



Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <https://jmes.humg.edu.vn>



Tunnel-pile interaction: a review

Tien Tai Nguyen^{1,2*}, Vi Van Pham³

¹ Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

² Tunnelling and Underground Space Research Group, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

³ Electric Power University, Hanoi, Vietnam



ARTICLE INFO

Article history:

Received 27th Jul. 2025

Revised 21st Nov. 2025

Accepted 11th Dec. 2025

Keywords:

Interaction,
Pile,
Review,
Tunnel.

ABSTRACT

Tunnel-pile interaction is a key concern in geotechnical research due to the significant impact of tunnelling on the stress and deformation of the soil, as well as on surface structures. Tunnel excavation, especially at shallow depths, often causes ground settlement or heave, which affects the stability of existing structures and their pile foundations. Research on tunnel-pile interaction is conducted through analytical, numerical, and experimental methods. In analytical approaches, a two-step procedure is commonly applied: first, the ground displacement without piles is determined, followed by the analysis of the pile response. Experimental methods include physical modeling under 1g and centrifuge conditions, as well as full-scale prototypes. Full-scale models and field measurements provide real data on pile and soil deformation, which are essential for validating numerical and analytical models. Numerical modeling is widely used due to its ability to fully simulate the tunnelling process using a shield machine and the complex tunnel-pile interactions. It provides a balance between cost, accuracy, and flexibility, making it a powerful tool in both research and design. This paper reviews existing research methods and identifies potential research directions to enhance the accuracy of analysis and design of pile foundation structures.

Copyright © 2026 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: taitien12@gmail.com

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(1).01



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <https://tapchi.humg.edu.vn>



Nghiên cứu tổng quan về tương tác giữa đường hầm và cọc

Nguyễn Tài Tiến^{1,2 *}, Phạm Văn Vĩ³

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

² Nhóm nghiên cứu mạnh Xây dựng hầm và không gian ngầm, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

³ Trường Đại học Điện lực, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 27/7/2025

Sửa xong 21/11/2025

Chấp nhận đăng 11/12/2025

Từ khóa:

Đường hầm,

Móng cọc,

Tổng quan,

Tương tác.

TÓM TẮT

Tương tác giữa đường hầm và cọc là một chủ đề quan trọng trong nghiên cứu địa kỹ thuật, do ảnh hưởng lớn của việc đào hầm đến trạng thái ứng suất và biến dạng của đất cũng như các công trình trên mặt đất. Đào hầm thường gây lún hoặc đẩy trồi bề mặt đất, đặc biệt khi hầm ở độ sâu nhỏ, ảnh hưởng đến sự ổn định của công trình bề mặt và kết cấu móng cọc của chúng. Nghiên cứu tương tác đường hầm - cọc được thực hiện thông qua các phương pháp giải tích, mô hình số và thực nghiệm. Quy trình hai bước thường được áp dụng trong phương pháp giải tích: xác định chuyển vị đất không có cọc, sau đó phân tích ứng xử của cọc. Phương pháp thực nghiệm bao gồm mô hình vật lý (1g và ly tâm) trong phòng thí nghiệm và mô hình nguyên mẫu. Gần đây, mô hình số được sử dụng rộng rãi vì khả năng mô phỏng toàn diện quá trình đào hầm bằng máy khiên đào và tương tác phức tạp giữa khối đất và kết cấu. Phương pháp này tạo ra sự cân bằng giữa chi phí, độ chính xác và tính linh hoạt, khiến nó trở thành một công cụ mạnh mẽ trong cả nghiên cứu và thiết kế. Bài báo tổng hợp các phương pháp nghiên cứu hiện có, đồng thời nêu ra các hướng nghiên cứu tiềm năng nhằm cải thiện độ chính xác trong phân tích và thiết kế kết cấu móng của các công trình bề mặt chịu ảnh hưởng của đường hầm.

© 2026 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ

E - mail: taitien12@gmail.com

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(1).01

1. Mở đầu

Sự tương tác giữa cọc và đường hầm là một chủ đề quan trọng của nghiên cứu địa kỹ thuật do sự gia tăng nhanh chóng của hạ tầng ngầm ở đô thị, đặc biệt ở các đô thị lớn. Hoạt động xây dựng hầm, dẫn tới sự thay đổi trạng thái và phân bố lại trạng thái ứng suất của đất đá xung quanh đường hầm (Lim và nnk., 2023). Sự thay đổi ứng suất kèm theo sự dịch chuyển của đất đá xung quanh đường hầm và gây lún/đẩy trồi bề mặt đất, đặc biệt ảnh hưởng đến các công trình trên bề mặt cũng như kết cấu móng của chúng. Tương tác giữa kết cấu cọc và đường hầm phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố như tính chất cơ lý của đất, các tham số của cọc, vị trí tương quan giữa đường hầm (Rehman và nnk., 2024; Kong và nnk., 2021) và công nghệ thi công đường hầm (Zhou và nnk., 2024).

Có nhiều nghiên cứu về vấn đề tương tác giữa cọc và đường hầm sử dụng các phương pháp số, phương pháp giải tích, phương pháp nghiên cứu thực nghiệm và đo đạc hiện trường. Khi sử dụng phương pháp số để nghiên cứu tương tác giữa đường hầm - đất - cọc, các phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và sai phân hữu hạn (FDM) được sử dụng rộng rãi. Các mô hình đơn giản hóa như Mô hình lò xo Winkler, phương pháp phần tử biên (BEM) thường được sử dụng trong phương pháp giải tích (Abd-Elhamed, 2021; Li và nnk., 2023; Zhang và nnk., 2019; Zhang và nnk., 2018). Các mô hình thực nghiệm với quy mô lớn và nhỏ (Lim và nnk., 2023) được xây dựng để mô phỏng các điều kiện thực tế, các kết quả thu được từ mô hình có thể được sử dụng để kiểm chứng các mô hình số hoặc mô hình giải tích. Đo đạc hiện trường tại các công trình thực tế thường được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của việc xây dựng đường hầm đến công trình hoặc ngược lại, các kết quả thường được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng, tác động qua lại giữa đường hầm và công trình trong điều kiện thực tế, giám sát, đánh giá rủi ro,... Ở Việt Nam, các nghiên cứu chủ yếu sử dụng mô hình số để đánh giá ảnh hưởng của việc thi công đường hầm đến lún bề mặt tại khu vực có công trình trên bề mặt và móng của chúng (Nguyễn & Nguyễn, 2012; Lê, 2019; Do và nnk., 2021).

Mục tiêu của bài báo này là tổng hợp, hệ thống hóa các phương pháp nghiên cứu và các hướng nghiên cứu trong tương tác giữa đường

hầm và móng cọc, đồng thời chỉ ra các xu hướng nghiên cứu tiềm năng trong tương lai.

2. Các phương pháp nghiên cứu tương tác đường hầm - cọc

2.1. Phương pháp giải tích

Phương pháp nghiên cứu hai giai đoạn thường được sử dụng để nghiên cứu tương tác giữa đường hầm - cọc. Quy trình bao gồm hai bước như sau (Franza và nnk., 2017; Basile, 2014):

- Xác định chuyển vị đất khi đào hầm trong trường hợp không có cọc và các công trình trên bề mặt. Chuyển vị của đất có thể được xác định theo các công thức thực nghiệm, giải tích hoặc kết quả thu được từ các mô hình số 2D, 3D.

- Phân tích nội lực và chuyển vị của cọc, trên cơ sở chuyển vị đất xung quanh cọc đã tính toán ở bước một.

Nội lực và chuyển vị của cọc có thể được xác định thông qua các mô hình như: Mô hình lò xo Winkler hoặc mô hình liên tục.

2.1.1. Phương pháp phần tử biên (mô hình liên tục)

Trong phương pháp này, cọc được định nghĩa là một dầm đàn hồi và môi trường đất được coi là dầm hồi liên tục (Poulos và Davis, 1980). Cọc được chia thành nhiều phần tử, chuyển vị của mỗi phần tử cọc phụ thuộc vào độ cứng chống uốn của cọc và ứng suất theo phương ngang do tương tác giữa cọc và đất, chuyển vị của đất trong trường hợp không có cọc. Trong trạng thái đàn hồi, chuyển vị gia tăng của đất tại phần tử thứ i , $\Delta\rho_{si}$ có thể xác định như sau (Poulos, 1989):

$$\Delta\rho_{si} = \sum_{j=1}^m \frac{I_{ij}}{k_{sij}} \cdot \Delta p_j + \Delta S_{ei} \quad (1)$$

Trong đó: Δp_j - ứng suất tương tác giữa cọc-đất gia tăng; ΔS_{ei} - chuyển vị do ảnh hưởng yếu tố bên ngoài (do đào hầm) gia tăng tại phần tử i ; I_{ij} - hệ số ảnh hưởng chuyển vị của phần tử i do phần tử j ; k_{sij} - độ cứng của đất của phần tử i do phần tử j .

Từ phương trình tính toán chuyển vị gia tăng của cọc và của đất, và điều kiện cân bằng chuyển vị theo phương thẳng đứng, có thể xác định được ứng suất gia tăng của cọc - đất xung quanh. Kết quả là có thể xác định chuyển vị của cọc ở mỗi nút của phần tử.

2.1.2. Mô hình lò xo Winkler

Trong phương pháp này, đất được mô phỏng là một loạt các lò xo đàn hồi, độ cứng của các lò xo này đặc trưng bởi mô đun phản lực nền (Hình 1). Cọc được mô phỏng là phần tử dầm liên kết với các lò xo tại các nút, chuyển vị của đất nền do ảnh hưởng của công tác đào hầm được coi là tải trọng bên ngoài tác dụng lên phần tử dầm. Phương trình cân bằng với một cọc đơn có dạng (Poulos và Davis, 1974, 1980):

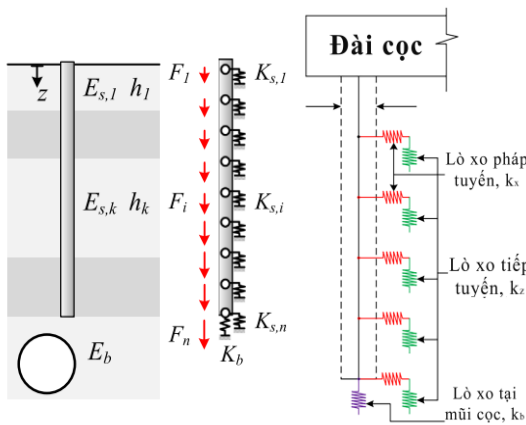
$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + k_x y(z) = k_x \cdot y_0(z) \quad (2)$$

Trong đó: E, I - Mô đun đàn hồi và mô đun chống uốn mặt cắt của cọc; $y(z)$ - chuyển vị của cọc tại độ sâu z ; k_x - Mô đun phản lực nền theo phương ngang; $y_0(z)$ - chuyển vị của đất do việc đào hầm tại độ sâu z .

Vesic (1961) nghiên cứu một dầm ngang vô hạn trên nền đàn hồi và so sánh với những kết quả thu được từ lý thuyết phản lực nền, đã xác định được mối quan hệ giữa mô đun phản lực nền k_x với các tham số Mô đun đàn hồi (E_s) và hệ số Poisson ν_s) của đất như sau:

$$k_x = \frac{0,65 E_s}{d_p (1 - \nu_s^2)} \sqrt{\frac{d_p^4 E_s}{E_p I_p}} \quad (3)$$

Trong đó: d_p - đường kính của cọc; E_p - mô đun đàn hồi vật liệu làm cọc; I_p - mô men quán tính của cọc.



Hình 1. Mô hình lò xo Winkler a) tương tác giữa đường hầm và cọc đơn (Franza và nnk., 2017) b) cọc và đất (Magade và Ingle, 2019).

Để giải phương trình trên cần xác định chuyển vị của đất do ảnh hưởng của công tác xây dựng đường hầm và các điều kiện biên của cọc, trong đó có hai điều kiện biên tại đầu cọc (tự do -

xoay tự do và cố định - không xoay) và hai điều kiện biên tại mũi cọc (tự do - không chuyển vị, xoay tự do và cố định - không chuyển vị, không xoay) (Poulos và Davis, 1974). Kết quả nhận được từ phương trình (2) là chuyển vị của cọc tại $y(z)$ từ đó sẽ xác định được nội lực sinh ra trong cọc.

Theo Randolph và Wroth (1978) khi xem xét chuyển vị theo phương thẳng đứng (dọc trục), thì đất xung quanh cọc có thể được biểu diễn thông qua các lò xo tiếp tuyến, độ cứng của lò xo này, k_z được xác định theo công thức (4-a). Bên cạnh đó, mũi cọc được mô tả như là một đĩa tròn cứng tác dụng lên nền đàn hồi đồng nhất với độ cứng, k_b (công thức 4-b) (Randolph và Wroth, 1979):

$$k_z = \frac{2\pi G_s}{\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)} \quad (4-a)$$

$$k_b \approx \frac{d_p E_s}{(1 - \nu_b^2)} \quad (4-b)$$

Trong đó: G_s - Mô đun trượt của đất; r_m - bán kính ảnh hưởng của cọc; r_0 - bán kính của cọc; ν_b - hệ số Poisson của vật liệu làm cọc.

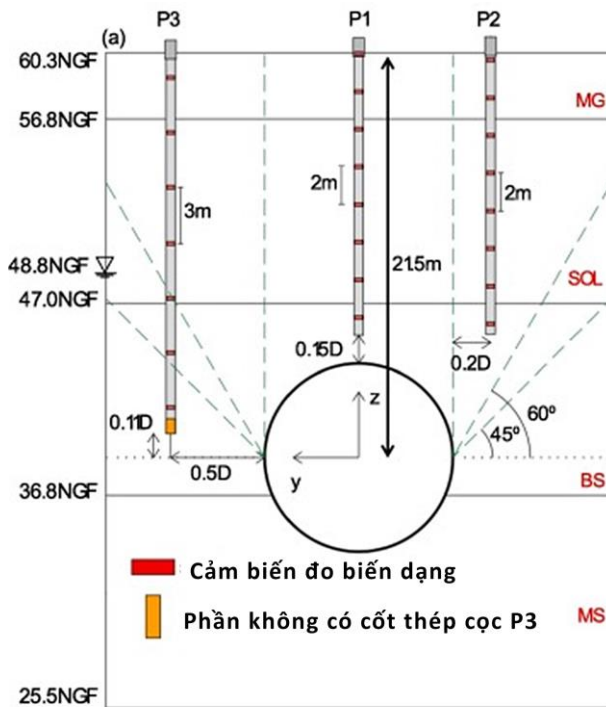
2.2. Phương pháp sử dụng mô hình thực nghiệm

Khi nghiên cứu tương tác giữa đường hầm và cọc bằng mô hình thực nghiệm, các tác giả thường sử dụng các mô hình vật lý (Sohaei và nnk., 2020; Lee và Bassett, 2007; Guo và nnk., 2025; He và nnk., 2022), mô hình lý tâm (Ng và nnk., 2013, 2014; Soomro và nnk., 2024; Song, 2019), mô hình nguyên mẫu 1:1 và thực nghiệm hiện trường (Berthoz và nnk., 2023; Mohamad và nnk., 2022; Khoo và nnk., 2025) (Pang và nnk., 2006; Liu và nnk., 2014). Các mô hình vật lý được xây dựng để thực hiện các thí nghiệm không có gia tốc trọng trường nhân tạo (1g). Các mô hình này có ưu điểm dễ thực hiện, chi phí thấp (Momeni và nnk., 2017), dễ kiểm soát thông số và quan sát trực tiếp. Tuy nhiên, do mô hình thu nhỏ nên ứng suất trong mô hình có thể không phản ánh chính xác ứng suất thực tế và không mô phỏng được ảnh hưởng của tải trọng thực tế (Viswanadham, 2016; Momeni và nnk., 2017). Để khắc phục nhược điểm của mô hình vật lý, mô hình lý tâm được sử dụng, mô hình vật lý sẽ được đặt trong máy lý tâm quay với tốc độ cao để tạo ra gia tốc trọng trường nhân tạo. Dưới tác động của lực ly tâm, ứng suất trong mô hình thu nhỏ có thể phản ánh chính xác so với ứng suất trong môi trường thực tế (Taylor, 1994;

Meguid và nnk., 2008; Idinge và nnk., 2011). Nhược điểm của mô hình ly tâm là chi phí lớn do phải đầu tư các thiết bị chuyên dụng. Mặt khác, việc lắp đặt và kiểm soát mô hình sẽ phức tạp hơn.

Các cảm biến thường được sử dụng trong thực nghiệm hiện trường và trên mô hình nguyên mẫu để thu thập các số liệu về lún mặt đất, chuyển vị của cọc và đất xung quanh cọc, sự thay đổi nội lực của cọc do có sự tương tác với đường hầm. Kết quả đo đạc từ các cảm biến thường được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của việc đào đường hầm đến kết cấu cọc cũng như độ ổn định của chúng.

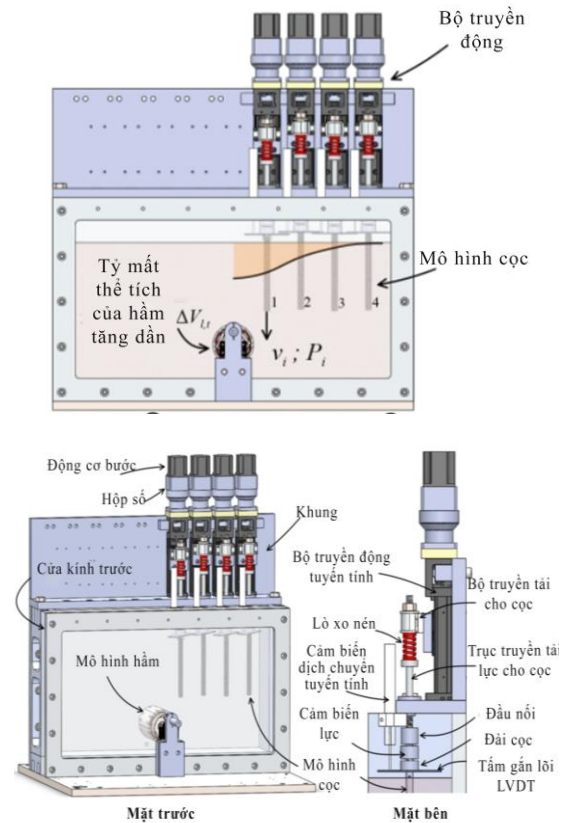
Mohamad và nnk. (2022) nghiên cứu một mô hình nguyên mẫu để đánh giá ảnh hưởng của việc thi công đường hầm đến kết cấu cọc. Ba cọc bê tông cốt thép đổ tại chỗ với đường kính 500mm được xây dựng xung quanh khu vực đường hầm đi qua với chiều dài cọc khác nhau, các cảm biến được lắp đặt dọc theo chiều dài cọc (Hình 2). Kết quả cho thấy, ứng xử của cọc thay đổi tùy thuộc vào vị trí cọc so với đường hầm, sự thay đổi lớn xảy ra khi máy đào hầm đi qua vị trí của cọc.



Hình 2. Vị trí giữa cọc và đường hầm trong mô hình thực nghiệm tỷ lệ 1:1 của Mohamad và nnk. (2022).

Trong nghiên cứu của Song (2019), các cọc được mô phỏng bằng các thanh thép được đặt vào mô hình với độ sâu 140 mm trong điều kiện 1g, từ trung tâm ra ngoài. Các cọc này được kết nối với bộ truyền tải trọng được gắn trên khung mô hình (Hình 3). Tiếp theo, hệ thống kiểm soát độ mất thể tích (VL) và hệ thống cảm biến được lắp đặt. Trong đó, VL là tỷ lệ giữa thể tích đất bị mất khi đào hầm, xác định thông qua độ lún bề mặt và thể tích mất cắt ngang đường hầm (Peck, 1969). Một tải trọng cố định 5N tác dụng lên đầu cọc trong quá trình tăng tốc ly tâm lên 80g. Sau đó, các cọc được gia tải tới tải trọng làm việc (255N với cọc 1 và 4, 370N với cọc 2, 3). Bốn trường hợp đã được thực hiện: 1) Tải trọng cọc; 2) Tải trọng cố định trên nhóm cọc, $VL=2,2\%$; 3) Nhóm cọc khi xem xét độ cứng kết cấu (khung thép mô phỏng 5 tầng) và $VL=2,2\%$; 4) Nhóm cọc khi xem xét độ cứng kết cấu và $VL=3,2\%$.

Kết quả về độ lún, lực dọc trục trong cọc và sự truyền tải giữa các cọc do chuyển vị của đất sinh ra trong quá trình đào hầm được ghi nhận bằng hệ



Hình 3. Mô hình ly tâm (Song, 2019).

thống cảm biến. Kết quả cho thấy, khi tăng tải trọng đầu cọc thì lực dọc theo chiều dài cọc tăng lên. Tại phần trên của cọc, lực dọc không thay đổi nhiều so với lực dọc tại đầu cọc. Tại phần giữa và phần dưới của cọc, lực dọc giảm theo chiều sâu. Khi tăng độ mất thể tích đất VL, tải trọng đầu cọc số 1 giảm. Tải trọng này sẽ truyền sang cọc liền kề, cọc số 2, làm tăng tải trọng lên đầu cọc cũng như độ lún đầu cọc. Mức tăng tải trọng ở đầu cọc có xu hướng giảm dần từ cọc số 3 và 4.

2.3. Mô hình số

Mô hình số là phương pháp nghiên cứu chủ đạo trong lĩnh vực địa kỹ thuật, trong đó có các bài toán phân tích về tương tác giữa đường hầm và cọc. So với các phương pháp giải tích và phương pháp thực nghiệm chúng có nhiều ưu điểm như: (1) có thể mô phỏng nhiều mô hình biến dạng của đất khác nhau (MC, HS, HSS, Cam-clay,...); (2) có thể mô phỏng các tương tác phức tạp giữa đường hầm và cọc (cọc đơn, nhóm cọc; hình dạng, kích thước và khoảng các đường hầm khác nhau); (3) có thể mô phỏng các giai đoạn thi công của đường hầm; (4) nhanh hơn và chi phí thấp hơn. Mặc dù có nhiều ưu điểm, tuy nhiên các mô hình số cũng có một số hạn chế như: cần phải hiệu chuẩn hoặc kiểm tra với các dữ liệu đo đạc hiện trường hoặc thực nghiệm; đòi hỏi các tài nguyên tính toán lớn với các mô hình phức tạp.

Có nhiều mô hình số khác nhau được sử dụng để nghiên cứu tương tác giữa đường hầm và cọc như phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), phương pháp phần tử rời rạc (DEM) (Zhao và nnk., 2024; Zhu và nnk., 2023; Wang và nnk.,

2024; Liu và nnk., 2022), phương pháp phần tử biên (BEM) (Surjadinata và nnk., 2006; Stacul và Squeglia, 2018).

3. Nghiên cứu tương tác đường hầm và cọc

Các nghiên cứu thường tập trung vào hai đối tượng chính là đường hầm và cọc, bao gồm: ảnh hưởng của cọc đến ứng xử của kết cấu đường hầm (Kong và nnk., 2021; Gao và nnk., 2019; Yang và nnk., 2022; Prateep Lueprasert, 2017; Ayasrah và nnk., 2023) và ảnh hưởng của thi công hầm đến kết cấu cọc. Khi nghiên cứu ứng xử của kết cấu cọc chịu ảnh hưởng của công tác thi công đường hầm các yếu tố thường được xét đến như: 1- vị trí tương quan giữa đường hầm và kết cấu cọc. 2- tính chất của đất xung quanh kết cấu cọc và đường hầm.

3.1. Vị trí tương quan giữa hầm và kết cấu cọc

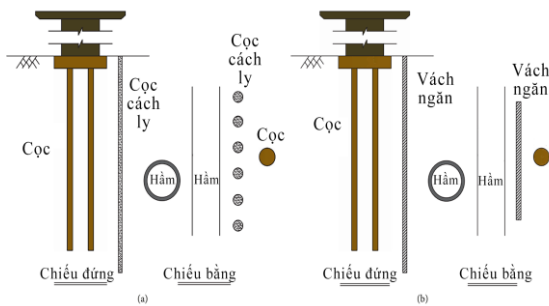
Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của vị trí tương đối giữa đường hầm và cọc (Bảng 1): đường hầm nằm dưới mũi cọc (Jongpradist và nnk., 2013); đường hầm nằm ngang với thân cọc (Al-Omari và nnk., 2019; Li và nnk., 2021) và cọc nằm giữa hai đường hầm (Lu và nnk., 2020; Mangi và nnk., 2020; Phutthananon và nnk., 2023). Kết quả cho thấy rằng vị trí tương đối giữa hầm và cọc yếu tố quyết định đến mức độ tương tác. Khi đường hầm nằm ngay bên dưới hoặc gần đầu cọc (trong phạm vi nhỏ hơn $1,5 \div 2$ lần đường kính hầm), chuyển vị ngang và nội lực trong cọc (đặc biệt là mômen uốn) tăng đáng kể (Soomro và nnk., 2017;

Bảng 1. Tổng hợp các nghiên cứu về ảnh hưởng của đường hầm đến cọc.

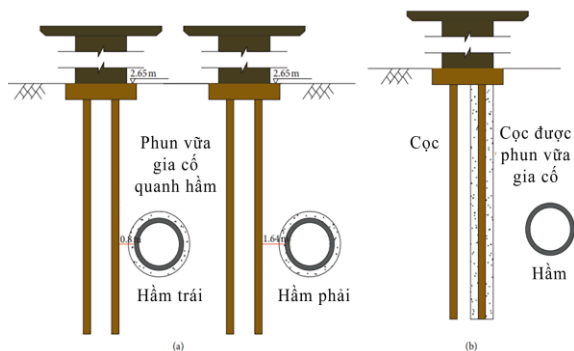
Tác giả	C/D	E/D	y/D	Mô hình	Ghi chú
Jongpradist, (2013)	-	0; 0,5; 0,75; 1,25; 1,5; 2; 2,5; 3,5	-	Mô hình số	
C.W.W. Ng và nnk. (2014)	1,5; 2,75; 3,7	0,75	-1; +0,5; 1,5	Mô hình lý tâm	Hầm đôi, nhóm cọc
Soomro và nnk (2017)	1,5; +0,5; 5,5	0,92	-	Mô hình số	Hầm đôi, cọc đơn
Al-Omar và nnk. (2019)	0,16; 0,5, 0,75; 2; 3	0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0	-5; +0,5; 5	Mô hình số	Hầm đơn, cọc đơn, nhóm cọc
Li và nnk. (2021)	1	0,62; 0,92	-	Mô hình số	Hầm đơn
Ayasrah và nnk. (2023)	1,32; 2,41; 3,61	-	-	Mô hình số	Hầm đơn, cọc đơn
Zhao và nnk. (2024)	-	1; 1,5; 2; 2,5; 3	-	Mô hình số	Ba hầm, cọc đơn

Jongpradist và nnk., 2013), điều này cũng tương tự trong trường hợp cọc ở phía trước và phía sau đường hầm (theo phương dọc trục (Lee C., 2012). Ảnh hưởng này giảm mạnh khi khoảng cách theo phương ngang giữa hầm và cọc vượt quá $2,5 \div 3D$ (Al-Omari và nnk., 2019). Ngoài ra, cọc bố trí theo phương ngang trục hầm chịu tác động lớn hơn so với khi bố trí dọc theo trục hầm, do vùng ảnh hưởng của biến dạng đất mở rộng hơn (Al-Omari và nnk., 2019; Tian và nnk., 2025). Mô phỏng số và thí nghiệm lý tâm đều xác nhận rằng lún và chuyển vị lớn nhất xảy ra khi cọc nằm ngay trên hầm (Selemetas, 2005; Marshall và Mair, 2011). Các nghiên cứu cũng khuyến nghị duy trì khoảng cách tối thiểu từ cọc đến hầm ít nhất từ $2D$ đến $2.5D$ để đảm bảo an toàn kết cấu (Su và nnk., 2025).

Ngoài ra, để giảm thiểu tương tác do thi công đường hầm đến các công trình trên bề mặt và kết cấu móng của chúng, một kết cấu tường chắn bảo vệ hoặc hàng cọc cách ly được sử dụng (Hình 4) (Song, 2019; Huang và nnk., 2022). Bên cạnh đó còn có các phương pháp gia cố đất xung quanh



Hình 4. Sơ đồ cách ly giữa hầm và nhóm cọc (Li và nnk., 2020).

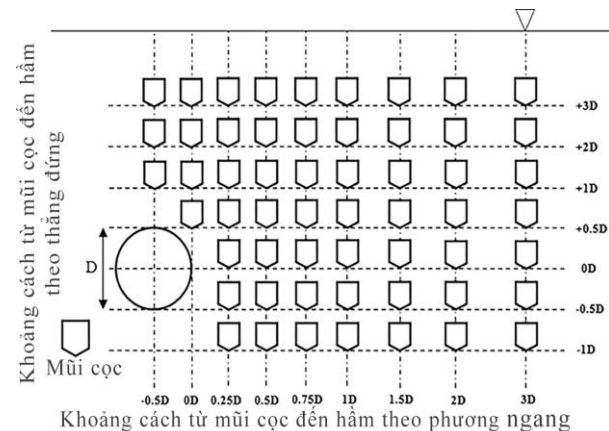


Hình 5. Sơ đồ phun vữa gia cố: a) phun vữa quanh hầm; b) phun vữa quanh cọc (Li và nnk., 2020).

đường hầm và gia cố xung quanh cọc, Hình 5 (Li và nnk., 2020; Huang và nnk., 2021).

Al-Omar và nnk. (2019) đã thực hiện các mô phỏng số 3 chiều nghiên cứu ảnh hưởng của khoảng cách tương đối giữa đường hầm và cọc theo mặt cắt ngang ($E/D=0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$) và theo dọc trục hầm ($Y/D= -5; +0,5; +5$), cũng như độ sâu đặt hầm ($C/D = 0,16; 0,5; 0,75; 2; 3$) đến ứng xử của kết cấu cọc đơn và nhóm cọc (3×3) trong các loại đất khác nhau (cát, sét). Kết quả cho thấy rằng một vùng ảnh hưởng sẽ xuất hiện trong phạm vi bằng 2 lần đường kính hầm (D) theo phương dọc trục hầm và theo phương ngang. Nếu cọc nằm ngoài phạm vi này thì việc xây dựng đường hầm không làm ảnh hưởng lớn đến kết cấu cọc. Độ lún của đầu cọc trong phạm vi $\pm 2D$ theo phương dọc trục chiếm tới 89% tổng độ lún của cọc đơn và 94% tổng độ lún của nhóm cọc (cọc ở trung tâm). Độ lún của đầu cọc lớn hơn (1,27 và 1,42 lần tương ứng với trường hợp cọc đơn và nhóm cọc) độ lún của mặt đất khi không có cọc.

Jongpradist và nnk. (2013) đã thực hiện nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của vị trí tương đối giữa mũi cọc và đường hầm đến độ lún tương đối giữa đầu cọc và lún bề mặt. Vị trí mũi cọc so với tâm đường hầm trong phạm vi $+3D$ đến $-1D$, đồng thời khoảng cách tương đối theo phương ngang thay đổi trong phạm vi từ $0D$ đến $3,5D$ (Hình 6). Kết quả cho thấy rằng tỷ lệ lún đầu cọc/lún mặt đất ($R > 1,6$) tăng mạnh khi mũi cọc trong phạm vi $< 2D$ (tính từ tâm hầm) theo phương thẳng đứng và $< 0,75D$ theo phương ngang tính (tính từ biên



Hình 6. Các trường hợp tính toán theo Jongpradist và nnk. (2013)

đường hầm). Khi mũi cọc nằm dưới đường hầm 1D, mômen uốn lớn nhất trong cọc giảm mạnh.

Nhìn chung, các nghiên cứu ở trên đã đánh giá được ảnh hưởng của việc thi công một, hai và ba đường hầm đến cọc đơn hoặc nhóm cọc bằng mô hình số 3D. Tuy nhiên, các nghiên cứu trên vẫn chưa đánh giá được ảnh hưởng phức tạp của hệ thống công trình ngầm đến kết cấu cọc: hệ thống tàu điện ngầm không chỉ có một tuyến hầm và có nhiều tuyến hầm có thể nằm gần nhau hoặc giao cắt nhau. Do đó việc thi công các tuyến đường hầm này sẽ ảnh hưởng tới móng cọc không chỉ một mà nhiều lần tùy thuộc vào số lượng đường hầm lân cận cọc, điều đó đòi hỏi phải có những nghiên cứu để đánh giá mức độ ảnh hưởng tới móng cọc và công trình trên bề mặt.

3.2. Ảnh hưởng của loại đất

Điều kiện đất nền đóng vai trò quyết định trong cơ chế tương tác giữa đường hầm và kết cấu cọc, đặc biệt là trong giai đoạn thi công đào hầm. Các biểu hiện khác biệt rõ rệt được quan sát thấy ở đất cát và đất sét do sự khác biệt về điều kiện thoát nước, cường độ chống cắt và cơ chế biến dạng.

Việc đào hầm trong đất sét sẽ xuất hiện hiện tượng trời ngắn hạn trong điều kiện không thoát nước sau đó là lún cổ kết dài hạn, dẫn đến hiện tượng kéo cọc xuống dần (đất xung quanh dịch chuyển nhiều hơn cọc), từ đó phát sinh mô men uốn đáng kể trong cọc (Chen và nnk., 1999).

Ở đất cát, việc đào hầm gây ra lún tức thời do sự phân bố lại ứng suất nhanh chóng trong điều kiện thoát nước, thường tuân theo đường cong lún dạng Gaussian (Attewell và nnk., 1986). Khả năng chịu tải của cọc chủ yếu dựa vào ma sát thành và sức kháng mũi cọc, có thể bị suy giảm do hiện tượng giảm ứng suất (Poulos và nnk., 2000; Jacobsz và nnk., 2004). Trong điều kiện đất cát, cọc có xu hướng chịu chuyển vị ngang mạnh khi khiên đào tiến đến gần (Jacobsz và nnk., 2004). Những khác biệt rõ rệt về ứng xử cơ học giữa đất sét và đất cát cho thấy cần phải xem xét kỹ lưỡng loại đất nền trong thiết kế và đánh giá ảnh hưởng của thi công hầm đến các kết cấu móng lân cận.

Ngoài ra, ảnh hưởng của nước ngầm đến tương tác giữa hầm và kết cấu cọc cũng cần phải được chú ý. Theo Su và nnk. (2025), khi đào hầm bằng máy khiên đào, lún bề mặt lớn nhất trong điều kiện có nước ngầm sẽ lớn hơn 22% so với

điều kiện địa tầng khô. Bên cạnh đó, lực dọc và chuyển vị ngang của cọc tăng lên dọc theo chiều dài cọc từ 16÷23% và 15÷28% tương ứng.

Có thể thấy rõ ràng rằng điều kiện địa chất thực tế rất phức tạp: Đường hầm đào qua môi trường địa chất phức tạp và biến đổi, cọc được đặt trong nhiều lớp đất khác nhau (cát, sét, sỏi cuội, có và không có nước ngầm,...) với những biểu hiện cơ học khác nhau. Những nghiên cứu trên thường tập trung vào một loại đất hoặc một điều kiện cụ thể, chưa phản ánh đúng điều kiện đất nền, nước ngầm. Do đó, việc nghiên cứu cần tập trung nghiên cứu tương tác giữa đường hầm và móng cọc trong điều kiện đất phân lớp, có nước ngầm và không có nước ngầm, đặc biệt trong đất có khả năng trương nở.

3.3. Ảnh hưởng của trình tự thi công và tham số vận hành

Khi thi công các đường hầm sẽ làm thay đổi trạng thái ứng suất và chuyển vị của khối đất xung quanh, từ đó sẽ ảnh hưởng đến các kết cấu xung quanh. Trình tự thi công đường hầm trong mối tương quan về khoảng cách giữa đường hầm với cọc theo phương ngang và vị trí của đường hầm theo dọc trục của cọc sẽ ảnh hưởng lớn đến tương tác giữa chúng (Huang và nnk., 2021; Soomro và nnk., 2020; Soomro, 2025). Các tham số vận hành của máy đào hầm như áp lực bề mặt gương đào, áp lực phun vữa, tốc độ đào,... đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát giá trị mất thể tích (VL) và lún bề mặt (Rong và nnk., 2024), từ đó ảnh hưởng đến tương tác giữa đường hầm và cọc (Broere và Dijkstra, 2008).

Huang và nnk. (2021) nghiên cứu ảnh hưởng của trình tự thi công của đường hầm song song nằm ngang đến lún bề mặt và chuyển vị của cọc đơn. Kết quả thấy rằng, nếu đường hầm gần cọc được thi công trước sau đó thi công đường hầm ở xa cọc thì độ lún lớn nhất của mặt đất cũng như chuyển vị (thẳng đứng và ngang) đều giảm.

Soomro và nnk. (2020) nghiên cứu ảnh hưởng của trình tự thi công đến lún và cơ chế truyền tải trọng của cọc đơn do ảnh hưởng của trình tự thi công hai đường hầm song song thẳng đứng. Soomro (2025) thực hiện nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của hai đường hầm song song thẳng đứng đến nhóm cọc chịu tải trọng ngang bằng mô hình ly tâm và phân tích ngược. Các nghiên cứu tham số được thực hiện có chú ý đến

trình tự thi công hầm, hệ số mất thể tích, cũng như độ sâu và vị trí đặt hầm. Kết quả cho thấy rằng việc đào hầm bên dưới trước sẽ làm giảm đáng kể chuyển vị theo phương ngang và độ nghiêng của đài cọc. Ngoài ra, kết quả còn chỉ ra, độ sâu và vị trí của đường hầm so với nhóm cọc có vai trò quan trọng trong chuyển vị ngang và mômen uốn trong cọc.

Quá trình mô phỏng việc thi công đường hầm bằng mô hình số và mô hình thực nghiệm chưa bao gồm chi tiết quá trình thi công đường hầm và thường giả định lún bề mặt thông qua giá trị mất thể tích VL. Do đó, cần phải phát triển các mô hình vật lý và mô hình số để mô phỏng chính xác ảnh hưởng của quá trình đào hầm đến kết cấu cọc như: mô phỏng chi tiết quá trình khiên đào làm việc trong mô hình vật lý; kết hợp giữa mô hình DEM-FEM (mô hình phần tử rời rạc và mô hình phần tử hữu hạn) để mô phỏng quá trình khiên đào cắt trực tiếp qua cọc trong mô hình số; mô phỏng chi tiết quá trình đào với các tham số áp lực mặt

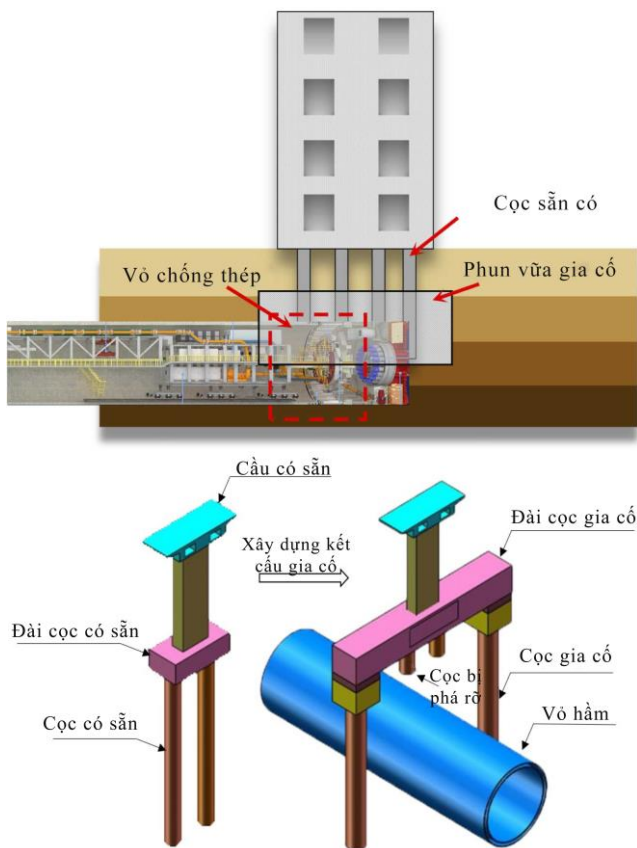
giương, áp lực phun vữa sau vỏ và quá trình đông cứng của vữa.

3.4. Đường hầm cắt qua cọc

Trong quá trình thiết kế tuyến hầm đường sắt đô thị, đơn vị thiết kế thường cố gắng đưa ra các giải pháp tuyến hầm khác nhau để tránh gặp phải cọc trong quá trình thi công hầm. Tuy nhiên, do mật độ dày đặc của các công trình trên bề mặt và hệ thống móng cọc của chúng, việc thi công đường hầm ngay sát hoặc thậm chí cắt trực tiếp là không thể tránh khỏi để đảm bảo tính kinh tế cũng như kỹ thuật của tuyến hầm. Để đảm bảo an toàn khi thi công hầm bằng máy khiên đào, một loạt các giải pháp thường được sử dụng khi đi qua khu vực này như: giải pháp cọc gia cố (Li và nnk., 2020; Tian và nnk., 2025), cắt trực tiếp qua cọc (Wang và nnk., 2023) hoặc phá dỡ công trình (Hình 7). Phương pháp phá dỡ công trình và giải pháp cọc gia cố là một trong những giải pháp chính để xử lý các trường hợp xâm lấn của đường hầm và móng cọc, tuy nhiên phương án máy đào hầm cắt trực tiếp qua cọc ngày càng phổ biến (Chen và nnk., 2025) do chúng có chi phí rẻ hơn và thời gian thi công ngắn hơn.

Dự án đường hầm vịnh Hải Châu, Quảng Châu, Trung Quốc với đường kính khiên đào 15,07 m đi cắt qua 73 cọc của một trung tâm thương mại sáu tầng, các cọc có đường kính từ 0,5 m đến 1,5 m xâm nhập vào đường hầm 7÷12 m. Giải pháp gia cố móng của tòa nhà bằng cách bổ sung các cọc gia cố được thực hiện theo các bước như sau: 1) Phá dỡ tường, sàn tầng trệt và công tác phòng cháy; 2) Sau thi công tường cách ly tiến hành phun vữa gia cố (jet grouting) trong khu vực 3 mét xung quanh khiên; trước, sau cọc; 3) Thi công cọc gia cố; 4) Đào hố móng; 5) Thi công dầm và mũ cọc gia cố kết hợp với tấm đế móng hiện hữu; 6) Cắt cọc (dây cưa) (Chen và nnk., 2025).

Đối với phương pháp máy khiên đào cắt trực tiếp qua cọc, không thực hiện biện pháp bổ sung cọc cho tòa nhà mà bằng cách gia cố đất nền phía dưới tòa nhà để có thể đáp ứng yêu cầu chịu tải sau khi cắt cọc. Bên cạnh đó, máy đào cần phải thay đổi cấu hình của đầu cắt (răng cắt). Trong quá trình cắt tốc độ đào của đầu cắt phải duy trì ở tốc độ xoay thấp, 1÷1,3 vòng/phút và tốc độ xâm nhập 3÷5 mm/phút (Wang và nnk., 2022; Liu và nnk., 2025), 0,8 vòng/phút và 1mm/phút (Li và nnk., 2021) để giảm thiểu tác động đến công trình



Hình 7. a) giải pháp gia cố và khiên cắt trực tiếp qua cọc (Chen và nnk., 2025) b) giải pháp cọc gia cố (Zhang và nnk., 2021).

trên bề mặt. Trong trường hợp vỏ chống bê tông cốt thép đúc sẵn của đường hầm không đáp ứng yêu cầu chịu tải, có thể thay thế bằng vỏ chống bằng thép. Wang và nnk. (2023) đề xuất một quy trình đào hầm trong quá trình cắt nhóm cọc của nhà ga ngầm đã tồn tại trước đó (Hình 8).

Ye và nnk. (2024) nghiên cứu biến dạng của đường hầm đi bộ khi chịu ảnh hưởng của công tác thi công hầm và cắt các cọc gia cố của nền đường hầm đi bộ trên cơ sở đo đạc hiện trường và phương pháp giải tích. Công nghệ khoan phụt ép vữa (Jet Grouting) được sử dụng để gia cố trước khi cắt cọc, vữa phun với tỷ lệ $N/X=1,0$ với hàm lượng xi măng 40% được sử dụng với áp lực 40 MPa. Cường độ nén đơn trục của đất sau khi gia cố $>1,25$ MPa, lớn hơn giá trị theo khuyến nghị của Wu và nnk. (2022) là 1 MPa. Kết quả cho thấy, với giải pháp thi công phun ép vữa gia cố được đề xuất, xáo trộn đất phía dưới là không đáng kể và không gây biến dạng kết cấu hầm đi bộ phía trên.

Sự phát triển mạnh mẽ của cơ sở hạ tầng ngầm như đường hầm giao thông, đường hầm tiện ích, kéo theo nhiều nguy cơ tiềm ẩn gây hư hại đến kết cấu công trình trên bề mặt, đặc biệt trong trường hợp đường hầm cắt trực tiếp qua cọc. Các nghiên cứu về chủ đề này còn tương đối hạn chế, điều đó thúc đẩy nhu cầu dự đoán và đề xuất các phương pháp giảm thiểu các tác động tiêu cực của

việc thi công đường hầm đến kết cấu nhằm đảm bảo an toàn và giảm thiểu chi phí.

4. Kết luận

Tương tác giữa đường hầm và móng cọc của các công trình trên bề mặt là chủ đề hấp dẫn được nhiều nhà khoa học trong và ngoài nước quan tâm. Các nghiên cứu được thực hiện bằng nhiều phương pháp khác nhau như: phương pháp giải tích, mô hình thực nghiệm, mô hình số. Mỗi phương pháp đều có những ưu và nhược điểm riêng, tuy nhiên mô phỏng số kết hợp với kiểm chứng bằng dữ liệu hiện trường hiện nay được sử dụng khá phổ biến.

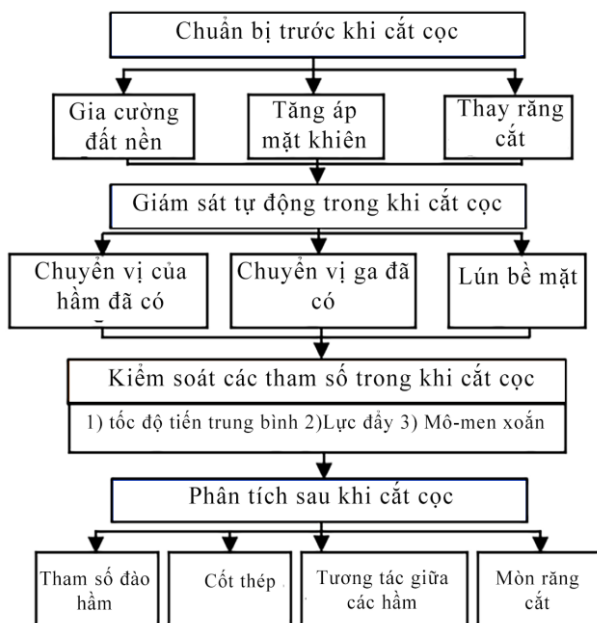
- Các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào: 1) ảnh hưởng của vị trí tương đối và khoảng cách giữa đường hầm và cọc; 2) ảnh hưởng của trình tự thi công hầm và tham số vận hành của máy đào hầm; 3) ảnh hưởng của điều kiện địa chất và thủy văn; 4) ảnh hưởng của việc đào hầm cắt qua cọc và các biện pháp gia cố nền móng.

- Xu hướng trong các nghiên cứu về tương tác giữa đường hầm và móng cọc: 1) các biện pháp giảm thiểu ảnh hưởng của việc thi công hầm đến móng cọc; 2) sự phức tạp của hệ thống các đường hầm trong đô thị và ảnh hưởng của chúng đến móng cọc; 3) phát triển các mô hình vật lý và mô hình số để mô phỏng chính xác tương tác giữa quá trình đào đường hầm và kết cấu móng cọc; 4) ảnh hưởng của việc đào hầm cắt qua cọc đến kết cấu công trình trên bề mặt và biện pháp đối phó.

Ngoài ra, sự phát triển nhanh chóng của các mô hình học máy và trí tuệ nhân tạo đòi hỏi áp dụng các mô hình này trong việc dự báo tương tác giữa đường hầm và móng cọc theo thời gian thực. Nghiên cứu các mô hình điều khiển bằng AI kết hợp với tham số vận hành của máy đào hầm TBM và các dữ liệu từ các cảm biến gắn trong cọc, vỏ chống đường hầm, khối đất xung quanh để nâng cao khả năng đánh giá rủi ro và ra quyết định nhằm tăng độ an toàn và giảm thiểu chi phí.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài khoa học cấp Bộ B2025-MDA-02 của Bộ Giáo dục và Đào tạo. Tác giả xin chân thành cảm ơn Bộ Giáo dục và Đào tạo.



Hình 8. Quy trình đào hầm khi cắt qua cọc (Wang và nnk., 2023).

Đóng góp của tác giả

Nguyễn Tài Tiến - phương pháp luận, nghiên cứu tổng quan, viết bản thảo bài báo; Phạm Văn Vĩ - đọc đánh giá và chỉnh sửa.

Tài liệu tham khảo

- Abd-Elhamed, A. (2021). *Analytical Solution of Laterally Loaded Free-Head Long Piles in Elasto-Plastic Cohesive Soils. Mathematics* 2021, 9, 1961. <https://doi.org/10.3390/math9161961>.
- Al-Omari, R. R., Al-Soud, M. S., & Al-Zuhairi, O. I. (2019). Effect of tunnel progress on the settlement of the existing piled foundation. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 41(2). <https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0008>.
- Attewell, P. B., Yeates, J., & Selby, A. R. (1986). *Soil Movements Induced by Tunnelling and Their Effects on Pipelines and Structures*. Glasgow & New York: Blackie; Chapman and Hall.
- Ayasrah, M. M., Fattah, M. Y., & Hamood, M. J. (2023). Investigation on existing tunnel response to piles construction: a numerical study. *Civ Eng J*, 9, 202-216. <https://doi.org/10.28991/CEJ-SP2023-09-016>.
- Basile, F. (2014). Effects of tunnelling on pile foundations. *Soils and Foundations*, 54(3), 280-295. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.04.004>.
- Berthoz, N., Branque, D., Michalski, A., Mohamad, W., Bourgeois, E., Le Kouby, A., ... & Rallu, A. (2023). Impact of tunnelling on piles in Parisian subsoil: Dataset of in-situ measurements in the ground and on three instrumented piles. *Data in Brief*, 47, 108971. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.108971>.
- Broere, W., & Dijkstra, J. (2008). Investigating the influence of tunnel volume loss on piles using photoelastic techniques. In *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* (pp. 637-642). CRC Press.
- Chen, L., Poulos, H. G., & Loganathan, N. J. J. O. G. (1999). Pile responses caused by tunneling. *Journal of Geotechnical and*

Geoenvironmental Engineering, 125(3), 207-215. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:3\(207\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:3(207)).

- Chen, Y., Chen, X., Ouyang, J., Shen, X., Huang, S., Sheng, J., & Zhang, L. (2025). Low carbon effects of super large diameter shield directly cutting piles project: A case study in China. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04264. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04264>.
- Do N., A., Dias, D., & Dang, T. T. (2021). A numerical investigation of the impact of shield machine's operation parameters on the settlements above twin stacked tunnels-A case study of Ho Chi Minh urban railway Line 1. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 43(4), 409-423. doi:10.15625/2615-9783/16442.
- Franza, A., Marshall, A. M., Haji, T., Abdelatif, A. O., Carbonari, S., & Morici, M. (2017). A simplified elastic analysis of tunnel-piled structure interaction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 61, 104-121. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.09.008>.
- Gao, G., Zhuang, Y., Wang, K., & Chen, L. (2019). Influence of Benoto bored pile construction on nearby existing tunnel: A case study. *Soils and Foundations*, 59(2), 544-555. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.11.006>.
- Guo, C., Yue, H., Tao, Y., Liu, G., Kong, F., Lu, D., & Du, X. (2025). Mechanical response of pile group and stratum induced by shallow tunneling based on the model test. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 159, 106480. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106480>.
- He, S., Lai, J., Li, Y., Wang, K., Wang, L., & Zhang, W. (2022). Pile group response induced by adjacent shield tunnelling in clay: Scale model test and numerical simulation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 120, 104039. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104039>.
- Huang, K., Sun, Y., He, J., Huang, X., Jiang, M., & Li, Y. (2021). Comparative study on grouting protection schemes for shield tunneling to adjacent viaduct piles. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021(1), 5546970. <https://doi.org/10.1155/2021/5546970>.
- Huang, K., Sun, Y., Huang, X., Li, Y., Jiang, M., & Liu, R. (2021). Effects of different construction

- sequences on ground surface settlement and displacement of single long pile due to twin paralleled shield tunneling. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 5559233. <https://doi.org/10.1155/2021/5559233>.
- Huang, K., Sun, Y., Kuang, X., Huang, X., Liu, R., & Wu, Q. (2022). Study on the restraint effect of isolation pile on surface settlement trough induced by shield tunnelling. *Applied Sciences*, 12(10), 4845. <https://doi.org/10.3390/app12104845>.
- Idinger, G., Aklik, P., Wu, W., & Borja, R. I. (2011). Centrifuge model test on the face stability of shallow tunnel. *Acta Geotechnica*, 6(2), 105-117. <https://doi.org/10.1007/s11440-011-0139-2>.
- Jacobsz, S. W., Standing, J. R., Mair, R. J., Hagiwara, T., & Sugiyama, T. (2004). Centrifuge modelling of tunnelling near driven piles. *Soils and foundations*, 44(1), 49-56. <https://doi.org/10.3208/sandf.44.49>.
- Jongpradist, P., Kaewsri, T., Sawatparnich, A., Suwansawat, S., Youwai, S., Kongkitkul, W., & Sunitakul, J. (2013). Development of tunneling influence zones for adjacent pile foundations by numerical analyses. *Tunnelling and underground space technology*, 34, 96-109. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.11.005>.
- Khoo, C., Mohamad, H., Beddelee, A. A. A. M., Thansirichaisree, P., Ghazali, M. F., & Nasir, M. Y. M. (2025). Effects of advancing tunnel on a loaded pile: Numerical analysis and field measurements. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.12.028>.
- Kong, S. M., Oh, D. W., Lee, S. W., Kim, C. Y., & Lee, Y. J. (2021). Effects of pile installation on existing tunnels using model test and numerical analysis with medium density sand. *Applied Sciences*, 11(15), 6904. <https://doi.org/10.3390/app11156904>.
- Lee, C. J. (2012). Numerical analysis of the interface shear transfer mechanism of a single pile to tunnelling in weathered residual soil. *Computers and Geotechnics*, 42, 193-203. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.01.009>.
- Lee, Y. J., & Bassett, R. H. (2007). Influence zones for 2D pile-soil-tunnelling interaction based on model test and numerical analysis. *Tunnelling and underground space technology*, 22(3), 325-342. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.07.001>.
- Lê, B. Q. (2019). Ảnh hưởng thi công công trình ngầm đô thị đối với móng sâu công trình lân cận trong môi trường đất yếu ở Thành phố Hồ Chí Minh. Vĩnh Long: Trường Đại học Xây dựng Miền Tây.
- Li, H., Tong, L., & Liu, S. (2021, August). Multistage-based evaluation of tunnelling effects on the skin friction of adjacent building piles in layered media. In *Structures* (Vol. 32, pp. 96-105). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.023>.
- Li, P., Lu, Y., Lai, J., Liu, H., & Wang, K. (2020). A Comparative Study of Protective Schemes for Shield Tunnelling Adjacent to Pile Groups. *Advances in Civil Engineering*, 16, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2020/6964314>.
- Li, T., Yang, M., & Chen, X. (2023). A Simplified Analytical Method for the Deformation of Pile Foundations Induced by Adjacent Excavation in Soft Clay. *Buildings*, 13. <https://doi.org/10.3390/buildings13081919>.
- Li, X., Yuan, D., Jiang, X., & Wang, F. (2021). Damages and wear of tungsten carbide-tipped rippers of tunneling machines used to cutting large diameter reinforced concrete piles. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105533. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105533>.
- Li, Z., Chen, Z., Wang, L., Zeng, Z., & Gu, D. (2021). Numerical simulation and analysis of the pile underpinning technology used in shield tunnel crossings on bridge pile foundations. *Underground Space*, 6(4), 396-408. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2020.05.006>.
- Lim, C. B., Jusoh, S. N., Lim, C. X., Hasbollah, D. Z. A., & Sohaei, H. (2023). Tunnel-pile interaction sequence: Parametric studies. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 129, 103312. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103312>.

- Liu, B., Li, T., Han, Y., Li, D., He, L., Fu, C., & Zhang, G. (2022). DEM-continuum mechanics coupling simulation of cutting reinforced concrete pile by shield machine. *Computers and Geotechnics*, 152, 105036. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.105036>.
- Liu, C., Zhang, Z., & Regueiro, R. A. (2014). Pile and pile group response to tunnelling using a large diameter slurry shield-Case study in Shanghai. *Computers and Geotechnics*, 59, 21-43. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.03.006>.
- Liu, Z. X., Ye, X. W., Song, K., Lu, C. R., Song, Y. J., Li, X. J., & Zhao, L. A. (2025). Monitoring-based analysis of the responses of upper structure and tunnel lining during shield tunneling with pile cutting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 158, 106427. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106427>.
- Lu, H., Shi, J., Ng, C. W., & Lv, Y. (2020). Three-dimensional centrifuge modeling of the influence of side-by-side twin tunneling on a piled raft. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103486. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103486>.
- Magade, S. B., & Ingle, R. K. (2019). Influence of Clear Edge Distance and Spacing of Piles on Failure of Pile Cap. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00285-9>.
- Mangi, N., Bangwar, D. K., Karira, H., Kalhor, S., & Siddiqui, G. R. (2020). Parametric study of pile response to side-by-side twin tunneling in stiff clay. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 10(2), 5361-5366. <https://doi.org/10.48084/etasr.3290>.
- Marshall, A. M., & Mair, R. J. (2011). Tunneling beneath driven or jacked end-bearing piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(12), 1757-1771. <https://doi.org/10.1139/t11-067>.
- Meguid, M. A., Saada, O., Nunes, M. A., & Mattar, J. (2008). Physical modeling of tunnels in soft ground: a review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(2), 185-198. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.02.003>.
- Mohamad, W., Bourgeois, E., Le Kouby, A., Szymkiewicz, F., Michalski, A., Branque, D., ... & Kreziak, C. (2022). Full scale study of pile response to EPBS tunnelling on a Grand Paris Express site. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 124, 104492. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104492>.
- Momeni, R., Rostami, V., & Khazaei, J. (2017). Study of physical modelling for piles. *Open Journal of Geology*, 7(8), 1160-1175. <https://doi.org/10.4236/ojg.2017.78077>.
- Ng, C. W. W., Lu, H., & Peng, S. Y. (2013). Three-dimensional centrifuge modelling of the effects of twin tunnelling on an existing pile. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 189-199. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.07.008>.
- Ng, C. W. W., Soomro, M. A., & Hong, Y. (2014). Three-dimensional centrifuge modelling of pile group responses to side-by-side twin tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 350-361. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.05.002>.
- Nguyễn, A. T., & Nguyễn, T. D. (2012). *Phân tích ảnh hưởng lún của việc xây dựng đường hầm Metro đến các công trình lân cận khu vực thành phố Hồ Chí Minh*. Tạp chí GTVT.
- Pang, C., Yong, K., Ch, Y., & Wang, J. (2006). The response of pile foundations subjected to shield tunnelling. *Trong International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (trang 737-743). London, UK: Taylor & Francis Group plc.
- Phutthananon, C., Lertkultanon, S., Jongpradist, P., Duangsano, O., Likitlersuang, S., & Jamsawang, P. (2023). Numerical investigation on the responses of existing single piles due to adjacent twin tunneling considering the lagging distance. *Underground Space*, 11, 171-188. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2022.12.005>.
- Peck, B. B. (1969). Deep excavation and tunnelling in soft ground, State of the art volume. In *7th ICSMFE* (Vol. 4, pp. 225-290).
- Poulos, H. G. (1989). Pile behaviour—theory and application. *Geotechnique*, 39(3), 365-415. <https://doi.org/10.1680/geot.1989.39.3.365>.
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1974). *Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics*. John Wiley NY.
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*. John Wiley & Sons Inc.
- Loganathan, N., Poulos, H. G., & Stewart, D. P. (2000). Centrifuge model testing of tunnelling-

- induced ground and pile deformations. *Geotechnique*, 50(3), 283-294. <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.3.283>.
- Lueprasert, P., Jongpradist, P., Jongpradist, P., & Suwansawat, S. (2017). Numerical investigation of tunnel deformation due to adjacent loaded pile and pile-soil-tunnel interaction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 70, 166-181. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.08.006>.
- Randolph, M. F., & Wroth, C. P. (1979). An analysis of the vertical deformation of pile groups. *Geotechnique*, 29(4), 423-439. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.4.423>.
- Randolph, M. F., & Wroth, C. P. (1978). Analysis of deformation of vertically loaded piles. *Journal of the geotechnical engineering division*, 104(12), 1465-1488. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000729>.
- Rehman, M., Abbas, S. M., & Usmani, A. (2024). Analysis of tunnel-pile interaction and predictive modelling of pile foundation response to tunnel excavation at various horizontal positions using PLAXIS. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*, 12(1), 62-80. <https://doi.org/10.1504/IJCMSSE.2024.139018>.
- Rong, X., Gao, L., Han, A., Wu, J., Wu, X., & Jiang, G. (2024). Analysis of ground volume loss for EPB shield tunneling in thick silty clay layer. *Alexandria Engineering Journal*, 96, 295-302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.03.083>.
- Selemetas, D. (2005). The response of full-scale piles and piled structures to tunnelling. Cambridge University.
- Sohaei, H., Namazi, E., Hajihassani, M., & Marto, A. (2020). A review on tunnel-pile interaction applied by physical modeling. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(4), 3341-3362. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01240-6>.
- Song, G., Marshall, A. M., & Heron, C. M. (2022). The use of protective structures to reduce tunnelling induced damage to buildings. In *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. 2nd Edition* (pp. 673-680). CRC Press.
- Song, G. (2019). The use of protective structures to reduce tunnelling induced damage to buildings. Nottingham: Doctoral thesis, University of Nottingham.
- Soomro, M. A. (2025). Influence of twin stacked tunnels on the performance of laterally loaded pile group. *Canadian Geotechnical Journal*, 62, 1-23. <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0199>.
- Soomro, M. A., Keerio, M. A., & Bangwar, D. K. (2017). 3D centrifuge modeling of the effect of twin tunneling to an existing pile group. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 7(5), 2030-2040. <https://doi.org/10.48084/etasr.1393>.
- Soomro, M. A., Kumar, M., Xiong, H., Mangnejo, D. A., & Mangi, N. (2020). Investigation of effects of different construction sequences on settlement and load transfer mechanism of single pile due to twin stacked tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 96, 103171. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103171>.
- Soomro, M. A., Mangi, N., Cui, Z. D., Liu, K., & Mangnejo, D. A. (2024). Evaluation of response mechanisms in an elevated pile group subjected to lateral loading caused by twin-tunnelling. *Computers and Geotechnics*, 171, 106334. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106334>.
- Stacul, S., & Squeglia, N. (2018). KIN SP: A boundary element method based code for single pile kinematic bending in layered soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(1), 176-187. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.11.004>.
- Su, J., Pan, Y., Niu, X., & Zhang, C. (2025). Effect of shield tunneling on adjacent pile foundations in water-rich strata. *Transportation Geotechnics*, 52, 101557. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101557>.
- Surjadinata, J., Hull, T. S., Carter, J. P., & Poulos, H. G. (2006). Combined finite-and boundary-element analysis of the effects of tunneling on single piles. *International Journal of Geomechanics*, 6(5), 374-377. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2006\)6:5\(374\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2006)6:5(374)).

- Taylor, R. (1994). *Geotechnical Centrifuge Technology*. London: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482269321>.
Reports, 15(1), 4770.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-83863-w>.
- Vesić, A. B. (1961). Bending of beams resting on isotropic elastic solid. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 87(2), 35-53. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.000021>.
- Viswanadham, B. V. S. (2016). Centrifuge-based Physical Modeling of Geotechnical Structures. *A Primer on Numerical and Physical Modelling in Geotechnical Engineering*, 1.
- Wang, G., Qiao, S., Li, G., & Singh, J. (2023). Direct shield cutting of large-diameter reinforced concrete group piles: Case study on Shenyang Metro construction. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01864. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01864>.
- Wang, Y., Ma, Y., Wang, R., Ding, B., & Yu, S. (2024). Vibration response of piles at different distances induced by shield tunneling in hard rock strata. *Scientific Reports*, 14(1), 21723. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72987-8>.
- Wang, Y., Wang, X., Xiong, Y., Yang, Z., & Zhang, J. (2022). Full-Scale Laboratory Test of Cutting Large-Diameter Piles Directly by Shield Cutterhead. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1), 8780927. <https://doi.org/10.1155/2022/8780927>.
- Wu, T., Gao, Y., & Zhou, Y. (2022). Application of a novel grouting material for prereinforcement of shield tunnelling adjacent to existing piles in a soft soil area. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 128, 104646. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104646>.
- Yang, W., Zhang, D., & Wang, A. (2022). Field measurement analysis of the influence of simultaneous construction of river channel and bridge on existing double shield tunnels. *Underground Space*, 7(5), 812-832. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.12.008>.
- Tian, Z., Zhang, Z., Zhang, G., Shan, X., & Liu, W. (2025). Impact analysis of tunnel crossing pile foundation at different angles. *Scientific Reports*, 15(1), 4770. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83863-w>.
- Ye, X. W., Liu, Z. X., Chen, Y. B., Lu, C. R., Song, Y. J., Li, X. J., & Zhao, L. A. (2024). Deformation of existing underpasses due to pile cutting and shield tunneling: Observations from field monitoring and explanations by analytical model. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03836. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03836>.
- Zhang, C., Zhao, Y., Zhang, Z., & Zhu, B. (2021). Case study of underground shield tunnels in interchange piles foundation underpinning construction. *Applied Sciences*, 11(4), 1611. <https://doi.org/10.3390/app11041611>.
- Zhang, Z., Huang, M., Xu, C., Jiang, Y., & Wang, W. (2018). Simplified solution for tunnel-soil-pile interaction in Pasternak's foundation model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 78, 146-158. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.04.025>.
- Zhang, Z., Zhang, C., Jiang, K., Wang, Z., Jiang, Y., Zhao, Q., & Lu, M. (2019). Analytical prediction for tunnel-soil-pile interaction mechanics based on Kerr foundation model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(6), 2756-2771. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0791-x>.
- Zhao, Z., Zhang, Y., & Dai, F. (2024). Study on deformation of tunnel pile foundation based on discrete element method and finite difference method. *Plos one*, 19(7), e0307405. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307405>.
- Zhou, J., Han, K., & Chen, W. (2024). Study on Influence Mechanism of Tunnel Construction on Adjacent Pile Foundation and Resilience Assessment. *Buildings* (2075-5309), 14(9). <https://doi.org/10.3390/buildings14092818>.
- Zhu, Y., Zeng, B., Ye, S., He, L., Zheng, Y., & Ma, R. (2023). Physical model tests and discrete-element simulation of pile and soil displacement response induced by DOT shield tunneling based on transparent soil technology. *International Journal of Geomechanics*, 23(8), 04023124. <https://doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-796>.