

## Ứng dụng cọc khoan nhồi đường kính nhỏ trong thi công tầng hầm các công trình xây tại thành phố Quy Nhơn

Trần Phi Dũng<sup>1</sup>, Huỳnh Phụng Hưng<sup>1\*</sup>, Ngô Văn Tín<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Quang Trung, số 327 Đào Tấn, Phường Nhơn Phú, TP. Quy Nhơn, tỉnh Bình Định

<sup>2</sup>Công ty TNHH Tổng Hợp Kim Sơn, An Nghĩa, Hoài An, Bình Định

\* Tác giả liên hệ: [hphung@qtu.edu.vn](mailto:hphung@qtu.edu.vn)

### THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận: 3/3/2025  
Ngày hoàn thiện: 11/3/2025  
Ngày chấp nhận: 22/3/2025  
Ngày đăng: 2/4/2025

### TỪ KHÓA

Cọc khoan nhồi;  
Đường kính nhỏ;  
Tầng hầm;  
Địa chất Quy Nhơn;  
Tường vây;  
Thi công xây.

### TÓM TẮT

Thành phố Quy Nhơn đang đẩy mạnh quá trình đô thị hóa, kéo theo nhu cầu xây dựng các công trình có tầng hầm để tối ưu hóa không gian sử dụng. Tuy nhiên, việc thi công tầng hầm tại đây gặp nhiều thách thức do điều kiện địa chất phức tạp với lớp đất yếu phân bố không đồng đều, mực nước ngầm cao (1.5–3 m), mặt bằng thi công chật hẹp và yêu cầu nghiêm ngặt về giảm thiểu ảnh hưởng đến các công trình lân cận. Trước những khó khăn này, giải pháp cọc khoan nhồi đường kính nhỏ ( $D \leq 300$  mm) đã được đề xuất như một phương án tối ưu nhờ khả năng thi công linh hoạt trong không gian hạn chế, giảm thiểu rung động và tiếng ồn, đồng thời đảm bảo độ ổn định cao với độ lún dưới 5 mm. Các dự án thực tế tại Quy Nhơn đã chứng minh hiệu quả của phương pháp này với việc rút ngắn 30% thời gian thi công, tiết kiệm 20% chi phí so với các giải pháp truyền thống như cọc ép hay cọc Barrette. Nghiên cứu này không chỉ phân tích các ưu điểm kỹ thuật và kinh tế của cọc khoan nhồi đường kính nhỏ mà còn đưa ra các số liệu cụ thể từ thực tế thi công, từ đó đề xuất giải pháp tối ưu cho các công trình tương tự trong tương lai.

## Application of Small-Diameter bored piles in basement construction of buildings in Quy Nhon city

Tran Phi Dung<sup>1</sup>, Huynh Phung Hung<sup>1\*</sup>, Ngo Van Tin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Quang Trung University, 327 Dao Tan Street, Nhon Phu Ward, Quy Nhon City, Binh Dinh Province, Vietnam

<sup>2</sup>Kim Son General Co., Ltd., An Nghia, Hoai An District, Binh Dinh Province, Vietnam

\* Corresponding Author: [hphung@qtu.edu.vn](mailto:hphung@qtu.edu.vn)

### ARTICLE INFO

Received: Mar 3<sup>rd</sup>, 2025  
Revised: Mar 11<sup>st</sup>, 2025  
Accepted: Mar 22<sup>nd</sup>, 2025  
Published: Apr 2<sup>nd</sup>, 2025

### KEYWORDS

Bored piles;  
Small diameter;  
Basement;  
Quy Nhon geology;  
Retaining wall;  
Construction.

### ABSTRACT

Quy Nhon city is accelerating its urbanization process, leading to a growing demand for buildings with basements to optimize space utilization. However, basement construction in this area faces numerous challenges due to complex geological conditions, including uneven distribution of weak soil layers, high groundwater levels (1.5–3 meters), limited construction space, and strict requirements to minimize impact on adjacent structures. To address these difficulties, small-diameter bored piles ( $D \leq 300$  mm) have been proposed as an optimal solution thanks to their flexibility in tight spaces, reduced vibration and noise, and high stability with settlement kept under 5 mm. Practical projects in Quy Nhon have demonstrated the effectiveness of this method, showing a 30% reduction in construction time and 20% cost savings compared to traditional methods such as driven piles or Barrette piles. This study not only analyzes the technical and economic advantages of small-diameter bored piles but also presents specific data from actual construction projects, thereby proposing optimized solutions for similar future developments.

Doi:

Available online at: <https://js.lhu.edu.vn/index.php/lachong>.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh quá trình đô thị hóa diễn ra mạnh mẽ tại thành phố Quy Nhơn, nhu cầu về các công trình cao tầng có tầng hầm ngày càng trở nên cấp thiết. Xu hướng này xuất phát từ bài toán quy hoạch đô thị khi diện tích đất trống ngày càng thu hẹp, trong khi nhu cầu về không gian sinh hoạt, thương mại và hạ tầng kỹ thuật ngầm không ngừng gia tăng. Tuy nhiên, công tác thi công tầng hầm tại Quy Nhơn đang đối mặt với những thách thức đa chiều mang tính đặc thù.

Về mặt địa kỹ thuật, khu vực Quy Nhơn có cấu trúc nền đất khá phức tạp với sự phân bố không đồng nhất của các lớp đất yếu, chủ yếu là sét pha và cát mịn, xen kẽ các lớp đất có tính nén lún cao. Đặc biệt, mực nước ngầm nông (chỉ từ 1.5-3m so với mặt đất) tạo ra áp lực thủy tĩnh đáng kể lên thành hố đào, đồng thời làm tăng nguy cơ sụt lún đất trong quá trình thi công. Các giải pháp xử lý nước ngầm truyền thống như hệ thống giếng hút nước hay tường chắn thường không đạt hiệu quả tối ưu trong điều kiện này.

Về không gian thi công, đa số các dự án tại trung tâm thành phố đều nằm trong các lô đất có diện tích hạn chế, bao quanh bởi các công trình hiện hữu. Điều này đặt ra yêu cầu khắt khe về kỹ thuật thi công phải đảm bảo không gây ảnh hưởng đến các công trình lân cận, đặc biệt là vấn đề kiểm soát độ lún và rung động. Các phương pháp thi công truyền thống như cọc ép hay cọc Barrette thường gặp nhiều hạn chế trong bối cảnh này do yêu cầu mặt bằng rộng và khả năng gây rung động lớn.

Trước những thách thức đó, giải pháp cọc khoan nhồi đường kính nhỏ ( $D \leq 300\text{mm}$ ) đã xuất hiện như một phương án tối ưu. Về mặt kỹ thuật, phương pháp này có ưu thế vượt trội nhờ khả năng thi công trong không gian hẹp với thiết bị khoan có kích thước nhỏ gọn. Quá trình thi công bằng phương pháp khoan xoay sử dụng dung dịch bentonite giúp ổn định thành hố khoan hiệu quả, đồng thời giảm thiểu tối đa độ rung và tiếng ồn so với các phương pháp đóng cọc truyền thống. Đặc biệt, khả năng thích ứng linh hoạt với nhiều loại địa chất khác nhau giúp phương pháp này phát huy hiệu quả trong điều kiện địa chất phức tạp của Quy Nhơn.

Về hiệu quả kinh tế, các số liệu thực tế từ các dự án tại Quy Nhơn cho thấy giải pháp này giúp tiết kiệm khoảng 20-25% chi phí so với phương pháp cọc ép truyền thống, chủ yếu nhờ giảm chi phí vật tư (do đường kính cọc nhỏ), giảm chi phí nhân công (do quy trình thi công đơn giản hơn) và giảm chi phí xử lý phát sinh. Thời gian thi công được rút ngắn đáng kể (khoảng 30%) nhờ khả năng triển khai đồng thời nhiều vị trí thi công trên cùng mặt bằng hẹp.

Các kết quả giám sát thực tế tại các công trình ứng dụng phương pháp này ở Quy Nhơn cho thấy độ lún của công trình lân cận được kiểm soát ở mức dưới 5mm, đạt yêu cầu khắt khe của tiêu chuẩn TCVN 9362:2012. Đặc biệt, hệ thống tường vây bằng cọc khoan nhồi đường kính nhỏ kết hợp neo phụ đã chứng minh hiệu quả vượt trội trong việc ổn định hố đào sâu tại các khu vực có mực nước ngầm cao.

Nghiên cứu này không chỉ phân tích sâu các ưu điểm về mặt kỹ thuật và kinh tế của giải pháp, mà còn cung cấp

các số liệu thực nghiệm chi tiết từ các dự án thực tế tại Quy Nhơn, bao gồm kết quả thí nghiệm tải trọng tĩnh, kiểm tra chất lượng cọc bằng phương pháp siêu âm (PIT), và kết quả giám sát độ lún bằng các thiết bị chuyên dụng. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất các giải pháp tối ưu cho thi công tầng hầm trong điều kiện đặc thù của Quy Nhơn, có thể áp dụng mở rộng cho các đô thị ven biển có điều kiện tương tự.

## 2. MỤC TIÊU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1 Mục tiêu nghiên cứu

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm đạt được các mục tiêu cụ thể sau:

**2.1.1 Đánh giá hiệu quả kỹ thuật** của giải pháp cọc khoan nhồi đường kính nhỏ trong điều kiện địa chất đặc thù tại Quy Nhơn, tập trung vào:

- o Khả năng chịu tải và độ ổn định của hệ cọc
- o Hiệu quả kiểm soát độ lún và biến dạng nền đất
- o Ảnh hưởng của mực nước ngầm cao đến chất lượng thi công

**2.1.2 Phân tích hiệu quả kinh tế** thông qua so sánh toàn diện với các phương pháp truyền thống về:

- o Tổng chi phí đầu tư và chi phí vận hành
- o Thời gian thi công và hiệu suất lao động
- o Chi phí bảo trì và tuổi thọ công trình

**2.1.3 Xây dựng quy trình thi công tối ưu** cho cọc khoan nhồi đường kính nhỏ trong điều kiện:

- o Mặt bằng thi công hạn chế
- o Địa chất phức tạp và mực nước ngầm cao
- o Yêu cầu nghiêm ngặt về an toàn cho công trình lân cận

**2.1.4 Đề xuất giải pháp kỹ thuật** nâng cao hiệu quả ứng dụng phương pháp này tại các đô thị ven biển có điều kiện tương tự Quy Nhơn.

### 2.2 Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu áp dụng đa dạng các phương pháp khoa học sau:

#### 2.2.1 Phương pháp khảo sát thực địa:

- o Thu thập mẫu đất tại các độ sâu khác nhau (0-20m) ở 5 vị trí trọng yếu
- o Đo đạc các chỉ tiêu cơ lý đất nền ( $\gamma$ ,  $\phi$ ,  $c$ ,  $E$ ) theo TCVN 4195-2012

- o Quan trắc mực nước ngầm theo mùa bằng hệ thống piezometer

#### 2.2.2 Phương pháp mô hình hóa số:

- o Sử dụng phần mềm Plaxis 2D/3D mô phỏng tương tác cọc - đất nền
- o Phân tích phi tuyến ứng xử của hệ cọc dưới tác dụng tải trọng
- o Đánh giá ảnh hưởng của các thông số thiết kế ( $D$ ,  $L$ , khoảng cách cọc)

**2.2.3 Phương pháp thực nghiệm:**

- o Thí nghiệm tải trọng tĩnh theo ASTM D1143 trên 15 cọc mẫu
- o Kiểm tra chất lượng cọc bằng phương pháp siêu âm (PIT) và động biến dạng nhỏ
- o Thí nghiệm kiểm tra cường độ bê tông cọc tại các độ tuổi khác nhau

**2.2.4 Phương pháp phân tích hệ thống:**

- o Đánh giá đa tiêu chí (MCDA) các phương án thi công
- o Phân tích độ nhạy của các thông số thiết kế
- o Xây dựng ma trận SWOT cho giải pháp đề xuất

**2.2.5 Phương pháp thống kê và xử lý số liệu:**

- o Sử dụng phần mềm SPSS để xử lý số liệu đo đạc
- o Phân tích hồi quy các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng cọc
- o Kiểm định giả thuyết bằng phương pháp ANOVA

**2.3 Tiếp cận nghiên cứu**

Nghiên cứu được thực hiện theo quy trình hệ thống:

1. Đánh giá hiện trạng → 2. Phân tích số liệu → 3. Mô hình hóa → 4. Thực nghiệm hiện trường → 5. Đề xuất giải pháp. Các số liệu được thu thập từ 3 dự án tiêu biểu tại Quy Nhơn trong giai đoạn 2020-2023, đảm bảo tính đại diện và độ tin cậy khoa học.

**2.4 Phạm vi nghiên cứu**

Nghiên cứu tập trung vào:

- Cọc khoan nhồi đường kính 250-300mm
- Độ sâu thi công 12-20m
- Điều kiện địa chất đặc trưng tại Quy Nhơn
- Công trình có 1-2 tầng hầm trong khu vực đô thị

Kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc ứng dụng rộng rãi giải pháp này tại các đô thị ven biển Việt Nam.

**3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ PHÂN TÍCH**

**3.1 Đặc tính địa chất khu vực nghiên cứu**

Khảo sát địa chất tại 5 vị trí trọng điểm ở Quy Nhơn, bao gồm các thông số cơ lý quan trọng của các lớp đất phân bố trong khu vực. Dữ liệu này đóng vai trò then chốt trong việc đánh giá điều kiện nền móng, dự báo khả năng chịu tải và độ lún của công trình, đồng thời hỗ trợ thiết kế giải pháp xử lý nền phù hợp. Dưới đây là phân tích chi tiết các đặc tính địa kỹ thuật của từng lớp đất dựa trên bảng kết quả.

**Bảng 3.1** Trình bày kết quả khảo sát địa chất tại 5 vị trí trọng điểm ở Quy Nhơn:

Lớp đất	Chiều dày (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	c (kPa)	E (MPa)	N <sub>30</sub>
Đất	1.0-	16.8	24	12	4.5	5-8

lấp	2.5					
Sét pha	3.0-6.0	17.5	18	28	6.2	10-15
Cát mịn	2.0-4.0	18.2	30	5	15.8	15-20
Cát trung	>6.0	19.0	32	2	28.5	20-25

Ghi chú:  $\gamma$  - Trọng lượng riêng;  $\phi$  - Góc ma sát trong; c - Lực dính; E - Module đàn hồi; N<sub>30</sub> - Chỉ số SPT

Kết quả khảo sát địa chất tại 5 vị trí trọng điểm ở Quy Nhơn (Bảng 3.1) cho thấy sự phân tầng rõ rệt về tính chất cơ lý của các lớp đất. Lớp đất lấp (dày 1.0–2.5 m) có khả năng chịu tải yếu ( $\gamma = 16.8$  kN/m<sup>3</sup>, N<sub>30</sub> = 5–8) do module đàn hồi thấp (4.5 MPa) và lực dính nhỏ (12 kPa), đòi hỏi xử lý nền trước khi thi công. Lớp sét pha (dày 3.0–6.0 m) với lực dính cao (28 kPa) nhưng góc ma sát trong thấp (18°) dễ gây lún lệch, cần gia cố nếu đặt móng nông. Trong khi đó, hai lớp cát mịn và cát trung thể hiện đặc tính ưu việt: lớp cát mịn ( $\phi = 30^\circ$ , E = 15.8 MPa) phù hợp cho móng băng, còn lớp cát trung ( $\phi = 32^\circ$ , E = 28.5 MPa, N<sub>30</sub> = 20–25) là tầng chịu lực lý tưởng cho móng cọc nhờ chiều dày lớn (>6 m) và độ chặt cao. Kết quả này làm cơ sở đề xuất giải pháp móng tối ưu, đồng thời cảnh báo rủi ro lún tại các lớp đất yếu, đặc biệt khi có tải trọng động hoặc nước ngầm dâng cao.

**3.2 Kết quả thí nghiệm cọc mẫu**

Kết quả thí nghiệm nén tĩnh cọc đơn tại hiện trường cung cấp các thông số quan trọng về khả năng chịu tải, độ lún và hệ số an toàn của ba loại cọc bê tông (C1, C2, C3) với các kích thước và chiều dài khác nhau. Dữ liệu này giúp đánh giá hiệu quả làm việc của cọc trong điều kiện đất nền thực tế, đồng thời kiểm tra mức độ phù hợp giữa tải trọng thiết kế và khả năng thực tế của cọc. Phân tích dưới đây sẽ làm rõ mối quan hệ giữa kích thước cọc, chiều dài cọc, tải trọng thiết kế và độ lún, từ đó đưa ra nhận định về khả năng ứng dụng trong thiết kế móng cọc công trình.

**Bảng 3.2** Kết quả thí nghiệm tải trọng tĩnh (ASTM D1143)

Cọc	D (mm)	L (m)	Tải trọng thiết kế (kN)	Độ lún (mm)	Hệ số an toàn
C1	250	12	400	8.2	2.1
C2	300	15	500	9.5	2.3
C3	300	18	600	11.8	2.0

Kết quả phân tích thí nghiệm nén tĩnh cọc đơn cho thấy khả năng chịu tải của các loại cọc có sự khác biệt rõ rệt theo kích thước và chiều dài. Cọc C2 (D=300mm, L=15m) thể hiện hiệu suất tối ưu nhất khi chịu tải 500kN với độ lún 9.5mm và hệ số an toàn 2.3, cao hơn so với C1 (400kN, 8.2mm, FS=2.1) và ổn định hơn C3 (600kN, 11.8mm, FS=2.0). Mặc dù C3 có khả năng chịu tải lớn nhất nhưng hệ số an toàn ở ngưỡng tối thiểu chấp nhận được, đồng thời độ lún lớn nhất trong nhóm (11.8mm) cho thấy cần thận trọng khi ứng dụng cho công trình yêu cầu

độ ổn định cao. Dữ liệu này khẳng định mối quan hệ tỷ lệ thuận giữa kích thước cọc với khả năng chịu tải, nhưng cũng chỉ ra rằng việc tăng chiều dài cọc quá mức (như trường hợp C3) có thể làm giảm hiệu quả kinh tế-kỹ thuật do hệ số an toàn giảm và độ lún tăng. Kết quả khuyến nghị ưu tiên sử dụng cọc C2 cho các công trình thông thường, trong khi C1 phù hợp với hạng mục phụ trợ và C3 cần được đánh giá bổ sung về điều kiện địa chất tầng sâu trước khi áp dụng.

### 3.3 Chất lượng cọc kiểm tra bằng PIT

Kết quả kiểm tra chất lượng cọc bằng phương pháp siêu âm (PIT) và đánh giá hiệu quả kiểm soát độ lún cung cấp những thông tin quan trọng về chất lượng thi công và khả năng làm việc thực tế của hệ thống cọc. Phân tích dưới đây sẽ làm rõ mối quan hệ giữa tốc độ sóng siêu âm, tỷ lệ khuyết tật với chất lượng cọc, đồng thời đánh giá hiệu quả công tác kiểm soát độ lún trong quá trình thi công.

**Bảng 3.3** Kết quả kiểm tra chất lượng bằng phương pháp siêu âm

Vị trí	Tốc độ sóng (m/s)	Đánh giá	Tỷ lệ khuyết tật (%)
Cọc 1-5	3800-4100	Tốt	<5%
Cọc 6-10	3500-3790	Khá	5-10%
Cọc 11-15	3200-3490	Đạt yêu cầu	10-15%

Kết quả kiểm tra chất lượng cọc bằng phương pháp siêu âm (PIT) cho thấy sự phân hóa rõ rệt về chất lượng giữa các nhóm cọc. Nhóm cọc 1-5 đạt chất lượng tốt nhất với tốc độ sóng siêu âm từ 3800-4100 m/s và tỷ lệ khuyết tật dưới 5%, chứng tỏ quá trình thi công được kiểm soát tốt và vật liệu đạt chất lượng cao. Nhóm cọc 6-10 có chất lượng khá với tốc độ sóng 3500-3790 m/s và tỷ lệ khuyết tật 5-10%, vẫn đảm bảo yêu cầu kỹ thuật nhưng cần lưu ý trong quá trình sử dụng. Đáng chú ý là nhóm cọc 11-15 chỉ đạt mức yêu cầu tối thiểu với tốc độ sóng 3200-3490 m/s và tỷ lệ khuyết tật 10-15%, điều này cho thấy khả năng tồn tại các khiếm khuyết trong cấu trúc cọc. Kết quả kiểm soát độ lún cho thấy mối tương quan rõ rệt giữa chất lượng cọc và độ lún, trong đó các cọc chất lượng tốt có độ lún thấp hơn 15-20% so với cọc chất lượng trung bình. Điều này khẳng định tầm quan trọng của công tác kiểm tra chất lượng trong việc đảm bảo hiệu quả làm việc của hệ thống móng cọc. Nhóm cọc 11-15 cần được theo dõi đặc biệt và xem xét các biện pháp xử lý bổ sung nếu cần thiết để đảm bảo an toàn cho công trình.

### 3.4 Hiệu quả kiểm soát độ lún

Quan trắc độ lún tại các công trình lân cận trong quá trình thi công móng cọc cung cấp những thông tin quan trọng về hiệu quả của các biện pháp kiểm soát lún. Phân tích dưới đây sẽ đánh giá mức độ ảnh hưởng của thi công đến các công trình xung quanh thông qua các chỉ số độ lún tối đa và thời gian ổn định, đồng thời so sánh với tiêu chuẩn cho phép theo TCVN 9362.

**Bảng 3.4** Kết quả quan trắc độ lún công trình lân cận

Dự án	Vị trí	Độ lún max (mm)	Thời gian ổn định	Tiêu chuẩn (TCVN 9362)
Chung cư A1 - Nguyễn Tất Thành	M1	3.2	25	≤5mm
TTTM Chợ lớn - Quy Nhơn	M2	4.1	30	≤5mm
Anya Premier Hotel	M3	2.8	20	≤5mm

Kết quả quan trắc độ lún tại các công trình lân cận (Bảng 3.4) cho thấy hiệu quả tích cực của các biện pháp kiểm soát lún trong quá trình thi công. Cả ba vị trí quan trắc đều có độ lún tối đa (2.8-4.1mm) nằm dưới giới hạn cho phép theo TCVN 9362 (≤5mm), trong đó Anya Premier Hotel (M3) ghi nhận độ lún thấp nhất (2.8mm) và thời gian ổn định ngắn nhất (20 ngày), chứng tỏ nền đất tại đây có khả năng ổn định nhanh. Trong khi đó, TTTM Chợ lớn (M2) có độ lún cao nhất (4.1mm) và thời gian ổn định dài nhất (30 ngày), phản ánh ảnh hưởng của điều kiện địa chất phức tạp hoặc tải trọng công trình lớn hơn. Kết quả này khẳng định các biện pháp thi công hiện tại đã đảm bảo an toàn cho công trình lân cận với hệ số an toàn từ 1.28 đến 1.79, đồng thời chỉ ra sự cần thiết phải tiếp tục giám sát chặt chẽ đối với các vị trí có độ lún gần sát giới hạn cho phép như M2 để kịp thời điều chỉnh biện pháp thi công khi cần thiết.

### 3.5 Phân tích hiệu quả kinh tế - kỹ thuật

Việc lựa chọn phương pháp thi công cọc phù hợp đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo hiệu quả kinh tế và kỹ thuật của công trình. Bảng 3.5 cung cấp dữ liệu so sánh giữa 3 phương pháp thi công phổ biến: cọc ép, cọc Barrette và cọc khoan nhồi D nhỏ. Phân tích dưới đây sẽ đánh giá ưu nhược điểm của từng phương pháp dựa trên các tiêu chí chi phí, thời gian thi công, độ lún, yêu cầu mặt bằng và mức độ ồn.

**Bảng 3.5** So sánh các phương pháp thi công

Chỉ tiêu	Cọc ép	Cọc Barrette	Cọc khoan nhồi D nhỏ
Chi phí (triệu VND/m)	3.5	4.2	2.8
Thời gian (ngày/100 cọc)	45	60	30
Độ lún max (mm)	8.0	6.5	3.2
Mặt bằng yêu cầu (m <sup>2</sup> )	150	200	80

Mức độ ồn (dB)	85	75	65
----------------	----	----	----

Kết quả phân tích hiệu quả kinh tế - kỹ thuật của ba phương pháp thi công cọc cho thấy cọc khoan nhồi D nhỏ là giải pháp tối ưu nhất khi đạt được sự cân bằng giữa chi phí (2.8 triệu VND/m), thời gian thi công (30 ngày/100 cọc) và chất lượng kỹ thuật (độ lún chỉ 3.2mm). Phương pháp này không chỉ tiết kiệm được 20-33% chi phí so với cọc ép và cọc Barrette mà còn yêu cầu diện tích mặt bằng nhỏ nhất (80m<sup>2</sup>) và gây ít tiếng ồn nhất (65dB), đặc biệt phù hợp với các công trình trong đô thị. Trong khi đó, cọc ép tuy có chi phí trung bình (3.5 triệu VND/m) nhưng gây độ lún lớn (8.0mm) và tiếng ồn cao (85dB), còn cọc Barrette dù cho độ lún tốt hơn (6.5mm) nhưng có chi phí cao nhất (4.2 triệu VND/m) và thời gian thi công lâu nhất (60 ngày). Như vậy, tùy theo điều kiện cụ thể của từng công trình mà có thể lựa chọn phương pháp phù hợp, trong đó cọc khoan nhồi D nhỏ được ưu tiên cho các dự án cần tối ưu cả về kinh tế lẫn kỹ thuật, đặc biệt ở những khu vực có không gian hạn chế và yêu cầu nghiêm ngặt về tiếng ồn.

### 3.6 Phân tích SWOT giải pháp

Phân tích SWOT là công cụ quan trọng để đánh giá toàn diện giải pháp thi công trong không gian hẹp. Ma trận SWOT (Bảng 3.6) cung cấp cái nhìn hệ thống về các yếu tố nội bộ (điểm mạnh, điểm yếu) và yếu tố bên ngoài (cơ hội, thách thức) ảnh hưởng đến hiệu quả của giải pháp.

**Bảng 3.6** Ma trận SWOT đánh giá giải pháp

Điểm mạnh (S)	Điểm yếu (W)
<ul style="list-style-type: none"> <li>Thi công trong không gian hẹp</li> <li>Giảm 30% thời gian</li> <li>Kiểm soát độ lún &lt;5mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yêu cầu cao về tay nghề công nhân</li> <li>Chi phí thiết bị ban đầu cao</li> <li>Phụ thuộc vào chất lượng dung dịch bentonite</li> </ul>
Cơ hội (O)	Thách thức (T)
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nhu cầu xây dựng ngầm tăng</li> <li>Chính sách phát triển đô thị</li> <li>Tiềm năng ứng dụng rộng rãi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cạnh tranh với công nghệ mới</li> <li>Rủi ro địa chất phức tạp</li> <li>Quy chuẩn thi công chưa hoàn thiện</li> </ul>

Kết quả phân tích bảng 3.6. nêu rõ giải pháp thi công trong không gian hẹp thể hiện nhiều ưu điểm nổi bật về khả năng thích ứng với môi trường đô thị chật hẹp (S1), rút ngắn 30% thời gian thi công (S2) và kiểm soát tốt độ lún dưới 5mm (S3). Tuy nhiên, giải pháp này cũng bộc lộ một số hạn chế đáng kể như yêu cầu cao về tay nghề công nhân (W1), chi phí đầu tư thiết bị ban đầu lớn (W2) và sự phụ thuộc vào chất lượng dung dịch bentonite (W3). Về cơ hội phát triển, nhu cầu ngày càng tăng đối với các công trình ngầm (O1) cùng với sự hỗ trợ từ chính sách phát triển đô thị (O2) tạo điều kiện thuận lợi để mở rộng ứng

dụng phương pháp này (O3). Tuy vậy, giải pháp cũng đối mặt với những thách thức không nhỏ từ sự cạnh tranh của công nghệ mới (T1), rủi ro địa chất phức tạp (T2) và hệ thống quy chuẩn thi công chưa hoàn thiện (T3). Để phát huy tối đa hiệu quả, cần tập trung đào tạo nâng cao tay nghề công nhân, giảm thiểu sự phụ thuộc vào bentonite, đồng thời chủ động nghiên cứu ứng dụng công nghệ mới nhằm nâng cao năng lực cạnh tranh và giảm thiểu rủi ro trong thi công.

## 4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### 4.1 Kết luận

Nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả vượt trội của giải pháp cọc khoan nhồi đường kính nhỏ ( $D \leq 300$  mm) trong thi công tầng hầm tại Quy Nhơn, đặc biệt trong điều kiện địa chất phức tạp với lớp đất yếu, mực nước ngầm cao (1.5–3 m) và không gian thi công hạn chế. Các kết quả nổi bật bao gồm:

Kiểm soát độ lún dưới 5 mm (đạt TCVN 9362), giảm 30% rung động và tiếng ồn so với phương pháp truyền thống.

Khả năng thích ứng cao với địa chất đa dạng nhờ sử dụng dung dịch bentonite ổn định thành hố khoan.

Tiết kiệm 20–25% chi phí nhờ giảm vật tư và thời gian thi công (30 ngày/100 cọc)

Giảm 40% diện tích mặt bằng thi công (chỉ cần 80 m<sup>2</sup>) so với cọc ép hoặc Barrette.

Giảm thiểu tác động đến công trình lân cận, phù hợp với quy hoạch đô thị chật hẹp.

### 4.2 Kiến nghị

Ưu tiên sử dụng cọc khoan nhồi D nhỏ cho các dự án cao tầng 1–2 tầng hầm tại Quy Nhơn và đô thị ven biển tương tự.

Kết hợp hệ thống tường vây + neo phụ để tăng ổn định hố đào trong điều kiện nước ngầm cao.

Đầu tư đào tạo công nhân kỹ thuật cao, chuẩn hóa quy trình thi công.

Nghiên cứu thay thế một phần bentonite bằng vật liệu thân thiện môi trường.

Xây dựng quy chuẩn riêng cho thi công cọc khoan nhồi D nhỏ trong điều kiện địa chất đặc thù.

Khuyến khích ứng dụng công nghệ giám sát độ lún thời gian thực (IoT) để giảm rủi ro.

## 5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bộ Xây dựng (2012). TCVN 9362:2012 - Tiêu chuẩn thiết kế nền nhà và công trình. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [2] Bộ Xây dựng (2015). TCVN 9393:2012 - Cọc khoan nhồi - Thi công và nghiệm thu. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [3] ASTM International (2018). ASTM D1143-20: Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load.
- [4] Das, B. M. (2019). Principles of Foundation Engineering (9th Edition). Cengage Learning.
- [5] Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). Pile Foundation Analysis and Design. John Wiley & Sons.

[6] Tomlinson, M. J. (2001). Foundation Design and

Construction (7th Edition). Pearson Education.