.
- Phương pháp xử lý số liệu: Phân tích các dữ liệu thí nghiệm.
- Phương pháp số: Mô hình hóa thí nghiệm nén tĩnh cọc bằng Plaxis 3D.

6. Những đóng góp mới của luận án

(1) Xác định định lượng ảnh hưởng của hàm lượng vữa phụt đến sức kháng thành đơn vị và sức chịu tải cực hạn của cọc khoan nhồi làm việc trong nền cát mịn, trạng thái rời thông qua thí nghiệm nén tĩnh cọc kết hợp đo biến dạng dọc thân cọc.

(2) Đề xuất công thức thực nghiệm dự báo sức kháng thành đơn vị của cọc khoan nhồi có phụt vữa từ giá trị tương ứng của cọc không phụt, có xét đến ảnh hưởng của hàm lượng vữa phụt và cao trình phụt.

(3) Đề xuất giải pháp đường kính quy đổi kết hợp hệ số tương tác cọc - đất để mô phỏng đường cong tải trọng – độ lún của cọc khoan nhồi có phụt vữa bằng phần mềm Plaxis 3D.

7. Cấu trúc của luận án

Ngoài phần Mở đầu, Kết luận và Kiến nghị, Tài liệu tham khảo và Phụ lục, luận án gồm 4 chương chính.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG TĂNG SỨC CHỊU TẢI CỌC KHOAN NHỒI KHI PHỤT VỮA DỌC THÂN CỌC

1.1 Tổng quan cọc khoan nhồi.

1.2 Tổng quan về công nghệ phụt vữa dọc thân

1.3 Các nghiên cứu quốc tế về cọc phụt vữa.

Tổng hợp các nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng FEM trên thế giới, cho thấy: (i) Phụt vữa làm tăng rõ rệt sức kháng thành của cọc, (ii) Hiệu quả phụ thuộc loại đất, áp lực và hàm lượng vữa. Tuy nhiên kết quả chưa tập trung.

1.4 Các nghiên cứu trong nước về cọc phụt vữa.

Các nghiên cứu chủ yếu dựa trên: (i) Thí nghiệm hiện trường (nén tĩnh, O-cell), (ii) Mô phỏng số bằng phần tử hữu hạn (Plaxis). Tuy nhiên khó áp dụng cho từng loại nền tại Việt Nam.

1.5 Cơ chế gia tăng sức kháng thành thành của cọc khoan nhồi khi phụt vữa dọc thân cọc.

Gồm ba cơ chế chính: (i) Tăng ứng suất pháp tuyến hữu hiệu quanh thân cọc, (ii) Tăng hệ số ma sát tiếp xúc cọc–đất, và (iii) Cải thiện đặc tính cơ học của vùng đất xung quanh.

1.6 Nhận xét chương 1

Công nghệ phụt vữa có hiệu quả rõ rệt trong việc tăng sức chịu tải cọc. Tuy nhiên, còn thiếu mô hình định lượng phù hợp với nền cát tại Việt Nam. Đây là cơ sở để luận án triển khai nghiên cứu.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT XÁC ĐỊNH SỨC CHỊU TẢI VÀ SỨC KHÁNG THÀNH ĐƠN VỊ CỌC KHOAN NHỒI KHI PHỤT VỮA THÂN CỌC

2.1 Cơ sở lý thuyết xác định sức chịu tải cọc khoan nhồi theo điều kiện đất nền theo TCVN 10304:2025.

2.1.1 Xác định sức chịu tải cọc theo điều kiện đất nền

Sức chịu tải R_k của cọc theo điều kiện đất nền được xác định dựa vào giá trị sức kháng đơn vị của đất dưới mũi cọc q_b và sức kháng đơn vị của từng lớp đất xung quanh cọc f_i.

2.1.2 Xác định sức kháng thành đơn vị theo chỉ tiêu cơ lý của đất nền

2.1.3 Xác định sức kháng thành đơn vị theo kết quả thí nghiệm xuyên tiêu chuẩn (SPT)

2.2 Cơ sở lý thuyết xác định sức chịu tải cọc bằng thí nghiệm nén tĩnh

2.3 Cơ sở lý thuyết xác định sức kháng thành đơn vị bằng thí nghiệm nén tĩnh kết hợp đo biến dạng thân cọc.

Thí nghiệm nén tĩnh cọc kết hợp đo biến dạng thân cọc sử dụng các cảm biến strain gauge (SG) lắp dọc theo chiều sâu cọc để xác định phân bố lực dọc trục trong quá trình gia tải. Từ đó tính toán được thành phần sức kháng thành và sức kháng mũi của cọc thí nghiệm. Nén tĩnh kết hợp đo biến dạng cho phép đánh giá chính xác cơ chế truyền tải của cọc thay vì chỉ dựa vào đường cong tải trọng – độ lún để xác định sức chịu tải cực hạn của cọc.

2.4 Cơ sở lý thuyết mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM)

Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được mô phỏng thí nghiệm nén tĩnh cọc, từ đó thiết lập được đường cong tải - lún của cọc.

2.5 Các công thức xác định sức kháng thành đơn vị của cọc khoan nhồi có phụt vữa

2.6 Nhận xét chương 2

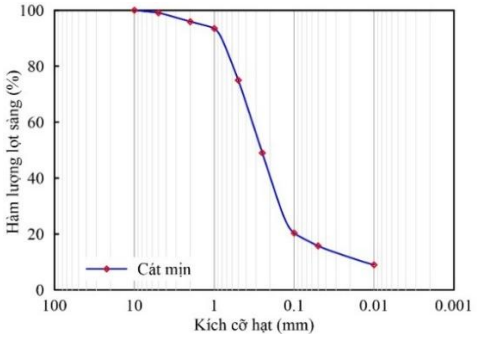
Chương 2 trình bày các phương pháp xác định sức chịu tải cực hạn của cọc; Các công thức tính sức kháng thành đơn vị cọc khoan nhồi phụt vữa và cọc không phụt vữa; cũng như cơ chế gia tăng sức kháng thành khi cọc được phụt vữa, đây chính là cơ sở để NCS xây dựng thí nghiệm nén tĩnh cọc tại hiện trường và mô phỏng số cho cọc nhồi có phụt vữa.

CHƯƠNG 3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH THÍ NGHIỆM NÉN TĨNH ĐỂ PHÂN TÍCH HIỆU QUẢ TĂNG SỨC CHỊU TẢI CỦA CỌC KHOAN NHỒI PHỤT VỮA DỌC THÂN CỌC

3.1 Xây dựng mô hình thí nghiệm

3.1.1 Địa chất tại khu vực thí nghiệm

Chương trình thí nghiệm được thực hiện tại một khu đất trống thuộc bãi tập Thao trường Tân Uyên của Trường Sỹ Quan Công Binh, tại Phường Tân Uyên, TP.HCM. Cấp phối: hạt cát 78,8%, sét 10,9%, bụi 9,3%, sỏi 0,9%. Chỉ số SPT lần lượt 2 – 4 – 7 tại các độ sâu 0,9 m – 2,4 m – 3,9 m với giá trị trung bình là 4. Địa chất khu vực là nền cát mịn, trạng thái rời. Đường cong cấp phối hạt của đất tại khu vực thí nghiệm được trình bày trong Hình 3.2.

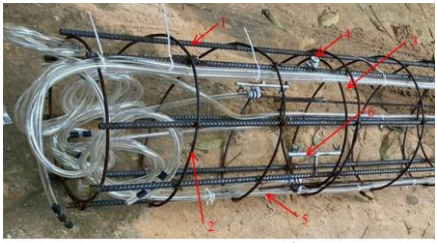


Hình 3.2. Đường cong cấp phối hạt của đất khu vực tiến hành thực nghiệm

3.1.2 Quy mô, cấu tạo và thi công cọc thí nghiệm

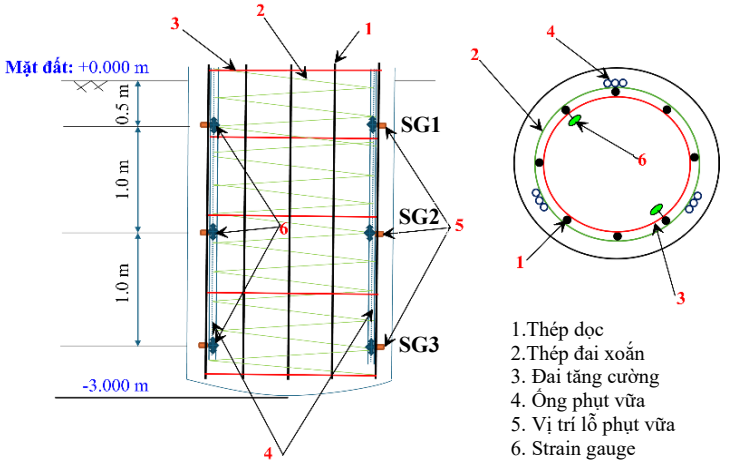
Để đảm bảo các yêu cầu về độ chính xác khi đo đạc và điều kiện kinh phí hạn chế, NCS thực hiện các thí nghiệm nén tĩnh trên 4 cọc khoan nhồi (D = 0,4 m; L = 3,0 m), gồm 1 cọc không phụt và 3 cọc phụt vữa với hàm lượng vữa IR = 20, 35 và 50 l/m². Các cọc thí nghiệm đều được bố trí hệ thống strain gages (SG) tại 3 cao trình khác nhau, để đo biến dạng dọc thân cọc (Hình 3.4 ; Hình 3.5).

Cọc thi công theo TCVN 9395:2012. Hệ thống ống phụt vữa bố trí tại cao trình: -0,5 m; -1,5 m; -2,5 m. 24 giờ sau khi đổ bê tông cọc, thì phá nước tại các lỗ phụt và 3 ngày sau tiến hành phụt vữa dọc thân cọc với các hàm lượng vữa khác nhau.



1. Thép chủ chịu lực
2. Thép đai xoắn
3. Thép đai tăng cường
4. Đầu phun vữa
5. Ống dẫn vữa
6. Vị trí lắp đặt strain gauge

Hình 3.4. Khung thép cọc khoan nhồi được chế tạo tại xưởng



Hình 3.5. Cấu tạo của các cọc thí nghiệm

3.2 Thí nghiệm nén tĩnh cọc kết hợp với đo biến dạng dọc thân cọc

3.2.1 Mục tiêu thí nghiệm

3.2.2 Xác định tải trọng thí nghiệm

3.2.3 Đề cương và trình tự gia tải thí nghiệm

Thí nghiệm nén tĩnh cọc thực hiện quy trình nén nhanh (ASTM D1143), để tránh hiện tượng trùng ứng suất khi đo biến dạng. Các thiết bị đo trong thí nghiệm nén tĩnh cọc được bố trí như Hình 3.9. Tại từng cấp tải số liệu về: chuyển vị đầu cọc, tải trọng và biến dạng được ghi nhận, làm cơ sở xác định sức chịu tải cực hạn của cọc và tính giá trị sức kháng thành đơn vị của từng đoạn cọc.



Kí hiệu :1. Dầm phụ
2. Dầm chính
3. Đầu thu số liệu
4. Máy tính đọc dữ liệu
5. Bơm dầu thủy lực bằng tay
6. Dầm chuẩn
7. Cọc neo dầm chuẩn
8. Cảm biến đo chuyển vị cọc
9. Cọc neo
10. Cọc thí nghiệm
11. Đế thép
12. Gối thép tăng cường
14. Cảm biến đo lực
15. Thước bọt thủy
16. Cáp tín hiệu biến dạng cọc
17. Cáp tín hiệu P – S.
18. Giá đỡ cảm biến đo

Hình 3.9. Lắp đặt thiết bị thí nghiệm nén tĩnh cọc

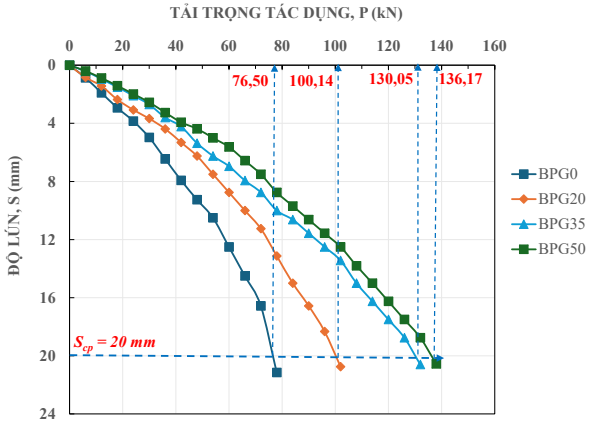
3.2.4 Xây dựng hệ thống thử tải tĩnh cọc tại hiện trường

Đối trọng: Hệ phản lực gồm 4 cọc neo, dầm đối trọng I400 – I250, kích thủy lực 40 tấn. Thiết bị đo và ghi nhận số liệu: load cell và đồng hồ chuyển vị, các số liệu thí nghiệm được ghi nhận bằng đầu thu data logger,..

3.3 Kết quả thí nghiệm và phân tích thí nghiệm nén tĩnh cọc kết hợp đo biến dạng dọc thân cọc

3.3.1 Kết quả thí nghiệm nén tĩnh cọc

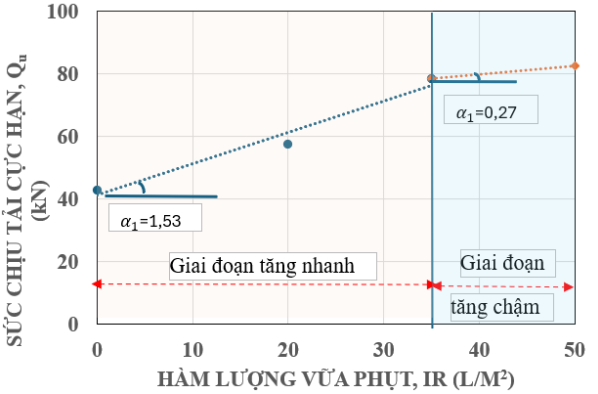
Trong quá trình gia tải, các cọc TN đều được nén đến cấp tải tương ứng với độ lún của đầu cọc lớn hơn 20 mm, lúc này cả 4 cọc đều chưa xảy ra hiện tượng cọc bị tụt, vì thế quá trình gia tải được kết thúc. Các đồ thị tải trọng – độ lún của 4 cọc thí nghiệm đươc thể hiện trên Hình 3.12



Hình 3.12. Đường cong P -S của các cọc thí nghiệm

3.3.2 Phân tích ảnh hưởng của hàm lượng vữa đến sức chịu tải cực hạn của cọc

Theo TCVN 10304:2025, khi đồ thị P-S không có điểm uốn, giá trị sức chịu tải cực hạn (Q_u) của cọc chính là lực nén (P) tương ứng với độ lún cho phép (S_{cp}). Giá trị của Q_u tăng lần lượt từ 76,50 kN (cọc BPG0) lên 100,14 kN (cọc BPG20), 130,05 kN (cọc BPG35) và 136,17 kN (cọc BPG50) mức tăng lần lượt là 1,31; 1,70 và 1,78 lần so với cọc không phụt.



Hình 3.13. Ảnh hưởng hàm lượng vữa phụt đến giá trị sức chịu tải cực hạn của cọc.

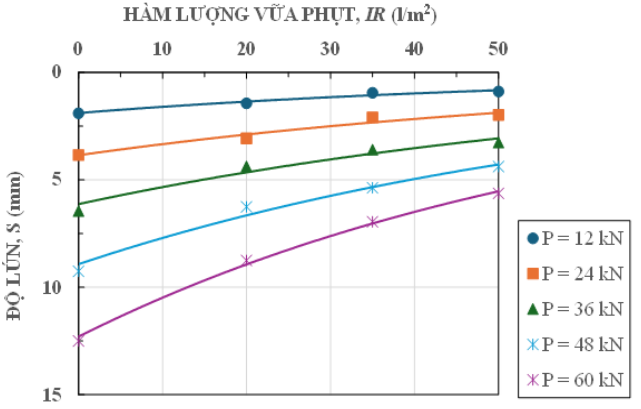
Đồ thị biểu diễn quan hệ giữa hàm lượng vữa phụt (*IR*) và sức chịu tải cực hạn (Q_u) (Hình 3.13), đường xu hướng trên đồ thị, cho thấy có hai giai đoạn biến thiên:

(1) Khi *IR* = 0÷35 l/m² giá trị sức chịu tải cực hạn tăng nhanh, mức gia tăng sức giá trị của Q_u chiếm khoảng 70% so với giá trị tương ứng của cọc trơn;

(2) Khi *IR* = 35÷50 l/m² giá trị Q_u tăng chậm, mức tăng Q_u chỉ thêm 8% so với giá trị tương ứng của cọc trơn. Do vậy, hàm lượng vữa *IR* = 35 l/m² có thể xem là hàm lượng vữa hiệu quả.

3.3.3 Phân tích ảnh hưởng của hàm lượng vữa đến chuyển vị đầu cọc

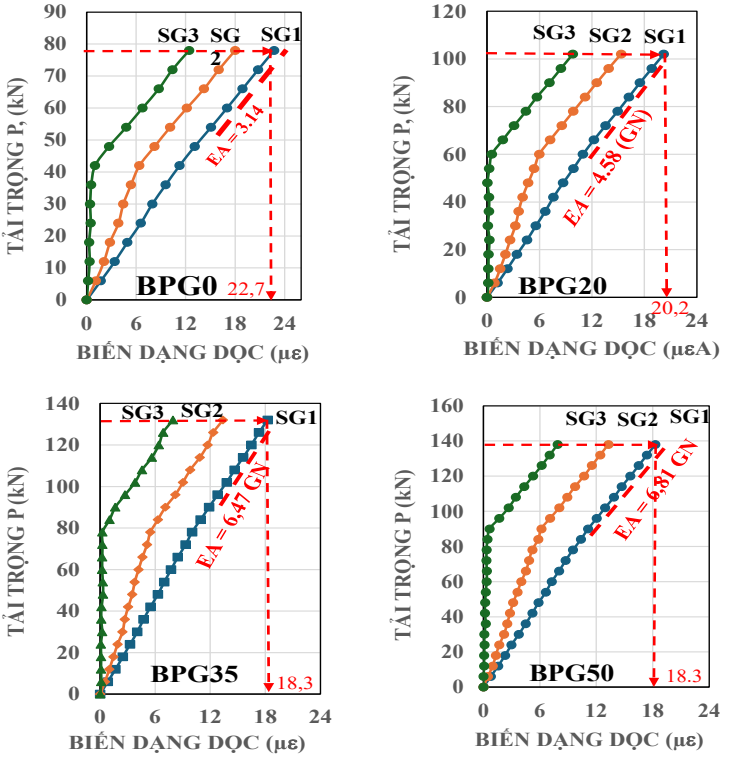
Đồ thị Hình 3.15 cho thấy hàm lượng vữa phụt (*IR*) ảnh hưởng rõ rệt đến chuyển vị đầu cọc. Ở các cấp tải trọng nén P=12÷36 (kN), sự khác biệt về độ lún của các cọc chưa rõ rệt. Khi tải trọng đạt nén là 48 kN và 60 kN, hiệu quả phụt vữa rõ rệt, khi cọc BPG0 có độ lún 9,25 mm và 12,5 mm, cọc BPG50 chỉ lún 4,38 mm và 5,63 mm, độ giảm lún lần lượt là 53 % và 59 %.



Hình 3.15. Ảnh hưởng hàm lượng vữa phụt đến độ lún của các cọc thí nghiệm tại các cấp tải trọng nén khác nhau

3.3.4 Phân tích kết quả đo biến dạng dọc trục cọc

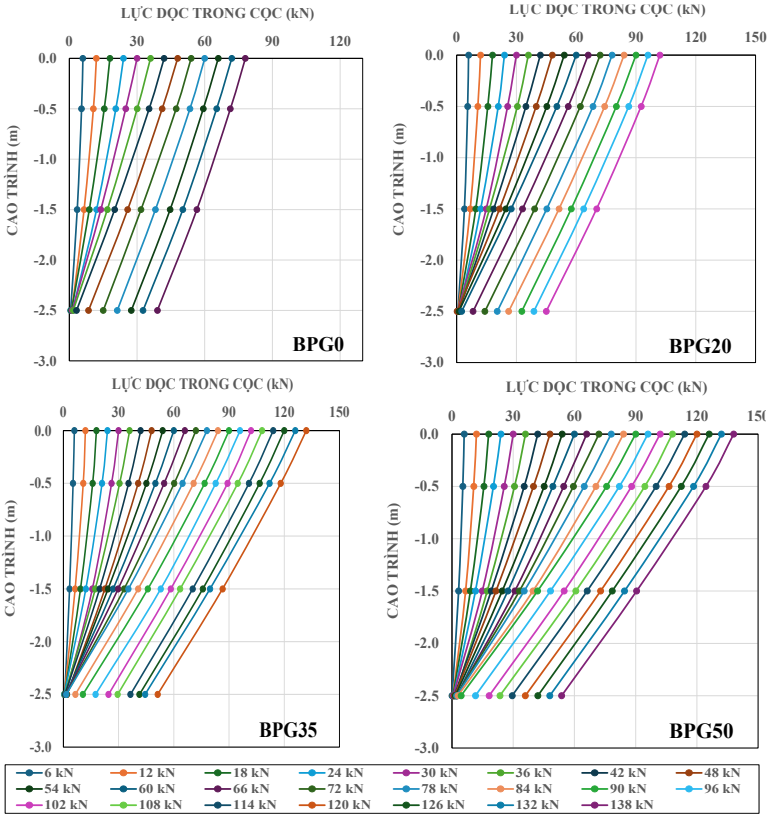
Kết quả đo biến dạng cọc (Hình 3.16*)* cho thấy biến dạng dọc thân cọc tại các cấp tải đều khá bé, khi này vật liệu cọc làm việc trong miền đàn hồi. Độ cứng của các cọc thí nghiệm BPG0, BPG20, BPG35 và BPG50 lần lượt là 3,14; 4,58; 6,47 và 6,81 GN, được xác định từ quan hệ giữa tải trọng và biến dạng đo tại vị trí SG1 của mỗi cọc. Kết quả cho thấy độ cứng của các cọc, phản ánh xu hướng tăng độ cứng khi *IR* tăng.



Hình 3.16. Số liệu biến dạng của các cọc BPG0, BPG20, BPG35 và BPG50

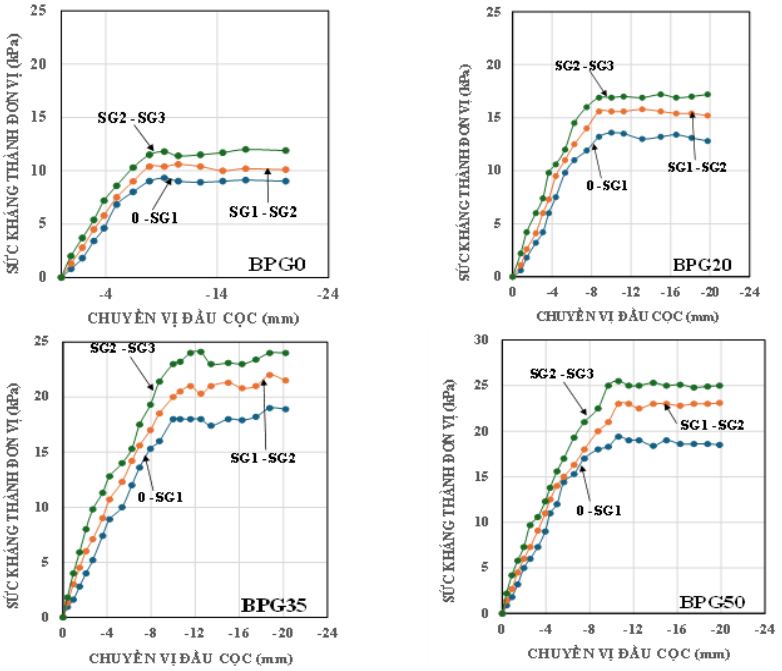
Biểu đồ phân bố lực dọc trong cọc (Hình 3.17) được xác định từ số đo biến dạng (ε), cho thấy giá trị này giảm dần theo chiều

sâu do ma sát đất – cọc. Ở các cấp tải nhỏ, sức kháng mũi gần như bằng 0, lúc này chỉ có sức kháng thành được huy động. Khi tăng tải, độ dốc đường cong lực dọc – chiều sâu tăng lên, phản ánh sự gia tăng sức kháng thành đơn vị. Ở cấp tải cuối, các đồ thị gần song song, cho thấy giá trị sức kháng thành đã huy động hết.

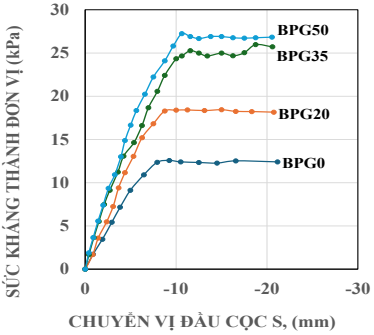


Hình 3.17. Biểu đồ phân bố lực dọc trục của các cọc thí nghiệm

Khi tải trọng nén tác dụng làm cọc lún sâu vào trong đất, thì lực ma sát giữa đất và cọc hướng ngược chiều chuyển động, kết quả là lực dọc trong cọc giảm dần theo chiều sâu; từ đó ta xác định được giá trị sức kháng đơn vị của từng đoạn cọc (Hình 3.18).



Hình 3.18. Biểu đồ quan hệ giữa sức kháng thành đơn vị và chuyển vị đầu cọc



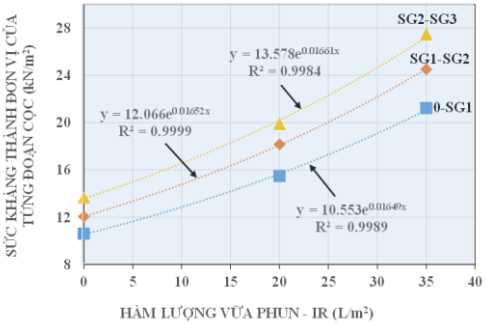
Hình 3.19. Sức kháng thành đơn vị trung bình của các cọc.

Giá vị sức kháng thành đơn vị trung bình của cọc không phụt (BPG0) là 11,88 kPa, sai số khoảng 5% với giá trị thu được từ công thức tính sức kháng đơn vị dựa vào chỉ số SPT (N_p). Các

cọc phụt vữa (BPG20, BPG35, BPG50) có giá trị Sức kháng thành đơn vị trung bình lần lượt 18,32; 25,3 và 26,51 kPa, tương ứng hệ số tăng 1,48; 2,04 và 2,14 so với cọc trơn (Hình 3.19).

3.4 Thiết lập, hiệu chỉnh và kiểm chứng công thức xác định sức kháng thành đơn vị tại các đoạn cọc phụt vữa

3.4.1 Thiết lập công thức xác định sức kháng thành đơn vị của các đoạn cọc phụt vữa



Hình 3.20. Biểu đồ quan hệ giữa sức kháng thành đơn vị và hàm lượng vữa phụt

Từ đồ thị quan hệ giữa giá trị sức kháng thành đơn vị theo hàm lượng vữa (IR = 0÷30 l/m^2) và độ sâu phụt (Hình 3.20), NCS xử dụng hàm xấp xỉ dạng mũ để xác định giá trị sức kháng thành đơn vị f_{IR} của cọc phụt vữa từ giá trị tương ứng f_0 của cọc không phụt:

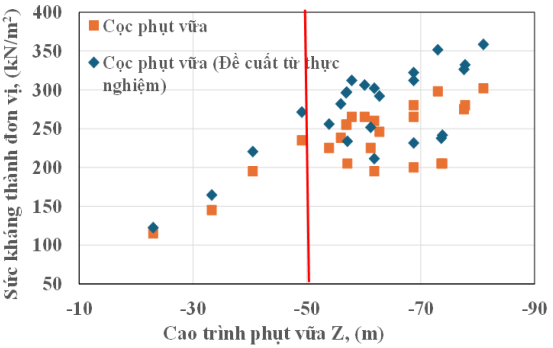
$$f_{IR} = f_0 . e^{b.IR} \quad (3.2)$$

Với: $b = -7.10^{-5}Z + 0{,}0165$ (3.3)

Trong đó: f_{IR}; f_0 lần lượt là giá trị sức kháng thành đơn vị ứng với hàm lượng vữa (IR) và của cọc không phụt (IR = 0); b là tham số phụ thuộc vào cao trình phụt vữa và IR (l/m^2) là hàm lượng vữa phụt, Z (m) là cao trình trung bình của đoạn cọc phụt vữa.

3.4.2 Hiệu chỉnh, kiểm chứng công thức xác định sức kháng thành đơn vị tại các đoạn cọc phụt vữa

Để kiểm chứng tính khả thi của công thức đề xuất, NCS đã sử dụng số liệu nén tĩnh của 8 công trình thực tế, từ đó tính ra được giá trị sức kháng thành đơn vị của từng đoạn cọc được phụt vữa và giá trị tương ứng của cọc không phụt. Các số liệu này được so sánh với giá trị tính theo công thức đề xuất (3.2) và (3.3) kết quả cho thấy có sai số khoảng ± 18.7 % (Hình 3.24).



Hình 3.24. Biểu đồ quan hệ giữa giá trị sức kháng thành đơn vị của cọc tính theo công thức (3.2) và kết quả tương ứng từ TN nén tĩnh của 8 công trình khác nhau

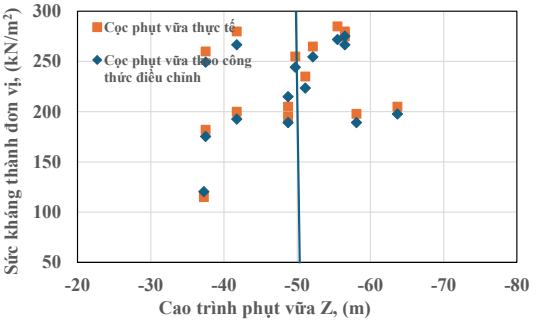
Sai số khá lớn giữa giá trị tính theo công thức (3.2) và kết quả thu được từ các công trình, có thể do cọc trong mô hình thí nghiệm của NCS có chiều dài khá nhỏ, do đó cần hiệu chỉnh tham số b, dựa trên việc so sánh giá trị sức kháng thành đơn vị của đoạn cọc không phụt và phụt vữa tương ứng thu được từ thí nghiệm của 8 công trình kiểm chứng, xác định theo công thức:

$$b = -4.10^{-5}.Z + 0{,}0135 \quad (3.5)$$

Trong đó: Z là cao trình trung bình của đoạn cọc phụt vữa, (đơn vị đo là m, lấy giá trị âm). Lấy Z= -50 (m) khi cao trình nghiên cứu sâu hơn 50 m.

Sau đó áp dụng công thức (3.2) cùng với tham số b được tính theo (3.5), để kiểm chứng độc lập các biểu thức đề xuất từ kết

quả thí nghiệm của 2 công trình thực tế khác (Sông Đà Riverside và Sông Việt). Kết quả cho thấy sai số giữa giá trị tính từ công thức và thực nghiệm là ± 4.83 % (Hình 3.26) thể hiện tính khả thi của công thức sau hiệu chỉnh.



Hình 3.26. Biểu đồ quan hệ giữa giá trị sức kháng thành đơn vị của cọc xác định theo công thức điều chỉnh và kết quả phân tích số liệu của công trình Sông Đà Riverside và Sông Việt.

3.5 Kết luận chương 3

Qua phân tích tổng hợp các kết quả thí nghiệm hiện trường, ta có thể rút ra những kết luận sau:

- Khi hàm lượng vữa phụt tăng, giá trị sức kháng thành đơn vị trung bình f_{IR} của cọc tương ứng tăng 1,48 lần; 2,04 lần; và 2,14 lần, làm cho giá trị sức chịu tải cực hạn của các cọc tăng lần lượt 1,31 lần, 1,70 lần và 1,78 lần so với các giá trị tương ứng của cọc trơn.
- Số liệu nghiên cứu cho thấy sức kháng thành của cọc phụt vữa không tăng tuyến tính theo hàm lượng vữa phụt, giá trị hàm lượng vữa phụt IR = 35 l/m² được xem là hiệu quả khi cọc làm việc trong nền đất tại khu vực thí nghiệm.
- Biểu thức (3.2) và (3.5) dự báo giá trị sức kháng thành đơn vị (f_s) của cọc phụt vữa từ giá trị tương ứng của cọc không phụt, có xét đến hàm lượng vữa và cao trình phụt, đã được

điều chỉnh và kiểm chứng cho thấy tính khả thi của đề xuất.

CHƯƠNG 4. MÔ PHỎNG THÍ NGHIỆM NÉN TĨNH CỌC VÀ ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP ĐƯỜNG KÍNH QUY ĐỔI MÔ PHỎNG CỌC KHOAN NHỒI PHỤT VỮA DỌC THÂN CỌC

4.1 Mục tiêu và phạm vi mô phỏng

4.2 Mô phỏng thí nghiệm nén tĩnh cọc thí nghiệm bằng phương pháp phần tử hữu hạn.

4.2.1 Xây dựng mô hình cọc và nền

Đất nền được chọn mô hình Mohr Coulomb phù hợp với việc xây dựng đường cong tải trọng – độ lún (P-S) của cọc. Cọc sử dụng mô hình đàn hồi tuyến tính, hoàn toàn phù hợp giai đoạn làm việc của vật liệu cọc.

4.2.2 Xác định thông số đầu vào của đất nền và cọc

Các thông số đầu vào của đất nền và cọc xác định từ kết quả thí nghiệm mẫu đất, mẫu bê tông cọc ở trong phòng thí nghiệm và tại hiện trường.

4.2.3 Điều kiện biên, lưới phần tử và các pha tính toán

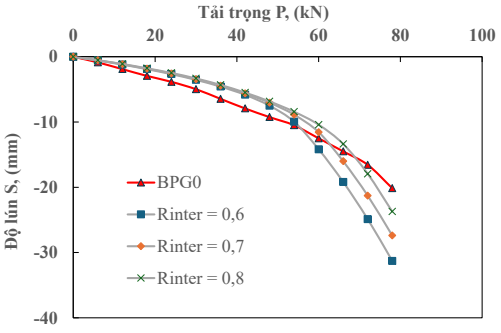
Kích thước mô hình nền là 20 m x 20 m x10 m đảm bảo không ảnh hưởng của hiệu ứng biên. Lưới phần tử được chọn với mức độ trung bình đến mịn từ biên của mô hình đến vùng đất quanh cọc. Các pha tính toán trong mô hình tương ứng từng cấp gia cấp trong quá trình thí nghiệm nén tĩnh cọc.

4.2.4 Chỉ tiêu đánh giá độ phù hợp giữa mô phỏng và thí nghiệm

4.3 Mô phỏng và hiệu chỉnh hệ số tiếp xúc của cọc không phụt vữa (BPG0)

Thí nghiệm nén tĩnh của cọc BPG0 được mô phỏng trước để xác định thông số R_{inter}, sao cho kết quả mô phỏng đường cong

tải lún (P-S) tiệm cận với kết quả thí nghiệm. Kết quả thử dần cho thấy giá trị R_{inter} = 0,80, là phù hợp cho cọc BPG0 (Hình 4.2).



Hình 4.2. So sánh giữa kết quả mô phỏng và thí nghiệm cọc BPG0 khi thay đổi R_{inter} = [0,6 ÷ 0,8]

4.4 Mô phỏng cọc khoan nhồi phụt vữa BPG20; BPG35 và BPG50

Vữa phụt làm gia tăng sức kháng thành của cọc, để mô phỏng một cách hiệu quả hiện tượng này NCS xử dụng giải pháp tăng diện tích tiếp xúc và tăng hệ số tiếp xúc (R_{inter}) của hệ cọc – đất. Sự gia tăng diện tích tiếp xúc cọc – đất tại các đoạn cọc phụt vữa sẽ được xét đến qua thông số đường kính qui đổi ($D_{qđ}$).

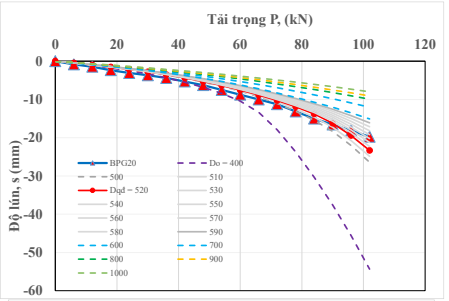
4.4.1 Cơ sở và nguyên lý mô hình hóa tương đương cọc phụt vữa

4.4.2 Xác định đường kính quy đổi $D_{qđ}$ của các cọc phụt vữa

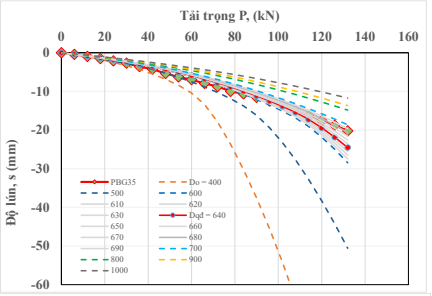
Ban đầu, giữ nguyên thông số đất nền và giá trị R_{inter} = 0,8; sử dụng phương pháp tăng dần đường kính của đoạn cọc được phụt vữa từ giá trị đường kính ban đầu (D_0) sao cho đường cong nén lún P-S của mô phỏng trùng với kết quả tương ứng thu từ thí nghiệm hiện trường, mức độ tương thích được đánh giá bằng hệ số xác định (với $R^2 \geq 0,95$), từ đó xác định được giá trị $D_{qđ}$ tương ứng cho từng hàm lượng vữa nghiên cứu (*IR*).

Kết quả thể hiện từ Hình 4.3 đến 4.5, cho thấy $D_{qđ}$ phù hợp

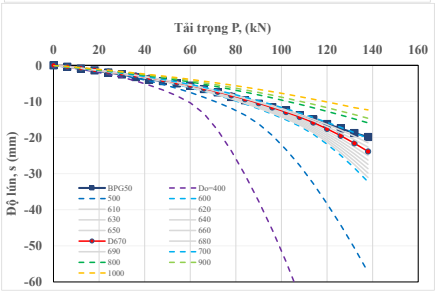
nhất đối với các cọc BPG20, BPG35 và BPG50 lần lượt là 0,52 m; 0,64 m và 0,67 m.



Hình 4.3. Biểu đồ P-S của cọc phụt vữa BPG20 theo đường kính quy đổi thử dần, trường hợp R_{inter} = 0,8



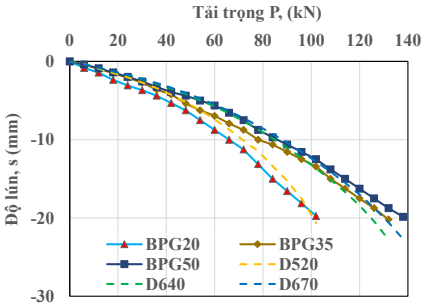
Hình 4.4. Biểu đồ P-S của cọc phụt vữa BPG35 theo đường kính quy đổi thử dần, trường hợp R_{inter} = 0,8



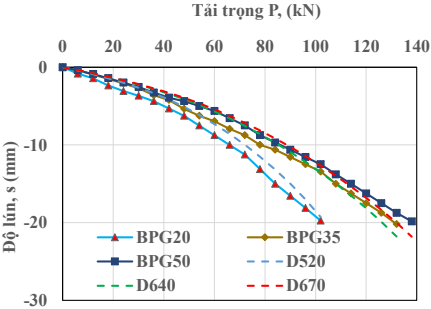
Hình 4.5. Biểu đồ P-S của cọc phụt vữa BPG50 theo đường kính quy đổi thử dần, trường hợp R_{inter} = 0,8

4.4.3 Hệ số tiếp xúc (R_{inter}) của cọc phụt vữa

Để tăng độ chính xác cho kết quả mô phỏng, tiếp theo ta thay đổi giá trị của hệ số tiếp xúc R_{inter} = [0,8 ÷ 1,0] để tìm ra giá trị R_{inter} phù hợp cho các đoạn cọc phụt vữa. Giá trị thích hợp của hệ số tiếp xúc cho các đoạn cọc phụt vửa là R_{inter} =1, tương ứng với hệ số xác định $R^2 \geq 0,96$ giữa 2 đồ thị P-S thu được từ mô phỏng và thí nghiệm (Hình 4.6 và 4.7).



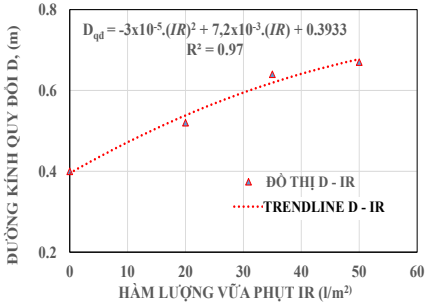
Hình 4.6. Biểu đồ P-S của cọc phụt vữa tương ứng với đường kính qui đổi đã xác định, trường hợp R_{inter} = 0,9



Hình 4.7. Biểu đồ P-S của cọc tương ứng với đường kính qui đổi đã xác định, trường hợp R_{inter} = 1,0

4.5 Thiết lập công thức xác định đường kính qui đổi cho các đoạn cọc có phụt vữa khi mô phỏng

Quan hệ giữa giá trị $D_{qđ}$ và IR được xấp xỉ bằng hàm bậc 2 thể hiện trên Hình 4.8 với hệ số xác định R^2 = 0,97.



Hình 4.8. Đồ thị quan hệ giữa $D_{qđ}$ và IR của cọc phụt vữa xác định bằng phương pháp số

Từ đó, NCS đề xuất công thức (4.6) để tính giá trị đường kính qui đổi $D_{qđ}$ dựa trên đường kính ban đầu (D_0) của cọc không phụt vữa và hàm lượng vữa (IR):

$$D_{qđ} = -3.10^{-5}.(IR)^2 + 7{,}2.10^{-3}.(IR) + D_0 \text{ (m)} \qquad (4.6)$$

Trong đó: $D_{qđ}$ (m) là đường kính qui đổi cọc phụt vữa theo hàm lượng vữa phụt, D_0 (m) là đường kính cọc khoan nhồi không phụt tương ứng, *IR* là hàm lượng vữa phụt (lít/m^2).

Giới hạn: sử dụng khi hàm lượng vữa phụt $IR \leq 50$ l/m^2; Đoạn cọc phụt vữa nằm trong nền cát mịn, trạng thái rời; Cấp phối của vữa phụt có tỷ lệ nước/xi măng là 0,66/1,0.

4.6 Kiểm chứng công thức đề xuất đường kính quy đổi của các đoạn cọc phụt vữa dọc thân cọc khi mô phỏng thí nghiệm nén tĩnh cọc

4.6.1 Nguyên tắc kiểm chứng công thức

4.6.2 Thông tin công trình kiểm chứng

Công trình Friendship Tower có cọc không phụt TP1 (*D* = 1500 mm; *L* = 80m) và cọc phụt vữa TP2 (*D* = 1200 mm; *L*= 65 m); cọc được phụt vữa từ cao trình -42,20 m đến -64,2 m (trong nền cát). Công trình Sông đà Riverside có cọc không phụt TP5 (*D* =1000 mm; *L* = 65 m) và cọc phụt vữa TP1 (*D* = 1200 mm; *L* = 68 m; được phụt vữa từ cao trình -45 m đến - 68 m (trong nền cát). Các cọc đều được thí nghiệm nén tĩnh.

4.6.3 Mô phỏng cọc không phụt vữa phục vụ hiệu chỉnh mô hình

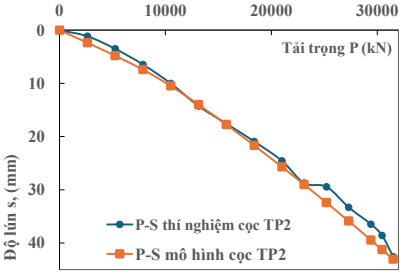
Tiến hành dùng phần mềm Plaxis 3D để mô phỏng thí nghiệm nén tĩnh cọc không phụt TP1 (Friendship Tower) và TP5 (Sông đà Riverside) nhằm xác định thông số nền đất và $R_{inter.}$

4.6.4 Sử dụng đường kính quy đổi cho đoạn cọc phụt vữa

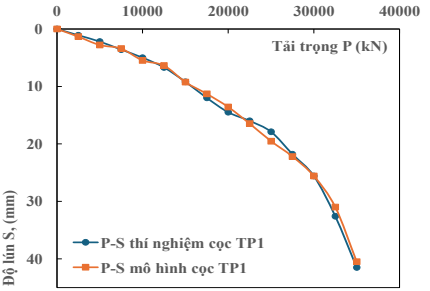
Khi thiết lập bài toán nén tĩnh cọc phụt vữa TP2 (Friendship Tower) và TP1 (Sông đà Riverside) bằng Plasic 3D, ta sử dụng thông số nền như khi mô phỏng các cọc không phụt tương ứng. Đồng thời, đường kính cọc tại đoạn cọc phụt vữa xác định theo công thức (4.6) với hệ số tiếp xúc R_{inter}= 1.

Các đường cong quan hệ tải trọng – độ lún (P-S) thu được từ thí nghiệm nén tĩnh cọc tại hiện trường và mô phỏng số của các

cọc phụt vữa TP2 (Friendship Tower) và TP1 (Sông đà Riverside) thể hiện trên Hình 4.16 và 4.17, cho thấy các đồ thị này có độ trùng khớp cao, khi hệ số xác định $R^2 \geq 0,94$.



Hình 4.16. So sánh P–S giữa mô phỏng và thí nghiệm của cọc phụt vữa TP2 tại công trình Friendship Tower.



Hình 4.17. So sánh đường cong P–S giữa mô phỏng và thí nghiệm của cọc phụt vữa TP1 tại công trình Sông Đà Riverside

4.7 Kết luận chương 4

Giải pháp sử dụng giá trị đường kính quy đổi ($D_{qđ}$) và hệ số tiếp xúc $R_{inter} = 1$ cho các đoạn cọc phụt vữa khi mô phỏng thí nghiệm nén tĩnh cọc bằng phần mềm Plaxis 3D, thu được đồ thị tải trọng – độ lún (P-S) có độ tương thích khá cao so với kết quả tương ứng thu được từ thực nghiệm.

Công thức (4.6) được NCS đề xuất để xác định giá trị đường kính quy đổi ($D_{qđ}$) của các đoạn cọc phụt vữa làm việc trong nền cát từ giá trị đường kính ban đầu (D_0) và hàm lượng vữa phụt $IR \leq 50$ l/m^2.

KẾT LUẬN – KIẾN NGHỊ

I. KẾT LUẬN

Dựa trên kết quả nghiên cứu thí nghiệm và mô phỏng số, luận án rút ra các kết luận chính sau:

1. Giá trị sức chịu tải cực hạn của cọc (Q_u) của cọc phụt vữa thân cọc không tăng tuyến tính theo hàm lượng vữa phụt (IR). Hàm lượng vữa IR = 35 l/m^2 (với tỷ lệ cấp phối nước và xi măng bằng 0,66/1,0) được xem là hàm lượng hiệu quả đối với cọc khoan nhồi làm việc trong nền cát mịn, trạng thái rời (tương tự địa chất tại khu vực thí nghiệm).
2. Tương quan giữa giá trị sức kháng thành đơn vị của cọc phụt vữa (f_{IR}) và cọc không phụt (f_0) được biểu diễn thông qua công thức:

$$f_{IR} = f_0 . e^{b.IR} \text{ Với } b = -4.10^{-5}.Z + 0{,}0135$$

Lưu ý: Khi cao trình phụt vữa sâu hơn -50 m lấy Z = -50 m;
Giới hạn: sử dụng khi hàm lượng vữa $IR \leq$ 35 l/m^2.

3. Giải pháp sử dụng hệ số tiếp xúc R_{inter} = 1 và giá trị đường kính quy đổi ($D_{qđ}$) cho các đoạn đoạn cọc phụt vữa, khi mô phỏng thí nghiệm nén tĩnh cọc bằng phần mềm Plaxis 3D cho đường cong tải trọng – độ lún khá tương đồng với thí nghiệm hiện trường. Giá trị đường kính quy đổi ($D_{qđ}$) được xác định từ biểu thức:

$$D_{qđ} = -3.10^{-5}.(IR)^2 + 7{,}2.10^{-3}.(IR) + D_0$$

Giới hạn: sử dụng khi hàm lượng vữa phụt $IR \leq$ 50 l/m^2.

II. KIẾN NGHỊ

Trên cơ sở các kết luận đã đạt được, luận án đề xuất một số kiến nghị nhằm định hướng việc áp dụng kết quả nghiên cứu vào thực tiễn và mở rộng phạm vi nghiên cứu:

1. Công thức xác định giá trị sức kháng thành đơn vị của đoạn cọc phụt vữa từ giá trị tương ứng của cọc không phụt có thể được áp dụng để dự báo sức chịu tải cực hạn của cọc khoan nhồi có phụt vữa làm việc trong nền cát mịn.

2. Giải pháp sử dụng giá trị đường kính qui đổi ($D_{qđ}$) và hệ số tiếp xúc R_{inter} = 1 cho các đoạn cọc phụt vữa làm việc trong nền cát tương tự khu vực thí nghiệm có thể được áp dụng để xây dựng đường cong tải trọng – độ lún (P-S) bằng phương pháp số.
3. Các công thức đề xuất được sử dụng cho cọc khoan nhồi làm việc trong nền tương tự với địa chất khu vực thí nghiệm và được phụt vữa với các yêu cầu kỹ thuật như trong thực nghiệm. Khi áp dụng cho các điều kiện địa chất khác, cần hiệu chỉnh hệ số và kiểm chứng qua các nghiên cứu khác.
4. Cần tiến hành thêm những nghiên cứu đối với những loại nền đất khác để hoàn chỉnh các phương pháp dự báo sức chịu tải cực hạn của cọc khoan nhồi có áp dụng giải pháp phụt vữa thân cọc bằng lý thuyết cũng như thực nghiệm.

III. HƯỚNG PHÁT TRIỂN CỦA LUẬN ÁN

Để có thể xây dựng một bộ tiêu chuẩn hoàn thiện của cọc có áp dụng giải pháp phụt vữa thân cọc, thì các nội dung có thể phát triển từ luận án này như sau:

- Nghiên cứu ảnh hưởng của cấp phối vữa và điều kiện thi công khác nhau (dung dịch khoan, thời gian phá nước,..) đến hiệu quả tăng sức chịu tải cọc sau khi phụt.
- Nghiên cứu hiệu quả của phụt vữa khi cọc làm việc trong các loại nền đất khác nhau, như đất sét, cát rời, hoặc đất lẫn sỏi.
- Nghiên cứu khả năng tăng sức chịu tải của cọc khi phụt vữa với đối với các loại cọc có tiết diện khác.
- Kết hợp mô phỏng Plaxis 3D với phân tích dữ liệu thực nghiệm mở rộng để thiết lập bộ tiêu chuẩn quốc gia về tính toán cọc khoan nhồi có phụt vữa dọc thân.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

1. Lê Thành Trung, Bạch Vũ Hoàng Lan. Phương pháp đường kính tương đương trong mô phỏng cọc khoan nhồi phụt vữa dọc thân cọc, Tạp chí Xây dựng, Bộ Xây dựng, ISSN: 2734-9888, Số 10/2025, trang 204–207.

2. Lê Thành Trung, Bạch Vũ Hoàng Lan. Nghiên cứu ảnh hưởng của công nghệ phụt vữa dọc thân cọc đến sức chịu tải của cọc khoan nhồi trong nền cát pha. Tạp chí Xây dựng, Bộ Xây dựng, ISSN: 2734 - 9888, Số 4/2025, trang 304–308.

3. Lê Thành Trung, Bạch Vũ Hoàng Lan, Nguyễn Nghĩa Hùng, Trần Hữu Bằng. Mô hình số thí nghiệm cọc khoan nhồi phụt vữa dọc thân cọc. Tạp chí Xây dựng, Bộ Xây dựng, ISSN: 2734-9888, Số 10/2021, trang 82–85.

4. Lê Thành Trung. Phân tích kết quả nén tĩnh cọc khoan nhồi trên nền địa chất Quận 3 khu vực thành phố Hồ Chí Minh. Kỷ yếu Hội thảo khoa học quốc gia ACEAT 2024: Những tiến bộ trong Xây dựng, Kiến trúc, Kinh tế và Công nghiệp năm 2024, NXB Xây dựng, ISBN: 978-604-82-8109-0, tổ chức ngày 6–7/07/2024, trang 207-216.

5. Trung Le Thanh, Lan Bach Vu Hoang. Field Study on the Effects of Shaft Grouting on the Load-Settlement Behavior of Bored Piles. Indian Geotechnical Journal, Springer Nature, ISSN: 0971-9555, Vol 56 (2), pages 1590-1604.
https://doi.org/10.1007/s40098-025-01266-8,

6. Trung Le Thanh, Lan Bach Vu Hoang, Hai Nguyen Minh. Bearing-Capacity Assessment Shaft Grouting of Barrette Pile by Conventionally Static Loading Test. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2024. In: Lecture Notes in Civil Engineering, ISSN: 2366 – 2557, vol. 395, pages 291 – 305, (Proceedings of the 5th International Conference on Geotechics for Substainable Infractructure Development Hanoi 2023,
https://doi.org/10.1007/978-981-99-9722-0_19 ,

7. Le Thanh Trung, Nguyen Duc Manh. Static loading tests on PHC piles installed in grouted boreholes. Transport and Communication Science Journal, ISSN: 1859-2724, Vol 72, issue 1 (01/2021), pages 53–64.