■Ngày nhận bài: 05/6/2025 ■Ngày sửa bài: 17/6/2025 ■Ngày chấp nhận đăng: 01/7/2025

Nghiên cứu móng bè kết hợp cọc để đưa ra giải pháp móng hiệu quả cho nhà cao tầng xây dựng trong đô thị ở Việt Nam

A Study on piled raft foundations to propose an efficient foundation solution for high-rise buildings in urban areas of Vietnam

> KS PHẠM TRUNG HIẾU[1], TS ĐẶNG XUÂN TRƯỜNG[2]
[1]Trường Đại học Giao thông vận tải TP.HCM; Email: 2380201005@ut.edu.vn
[2]Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP.HCM; Email: dxtruong@hcmunre.edu.vn

TÓM TẮT
Bài báo trình bày nghiên cứu về hiệu quả kỹ thuật và kinh tế của móng bè kết hợp cọc (Piled Raft Foundation - PRF) áp dụng cho nhà cao tầng xây dựng trên nền đất yếu trong đô thị Việt Nam. Trên cơ sở tổng hợp lý thuyết và các phương pháp tính toán (bán kinh nghiệm và mô hình số), nhóm tác giả sử dụng phần mềm SAFE để mô phỏng ba phương án móng: móng cọc, móng bè và móng bè cọc. Mô hình công trình là tòa nhà 11 tầng có tầng hầm đặt trên nền đất yếu tại TP.HCM. Kết quả phân tích cho thấy phương án PRF giúp giảm độ lún đến 70% so với móng bè, tiết kiệm 42,6% bê tông và 16,7% thép so với móng cọc. Ngoài ra, PRF còn đảm bảo khả năng thi công trong điều kiện xây chen và giảm ảnh hưởng đến công trình lân cận. Nghiên cứu đề xuất áp dụng PRF như một giải pháp móng hiệu quả về mặt kỹ thuật và kinh tế trong xây dựng công trình cao tầng tại đô thị Việt Nam, đồng thời kiến nghị cập nhật tiêu chuẩn thiết kế nền móng cho phù hợp với điều kiện địa chất trong nước.
Từ khóa: Móng bè cọc; PRF; nhà cao tầng; đất yếu; phần mềm SAFE; mô phỏng số; xây chen.

ABSTRACT
This paper presents a study on the technical and economic efficiency of piled raft foundations (PRF) for high-rise buildings constructed on soft soil in Vietnam. The study reviews theoretical concepts, analyzes design methods ranging from semi-empirical to numerical approaches and uses SAFE software to simulate three foundation types: pile foundation, raft foundation and piled raft foundation under typical soil conditions in Ho Chi Minh City. The results indicate that the PRF solution reduces settlement by up to 70% compared to raft foundations and saves 42.6% concrete and 16.7% steel compared to pile foundations. The PRF system also improves constructability in confined urban sites and minimizes the impact on adjacent structures. Based on these findings, the study proposes adopting PRF for urban high-rise buildings and recommends updating design standards to reflect Vietnam's geotechnical conditions.
Keywords: Piled raft foundation; PRF; high-rise building; soft soil; SAFE software; numerical simulation; urban construction.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển đô thị nhanh chóng ở Việt Nam làm gia tăng nhu cầu xây dựng nhà cao tầng trên nền đất yếu, đòi hỏi giải pháp móng vừa hiệu quả kỹ thuật, vừa hợp lý về kinh tế. Giải pháp móng bè kết hợp cọc (Piled Raft Foundation - PRF) đã được Balaam & Booker [1] và Randolph & Reul [5] chứng minh có thể tận dụng ưu điểm đồng thời của cọc (khả năng chịu tải sâu) và bản bè (phân bố ứng suất, khai thác thêm sức chịu tải của đất) [3, 5]. Tuy nhiên, việc ứng dụng PRF ở Việt Nam còn hạn chế do thiếu tiêu chuẩn thiết kế chính thức và công cụ mô phỏng phổ biến. Vì vậy, nghiên cứu này hệ thống hóa cơ sở lý thuyết và mô phỏng bằng SAFE nhằm đánh giá hiệu quả kỹ thuật - kinh tế của PRF, từ đó đề xuất giải pháp áp dụng phù hợp điều kiện đô thị Việt Nam.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Nguyên lý làm việc của PRF

PRF hoạt động dựa trên sự tương tác đồng thời giữa cọc - bè - nền đất. Cọc chịu phần lớn tải trọng đứng, trong khi bản bè phân phối lại ứng suất và góp phần kiểm soát lún lệch. Các nguyên lý thiết kế PRF được phân thành ba nhóm:

- Cọc chịu tải hoàn toàn;
- Bè chịu tải chính;
- Cả bè và cọc cùng chịu tải [3, 4, 5].

2.2. Phương pháp tính toán PRF

Các phương pháp tính toán PRF được phân thành hai nhóm chính:

Phương pháp bán kinh nghiệm: Dựa vào biểu đồ phân bố tải trọng và hệ số hiệu chỉnh từ kết quả thực nghiệm [3, 4].

Phương pháp mô hình số: Sử dụng mô phỏng phần tử hữu hạn như SAFE, PLAXIS, MIDAS GTS để mô phỏng tương tác phi tuyến giữa cọc - bè - đất [2]. Trong nghiên cứu này, phần mềm SAFE được lựa chọn do khả năng mô phỏng linh hoạt hệ bản sàn móng và cọc dưới tác động tải trọng đứng.

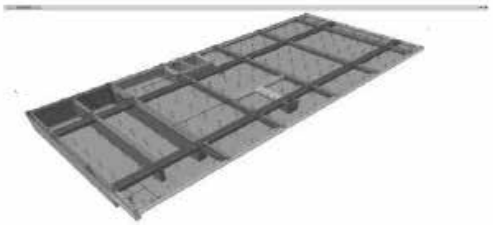
3. MÔ HÌNH TÍNH TOÁN

3.1. Mô hình công trình

Công trình mô phỏng là một tòa nhà văn phòng 11 tầng, có 1 tầng hầm, xây dựng tại phường Đông Hưng Thuận, TP Hồ Chí Minh. Nền đất yếu với sức chịu tải hạn chế, trong đó có mô-đun đàn hồi E = 30,51 MPa, hệ số nền là 25.000 kN/m^2/m, hệ số nền cọc D300 là 60.000 kN/m, hệ số nền cọc D450 là 160.000 kN/m. Ba phương án móng được mô phỏng gồm: Móng cọc D450; móng bè có sườn và móng PRF kết hợp cọc D450 và D300 phân bố thưa.

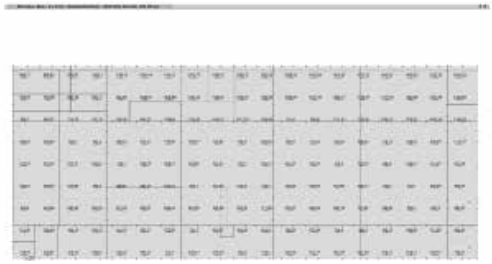
3.2. Phương án móng cọc

Hình 1 trình bày mô hình phân tích kết cấu móng bằng phần mềm SAFE, ứng với phương án móng sử dụng cọc D450 kết hợp với hệ dầm sườn. Đây là mô hình không gian 3D cho phép đánh giá đầy đủ ứng xử của móng dưới tác động của tải trọng công trình và điều kiện đất nền.



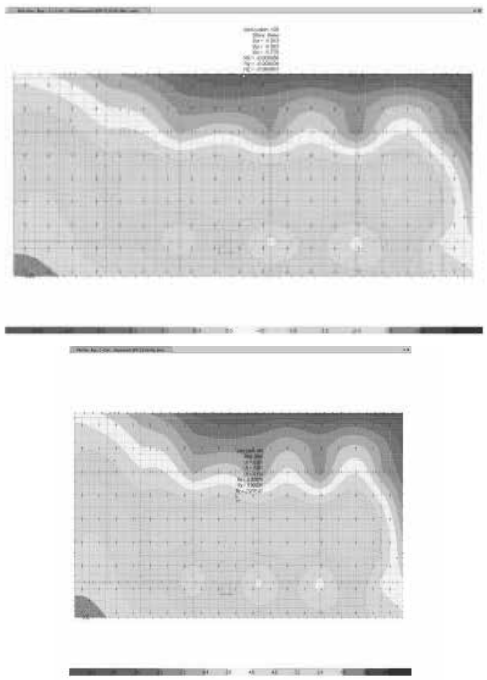
Hình 1. Mô hình SAFE tính toán phương án móng cọc D450 có sườn

Xuất kết quả từ phần mềm SAFE ta được lực nén dọc D450 có P_{TK} nhỏ hơn tải trọng thiết kế của cọc là 1.600 KN, từ đó đảm bảo khả năng chịu lực của cọc.



Hình 2. Lực nén dọc D450 (tải trọng thiết kế cọc 1.600 KN), PTK < 160 KN (đảm bảo chịu lực)

Hình 3 tại hai điểm bất kỳ, từ phần mềm phân tích kết cấu SAFE xuất ra chuyển vị nền theo phương đứng (ký hiệu Uz), đơn vị mm, có U_{z1} = -9.770 mm và U_{z2} = -4.154 mm, từ đó tính được độ lún cục bộ giữa hai điểm bất kỳ = 6 mm, tỷ lệ lún lệch là 0,1%<0,2% giới hạn theo TCVN 9360:2012.



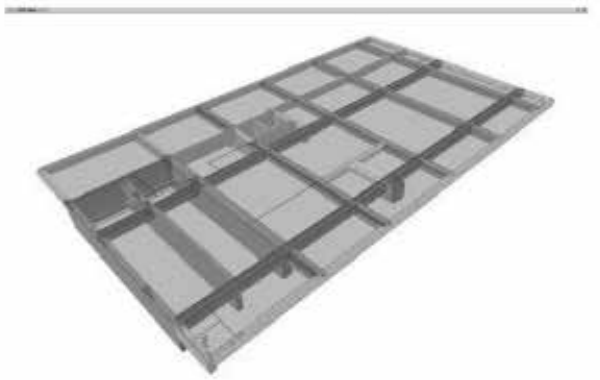
Hình 3. Độ lún móng cục bộ trên móng 6/6.000x100% = 0,1% < 0,2% (đảm bảo an toàn)

Bảng 1. Bảng tổng hợp chi phí xây dựng phương án móng cọc

STT	Hạng mục công việc	ĐVT	Khối lượng	Đơn giá (VNĐ)	Thành tiền (VNĐ)
1	Chi phí thép và gia công thép	Tấn	67,50	30.000.000	2.025.000.000
2	Bê tông móng	m^3	287,00	2.000.000	574.000.000
3	Chi phí cọc và ép cọc D450	md	3.078,00	500.000	1.539.000.000
4	Tổng giá trị trước thuế				4.138.000.000

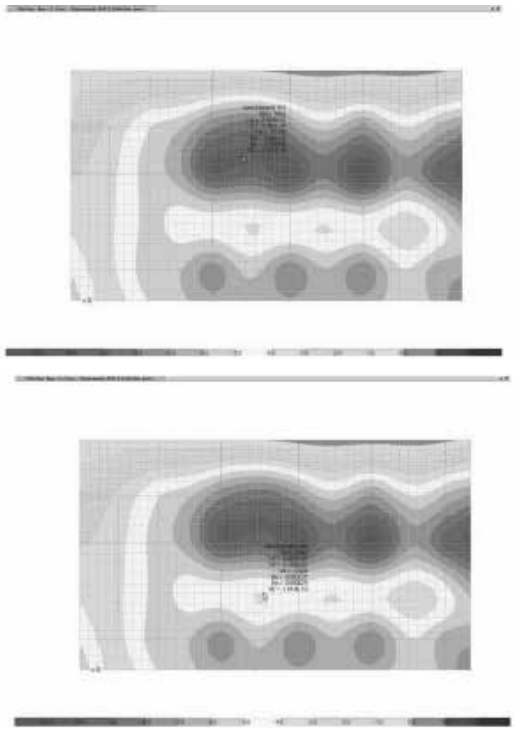
3.3. Phương án móng bè

Hình 4 thể hiện mô hình 3D được xây dựng bằng phần mềm SAFE để phân tích phương án móng bè kết hợp sườn có mở rộng móng, nhằm phân tán ứng suất đều hơn lên nền đất yếu, từ đó giảm tải trọng đơn vị truyền xuống nền.



Hình 4. Mô hình SAFE tính toán phương án móng bè kết hợp sườn (mở rộng móng)

Hình 5 tại hai điểm bất kỳ, từ phần mềm phân tích kết cấu SAFE xuất ra chuyển vị nền theo phương đứng (ký hiệu Uz), đơn vị mm, có U_{z1} = -10,198 mm và U_{z1} = -3,964 mm, từ đó tính được độ lún cục bộ giữa hai điểm bất kỳ Δs = 6,234 mm, tỷ lệ lún lệch là 0,1247%<0,2% giới hạn theo TCVN 9360:2012.



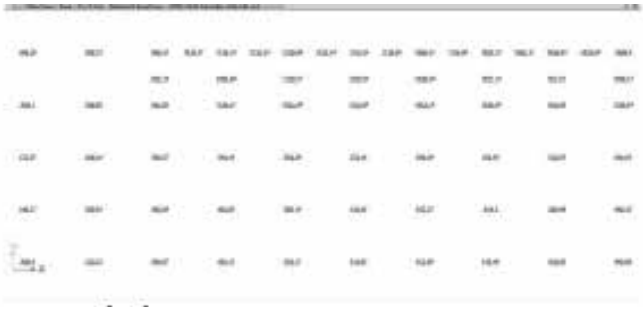
Hình 5. Độ lún móng cục bộ trên móng 6.234/5000x100% = 0,12% < 0,2% (đảm bảo an toàn)

Bảng 2. Bảng tổng hợp chi phí xây dựng phương án móng bè

STT	Hạng mục công việc	ĐVT	Khối lượng	Đơn giá (VNĐ)	Thành tiền (VNĐ)
1	Chi phí thép và gia công thép	Tấn	67,50	30.000.000	2.025.000.000
2	Bê tông móng	m^3	500,00	2.000.000	1.000.000.000
3	Tổng giá trị trước thuế				3.025.000.000

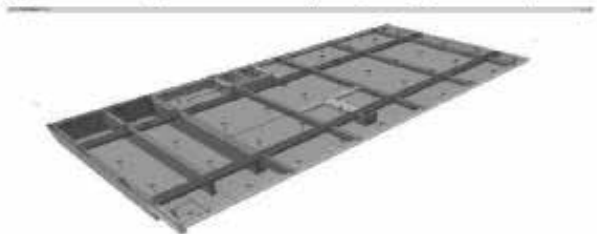
3.4. Phương án móng bè cọc

Hình 6 thể hiện mô hình phân tích kết cấu móng được thiết lập trong phần mềm SAFE, áp dụng cho phương án móng bè cọc kết hợp sườn. Đây là mô hình 3D mô phỏng đầy đủ các thành phần chính của hệ móng bao gồm: Bản bè, dầm sườn và hệ thống cọc chịu lực.



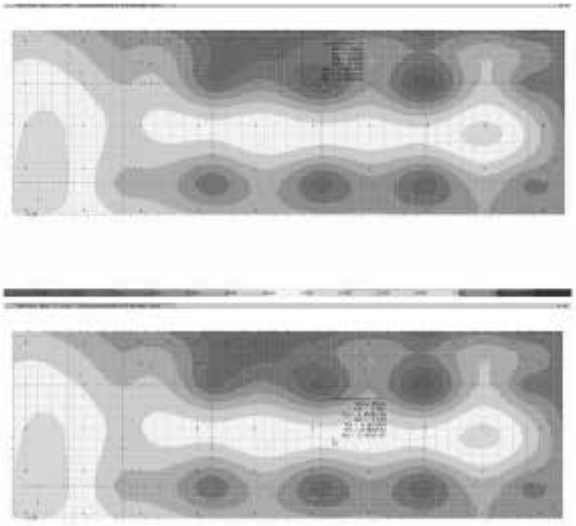
Hình 6. Mô hình SAFE tính toán phương án móng bè cọc kết hợp sườn

Hình 7 thể hiện kết quả xuất ra từ phần mềm SAFE, trong đó lực nén dọc D450 có P_{TK} nhỏ hơn tải trọng thiết kế của cọc là 1.600 KN, từ đó đảm bảo khả năng chịu lực của cọc. Tương tự xuất kết quả từ phần mềm SAFE ta được lực nén dọc D300 có P_{TK} nhỏ hơn tải trọng thiết kế của cọc là 600 KN, từ đó đảm bảo khả năng chịu lực của cọc.



Hình 7. Lực nén dọc D450 (tải trọng thiết kế cọc 1.600 KN); PTK < 1.600 KN (đảm bảo chịu lực), D300 (tải trọng thiết kế cọc 600 KN); PTK < 600 KN (đảm bảo chịu lực)

Hình 8 tại hai điểm bất kỳ, từ phần mềm phân tích kết cấu SAFE xuất ra chuyển vị nền theo phương đứng (ký hiệu Uz), đơn vị mm, có U_{z1} = -6,758 mm và U_{z2} = -3,818 mm, từ đó tính được độ lún cục bộ giữa hai điểm bất kỳ Δs = 2,940 mm, tỷ lệ lún lệch là 0,0589%<0,2% giới hạn theo TCVN 9360:2012.



Hình 8. Độ lún móng cục bộ trên móng 2,95/5.000x100% = 0,059% < 0,2% (đảm bảo an toàn)

Bảng 3. Bảng tổng hợp chi phí xây dựng phương án móng bè cọc

STT	Hạng mục công việc	ĐVT	Khối lượng	Đơn giá (VNĐ)	Thành tiền (VNĐ)
1	Chi phí thép và gia công thép	Tấn	56,18	30.000.000	1.685.400.000
2	Bê tông móng	m^3	287,00	2.000.000	574.000.000
3	Chi phí cọc và ép cọc D300	md	612,00	300.000	183.600.000
4	Chi phí cọc và ép cọc D450	md	558,00	500.000	279.000.000
5	Tổng giá trị trước thuế				2.443.000.000

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

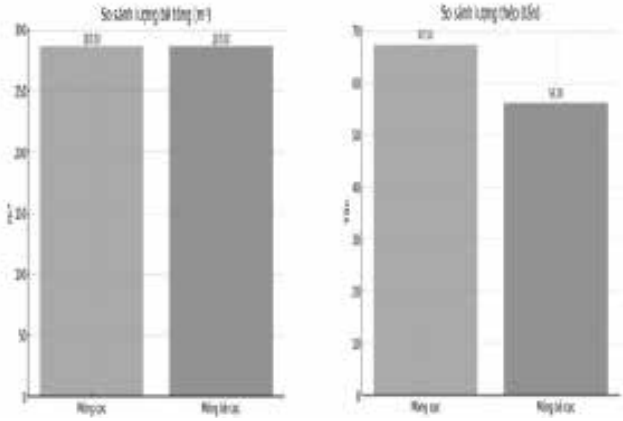
Bảng 4. So sánh ưu, nhược điểm ba phương án móng cọc, móng bè, móng bè cọc

Phương án: Móng cọc	Phương án: Móng bè	Phương án: Móng bè cọc
Biện pháp thi công đơn giản	Biện pháp thi công đơn giản	Biện pháp thi công đơn giản
Gần như không lún theo thời gian	Lún theo thời gian đặt trực tiếp nền đất	Gần như không lún theo thời gian do có hệ cọc bổ sung
Áp dụng được cho công trình xây chen và đại trà	Nếu công trình xây chen không thể mở rộng đài và nền đất có sức chịu tải nhỏ sẽ không đảm bảo	Áp dụng được cho công trình xây chen và đại trà

Ảnh hưởng công trình lân cận: Trung Bình (nếu ép quá nhiều cọc khả năng sẽ gây nứt nhà kế bên)	Ảnh hưởng công trình lân cận: Không ảnh hưởng	Ảnh hưởng công trình lân cận: Gần như không ảnh hưởng (do số lượng cọc rất thưa tới khoảng cách 13,3d)
Thi công: Đại trà	Thi công: Đại trà	Thi công: Đại trà
Chi phí: 100% (4.138.000.000)	Chi phí: 73,1% (3.025.000.000)	Chi phí: 59% (2.443.000.000)

Bảng 5. So sánh lượng bê tông và cốt thép móng bè cọc so với móng cọc

TÒA NHÀ VĂN PHÒNG			
Móng cọc		Móng bè cọc	
Thép T_1(Tấn)	Bê tông $V_1(m^3)$	Thép T_2(Tấn)	Bê tông $V_2(m^3)$
67,50	287,00	56,18	287,00
$V_{trung\ binh\ bê\ bông} = V_1 - V_2$ = 287,00 - 287,00 = 0		$\%_{bê\ tông} = V_{trung\ binh}/V_1$ = 0/287,00 = 0	
$T_{trung\ binh\ thép} = T_1 - T_2$ = 67,50 - 56,18 =11,32		$\%_{thép} = T_{trung\ binh}/T_1$ =(11,32/67,50)x100=16,7	

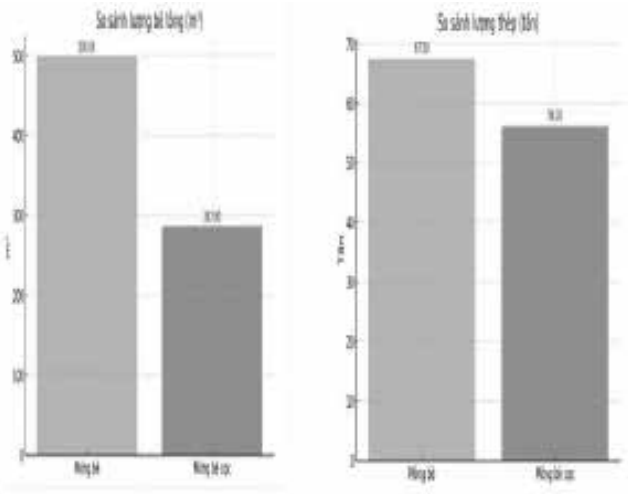


Hình 9. Sơ đồ so sánh lượng bê tông và thép giữa móng cọc và móng bè cọc

Kết quả tính toán lượng bê tông và cốt thép móng bè cọc so với móng cọc được thể hiện ở Bảng 5 và Hình 9 cho thấy nếu sử dụng phương án móng bè cọc sẽ tiết kiệm được 16,7% thép so với phương án móng cọc.

Bảng 6. So sánh lượng bê tông và cốt thép móng bè cọc so với móng bè

TÒA NHÀ VĂN PHÒNG			
Móng bè		Móng bè cọc	
Thép T_1(Tấn)	Bê tông $V_1(m^3)$	Thép T_2(Tấn)	Bê tông $V_2(m^3)$
67,50	500,00	56,18	287,00
$V_{trung\ binh\ bê\ bông} = V_1 - V_2$ = 500,00 - 287,00 = 213		$\%_{bê\ tông} = V_{trung\ binh}/V_1$ = (213/500)x100 = 42,6	
$T_{trung\ binh} = T_1 - T_2$ =67,50-56,18 =11,32		$\%_{thép} = T_{trung\ binh}/T_1$ (11,32/67,50)x100=16,78	



Hình 10. Sơ đồ so sánh lượng bê tông và thép giữa móng bè và móng bè cọc

Kết quả tính toán lượng bê tông và cốt thép móng bè cọc so với móng bè được thể hiện ở Bảng 6 và Hình 10 cho thấy nếu sử dụng phương án móng bè cọc sẽ tiết kiệm được 42,6% bê tông và 16,78% thép so với phương án móng bè.

5. KẾT LUẬN

Kết quả tính toán và mô phỏng cho thấy rằng, khi bố trí hệ thống cọc hợp lý, móng bè có thể tiếp nhận khoảng 70% áp lực từ nền đất trong khi cọc vẫn đảm bảo chịu gần 100% tải thiết kế, giúp phát huy tối đa hiệu quả phân phối tải trọng giữa các thành phần. Sự kết hợp hài hòa giữa bản bè và hệ cọc không những đảm bảo khả năng chịu lực, kiểm soát lún hiệu quả mà còn mang lại lợi ích kinh tế rõ rệt nhờ giảm khối lượng vật liệu sử dụng.

Từ các phân tích kỹ thuật và so sánh kinh tế, nghiên cứu đề xuất áp dụng móng bè kết hợp cọc (PRF) như một giải pháp nền móng ưu việt trong thi công nhà cao tầng có tầng hầm tại các khu vực đô thị xây chen, nơi yêu cầu cao về kiểm soát lún và hạn chế ảnh hưởng đến công trình lân cận. Đồng thời, phương án này còn tối ưu hóa không gian sử dụng và chi phí đầu tư.

Nghiên cứu cũng đã hệ thống hóa các phương pháp tính toán móng PRF, kết hợp lý thuyết với mô hình mô phỏng thực tế bằng phần mềm SAFE, từ đó cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn để lựa chọn giải pháp móng phù hợp cho các công trình cao tầng xây dựng trên nền đất yếu đặc trưng của đô thị Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Balaam, N. P., & Booker, J. R. (1981), Analysis of rigid rafts supported by granular piles. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol.5, no.4, pp.379-403, London, ICE Publishing.

[2]. Hemsley, J. A. (2000), Design Applications of Raft Foundations, London, Thomas Telford Publishing.

[3]. Horikoshi, K., & Randolph, M. F. (1998), A contribution to optimum design of piled rafts. Géotechnique, vol.48, no.3, pp.301-317, London, ICE Publishing.

[4]. Katzenbach, R., Arslan, U., Moormann, C., & Reul, O. (2000), Piled raft foundations - Design and applications, In: Hemsley, J. A. (Ed.), Raft Foundations: Design and Analysis, pp.281-322, London, Thomas Telford.

[5]. Randolph, M. F., & Reul, O. (2003), Piled rafts in overconsolidated clay: Comparison of in-situ measurements and numerical analyses. Géotechnique, vol.53, no.3, pp.301-317, London, ICE Publishing.