

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ XÂY DỰNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC XÂY DỰNG MIỀN TÂY

NGUYỄN NHỰT TÂN

**NGHIÊN CỨU SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA KHOẢNG CÁCH
VÀ TIẾT DIỆN CỌC ĐẾN HỆ SỐ NHÓM CỌC
TẠI KHU VỰC ĐỊA CHẤT THÀNH PHỐ VĨNH LONG**

**TÓM TẮT ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ
KỸ THUẬT XÂY DỰNG**

Vĩnh Long – 2025

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ XÂY DỰNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC XÂY DỰNG MIỀN TÂY

NGUYỄN NHỰT TÂN



**NGHIÊN CỨU SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA KHOẢNG CÁCH
VÀ TIẾT DIỆN CỌC ĐẾN HỆ SỐ NHÓM CỌC
TẠI KHU VỰC ĐỊA CHẤT THÀNH PHỐ VĨNH LONG**

Ngành: KỸ THUẬT XÂY DỰNG

Mã số: 8.58.02.01

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

TS. LÂM NGỌC QUÍ



Vĩnh Long – 2025

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

1. Lâm Ngọc Quý, Phạm Thị Mỹ Hạnh và Nguyễn Nhựt Tân, "Evaluation of the pile group effect on the bearing capacity of precast reinforced concrete piles in soft soil "
Tạp Chí của Bộ Xây Dựng, Tr. 125-129, 02/2025.

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Trong xây dựng, móng cọc là giải pháp nền móng phổ biến, đặc biệt tại các khu vực địa chất yếu như thành phố Vĩnh Long, nơi nền đất có sức kháng yếu và dễ biến dạng. Móng cọc không chỉ đảm bảo khả năng chịu tải lớn mà còn đáp ứng yêu cầu ổn định cho các công trình dân dụng và công nghiệp.

Các nghiên cứu trên về hệ số nhóm cọc chủ yếu tập trung vào phương pháp lý thuyết hoặc mô phỏng và chỉ xét đến một số yếu tố ảnh hưởng như khoảng cách và số lượng cọc trong nhóm, nhưng hiện nay chưa có nhiều nghiên cứu chi tiết về sự ảnh hưởng của kích thước cọc và phương pháp thực nghiệm tại khu vực địa chất yếu tại thành phố Vĩnh Long. Việc hiểu rõ hơn về sự ảnh hưởng của khoảng cách và kích thước cọc đến hệ số nhóm sẽ góp phần cải thiện độ chính xác trong thiết kế. Do đó, đề tài: ***“Nghiên cứu sự ảnh hưởng của khoảng cách và tiết diện cọc đến hệ số nhóm cọc tại khu vực địa chất thành phố Vĩnh Long”*** nhằm đóng góp cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc thiết kế móng cọc tại khu vực địa chất yếu. Kết quả nghiên cứu sẽ hỗ trợ tối ưu hóa việc lựa chọn khoảng cách và kích thước cọc phù hợp, đảm bảo tính an toàn, hiệu quả kinh tế.

2. Mục tiêu nghiên cứu

- Xác định hệ số nhóm cọc bằng lý thuyết và phần mềm Plaxis 3D V20.
- Xác định sức chịu tải của cọc đơn và nhóm cọc thông qua kết quả thử tĩnh cọc hiện trường.
- Nghiên cứu hiệu ứng trong nhóm cọc thông qua đại lượng là: hệ số nhóm, có xét đến các thông số ảnh hưởng như: khoảng cách cọc; tiết diện cọc và số lượng cọc trong nhóm.
- Đề xuất phương pháp xác định hệ số nhóm cọc trong việc thiết kế nền móng trên nền đất yếu tại tỉnh Vĩnh Long đảm bảo khả năng chịu lực và tránh gây lãng phí.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- *Đối tượng nghiên cứu:* Hiệu ứng nhóm cọc giữa các cọc trong móng cọc đài đơn, chịu tải dọc trục.
- *Phạm vi nghiên cứu:* Cọc vuông BTCT tiết diện nhỏ cạnh 150 mm và 200 mm, $L = 6$ m, thẳng đứng, số lượng cọc trong nhóm nhỏ hơn hoặc bằng 6 cọc ($n \leq 6$ cọc), khoảng cách tim cọc $S = (2 \div 7)d$ (d : đường kính cọc); làm việc trong khu vực địa chất thành phố Vĩnh Long; bỏ qua hiện tượng ma sát âm và phương pháp hạ cọc.

4. Phương pháp nghiên cứu

- *Phương pháp kế thừa, tổng hợp số liệu:*
- *Phương pháp thực nghiệm:*
- *Phương pháp toán học:*
- *Phương pháp phân tích tổng kết:*

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

- *Ý nghĩa khoa học:* Kết quả nghiên cứu của đề tài nhằm làm rõ hiệu ứng nhóm cọc ảnh hưởng đến sức chịu tải của nhóm cọc treo bởi các yếu tố số lượng, khoảng cách và tiết diện cọc.

- *Ý nghĩa thực tiễn*: Đề xuất được phương pháp xác định hệ số nhóm hợp lý trong việc thiết kế móng cọc khu vực địa chất thành phố Vĩnh Long.

6. Kết cấu đề án

Ngoài phần mở đầu, phần kết luận, kiến nghị và phần phụ lục. đề án được trình bày gồm 3 chương, nội dung cụ thể từng chương như sau:

Chương 1: Nghiên cứu tổng quan về sự làm việc của móng cọc.

Chương 2: Cơ sở lý thuyết tính toán hệ số nhóm cọc bằng giải tích và phần mềm Plaxis 3D.

Chương 3: Phân tích sự ảnh hưởng của khoảng cách và tiết diện cọc đến hệ số nhóm cọc bằng phương pháp giải tích và phần mềm Plaxis 3D.

Phần kết luận, kiến nghị:

Phần phụ lục:

Chương 1

NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ SỰ LÀM VIỆC CỦA MÓNG CỌC

1.1 Tổng quan về móng cọc

1.1.1 Định nghĩa

1.1.2 Cấu tạo của móng cọc

1.2 Khái quát về hiệu ứng nhóm

Mức độ giảm sức chịu tải của nhóm cọc so với cọc đơn là do sự tương tác giữa các cọc trong nhóm và giữa nhóm cọc với đất nền xung quanh. Để xét đến ảnh hưởng của hiệu ứng nhóm cọc chịu tải trọng dọc trục, người ta thường xét thông số hệ số nhóm cọc (η): Kể đến sự giảm sức chịu tải của nhóm cọc so với tổng sức chịu tải của từng cọc đơn làm việc riêng lẻ:

$$\eta = \frac{(Q_G)_{ult}}{nQ_{ult}} \quad (1.1)$$

Với: $(Q_G)_{ult}$: Sức chịu tải giới hạn của nhóm cọc;

Q_{ult} : Sức chịu tải giới hạn của cọc đơn;

n : Tổng số cọc trong nhóm.

1.3 Tổng quan các nghiên cứu về hệ số nhóm cọc trong và ngoài nước

1.3.1 Tổng quan các nghiên cứu về hệ số nhóm cọc ngoài nước.

1.3.2 Tổng quan các nghiên cứu về hệ số nhóm cọc trong nước

1.4 Nhận xét chương 1

Việc nghiên cứu tổng quan về sự làm việc của móng cọc cho thấy:

Sức chịu tải của móng cọc được xác định dựa trên sức chịu tải của cọc đơn có xét đến ảnh hưởng của hệ số nhóm cọc. Giá trị hệ số nhóm cọc bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như: số lượng cọc trong nhóm, khoảng cách giữa các cọc, chiều dài cọc, hình dạng cọc, địa chất xây dựng và phương pháp hạ cọc, ... tuy nhiên, các nghiên cứu lý thuyết hiện nay chỉ phản ánh sự ảnh hưởng của một số yếu tố về tiết diện và khoảng cách cọc.

Vì vậy, tác giả nhận thấy cần có nhiều nghiên cứu về hệ số nhóm cọc cho các địa chất cụ thể, ứng dụng thực tiễn vào các công trình xây dựng dân dụng vừa và nhỏ tại khu vực thành phố Vĩnh Long, với các nhiệm vụ được đặt ra như sau:

- Phân tích hiệu ứng nhóm cọc thông qua hệ số nhóm bằng giải tích với địa chất đặc trưng tại khu vực thông qua các thông số: Khoảng cách cọc, số lượng cọc, và chiều dài cọc.

- Phân tích hệ số nhóm cọc bằng phần mềm Plaxis 3D, từ đó đưa ra nhận xét đánh giá giữa hai phương pháp.

- Đánh giá độ tin cậy của phương pháp tính toán hệ số nhóm cọc dựa trên kết quả nén tĩnh cọc đơn.

- Đề xuất phương pháp tính toán hệ số nhóm cho nhóm cọc đài thấp làm việc trong điều kiện địa chất tại thành phố Vĩnh Long.

Chương 2

CƠ SỞ LÝ THUYẾT TÍNH TOÁN HỆ SỐ NHÓM CỌC BẰNG GIẢI TÍCH VÀ PHẦN MỀM PLAXIS 3D

2.1 Cơ sở tính toán hệ số nhóm cọc bằng giải tích

2.1.1 Công thức của Converse – Labarre (1941) [1]

2.1.2 Hệ số nhóm theo nguyên tắc của Feld (1943) [1]

2.1.3 Hệ số nhóm theo công thức của Das (1998) [2]

2.1.4 Công thức xác định hệ số nhóm của Seiler và Keeney (1944) [30]

2.2 Xác định hệ số nhóm trong các tiêu chuẩn Việt Nam

2.2.1 Tiêu chuẩn TCXD 205:1998

2.2.2 Tiêu chuẩn 10304: 2014

2.2.3 Tiêu chuẩn 22 TCN 272:05

2.3 Tổng quan về phần mềm Plaxis 3D V20 [31]

2.3.1 Giới thiệu

2.3.2 Lịch sử phát triển

2.3.3 Các mô hình vật liệu trong Plaxis 3D

2.3.3.1 Mô hình đàn hồi tuyến tính (*Le-Linear Elastic Model*)

Theo [31] Mô hình này dựa trên định luật Hooke đàn hồi đẳng hướng, Thông số chính trong mô hình này gồm module Young E và hệ số poisson ν . Mô hình này không phù hợp cho vật liệu đất nhưng có thể dùng để mô hình hóa các vật liệu như bê tông, đá nguyên khối.

Các thông số chính trong mô hình đàn hồi tuyến tính.

E : Mô đun đàn hồi Young (kN/m^2)

ν : Hệ số poisson

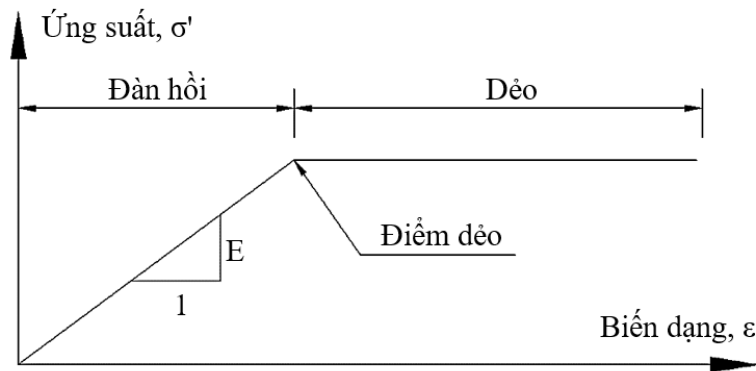
γ_{unsat} : Dung trọng tự nhiên (kN/m^3)

γ_{sat} : Dung trọng bão hòa (kN/m^3)

2.3.3.2 Mô hình Mohr-Coulomb

Theo [31] Mô hình Mohr-Coulomb là một mô hình đàn hồi và dẻo hoàn toàn. Tức là xem đất chỉ làm việc trong giai đoạn đàn hồi với quan hệ giữa ứng suất và biến dạng là tuyến tính, quan hệ này tuân theo định luật Hooke. Khi trạng thái đất vượt qua giai

đoạn làm việc đàn hồi này thì xem như đất bị phá hoại hoàn toàn, tức là biến dạng phát triển lớn đến vô cùng trong khi ứng suất không tăng.



Hình 2.2 Quan hệ ứng suất biến dạng trong mô hình đàn – dẻo

Các thông số đầu vào của mô hình Mohr-Coulomb bao gồm

E : Mô đun đàn hồi của vật liệu (kN/m^2)

ν : Hệ số poisson

φ : Góc ma sát trong (độ)

c : Cường độ kháng cắt (kN/m^2)

ψ : Góc dẫn nở của vật liệu (độ)

2.4 Phương pháp xác định sức chịu tải của cọc đơn

2.4.1 Tổng quát về sức chịu tải của cọc

Trong giai đoạn thiết kế, căn cứ vào cường độ vật liệu làm cọc và số liệu địa chất được cung cấp, cần tính toán và dự báo đầy đủ các loại sức chịu tải sau đây:

- Sức chịu tải theo cường độ vật liệu làm cọc - R_v
- Sức chịu tải theo đất nền, bao gồm:
 - + Theo kết quả thí nghiệm trong phòng:
 - Theo chỉ tiêu cơ lý của đất nền - R_{c1}
 - Theo chỉ tiêu cường độ của đất nền - R_{c2}
 - + Theo kết quả thí nghiệm hiện trường:
 - Theo kết quả thí nghiệm xuyên tĩnh - R_{c3}
 - Theo kết quả thí nghiệm xuyên tiêu chuẩn - R_{c4}

2.4.2 Xác định sức chịu tải cọc theo cường độ vật liệu làm cọc

2.4.3 Xác định sức chịu tải theo chỉ tiêu cơ lý đất nền

2.4.4 Sức chịu tải của cọc theo chỉ tiêu cường độ của đất nền

2.4.4.1 Tính thành phần sức kháng dưới mũi cọc (theo phương pháp Terzaghi)

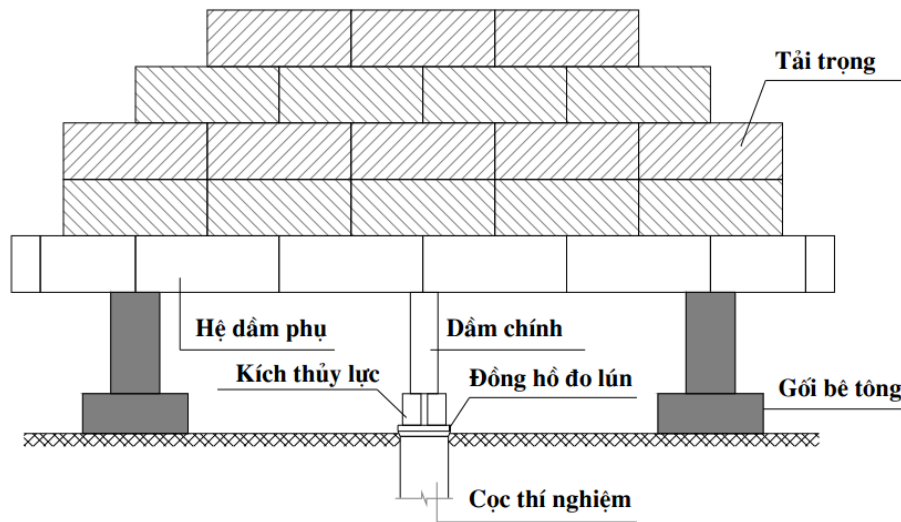
2.4.4.2 Tính thành phần ma sát giữa cọc và đất

2.4.5 Sức chịu tải của cọc theo thí nghiệm xuyên tiêu chuẩn (SPT)

2.4.6 Sức chịu tải của cọc theo kết quả thí nghiệm nén tĩnh hiện trường [32]

2.4.6.1 Thí nghiệm nén tĩnh:

Áp dụng tải trọng nén dần lên đầu cọc và đo độ lún của cọc. Sức chịu tải cọc được xác định dựa trên tiêu chí độ lún giới hạn hoặc dựa trên đường cong tải trọng - độ lún.



Hình 2.3 Sơ đồ bố trí thiết bị thí nghiệm nén tĩnh của cọc

2.4.6.2 Xác định sức chịu tải giới hạn theo chuyển vị giới hạn quy ước

Trên đường cong quan hệ tải trọng - chuyển vị, sức chịu tải giới hạn P_{gh} là tải trọng quy ước ứng với chuyển vị giới hạn quy ước, S_{gh} . Giới thiệu một số giá trị P_{gh} và S_{gh} theo đề nghị của các tác giả khác nhau.

2.4.6.3 Xác định sức chịu tải giới hạn theo phương pháp đồ thị

2.5 Nhận xét chương 2

Qua việc phân tích các thông số trong các công thức lý thuyết xác định hệ số nhóm cọc, cho thấy:

- Các công thức còn bộc lộ một số nhược điểm trong việc xác định hệ số nhóm, khi chỉ chú trọng đến các yếu tố hình học của cọc, mặt bằng bố trí cọc mà chưa xét đến các yếu tố ảnh hưởng đến hệ số nhóm khác như: chiều dài cọc, phương pháp hạ cọc, tính chất cơ lý của nền đất, ...

- Công thức của Sayed và Bakeer (1992) có xét đến ảnh hưởng của thành phần ma sát giữa cọc và đất, hệ số tương tác nhóm K, tuy nhiên trong công thức này tác giả không đề cập hướng dẫn xác định K gây khó khăn, và thiếu chính xác trong việc tính toán hệ số nhóm.

Tác giả lựa chọn TCVN 10304:2014 để tính sức chịu tải cọc và sử dụng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn mà cụ thể ở đây là phần mềm Plaxis 3D v20 để mô phỏng bài toán trong việc xác định hệ số nhóm cọc kết hợp với kết quả nén tĩnh nhằm tìm ra phương pháp xác định hệ số nhóm cọc đảm bảo an toàn và kinh tế nhất.

Chương 3

PHÂN TÍCH SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA KHOẢNG CÁCH VÀ TIẾT DIỆN CỌC ĐẾN HỆ SỐ NHÓM BẰNG PHƯƠNG PHÁP GIẢI TÍCH VÀ PHẦN MỀM PLAXIS 3D

3.1 Mô tả và phân chia các mô hình tính toán

3.1.1 Phân chia mô hình tính toán

Theo như đối tượng nghiên cứu đã được trình bày ở phần mở đầu.

Tính toán hệ số nhóm cọc bằng giải tích trên các mô hình tổ hợp cọc như sau: 2x1, 2x2, 2x3 cọc; với các khoảng cách từ tim cọc đến tim cọc 2d, 3d, 4d, 5d, 6d, 7d.

3.1.2 Thông số cọc và đài móng

Nghiên cứu tập trung vào cọc BTCT tiết diện nhỏ, đài đơn chiều sâu đáy đài +0,3m so với mặt đất tự nhiên

Bảng 3.2 Thông số cọc

Thông số cọc	Ký hiệu	Đơn vị	Cọc số 1	Cọc số 2
Kích thước tiết diện	d	m	0,15	0,2
Chiều dài	L	m	6	6
Diện tích mặt cắt	A _b	M ²	0,0225	0,04
Chu vi mặt cắt ngang	u	m	0,6	0,8

3.2 Giới thiệu về địa chất nghiên cứu

3.2.1 Vị trí địa lý

Vị trí khảo sát tọa lạc tại khóm 5, phường 2, Thành phố Vĩnh Long, tỉnh Vĩnh Long

3.2.2 Điều kiện địa hình

3.2.3 Số liệu địa chất

Căn cứ kết quả khoan địa chất và thí nghiệm trong phòng các mẫu đất lấy ở các hố khoan trên từ mặt đất đến độ sâu 45m gặp các lớp đất sau:

Mực nước ngầm -0,5m so với cao độ mặt đất tự nhiên.

Bảng 3.3 Bảng thống kê chỉ tiêu cơ lý của các lớp đất [33]

Chỉ tiêu cơ lý	Ký hiệu	Đơn vị	Các lớp đất		
			1	2	3
Chiều dày	L	m	24	14	7
Độ ẩm tự nhiên	W	%	54,4	41,9	33,2
Tỷ trọng	γ_s		2,64	2,73	2,72
Dung trọng	γ_{unsat}	kN/m ³	16,6	17,4	18,2
	γ_d		10,7	12,3	13,6
	γ_{sat}		16,64	17,79	18,6
Chỉ số dẻo	I _p	%	19,5	18	25,3
Độ sệt	I _L		1,27	0,81	0,36
Góc ma sát trong	ϕ	°(độ)	4°50'	6°38'	15°48'
Lực dính kết	c	kN/m ²	5,2	7,2	28,9
Module biến dạng	E ₁₀₀₋₂₀₀	kPa	2560	2900	4740

3.2.4 Giới thiệu về công trình thực tế nghiên cứu

3.3 Sức chịu tải thiết kế cọc đơn (Cọc số 1) theo lý thuyết

- Xác định theo “mục 7.1.6 - TCVN 10304:2014”. Tức khi tính toán cọc, móng cọc và nền móng phải dùng các đặc trưng tính toán của vật liệu và của đất nền.

3.3.1.1 Sức chịu tải của cọc theo vật liệu

$$R_{v,l} = 0,918 \times (221,86 \times 1,45 + 3,14 \times 26) = 370,26 \text{ (kN)}$$

3.3.1.2 Sức chịu tải theo chỉ tiêu cơ lý của đất nền

$$R_{c,u}^{cl} = \gamma_c \times (\gamma_{cq} \times q_b \times A_p + u \times \sum \gamma_{cf} \times f_i \times l_i) = 1 \times (1 \times 817,5 \times 0,0225 + 0,6 \times 23,945) = 32,76 \text{ (kN)}$$

3.3.1.3 Sức chịu tải của cọc theo chỉ tiêu cường độ của đất nền

$$R_{c,u} = Q_p + Q_s = 2,75 + 21,18 = 23,93 \text{ (kN)}$$

3.3.1.4 Sức chịu tải của cọc theo thí nghiệm xuyên tiêu chuẩn (SPT)

3.3.1.5 Chọn giá trị sức chịu tải của cọc

- Sức chịu tải của đất nền:

$$R_{c,k} = R_{c,u_{\min}} = \min(R_{c,u}^{cl}; R_{c,u}) = \min(32,76; 23,93) \\ = 23,93 \text{ (kN)}$$

- Cường độ tính toán của cọc theo đất nền: “Mục 7.1.11-TCVN 10304:2104”.

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_k} = \frac{23,93}{1,65} = 14,5 \text{ (kN)}$$

3.3.2 Sức chịu tải theo kết quả nén tĩnh cọc hiện trường

- Cọc được thi công bằng phương pháp ép cọc trực.
- Chuyển vị lớn nhất dự kiến đối với cọc: 10% cạnh cọc tương đương 15mm.
- Thời gian bắt đầu thực nghiệm thí nghiệm: sau khi ép cọc được 07 ngày trở lên.
- Sức chịu tải cho phép của cọc theo thiết kế: $P_{tk} = 17,5 \text{ kN}$
- Kết quả số liệu quan trắc trong quá trình thí nghiệm như sau:
- Khi gia tải đến 200% tải trọng thiết kế (35kN), độ lún của cọc đạt **9,4mm**

BẢNG TỔNG HỢP KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM THỬ TẢI TĨNH CỌC

KÝ HIỆU CỌC	TRỤC	XÁC ĐỊNH THEO CÁC PHƯƠNG PHÁP KHÁC NHAU						PHÂN TÍCH VÀ KHUYẾN CÁO CỦA ĐƠN VỊ THỬ TÍNH		
		THEO PHỤ LỤC E.1 CỦA TCVN 9393-2012			THEO PHỤ LỤC E.3 CỦA TCVN 9393-2012					
		Chuyển vị giới hạn 10% D (mm)	Điều kiện áp dụng	Chuyển vị thực tế của cọc (mm)	P_{10} (kN)	Hệ số an toàn F_s	P_u (kN)	Khuyến cáo hệ số an toàn F_s theo TCVN 9393-2012	Tải trọng cho phép P_k (kN)	Chiều dài cọc ép kiến nghị (m)
Cọc trục 2-B	15	Các loại cọc	9,40	35	2	17,5	2	17,5	6,00	
Cọc trục 8-D	15	Các loại cọc	9,52	35	2	17,5	2	17,5	6,00	

**CÔNG TY CỔ PHẦN TƯ VẤN THIẾT KẾ XÂY DỰNG SỐ 1
BẠC LIÊU**

TRƯỞNG PHÒNG

XD
LAS 394

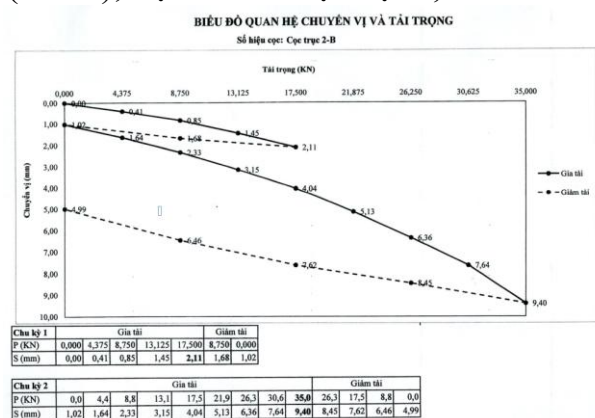
DƯƠNG MINH LINH

CHẤM ĐÓC

CÔNG TY CỔ PHẦN TƯ VẤN THIẾT KẾ XÂY DỰNG SỐ 1 BẠC LIÊU

NGUYỄN THỊ KIM ANH

Hình 3.2 Tổng hợp kết quả thí nghiệm thử tải tĩnh cọc



Hình 3.3 Biểu đồ quan hệ chuyển vị và tải trọng của thí nghiệm thử tải tĩnh cọc

3.3.3 Tính toán sức chịu tải cọc số 1 theo Plaxis 3D V20

3.3.3.1 Thông số đầu vào

Trong nghiên cứu và mô phỏng ứng xử nền móng cọc tại khu vực thành phố Vĩnh Long bằng phần mềm Plaxis, mô hình Mohr-Coulomb được lựa chọn làm mô hình đất nền do tính đơn giản, hiệu quả và phù hợp với điều kiện địa chất địa phương. Khu vực Vĩnh Long đặc trưng bởi các lớp đất yếu như sét mềm, bùn sét, có tính chất cơ lý biến thiên theo chiều sâu và thường gặp trong các bài toán xử lý nền móng. Mô hình Mohr-Coulomb, với 5 thông số cơ bản để xác định từ kết quả khảo sát địa chất (bao gồm mô đun đàn hồi E , hệ số Poisson ν , góc ma sát trong φ , lực dính c và góc giãn nở ψ), cho phép mô phỏng được hành vi chịu tải cơ bản của đất nền dưới tác dụng của móng cọc. Ngoài ra, do đặc điểm địa chất tại Vĩnh Long không yêu cầu mô hình phi tuyến quá phức tạp trong giai đoạn tính toán sơ bộ, mô hình Mohr-Coulomb là lựa chọn hợp lý để đánh giá tổng quan sức chịu tải và biến dạng của nền đất. Hơn nữa, việc sử dụng mô hình này giúp rút ngắn thời gian tính toán và dễ kiểm tra kết quả, hỗ trợ tốt cho việc so sánh, lựa chọn phương án thiết kế cọc phù hợp với điều kiện thực tế tại địa phương.

Bảng 3.7 Thông số đầu vào của nền đất

Chỉ tiêu cơ lý	Ký hiệu	Đơn vị	Các lớp đất		
			1	2	3
Mô hình	Model	-	M-C	M-C	M-C
Ứng xử của đất	Type	-	Undrained A	Undrained A	Undrained A
Chiều dày	L	m	24	14	7
Dung trọng	γ_{sat}	kN/m ³	16,64	17,79	18,6
	γ_{unsat}		16,6	17,4	18,2
Góc ma sát trong	φ	°(độ)	4°50'	6°38'	15°48'
			4,833	6,633	15,8
Lực dính kết	c	kN/m ²	5,2	7,2	28,9
Module biến dạng	$E_{100-200}$	kPa	2560	2900	4740
Hệ số poisson	ν	-	0,3	0,3	0,3
Hệ số giảm ứng suất tiếp xúc	R_{inter}	-	1	1	1

Bảng 3.8 Thông số đầu vào của cọc và đài

Chỉ tiêu cơ lý	Ký hiệu	Đơn vị	Cọc BTCT	Đài
Mô hình	Model	-	Linear-elastic	Isotropic
Loại mô hình	Type	-	Non-porous	Plate
Chiều dày	L	m	-	0,02
Trọng lượng riêng	γ	kN/m ³	25	25
Hình dạng	-	-	Vuông	Vuông
Module biến dạng	$E_{100-200}$	kPa	2,7E7	

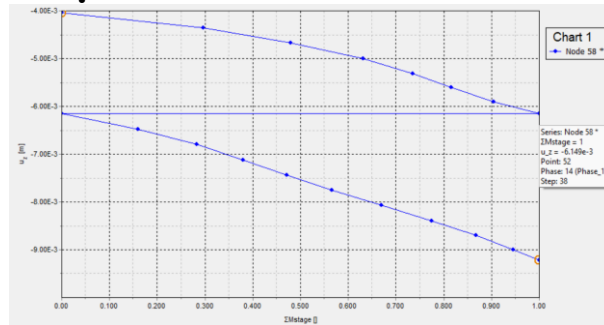
Chỉ tiêu cơ lý	Ký hiệu	Đơn vị	Cọc BTCT	Đài
Hệ số poisson	ν	-	0,2	
Hệ số giảm ứng suất tiếp xúc	R_{inter}	-	1	

3.3.3.2 Các bước thực hiện tính toán bằng Plaxis

3.3.3.3 Mô hình cọc đơn và đài

3.3.3.4 Tạo Phase tính toán

3.3.3.5 Kết quả tính toán cọc đơn



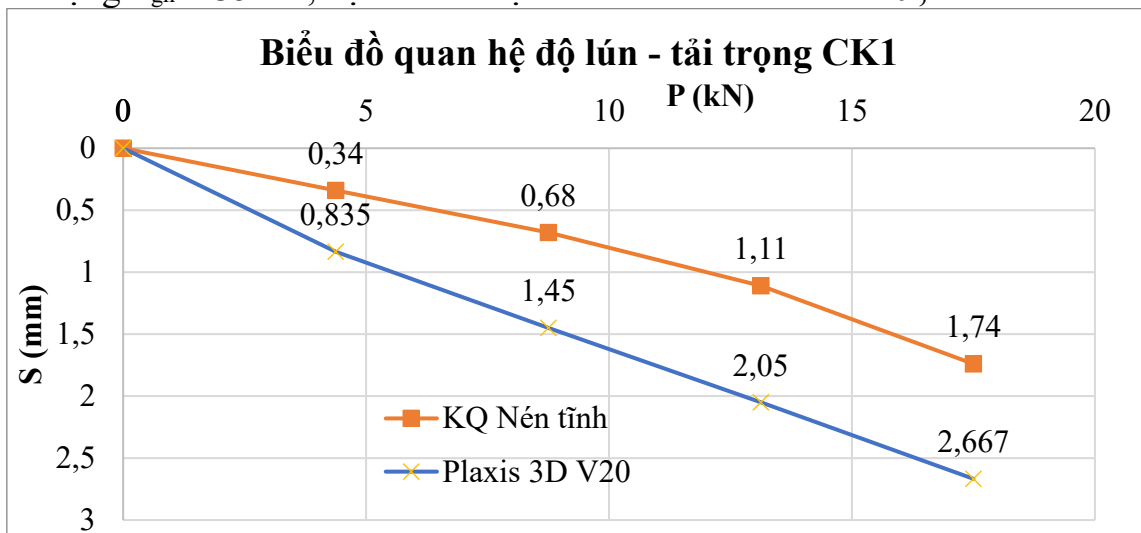
Hình 3.6 Biểu đồ nén tĩnh gia tải từng cấp cọc đơn bằng Plaxis

Xác định sức chịu tải giới hạn theo [35] biểu đồ gia tải từng cấp như sau:

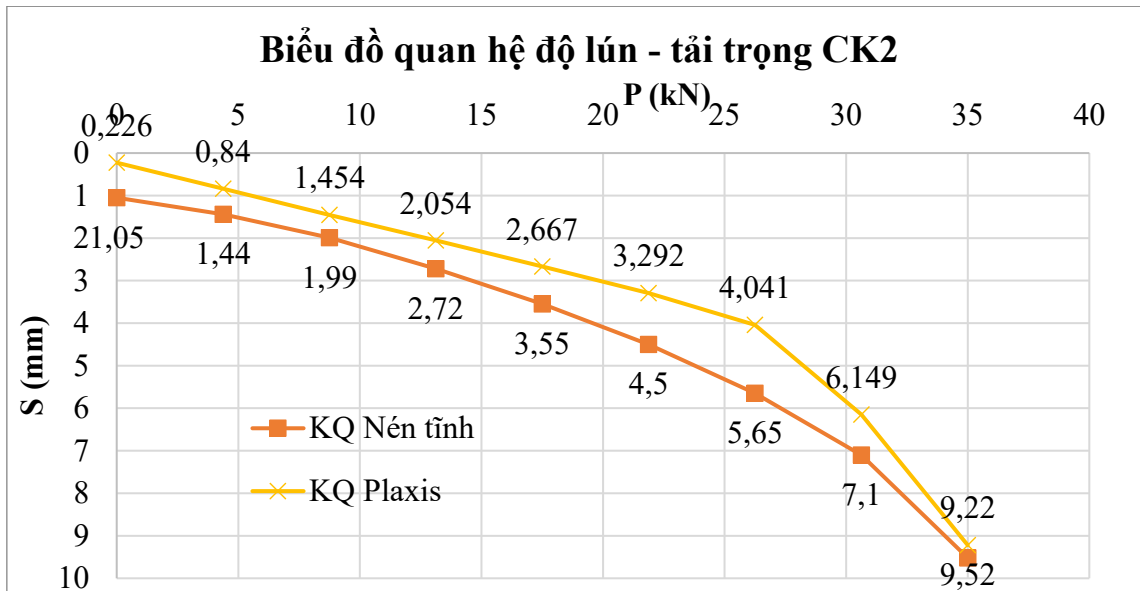
$$P_{gh} = P_{175\%}^{tk} + \sum mstage (P_{200\%}^{tk} - P_{175\%}^{tk})$$

$$= 30,625 + 1 \times (35 - 30,625) = 35 \text{ kN}$$

Tại tải trọng $P_{gh} = 35 \text{ kN}$, độ lún của cọc đơn số 1 theo Plaxis là **9,22 mm**



Hình 3.7 Biểu đồ quan hệ độ lún và tải trọng giữa kết quả nén tĩnh và Plaxis



Hình 3.8 Biểu đồ quan hệ độ lún và tải trọng giữa kết quả nén tĩnh và Plaxis

3.3.4 Tổng hợp kết quả tính sức chịu tải giới hạn cọc đơn (Cọc số 1)

Bảng 3.9 Tổng hợp sức chịu tải giới hạn của cọc đơn theo các phương pháp

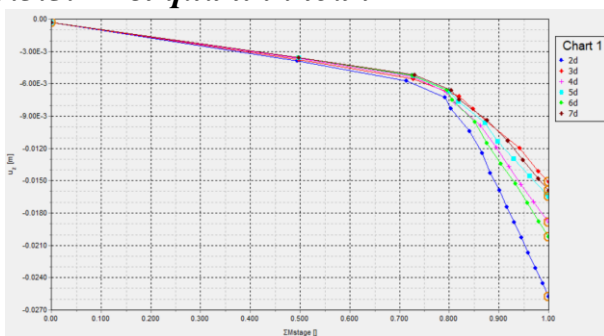
Cọc số 1 15x15, L = 6m	Phương pháp tính	Giải tích	Kết quả nén tĩnh	Plaxis 3D
	SCT giới hạn (kN)	23,93	35	35

Kết quả tính toán bằng Plaxis được thực hiện bằng phương pháp kiểm tra sức chịu tải theo TCVN 9393:2012. Kết quả trên cho thấy được việc tính toán sức chịu tải của cọc thông qua việc mô phỏng bằng phần mềm Plaxis 3D có kết quả bằng với kết quả thí nghiệm nén tĩnh hiện trường. Nên việc tính toán bằng Plaxis cho kết quả có độ tin cậy cao, vì vậy tác giả dùng phần mềm Plaxis để tiến hành tính toán các trường hợp còn lại.

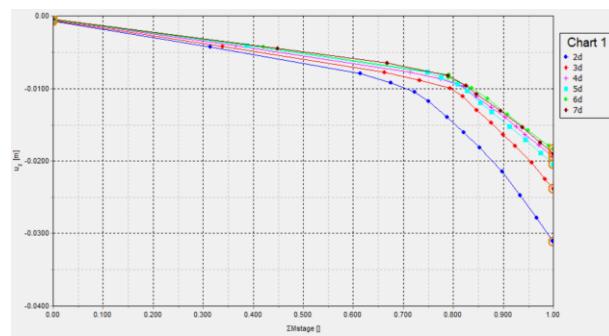
Kết quả giải tích có sự chênh lệch nhiều là do trong các công thức tính toán sử dụng nhiều bảng tra và các biểu đồ dẫn đến việc sai số trong các kết quả tính toán. Đối với bài toán cọc và móng cọc, phần mềm Plaxis 3D thể hiện ứng của đất tốt hơn.

3.3.5 Tính toán trường hợp nhóm cọc (Cọc số 1)

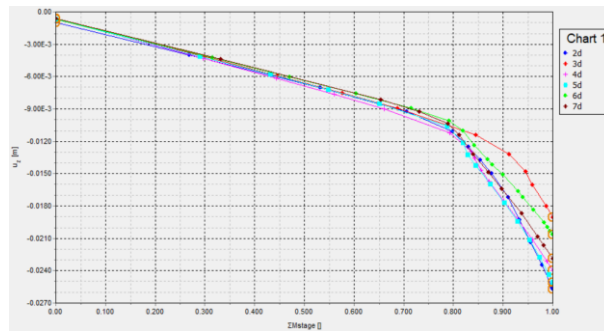
3.3.5.1 Kết quả tính toán



Hình 3.9 Biểu đồ quan hệ độ lún và tải trọng TH 2x1 cọc số 1



Hình 3.10 Biểu đồ quan hệ độ lún và tải trọng TH 2x2 cọc số 1



Hình 3.11 Biểu đồ quan hệ độ lún và tải trọng TH 2x3 cọc số 1

3.3.5.2 Tổng hợp kết quả tính toán cọc số 1 theo Plaxis

Bảng 3.10 Kết quả tính toán hệ số nhóm cọc (cọc số 1) theo Plaxis

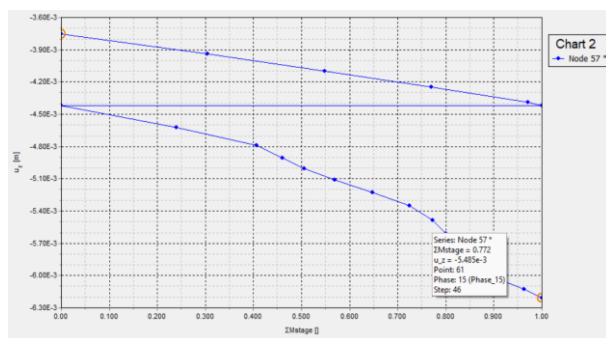
Trường hợp tính toán	Tổ hợp cọc	Khoảng cách tim cọc (mm) Cọc số 1	Sức chịu tải giới hạn $P_{gh} = \sum M_{stage} \times P_{gt}$	Hệ số nhóm cọc $\eta = \frac{Q_{G,ult}}{n \times Q_{ult}}$
TH1-1	2x1	2d=300	49,98	0,714
TH1-2		3d =450	50,96	0,728
TH1-3		4d = 600	50,89	0,727
TH1-4		5d = 750	50,96	0,728
TH1-5		6d = 900	50,82	0,726
TH1-6		7d=1050	51,03	0,729
TH2-1	2x2	2d=300	85,96	0,614
TH2-2		3d =450	92,68	0,662
TH2-3		4d = 600	99,96	0,714
TH2-4		5d = 750	104,58	0,747
TH2-5		6d = 900	110,88	0,792
TH2-6		7d=1050	110,60	0,790
TH3-1	2x3	2d=300	125,84	0,599
TH3-2		3d =450	155,31	0,740
TH3-3		4d = 600	166,53	0,793
TH3-4		5d = 750	165,27	0,787
TH3-5		6d = 900	166,32	0,792
TH3-6		7d=1050	165,69	0,789

Kết quả tính toán hệ số nhóm được tổng hợp, trình bày như Bảng 3.10 cho thấy:

- Trường hợp 2 cọc (2x1): HSN gần như không thay đổi khi tăng khoảng cách cọc. Giá trị HSN nhỏ nhất khi khoảng cách cọc 2d và lớn nhất 7d chênh lệch nhau không quá 2%

- Đối với hai tổ hợp cọc còn lại, HSN cọc tăng dần theo khoảng cách từ (4d ÷ 6d).

3.3.6 Xác định sức chịu tải giới hạn cọc đơn (Cọc số 2)



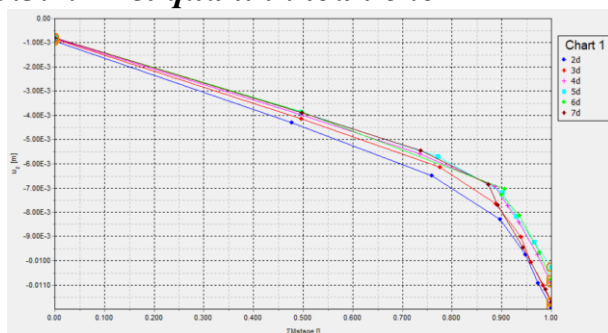
Hình 3.12 Biểu đồ quan hệ độ lún và tải trọng cọc đơn bằng Plaxis
Xác định sức chịu tải giới hạn theo [35] biểu đồ gia tải từng cấp như sau:

$$P_{gh} = P_{175\%}^{tk} + \sum mstage (P_{200\%}^{tk} - P_{175\%}^{tk})$$

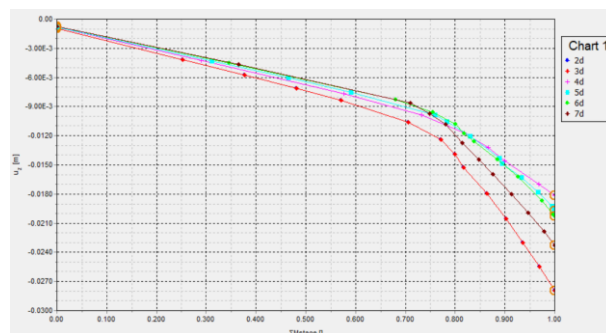
$$= 35 + 0,772 \times (40 - 35) = 38,86 \text{ kN}$$

3.3.7 Tính toán hệ số nhóm cho trường hợp nhóm cọc (Cọc số 2) bằng Plaxis

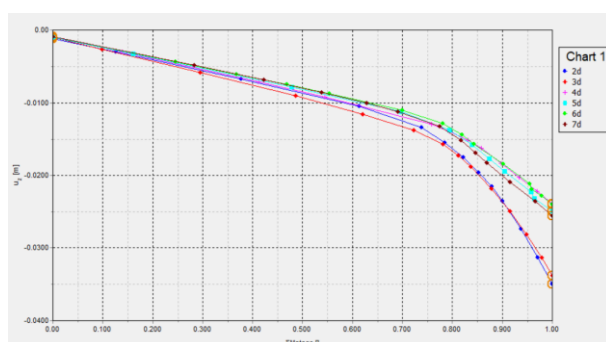
3.3.7.1 Kết quả tính toán cho



Hình 3.13 Biểu đồ quan hệ độ lún và tải trọng TH 2x1 cọc số 2



Hình 3.14 Biểu đồ quan hệ độ lún và tải trọng TH 2x2 cọc số 2



Hình 3.15 Biểu đồ quan hệ độ lún và tải trọng TH 2x3 cọc số 2

3.3.7.2 Tổng hợp kết quả tính toán cọc số 2 theo Plaxis

Bảng 3.11 Kết quả tính toán hệ số nhóm cọc (cọc số 2) theo Plaxis

Trường hợp tính toán	Tổ hợp cọc	Khoảng cách tim cọc (mm) Cọc số 1	Sức chịu tải giới hạn $P_{gh} = \sum Mstage \times P_{gt}$	Hệ số nhóm cọc $\eta = \frac{Q_{G,ult}}{n \times Q_{ult}}$
TH1-1	2x1	2d=400	60,72	0,781
TH1-2		3d=600	62,00	0,798

Trường hợp tính toán	Tổ hợp cọc	Khoảng cách tim cọc (mm) Cọc số 1	Sức chịu tải giới hạn $P_{gh} = \sum M_{stage} \times P_{gt}$	Hệ số nhóm cọc $\eta = \frac{Q_{G,ult}}{n \times Q_{ult}}$
TH1-3		4d = 8000	70,88	0,912
TH1-4		5d = 1000	72,08	0,927
TH1-5		6d = 1200	72,56	0,934
TH1-6		7d=1400	69,84	0,899
TH2-1	2x2	2d=400	112,96	0,727
TH2-2		3d =600	112,96	0,727
TH2-3		4d = 8000	117,28	0,755
TH2-4		5d = 1000	121,44	0,781
TH2-5		6d = 1200	120,96	0,778
TH2-6		7d=1400	113,60	0,731
TH3-1	2x3	2d=400	177,36	0,761
TH3-2		3d =600	216,90	0,930
TH3-3		4d = 8000	227,40	0,975
TH3-4		5d = 1000	209,10	0,897
TH3-5		6d = 1200	210,00	0,901
TH3-6		7d=1400	207,30	0,889

Theo kết quả tính toán hệ số nhóm trên cọc số 2, hệ số nhóm có xu hướng tăng dần theo khoảng cách cọc từ 2d – 6d và giảm xuống ở trường hợp 7d. Hệ số nhóm bé nhất khi khoảng cách giữa các cọc là 2d và có độ chênh lệch lớn nhất so với các trường hợp còn lại, khoảng cách cọc cho hệ số nhóm lớn nhất là từ (4d ÷ 6d).

3.3.8 Tổng hợp kết quả tính toán hệ số nhóm cọc số 1 và số 2 bằng Plaxis

3.4 Tính toán hệ số nhóm theo công thức giải tích

3.4.1 Công thức của Converse – Labarre (1941)

3.4.2 Theo nguyên tắc của Feld (1943)

3.4.3 Theo công thức của Das (1998)

3.4.4 Công thức xác định hệ số nhóm của Seiler và Keeney (1944) [30]

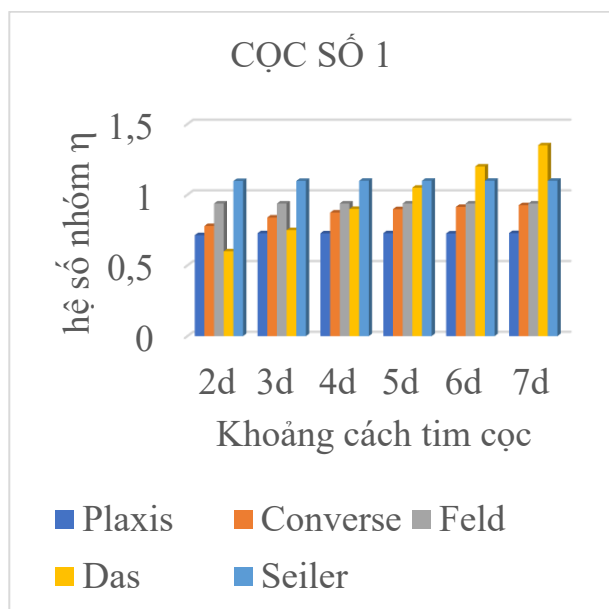
3.5 Tổng hợp kết quả tính toán

3.5.1 Kết quả tính toán hệ số nhóm cọc số 1 bằng giải tích và Plaxis

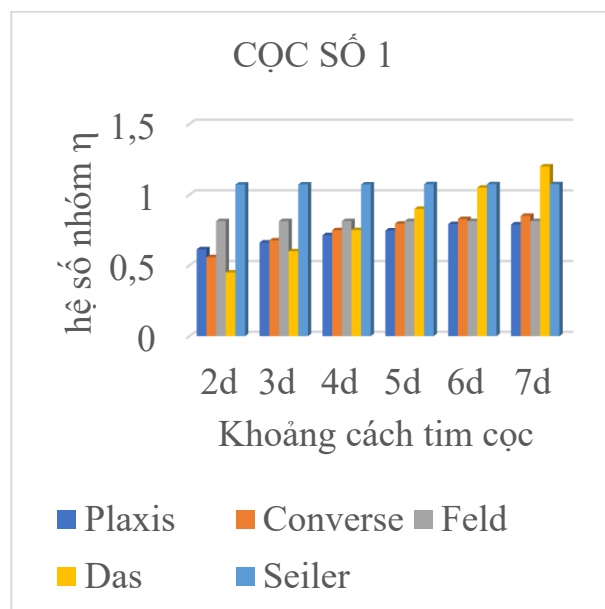
Bảng 3.17 Kết quả tính toán hệ số nhóm cọc số 1 bằng giải tích và Plaxis

Trường hợp tính toán	Tổ hợp cọc	Khoảng cách tim cọc	Hệ số nhóm cọc Theo Plaxis	Hệ số nhóm theo Converse – Labarre (1941)	Hệ số nhóm theo Feld (1943)	Hệ số nhóm theo Das (1998)	Hệ số nhóm theo Seiler và Keeney (1944)
TH1-1	2x1	2d	0,714	0,779	0,938	0,6	1,097
TH1-2		3d	0,728	0,839	0,938	0,75	1,098

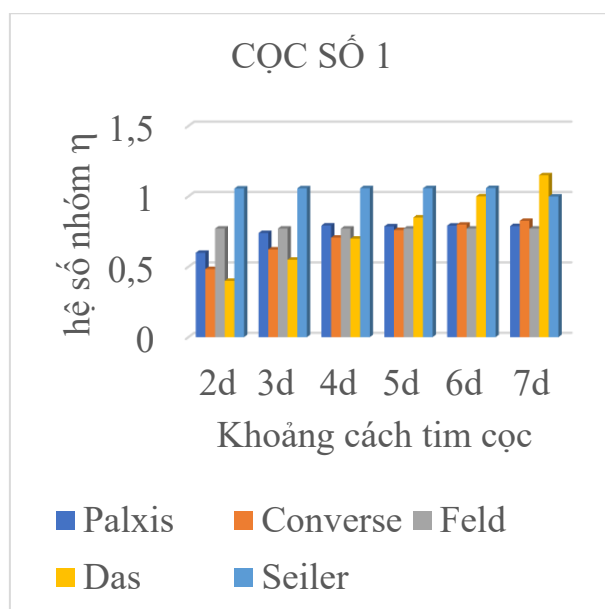
Trường hợp tính toán	Tổ hợp cọc	Khoảng cách tim cọc	Hệ số nhóm cọc Theo Plaxis	Hệ số nhóm theo Converse – Labarre (1941)	Hệ số nhóm theo Feld (1943)	Hệ số nhóm theo Das (1998)	Hệ số nhóm theo Seiler và Keeney (1944)
TH1-3		4d	0,727	0,874	0,938	0,9	1,099
TH1-4		5d	0,728	0,898	0,938	1,05	1,099
TH1-5		6d	0,726	0,914	0,938	1,2	1,099
TH1-6		7d	0,729	0,926	0,938	1,35	1,099
TH2-1	2x2	2d	0,614	0,558	0,813	0,45	1,072
TH2-2		3d	0,662	0,677	0,813	0,6	1,073
TH2-3		4d	0,714	0,749	0,813	0,75	1,073
TH2-4		5d	0,747	0,795	0,813	0,9	1,074
TH2-5		6d	0,792	0,828	0,813	1,05	1,074
TH2-6		7d	0,790	0,851	0,813	1,2	1,074
TH3-1	2x3	2d	0,599	0,484	0,771	0,4	1,056
TH3-2		3d	0,740	0,623	0,771	0,55	1,057
TH3-3		4d	0,793	0,707	0,771	0,7	1,058
TH3-4		5d	0,787	0,761	0,771	0,85	1,058
TH3-5		6d	0,792	0,799	0,771	1	1,059
TH3-6		7d	0,789	0,826	0,771	1,15	0,999



Hình 3.30 Biểu đồ quan hệ giữa HSN và khoảng cách cọc số 1 TH 2x1



Hình 3.31 Biểu đồ quan hệ giữa HSN và khoảng cách cọc số 1 TH 2x1



Hình 3.32 Biểu đồ quan hệ giữa HSN và khoảng cách cọc số 1 TH 2x3

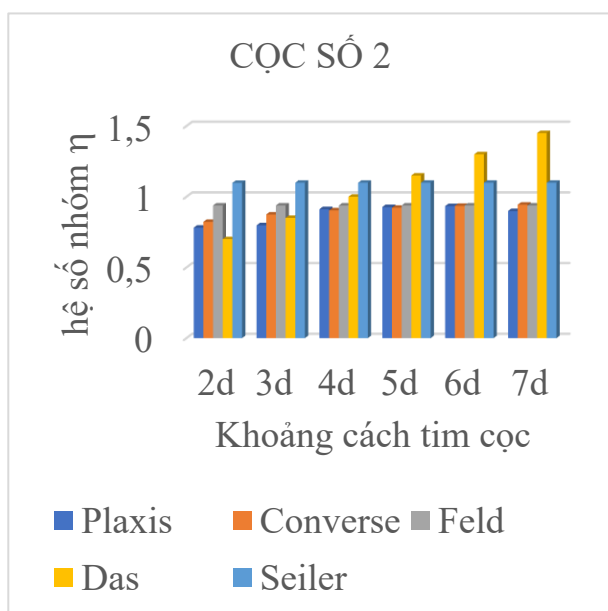
Kết quả tính toán HSN của cọc số 1 bằng phương pháp giải tích và Plaxis cho thấy sự chênh lệch kết quả tính theo công thức của các tác giả trên là rất lớn, điều này cho thấy sự thiếu chính xác và tính nhất quán giữa các công thức trên. Kết quả tính theo công thức của tác giả Converse – Labarre (1941) là gần nhất với kết quả tính bằng Plaxis. Công thức của Seiler và Keeney (1944) cho kết quả lớn nhất và lớn hơn 1 trong tất cả các trường hợp.

3.5.2 Kết quả tính toán hệ số nhóm cọc số 2 bằng giải tích và Plaxis

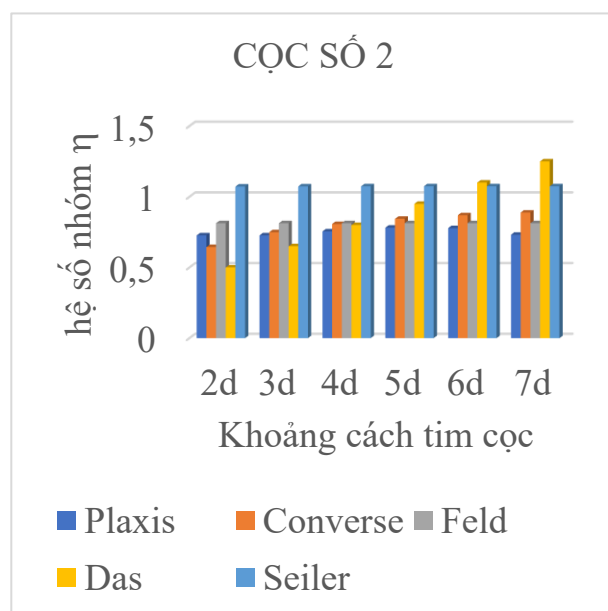
Bảng 3.18 Kết quả tính toán hệ số nhóm cọc số 2 bằng giải tích và Plaxis

Trường hợp tính toán	Tổ hợp cọc	Khoảng cách tim cọc	Hệ số nhóm cọc Theo Plaxis	Hệ số nhóm theo Converse – Labarre (1941)	Hệ số nhóm theo Feld (1943)	Hệ số nhóm theo Das (1998)	Hệ số nhóm theo Seiler và Keeney (1944)
TH1-1	2x1	2d	0,781	0,822	0,938	0,700	1,098
TH1-2		3d	0,798	0,874	0,938	0,850	1,099
TH1-3		4d	0,912	0,904	0,938	1,000	1,099
TH1-4		5d	0,927	0,922	0,938	1,150	1,099
TH1-5		6d	0,934	0,935	0,938	1,300	1,099
TH1-6		7d	0,899	0,944	0,938	1,450	1,099
TH2-1	2x2	2d	0,727	0,644	0,813	0,500	1,072
TH2-2		3d	0,727	0,749	0,813	0,650	1,073
TH2-3		4d	0,755	0,807	0,813	0,800	1,074
TH2-4		5d	0,781	0,844	0,813	0,950	1,074
TH2-5		6d	0,778	0,869	0,813	1,100	1,074
TH2-6		7d	0,731	0,888	0,813	1,250	1,074

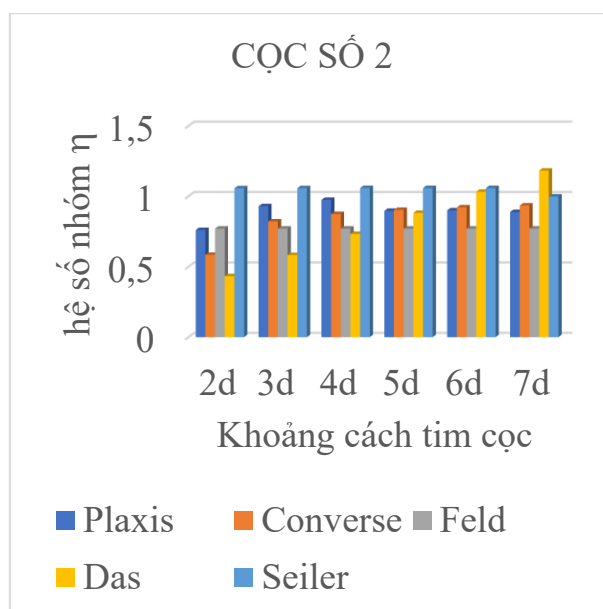
Trường hợp tính toán	Tổ hợp cọc	Khoảng cách tim cọc	Hệ số nhóm cọc Theo Plaxis	Hệ số nhóm theo Converse – Labarre (1941)	Hệ số nhóm theo Feld (1943)	Hệ số nhóm theo Das (1998)	Hệ số nhóm theo Seiler và Keeney (1944)
TH3-1	2x3	2d	0,761	0,585	0,771	0,433	1,057
TH3-2		3d	0,930	0,822	0,771	0,583	1,058
TH3-3		4d	0,975	0,874	0,771	0,733	1,059
TH3-4		5d	0,897	0,904	0,771	0,883	1,059
TH3-5		6d	0,901	0,922	0,771	1,033	1,059
TH3-6		7d	0,889	0,935	0,771	1,183	0,999



Hình 3.33 Biểu đồ quan hệ giữa HSN và khoảng cách cọc số 2 TH 2x1



Hình 3.34 Biểu đồ quan hệ giữa HSN và khoảng cách cọc số 21 TH 2x2



Hình 3.35 Biểu đồ quan hệ giữa HSN và khoảng cách cọc số 2 TH 2x3

Tương tự kết quả tính toán HSN của cọc số 1. Kết quả tính theo công thức của tác giả Converse – Labarre (1941) là gần nhất với kết quả tính bằng Plaxis. Công thức của Seiler và Keeney (1944) cho kết quả lớn nhất và lớn hơn 1 trong tất cả các trường hợp.

3.6 Nhận xét chương 3

Nội dung Chương 3 tính toán HSN cọc theo nhiều phương pháp khác nhau (Plaxis, các công thức thực nghiệm từ các nghiên cứu trước như Converse – Labarre (1941), Feld (1943), Das (1998), và Seiler & Keeney (1944)) với các tổ hợp cọc khác nhau (2x1, 2x2, 2x3) và khoảng cách tim cọc thay đổi từ 2d đến 7d. Các kết quả được tổng hợp và cho một số nhận xét như sau:

Kết quả tính toán sức chịu tải giới hạn của cọc đơn 15x15, L = 6m bằng phần mềm Plaxis 3D V20 cho kết quả bằng với kết quả theo phương pháp thí nghiệm nén tĩnh hiện trường (35 kN) và lớn hơn 46,25% sức chịu tải giới hạn được tính theo phương pháp giải tích (23,93 kN). Có thể thấy rằng, việc tính toán bằng phương pháp mô hình hoá bằng phần mềm Plaxis 3D V20 cho các giá trị thay đổi mượt mà theo khoảng cách, phản ánh được mô hình tương tác đất-cọc thực tế nhờ phân tích phần tử hữu hạn. Đây là phương pháp số chính xác cao, nhưng tốn thời gian tính toán.

Khi khoảng cách tim cọc tăng từ 2d đến 7d, HSN cọc cũng tăng dần (đặc biệt theo phương pháp Plaxis và Converse – Labarre). Tuy nhiên, khi khoảng cách các cọc $\leq 2d$, hiệu ứng nhóm cọc tăng dẫn đến giá trị HSN cọc giảm.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Kết quả tính toán hệ số nhóm (HSN) bằng phần mềm Plaxis cho thấy sự khác biệt đáng kể so với các kết quả tính theo các phương pháp giải tích. Với, công thức của Converse – Labarre (1941) là phương pháp cho kết quả gần sát nhất với Plaxis, phản ánh tốt ảnh hưởng tương tác giữa cọc và nền đất. Công thức của Seiler và Keeney (1944) cho kết quả lớn nhất trong tất cả các trường hợp khảo sát, thậm chí lớn hơn 1, cho thấy tính chất bảo thủ quá mức và không phù hợp để áp dụng trực tiếp cho bài toán móng cọc, do bản chất công thức được xây dựng cho phân loại đất nền đường, không phải để tính hiệu ứng nhóm cọc.

Với trường hợp 2 cọc (2×1), hệ số nhóm gần như không thay đổi đáng kể theo khoảng cách tim cọc. Chênh lệch giữa giá trị HSN nhỏ nhất (khoảng cách 2d) và lớn nhất (7d) không vượt quá 2%, cho thấy hiệu ứng nhóm không đáng kể trong tổ hợp 2 cọc.

Với các tổ hợp cọc lớn hơn, hệ số nhóm tăng dần khi khoảng cách cọc tăng từ 2d đến 6d, và có xu hướng giảm nhẹ ở 7d, điều này phản ánh rõ hiệu ứng nhóm đạt cực đại tại khoảng cách hợp lý ($4d \div 6d$).

Khi tiết diện cọc tăng, hệ số nhóm cũng tăng tương ứng trong tất cả các trường hợp khảo sát, thể hiện mối tương quan tỷ lệ thuận giữa diện tích tiếp xúc của cọc và khả năng chịu tải của nhóm cọc.

2. Kiến nghị

Phương pháp Plaxis nên được dùng khi cần độ chính xác cao, đặc biệt trong các công trình quan trọng hoặc nền đất phức tạp.

Phương pháp Converse – Labarre (1941) có thể được sử dụng làm cơ sở tham khảo tin cậy để tính toán hiệu ứng nhóm trong giai đoạn thiết kế sơ bộ.

Với các công trình có quy mô vừa và nhỏ tại khu vực địa chất thành phố Vĩnh Long sử dụng nhóm cọc BTCT tiết diện nhỏ cần chọn khoảng cách bố trí cọc hợp lý, thường nằm trong khoảng ($4d \div 6d$) để đạt hiệu quả tốt về chịu lực và tiết kiệm vật liệu.

3. Hướng nghiên cứu tiếp theo

Cần tiếp tục nghiên cứu liên quan về thí nghiệm nén tĩnh hiện trường cho nhóm cọc, kết quả là cơ sở để tăng độ tin cậy cho nghiên cứu của tác giả.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bowles. J. E, *Foundation analysis and Design*, New York, MC. Raw. Hill, 1997.
- [2] Helmy M, "Modeling pile Group Efficiency in Cohesionless Soil Using Artificial Neural Network", Master's thesis, Applied Science at Concordia University, Canada, 2002.
- [3] Viggiani C., Mandolini A. & Russo G. *Piles and Pile Foundaton*; Spon Press; London. 258P (2012).
- [4] Koizumi Y. and Ito K., "Field tests with regard to pile driving and bearing behaviour of piled foundation", *Soils and Foundation*, Vol. 7, No. 3, pp 30-53, 1967.

- [5] Poulos H.G., Davis E.H., *Pile Foundation Analysis and design*, New York, John Wiley, 1980
- [6] Dai G. ,”*Load test on full scale bored pile groups*”, *Geotech. J.*, No 49, pp 1293-1308, 2012.
- [7] Haibin Xu, Shaoqiang Zhang, Wenqiang Li, Zhensheng Cao, Kaiyu Jiang, “Behaviors and group effects of pile composite foundation under lateral load”, *Results in Engineering*, Vol. 17, No. 100899, 2023, DOI: 10.1016/j.rineng.2023.100899.
- [8] Yudhajit Dey, Soumin Das, “Settlement analysis of pile foundation using Plaxis 3D” *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, Vol. 7, Issue 1, ISSN No. 2455-2143, Pages 211-216, 2022.
- [9] Sri Dewi; Gouw Tjie-Liong, “Analysis on laterally loaded group piles by Plaxis 3D foundation”, *Comtech*, Vol.2 No. 2, pp. 1023-1030, 2011, DOI: 10.21512/comtech.v2i2.2852.
- [10] Gouw Tjie-Liong, Irpan Hidayat, “Effects of Pile Cap Thickness and Magnitudes of Lateral Movement on Laterally Loaded Group Piles”, *Ejge*, Vol. 20, No. 27, pp. 13179-13188, 2015.
- [11] Abdullah Ibrahim Al-Mhaidib, “Loading Rate Effects on Pile Groups in Clay”, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2005.
- [12] Marwan Shahin , Ahmed Farouk, and Mohsen Saad, “Numerical Analysis of Group Effect on Dragload on Piles Subjected to Negative Skin Friction”, *Journal of Engineering Research (ERJ)*, Vol. 6, No. 1, 2022, DOI: 10.21608/erjeng.2022.119962.1054.
- [13] Lorena da Silva Leite, Paulo César de Almeida Maia, Aldo Durand Farfán, “Three-dimensional numerical analysis of the generalized group effect in monitored continuous flight auger pile groups”, *Soils and Rocks*, Vol. 2, No. 46, 2023, DOI: 10.28927/SR.2023.013722.
- [14] Mohamed G. I. Shaaban, Mamdouh A. Kenawi, Abdel-Aziz A. Senoon, Mostafa A. Abd El-Naiem, “Effects of excavation and construction sequence on behavior of existing pile groups”, *Innovative Infrastructure Solutions*, 2023, DOI: /10.1007/s41062-023-01193-8.
- [15] Choi, Y.S., Lee, J., Prezzi, M. *et al.* Response of Pile Groups Driven in Sand Subjected to Combined Loads. *Geotech Geol Eng* **35**, 1587–1604 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0194-z>.
- [16] Shafaghat, A., Khabbaz, H., Fatahi, B. (2021). Developing an Efficiency Equation for Tapered Pile Groups in Sand Using Mathematical and Numerical Analyses. In: Kim, S.S., Moghal, A.A.B., Yao, JI. (eds) *Advances in Urban Geotechnical Engineering. GeoChina 2021. Sustainable Civil Infrastructures*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80152-6_2
- [17] Zhang, F., Dai, G., Ye, T. *et al.* Evaluation of the group efficiency factor for laterally loaded pile groups. *Acta Geotech.* **19**, 6141–6162 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02280-5>

- [18] Sudhi, D., Biswas, S., Choudhary, S.S. (2024). Group Efficiency Ratio of Pile Groups Subjected to Harmonic Vibration. In: Jose, B.T., Sahoo, D.K., Shin, E.C., Choudhury, D., Joseph, A., Pai, R.R. (eds) Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2022 Volume 2. IGC 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 477. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1741-5_8
- [19] Saggu, R. Cyclic Pile-Soil Interaction Effects on Load-Displacement Behavior of Thermal Pile Groups in Sand. *Geotech Geol Eng* **40**, 647–661 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01912-x>
- [20] Elgridly, E.A., Fayed, A.L. & Ali, A.A.AF. Efficiency of pile groups in sand soil under lateral static loads. *Innov. Infrastruct. Solut.* **7**, 26 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00628-4>
- [21] Alhashmi, A.E., El Naggar, M.H. & Oudah, F. Performance of axially loaded defective pile groups in sand: capacity and serviceability evaluation. *Innov. Infrastruct. Solut.* **8**, 124 (2023). <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01086-w>
- [22] Srivastava, A., Kothari, S. & Jawaid, S. Numerical Simulation-Based Performance Assessment of Pile Group Placed over Buried Utility Tunnel. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng* **48**, 2527–2536 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01321-5>
- [23] TCXD 205 : 1998, *Móng cọc tiêu chuẩn thiết kế*, 1998
- [24] TCVN 10304 : 2014, *Móng cọc - Tiêu chuẩn thiết kế*, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2014
- [25] 22TCN272: 05, *Tiêu chuẩn thiết kế cầu*, NXB Xây dựng, Hà Nội, 2005.
- [26] Nguyễn Mạnh Hà, Nguyễn Tương Lai, “Tính toán hiệu ứng nhóm trong móng cọc chịu tải trọng tĩnh bằng phần mềm phần tử hữu hạn Plaxis 3D”, 2015, [Trực tuyến]. Địa Chỉ: <https://britec.com.vn/tinh-toan-hieu-ung-nhom-trong-mong-coc-chiu-tai-trong-tinh-bang-phan-mem-phan-tich-phan-tu-huu-han-3d-142.html>. [Truy cập 31/8/2023].
- [27] Phạm Tuấn Anh và Nguyễn Đức Tịnh, “Nghiên cứu sự làm việc của nhóm cọc chịu tải trọng đứng với các cọc có chiều dài khác nhau”, *Tạp chí KHCN Xây dựng*, số 3, 2018.
- [28] Dương Hồng Thắm, Nguyễn Thanh Hà, Võ Hoàng Trí, “Một số nghiên cứu về hệ số nhóm cọc hạ vào đất rời”, *Tạp chí khoa học trường Đại học Mở TP. HCM*, Tập 1, số 11, tr. 96-104, 2016.
- [29] Bạch Vũ Hoàng Lan, “Nghiên cứu ảnh hưởng của hiệu ứng nhóm đến khả năng chịu tải dọc trục và độ lún của nhóm cọc thẳng đứng”, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Viện khoa học thủy lợi Miền Nam, Thành phố Hồ Chí Minh, 2017.
- [30] Braja M. Das & Nagaratnam Sivakugan. *Principles of Foundation Engineering*. US, Cengage Learning, 2017
- [31] Reference Manual, Plaxis 2D CONNECT Edition V20, Bentley Co., 2020.
- [32] TCVN 9393 : 2012, *Cọc – phương pháp thử nghiệm hiện trường bằng tải trọng tĩnh ép dọc trục*, 2012.
- [33] Công ty TNHH Tư vấn Thiết kế & Xây dựng Đại Thịnh, “Báo cáo khảo sát địa chất công trình”, Số: 04/BCKSĐC.2021, Vĩnh Long, 2021