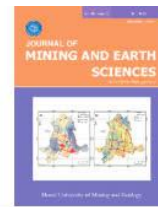




## Journal of Mining and Earth Sciences

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



# Analysis of internal forces in tunnel lining for twin piggy back tunnel geometry



Thai Ngoc Do\*

Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 6<sup>th</sup> Mar. 2025

Revised 14<sup>th</sup> May 2025

Accepted 19<sup>th</sup> May 2025

#### Keywords:

Finite element method,  
Lining tunnel,  
Twin piggy back tunnel,  
Twin tunnels.

### ABSTRACT

*Constructing metro tunnels in urban areas offers a sustainable solution to increasing traffic demands while supporting socio-economic development. In the design phase, metro tunnels are typically arranged as two closely spaced, parallel tunnels to optimize operational efficiency. However, during construction, mechanical interactions between the tunnels can alter the internal forces acting on their linings. This study uses the finite element method to analyze internal forces in the linings of two vertically aligned, parallel tunnels. The analysis focuses on normal forces and bending moments, taking into account the construction sequence.*

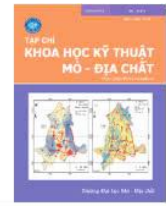
*Results show that the sequence of construction significantly influences internal force distribution, with the first tunnel being affected by the excavation of the second. The study also examines the impact of volume loss, tunnel depth, and spacing. Across these scenarios, the findings consistently indicate that the tunnel constructed first—whether upper or lower—is subjected to increased normal forces and bending moments due to the excavation of the second tunnel.*

Copyright © 2025 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

\*Corresponding author

E - mail: [dongcothai@humg.edu.vn](mailto:dongcothai@humg.edu.vn)

DOI: 10.46326/JMES.2025.66(3).06



## Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

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

# Phân tích nội lực vỏ hầm trong sơ đồ bố trí hai đường hầm song song cùng trục thẳng đứng

Đỗ Ngọc Thái\*

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

### THÔNG TIN BÀI BÁO

#### Quá trình:

Nhận bài 6/3/2025

Sửa xong 14/5/2025

Chấp nhận đăng 19/5/2025

#### Từ khóa:

Phương pháp phần tử hữu hạn,

Vỏ hầm,

Hai đường hầm song song cùng trục thẳng đứng,

Hai đường hầm song song.

### TÓM TẮT

*Xây dựng hệ thống đường hầm tàu điện ngầm trong đô thị là một giải pháp bền vững nhằm đáp ứng nhu cầu giao thông và thúc đẩy phát triển kinh tế - xã hội. Trong công tác quy hoạch thiết kế, các tuyến đường hầm tàu điện ngầm thường được bố trí thành hai đường hầm song song gần nhau để tối ưu hóa khi vận hành khai thác. Trong quá trình thi công hai đường hầm gây ra sự tương tác cơ học giữa hai đường hầm, dẫn đến sự thay đổi nội lực trong các vỏ hầm. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích nội lực trong vỏ hầm đối với sơ đồ bố trí hai đường hầm song song cùng trục thẳng đứng. Phân tích tập trung vào lực dọc và mô men trong các vỏ hầm, có xét đến trình tự thi công các đường hầm. Kết quả cho thấy trình tự thi công ảnh hưởng đáng kể đến nội lực trong vỏ hầm, trong đó đường hầm được thi công trước chịu tác động từ quá trình đào đường hầm thi công sau. Ngoài ra, nghiên cứu cũng xem xét ảnh hưởng của các yếu tố như giá trị lượng mất thể tích, độ sâu đặt đường hầm và khoảng cách giữa hai đường hầm đến lực dọc và mô men trong các vỏ hầm. Kết quả nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của lượng mất thể tích, chiều sâu bố trí đường hầm và khoảng cách giữa hai đường hầm cho thấy, giá trị lực dọc và mô men trong vỏ hầm trên và vỏ hầm dưới vẫn tuân theo quy luật là đường hầm thi công trước hay là đường hầm đã có hiện hữu chịu ảnh hưởng từ việc thi công đường hầm sau. Lực dọc và mô men trong vỏ chống đường hầm ở trình tự được thi công trước sẽ lớn hơn so với trình tự được thi công sau.*

© 2025 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

\*Tác giả liên hệ

E - mail: [dongcocthai@humg.edu.vn](mailto:dongcocthai@humg.edu.vn)

DOI: 10.46326/JMES.2025.66(3).06

## 1. Mở đầu

Hiện nay, trong công tác quy hoạch, thiết kế hệ thống các tuyến đường hầm tàu điện ngầm trong đô thị có ba sơ đồ chính được sử dụng để phân bố hai đường hầm song song gần nhau, bao gồm sơ đồ hai đường hầm song song có cùng trục nằm ngang; sơ đồ hai đường hầm song song có cùng trục thẳng đứng và sơ đồ hai đường hầm song song khác trục nằm ngang, khác trục thẳng đứng (Addenbrooke và Potts, 2001; Hunt, 2005; Divall, 2013). Quá trình thi công hai đường hầm song song gần nhau gây ra hiện tượng tương tác cơ học giữa hai đường hầm, sự thay đổi về nội lực trong vỏ chống các đường hầm hay chuyển vị khối đất đá xung quanh so với trường hợp thi công đường hầm đơn (Do và nnk., 2022b). Các kết quả nghiên cứu cho thấy khi thi công hai đường hầm song song thì gây ra giá trị nội lực vỏ hầm lớn hơn so với công tác thi công đường hầm đơn (Do và nnk., 2014; Wang và nnk., 2017; Pedro và nnk., 2022; Le và nnk., 2023) tuy nhiên các nghiên cứu vẫn chủ yếu tập trung vào hai đường hầm song song có cùng trục nằm ngang hoặc hai đường hầm được thi công đồng thời, chưa đánh giá ảnh hưởng của trình tự thi công các đường hầm (Liu và nnk., 2021; Do và nnk., 2022b; Wang và nnk., 2024).

Thực tế cho thấy, trong quá trình thi công rất hiếm khi hai đường hầm được thi công song song đồng thời, phần lớn là thi công cách nhau một khoảng nhất định hoặc là thi công xong đường hầm thứ nhất rồi tiến hành thi công đường hầm thứ hai. Trong các trường hợp đó, xuất hiện ảnh hưởng từ công tác thi công đường hầm thứ hai đến đường hầm thứ nhất đã được xây dựng trước đó hoặc đường hầm thi công thứ hai có thể được thi công trong khối đất đá đã bị thay đổi trạng thái ứng suất do công tác thi công đường hầm thứ nhất, phụ thuộc vào khoảng cách giữa hai đường hầm gây ra những tương tác cơ học giữa hai đường hầm với nhau. Bên cạnh đó, tương tác cơ học giữa đường hầm với khối đất đá xung quanh đã làm cho nội lực trong các vỏ hầm và chuyển vị lớp đất đá xung quanh các đường hầm khác nhau (Cording và Hansmire, 1975; Koungeles, 2007; Das và nnk., 2017).

Trong quá trình thi công đường hầm, công tác đào phá khối đất đá dẫn đến việc phân bố lại ứng suất trong khối đất đá xung quanh đường hầm, do việc giảm ứng suất dẫn đến hiện tượng di chuyển

của đất đá xung quanh về phía không gian trống của đường hầm. Lượng đất đá phải đào bổ sung này trên thể tích ước tính ban đầu của đường hầm được biểu thị dưới dạng phần trăm và được gọi là lượng mất thể tích (VL, %). Kết quả nghiên cứu khi tổng hợp, so sánh ảnh hưởng của công tác thi công đường hầm đơn và đường hầm đôi đến chuyển vị khối đất đá xung quanh đường hầm, dịch chuyển mặt đất, kết quả nghiên cứu còn cho thấy sự gia tăng giá trị lượng mất thể tích (VL, %) đối với công tác thi công hai đường hầm song song (Divall và nnk., 2023).

Mức độ mất thể tích phụ thuộc vào loại đất đá đường hầm thi công qua, kỹ thuật đào hầm được áp dụng và kỹ năng của nhà thầu. Theo kết quả nghiên cứu, tổng hợp như sau (Mair và Taylor, 1997; Divall, 2013):

- Lượng mất thể tích khi thi công trong đất sét cứng thường nằm trong khoảng từ 1%÷2% khi sử dụng phương pháp đào hầm lộ thiên;

- Sử dụng lớp bê tông phun khi áp dụng phương pháp đào hầm mới của Áo trong đất sét cứng có lượng mất thể tích 0,5%÷1,5%;

- Sử dụng phương pháp cân bằng áp lực đất (EPB) và máy đào hầm chất lỏng có áp có thể đạt được mức độ kiểm soát độ lún tốt hơn với lượng mất thể tích lần lượt là 0,5% đối với cát và 1÷2% với đất sét mềm;

- Trong điều kiện lớp đất hỗn hợp, lượng mất thể tích có thể cao hơn đối với máy cân bằng áp lực đất (EPB) và máy đào hầm chất lỏng có áp.

Kết quả nghiên cứu của Do và nnk. (2015) cho thấy khoảng cách giữa hai đường hầm có ảnh hưởng đến giá trị dịch chuyển mặt đất và nội lực trong vỏ hầm đối với sơ đồ bố trí hai đường hầm song song cùng trục nằm ngang. Đối với sơ đồ bố trí hai đường hầm song song có cùng trục thẳng đứng, kết quả nghiên cứu từ công tác thi công hai đường hầm gây ra giá trị dịch chuyển mặt đất lớn hơn so với trường hợp thi công một đường hầm đơn ở vị trí phía dưới (Do và nnk., 2022a).

Các kết quả nghiên cứu cho thấy các đường hầm đào gần nhau có tương tác với nhau. Do cơ chế tương tác này dẫn đến nội lực trong vỏ chống các đường hầm có sự thay đổi so với đường hầm đơn về giá trị và sơ đồ phân bố. Hiệu ứng tương tác cơ học giữa hai đường hầm thay đổi tùy theo vị trí tương quan giữa hai đường hầm, trình tự khai đào

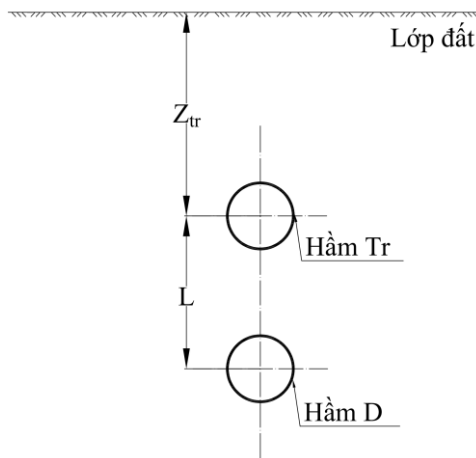
các đường hầm. Một trong những vấn đề thu hút sự quan tâm của các nhà khoa học là khoảng cách an toàn tối thiểu để không xảy ra hiệu ứng tương tác cơ học giữa hai đường hầm song song.

Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích nội lực trong vỏ hầm đối với sơ đồ hai đường hầm song song cùng trục thẳng đứng, nghiên cứu có xét đến ảnh hưởng của trình tự thi công các đường hầm, lượng mất thể tích, chiều sâu bố trí đường hầm và khoảng cách giữa các đường hầm.

## 2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, để phân tích nội lực trong vỏ hầm đối với sơ đồ hai đường hầm song song có cùng trục thẳng đứng, hai đường hầm có cùng hình dạng tiết diện ngang là hình tròn, kích thước và các tham số kỹ thuật gồm đường kính  $D = 6,65$  m; chiều dày vỏ hầm  $d = 0,3$  m; mô đun đàn hồi vỏ hầm  $E = 35$  GPa, hệ số poisson  $\nu = 0,15$ , chiều sâu từ mặt đất đến tâm đường hầm phía trên là  $Z_{tr}$ , khoảng cách giữa tâm hai đường hầm là  $L$ , hai đường hầm được thi công qua lớp đất sét. Sơ đồ bài toán được thể hiện như trên Hình 1. Các thông số cơ lý lớp đất đường hầm thi công qua được thể hiện trong Bảng 1.

Để phân tích nội lực trong các vỏ hầm đối với sơ đồ thi công hai đường hầm song song có cùng trục thẳng đứng, nhóm tác giả sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, thông qua phần mềm Plaxis2D, phương pháp cho phép phân tích chuyển vị của khối đất đá xung quanh đường hầm, trên mặt



Hình 1. Sơ đồ hai đường hầm song song có cùng trục thẳng đứng.

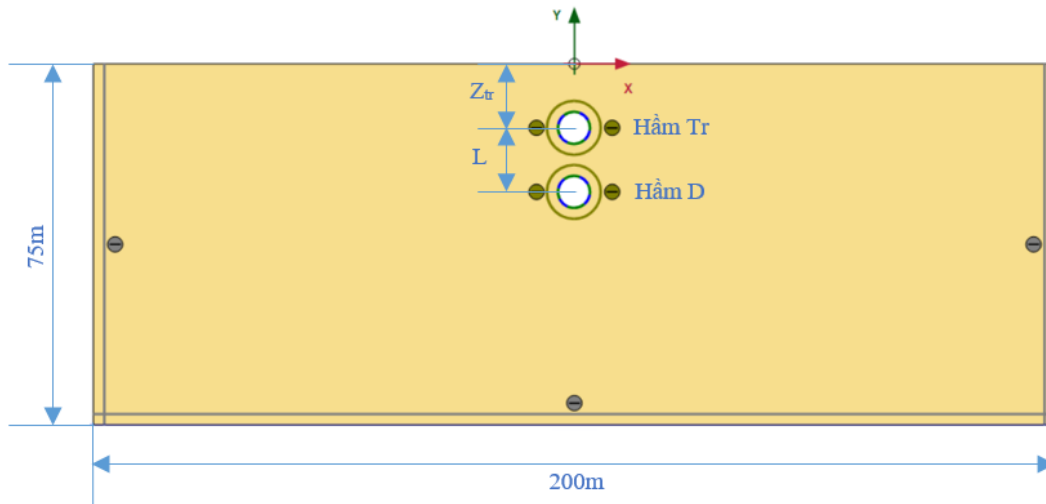
Bảng 1. Thông số cơ lý của lớp đất được sử dụng trong bài toán nghiên cứu.

STT	Thông số cơ lý	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Khối lượng thể tích lớp đất	$\gamma$	19,50	(kN/m <sup>3</sup> )
2	Mô đun cát tuyến xác định từ nén 3 trục, áp lực buồng pref	$E_{50}^{ref}$	32500	(kN/m <sup>2</sup> )
3	Mô đun tiếp tuyến trong thí nghiệm oedometer	$E_{oed}^{ref}$	32500	(kN/m <sup>2</sup> )
4	Mô đun dãn tải và gia tải	$E_{ur}^{ref}$	97500	(kN/m <sup>2</sup> )
5	Lực dính kết	$c_{ref}$	7,0	(kN/m <sup>2</sup> )
6	Góc ma sát trong	$\varphi$	20,5	(°)
7	Hệ số poisson	$\nu$	0,28	-

đất và nội lực trong vỏ hầm (Kunst, 2017; Bousbia, 2024).

Kích thước mô hình: Kích thước mô hình có ảnh hưởng đến tốc độ tính toán, độ chính xác của kết quả tính toán. Theo Oteo và Sagaseta (1982) kích thước mô hình từ tâm đường hầm đến biên thẳng đứng khuyến nghị lấy lớn hơn hoặc bằng 10 lần đường kính hầm, nhiều nghiên cứu về sau này cũng tuân thủ theo việc lựa chọn kích thước mô hình như trên để đảm bảo các tương tác trên biên mô hình không làm ảnh hưởng đến kết quả phân tích bài toán. Trong mô hình bài toán này tác giả lấy kích thước từ tâm hầm đến biên thẳng đứng là 100 m tức lớn hơn 14 lần đường kính hầm. Kích thước mô hình, bao gồm: chiều cao 75 m; chiều rộng 200 m, như Hình 2.

Điều kiện biên: Đối với các điều kiện biên, trong phân tích này, không cho phép có bất kỳ chuyển vị theo phương ngang hoặc chuyển vị theo phương thẳng đứng tại biên đáy mô hình. Trên hai biên thẳng đứng mô hình, chỉ cho phép có các



Hình 2. Sơ đồ mô phỏng hai đường hầm song song có cùng trục thẳng đứng.

chuyển vị theo chiều đứng, không cho phép chuyển vị theo phương ngang. Cuối cùng, biên trên cùng của mô hình cho phép chuyển vị theo phương ngang và phương đứng.

Điều kiện ứng suất ban đầu trong mô hình sử dụng phương pháp lực trọng trường, trong bài toán này ứng suất thẳng đứng  $\sigma_v$  (kN/m<sup>2</sup>) được xác định thông qua trọng lượng thể tích của lớp đất, theo công thức sau:

$$\sigma_v = Z \cdot \gamma \quad (1)$$

Trong đó:  $Z$  - chiều sâu vị trí xác định ứng suất (m);  $\gamma$  - trọng lượng thể tích của lớp đất (kN/m<sup>3</sup>);

Ứng suất theo phương nằm ngang  $\sigma_h$  (kN/m<sup>2</sup>) được xác định thông qua hệ số áp lực ngang  $K_0$ , theo công thức sau:

$$\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v \quad (2)$$

Trong đó:  $K_0$  - hệ số áp lực ngang;

Hệ số  $K_0$  được xác định thông qua giá trị góc ma sát trong của lớp đất đá  $\varphi$  (°), theo công thức sau:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (3)$$

Các bước thực hiện bài toán mô phỏng công tác thi công hai đường hầm song song cùng trục thẳng đứng bao gồm:

Bước 1: Thiết lập các thông số ban đầu, khai báo điều kiện biên.

Bước 2: Công tác đào đất, lắp đặt vỏ chống của đường hầm thứ nhất.

Bước 3: Áp đặt lượng mất thể tích cho đường hầm thứ nhất.

Bước 4: Công tác đào đất, lắp đặt vỏ chống của đường hầm thứ hai.

Bước 5: Áp đặt lượng mất thể tích cho đường hầm thứ hai.

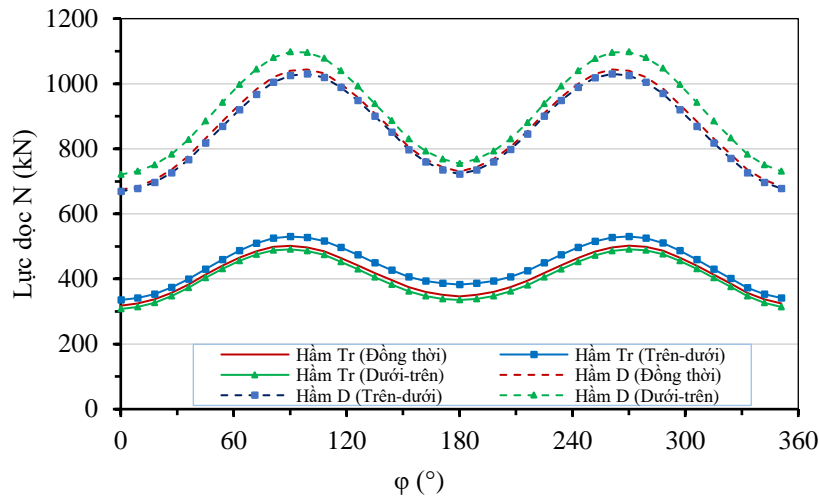
Sơ đồ mô phỏng hai đường hầm song song có cùng trục thẳng đứng được thể hiện trong Hình 2.

### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Kết quả phân tích ảnh hưởng của trình tự thi công các đường hầm đến nội lực trong các vỏ hầm

Để phân tích ảnh hưởng của trình tự thi công các đường hầm đến nội lực trong các vỏ hầm trong sơ đồ hai đường hầm song song có cùng trục thẳng đứng, tác giả đã thực hiện một số bài toán để đánh giá sự thay đổi nội lực trong các vỏ hầm, cụ thể như sau: thi công đồng thời hai đường hầm; thi công hầm trên (Hầm Tr) trước, hầm dưới (Hầm D) thi công sau; thi công hầm dưới trước, hầm trên thi công sau. Các tham số hình học sử dụng: giá trị chiều sâu từ mặt đất đến tâm đường hầm phía trên là  $Z_{tr} = 2D = 13,3$  m, khoảng cách giữa tâm hai đường hầm là  $L = 2D = 13,3$  m, lượng mất thể tích  $VL = 0,5\%$ . Kết quả lực dọc phân bố trong các vỏ hầm được thể hiện trong Hình 3.

Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi thi công hai đường hầm song song có cùng trục thẳng đứng, lực dọc phân bố trong vỏ hầm có tính đối xứng qua trục thẳng đứng của hầm, đường hầm ở dưới do bố trí ở chiều sâu lớn hơn nên có giá trị lực dọc và mô men lớn hơn so với đường hầm ở phía trên.



Hình 3. Ảnh hưởng của trình tự thi công đến lực dọc N (kN) trong vỏ hầm trên, hầm dưới.

Ảnh hưởng của trình tự thi công đến lực dọc vỏ hầm trên (Hàm Tr) cho thấy: khi thi công hai hầm đồng thời (Đồng thời); khi thi công theo trình tự hầm trên rồi đến hầm dưới (Trên-dưới); khi thi công theo trình tự hầm dưới rồi đến hầm trên (Dưới-trên), giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm trên lần lượt là: 502,38 kN; 530,80 kN; 491,25 kN, vị trí xảy ra giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm trên trong cả ba trường hợp có trình tự thi công như trên đều tại các góc  $90^\circ$  và  $270^\circ$ . So với trình tự đào đồng thời, thì ở trình tự đào (Trên-dưới) lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm trên tăng 5,65%, ở trình tự đào (Dưới-trên) lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm trên giảm 2,21%.

Từ đó ta thấy, khi thi công theo trình tự hầm trên trước, hầm dưới thi công sau thì lực dọc trong vỏ hầm trên là lớn nhất, do đường hầm trên thi công xong và chịu ảnh hưởng từ công tác thi công khai đào hầm phía dưới nên lực dọc trong hầm trên có giá trị lớn.

Đối với hầm phía dưới, khi thi công hai hầm đồng thời (Đồng thời); khi thi công theo trình tự hầm trên rồi đến hầm dưới (Trên-dưới); khi thi

công theo trình tự hầm dưới rồi đến hầm trên (Dưới-trên) giá trị lớn nhất của lực dọc trong vỏ hầm dưới lần lượt là: 1043,87 kN; 1030,35 kN; 1097,65 kN. Vị trí xảy ra giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm dưới trong ba trường hợp đó lần lượt là tại các góc  $99^\circ$  và  $261^\circ$ ; tại các góc  $99^\circ$  và  $261^\circ$ ; tại các góc  $90^\circ$  và  $270^\circ$ . So với trình tự đào đồng thời, thì ở trình tự đào (Trên-dưới) lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm dưới giảm 1,29%, ở trình tự đào (Dưới-trên) lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm dưới tăng 5,15%.

Từ đó cho thấy, ảnh hưởng của sự tương tác giữa hai đường hầm nên khi thi công theo thứ tự hầm dưới-trên thì nội lực trong đường hầm phía dưới là lớn nhất và vị trí xảy ra giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm dưới là tại các góc  $90^\circ$  và  $270^\circ$ . Các giá trị lực dọc lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm được tập hợp trong Bảng 2 dưới đây.

Trên Hình 4 thể hiện ảnh hưởng của trình tự thi công đến mô men trong các vỏ hầm, giá trị mô men dương và mô men âm lớn nhất trong vỏ hầm trên trong trường hợp thứ tự thi công hai hầm đồng thời; hầm trên-dưới; hầm dưới-trên có giá trị lần

Bảng 2. Giá trị lực dọc lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm khi thi công với các thứ tự khác nhau.

STT	Trình tự thi công	Lực dọc trong vỏ hầm, N (kN)			
		Hàm trên		Hàm dưới	
		Max	Min	Max	Min
1	Đồng thời	502,38	317,95	1043,87	674,20
2	Tr-D	530,80	335,48	1030,35	669,48
3	D-Tr	491,25	307,75	1097,65	720,99



lượt là 34,18/-41,84 kNm; 42,36/-53,83 kNm; 36,95/-43,00 kNm, vị trí có mô men lớn nhất trong vỏ hầm trên trong ba trường hợp đó đều tại các góc  $81^\circ$  và  $279^\circ$ . So với trình tự đào đồng thời, thì ở trình tự đào (Trên-dưới) giá trị tuyệt đối lớn nhất của mô men trong vỏ hầm trên tăng 28,6%, ở trình tự đào (Dưới-trên) giá trị tuyệt đối lớn nhất của mô men trong vỏ hầm trên tăng 2,77%. Như vậy, với trình tự thi công hầm trên-dưới thì mô men trong vỏ hầm trên có giá trị là lớn nhất, do ảnh hưởng từ việc thi công hầm thứ hai là hầm dưới nên khi thi công hầm trên trước thì mô men trong vỏ hầm trên là lớn nhất.

Đối với hầm dưới, giá trị mô men dương và mô men âm lớn nhất trong vỏ hầm dưới trong trường hợp thứ tự thi công hai hầm đồng thời; hầm trên-dưới; hầm dưới-trên có giá trị lần lượt là 47,23/-69,71 kNm; 49,90/-70,68 kNm; 59,36/-95,37 kNm. Vị trí xảy ra giá trị mô men lớn nhất trong vỏ hầm dưới trong ba trường hợp trên đều tại các góc  $90^\circ$  và  $270^\circ$ . So với trình tự đào đồng thời, thì ở trình tự đào (Trên-dưới) giá trị tuyệt đối lớn nhất của mô men trong vỏ hầm dưới tăng 1,39%, ở trình tự đào (Dưới-trên) giá trị tuyệt đối lớn nhất của mô men trong vỏ hầm dưới tăng 36,80%. Từ kết quả ta thấy, thứ tự thi công hầm dưới-trên thì mô men trong vỏ hầm dưới có giá trị lớn nhất, do ảnh hưởng từ việc thi công đường hầm

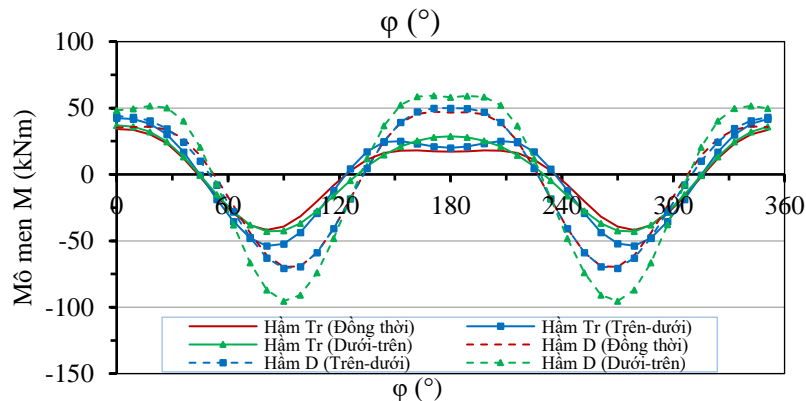
thứ hai là hầm trên, nên việc áp dụng thứ tự thi công hầm dưới trước hầm trên sau thì mô men trong vỏ hầm dưới có giá trị lớn nhất.

Từ đó cho thấy, đường hầm thi công trước chịu ảnh hưởng từ công tác thi công đường hầm thi công sau. Lực dọc và mô men trong vỏ hầm thi công trước lớn hơn so với lực dọc và mô men trong vỏ hầm đó khi hầm được thi công sau. Đường hầm thi công sau có giá trị lực dọc và mô men tương đồng so với trình tự thi công đồng thời. Các giá trị mô men lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm được tập hợp trong Bảng 3 dưới đây.

### 3.2. Kết quả phân tích ảnh hưởng của lượng mất thể tích đến nội lực trong các vỏ hầm

Để phân tích ảnh hưởng của lượng mất thể tích đến nội lực trong vỏ hầm, tác giả thực hiện một số bài toán với giá trị lượng mất thể tích thay đổi lần lượt là: 0,25%; 0,5%; 0,75%; 1%; 1,25%; 1,5% trong các trường hợp thứ tự thi công hầm trên trước, hầm dưới thi công sau và trình tự thi công hầm dưới trước, hầm trên thi công sau. Ảnh hưởng của lượng mất thể tích đến lực dọc trong các vỏ hầm được thể hiện trong Hình 5.

Từ kết quả Hình 5 cho thấy, theo trình tự thi công hầm trên-dưới cho giá trị lực dọc trong vỏ hầm trên lớn hơn khi thi công theo trình tự hầm dưới-trên. Theo trình tự thi công hầm trên-dưới,



Hình 4. Ảnh hưởng của trình tự thi công đến mô men  $M$  (kNm) trong vỏ hầm.

Bảng 3. Giá trị mô men lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm khi thi công với các thứ tự khác nhau.

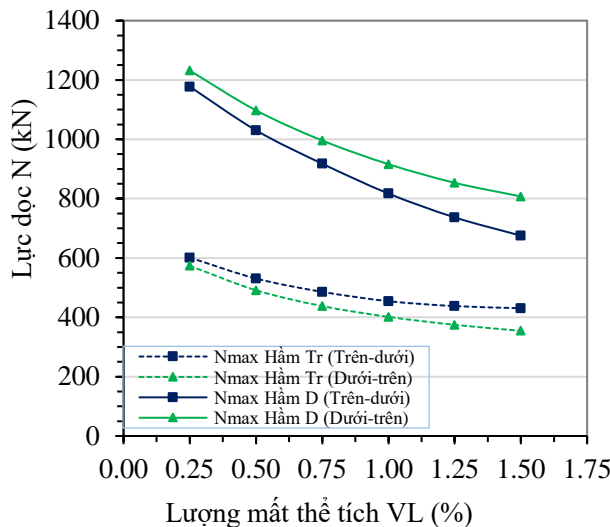
STT	Trình tự thi công	Mô men trong vỏ hầm, $M$ (kNm)			
		Hầm trên		Hầm dưới	
		Max	Min	Max	Min
1	Đồng thời	34,18	-41,84	47,23	-69,71
2	Tr-D	42,36	-53,83	49,90	-70,68
3	D-Tr	36,95	-43,00	59,36	-95,37

với giá trị lượng mất thể tích 0,25% thì giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm trên là 601,20 kN, khi tăng lượng mất thể tích từ 0,25% lên các giá trị: 0,5%; 0,75%; 1%; 1,25%; 1,5% thì giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm trên giảm lần lượt là: 11,71%; 19,18%; 24,41%; 27,17%; 28,36%. Từ kết quả cho thấy với giá trị lượng mất thể tích càng nhỏ thì giá trị lực dọc trong vỏ hầm trên càng lớn.

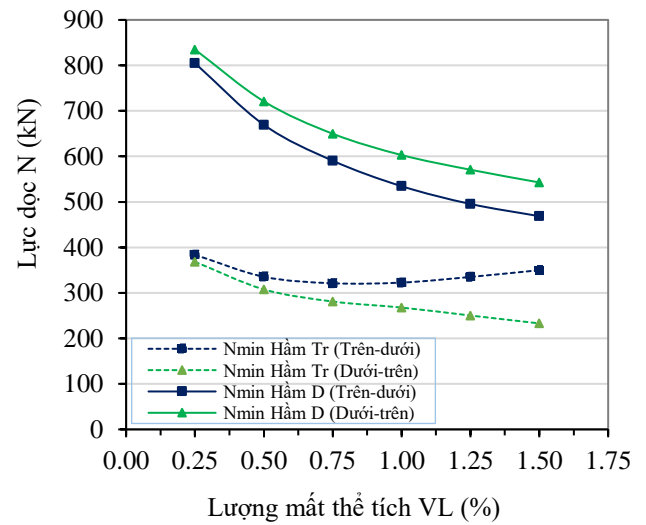
Ảnh hưởng của lượng mất thể tích đến lực dọc vỏ hầm dưới được thể hiện trong Hình 5. Từ kết quả cho thấy, đối vỏ hầm dưới thì thứ tự thi công hầm dưới-trên cho giá trị lực dọc trong vỏ hầm dưới lớn hơn so với trình tự thi công hầm trên-dưới. Theo trình tự thi công hầm dưới-trên, với giá trị lượng mất thể tích 0,25% thì giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm dưới là 1231,60 kN khi tăng

lượng mất thể tích từ 0,25% lên các giá trị: 0,5%; 0,75%; 1%; 1,25%; 1,5% thì giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm dưới giảm lần lượt là: 10,88%; 19,13%; 25,61%; 30,71%; 34,44%. Tương tự như lực dọc trong vỏ hầm trên, với giá trị lượng mất thể tích càng tăng thì giá trị lực dọc trong vỏ hầm dưới càng giảm. Các giá trị lực dọc lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm với lượng mất thể tích VL(%) khác nhau được tập hợp trong Bảng 4 dưới đây. Ảnh hưởng của lượng mất thể tích đến mô men trong các vỏ hầm được thể hiện trong Hình 6.

Từ kết quả cho thấy, trình tự thi công hầm trên-dưới cho giá trị mô men trong vỏ hầm trên lớn hơn so với trình tự thi công hầm dưới-trên, như Hình 6. Theo trình tự thi công hầm trên-dưới, với



(a)



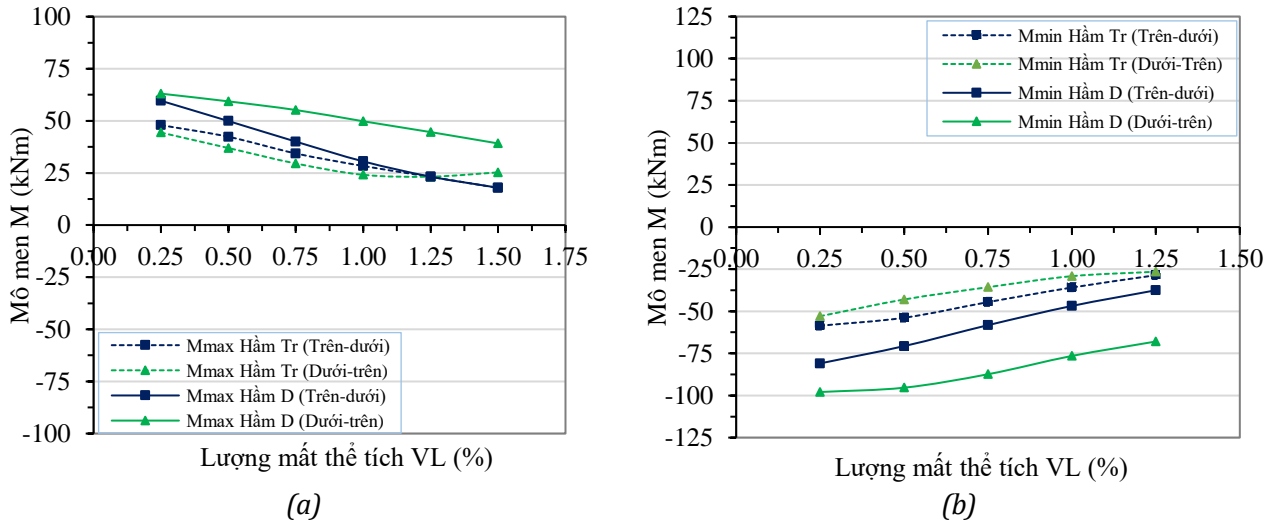
(b)

Hình 5. Ảnh hưởng của lượng mất thể tích VL (%) đến giá trị lực dọc lớn nhất  $N_{max}$  (kN) (a), và nhỏ nhất  $N_{min}$  (kN) (b).

Bảng 4. Giá trị lực dọc lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm khi thi công với lượng mất thể tích VL (%) khác nhau.

STT	Lượng mất thể tích VL (%)	Trình tự thi công	Lực dọc trong vỏ hầm (kN)			
			Hầm trên		Hầm dưới	
			Max	Min	Max	Min
1	0,25	Tr-D	601,20	383,71	1177,47	804,89
		D-Tr	573,47	368,34	1231,60	834,84
2	0,50	Tr-D	530,80	335,48	1030,35	669,48
		D-Tr	491,25	307,75	1097,65	720,99
3	0,75	Tr-D	485,90	321,24	917,86	590,50
		D-Tr	437,82	281,10	996,04	649,81
4	1,00	Tr-D	454,45	322,69	817,23	534,58
		D-Tr	401,47	267,77	916,20	602,99
5	1,25	Tr-D	437,87	335,10	736,80	495,45
		D-Tr	374,76	250,32	853,38	570,67
6	1,50	Tr-D	430,72	349,97	675,21	468,60
		D-Tr	354,47	232,99	807,41	542,80





Hình 6. Ảnh hưởng của lượng mất thể tích VL (%) đến giá trị Mô men lớn nhất  $M_{max}$  (kNm) (a), và nhỏ nhất  $M_{min}$  (kNm) (b).

các giá trị lượng mất thể tích 0,25%; 0,5%; 0,75%; 1%; 1,25%; 1,50% thì giá trị mô men dương, mô men âm lớn nhất trong vỏ hầm trên lần lượt là: 47,95/-58,58 kNm; 42,36/-53,83 kNm; 34,36/-44,57 kNm; 28,34/-35,90 kNm; 23,15/-28,59 kNm; 17,83/-23,24 kNm. Theo trình tự thi công hầm trên-dưới, với giá trị lượng mất thể tích tăng từ 0,25% lên các giá trị: 0,5%; 0,75%; 1%; 1,25%; 1,5% thì độ lớn mô men âm lớn nhất trong vỏ hầm trên giảm lần lượt là: 8,10%; 23,92%; 38,72%; 51,20%; 60,49%. Từ kết quả cho thấy với giá trị lượng mất thể tích càng nhỏ thì giá trị mô men trong vỏ hầm trên càng lớn.

Ảnh hưởng của lượng mất thể tích đến mô men vỏ hầm dưới được thể hiện trong Hình 6, từ kết quả cho thấy đối vỏ hầm dưới thì thứ tự thi công hầm dưới-trên cho giá trị mô men trong vỏ hầm

dưới lớn hơn so với trình tự thi công hầm trên-dưới. Theo trình tự thi công hầm dưới-trên, với các giá trị lượng mất thể tích 0,25%; 0,5%; 0,75%; 1%; 1,25%; 1,50% thì giá trị mô men dương, mô men âm lớn nhất trong vỏ hầm dưới lần lượt là: 63,04/-97,93 kNm; 59,36/-95,37 kNm; 55,20/-87,38 kNm; 49,81/-76,51 kNm; 44,60/-67,93 kNm; 39,17/-60,71 kNm. Theo trình tự thi công hầm dưới-trên (Bảng 5), với giá trị lượng mất thể tích tăng từ 0,25% lên các giá trị: 0,5%; 0,75%; 1%; 1,25%; 1,5% thì độ lớn mô men âm lớn nhất trong vỏ hầm dưới giảm lần lượt là: 2,61%; 10,77%; 21,87%; 30,63%; 38,00%. Từ kết quả cho thấy với giá trị lượng mất thể tích càng nhỏ thì giá trị mô men trong vỏ hầm dưới càng lớn. Các giá trị mô men lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm với

Bảng 5. Giá trị mô men lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm khi thi công với lượng mất thể tích VL (%) khác nhau.

STT	Lượng mất thể tích VL (%)	Trình tự thi công	Mô men trong vỏ hầm (kNm)			
			Hầm trên		Hầm dưới	
			Max	Min	Max	Min
1	0,25	Tr-D	47,95	-58,58	59,63	-80,94
		D-Tr	44,38	-52,91	63,04	-97,93
2	0,50	Tr-D	42,36	-53,83	49,90	-70,68
		D-Tr	36,95	-43,00	59,36	-95,37
3	0,75	Tr-D	34,36	-44,57	40,04	-58,24
		D-Tr	29,55	-35,70	55,20	-87,38
4	1,00	Tr-D	28,34	-35,90	30,55	-46,82
		D-Tr	24,12	-29,16	49,81	-76,51
5	1,25	Tr-D	23,15	-28,59	23,23	-37,51
		D-Tr	23,24	-26,51	44,60	-67,93
6	1,50	Tr-D	17,83	-23,14	17,92	-27,19
		D-Tr	25,29	-23,83	39,17	-60,71

lượng mất thể tích VL (%) khác nhau được tập hợp trong Bảng 5.

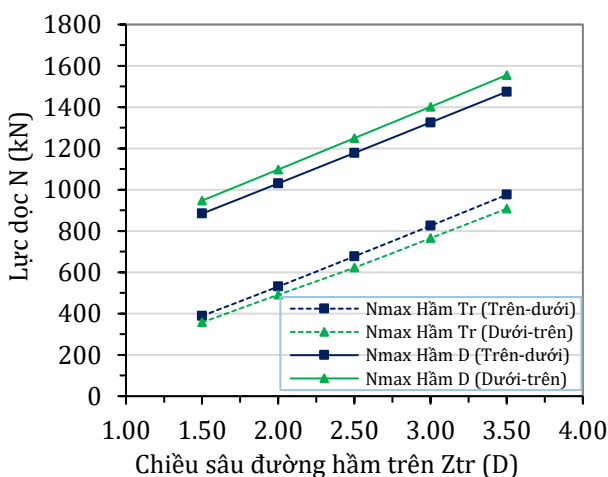
Kết quả bài toán khảo sát về lượng mất thể tích cho thấy, giá trị lực dọc và mô men trong vỏ hầm trên và vỏ hầm dưới vẫn tuân theo quy luật là đường hầm thi công trước hay là đường hầm đã hiện hữu thì chịu ảnh hưởng từ hoạt động khai đào đường hầm thi công sau, do đó lực dọc và mô men trong vỏ hầm lớn hơn so với trình tự được thi công sau. Công tác thi công đường hầm có giá trị lượng mất thể tích càng nhỏ thì gây ra lực dọc và mô men trong các vỏ hầm càng lớn.

### 3.3. Kết quả phân tích ảnh hưởng của chiều sâu đặt đường hầm đến nội lực trong các vỏ hầm

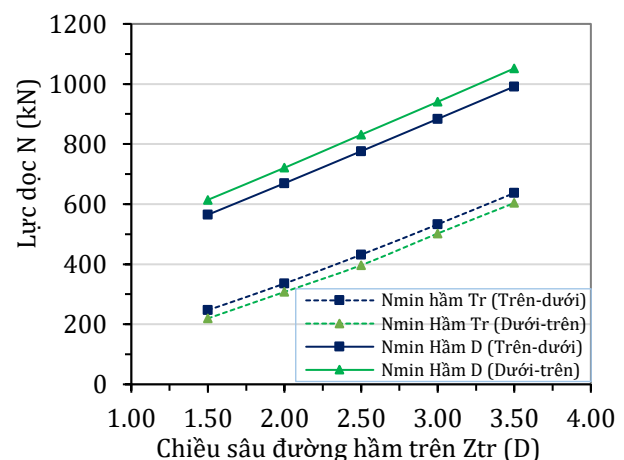
Để phân tích ảnh hưởng của chiều sâu bố trí đường hầm đến nội lực trong các vỏ hầm, tác giả thực hiện một số bài toán khi thay đổi chiều sâu từ mặt đất đến trục đường hầm trên  $Z_{tr} = 1,5D$ ;  $2,0D$ ;  $2,5D$ ;  $3,0D$ ;  $3,5D$  trong đó  $D$  là đường kính của các đường hầm, trong khi vẫn giữ nguyên các tham số khoảng cách giữa tâm hai đường hầm  $L = 2D$ , lượng mất thể tích VL = 0,5%; thực hiện với các trình tự thi công hầm trên-dưới và trình tự thi công hầm dưới-trên. Ảnh hưởng của chiều sâu bố trí đường hầm đến lực dọc trong các vỏ hầm được thể hiện trong Hình 7.

Kết quả giá trị lực dọc trong vỏ hầm trên cho thấy, trong các trình tự thi công hầm trên-dưới hay trình tự thi công hầm dưới-trên thì khi tăng chiều sâu bố trí đường hầm thì lực dọc trong vỏ hầm tăng

lên, do đường hầm nằm nông khi tăng chiều sâu đặt đường hầm thì trọng lượng khối đất tác dụng lên đường hầm tăng theo. Với trình tự thi công hầm trên-dưới thì cho giá trị lực dọc trong vỏ hầm trên lớn hơn so với trình tự thi công hầm dưới-trên, như Hình 7. Theo trình tự thi công hầm trên-dưới, với giá trị chiều sâu  $Z_{tr}$  là  $1,5D$  thì giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm trên là 388,84 kN, khi tăng chiều sâu  $Z_{tr}$  từ  $1,5D$  lên các giá trị:  $2,0D$ ;  $2,5D$ ;  $3,0D$ ;  $3,5D$  thì giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm trên tăng lần lượt là: 36,51%; 74,11%; 112,24%; 150,90%. Kết quả ảnh hưởng của chiều sâu đường hầm đến lực dọc vỏ hầm dưới được thể hiện trong Hình 7, từ kết quả cho thấy đối vỏ hầm dưới thì khi chiều sâu bố trí đường hầm tăng thì lực dọc trong vỏ hầm tăng và với thứ tự thi công hầm dưới-trên cho giá trị lực dọc trong vỏ hầm dưới lớn hơn so với trình tự thi công hầm trên-dưới. Theo trình tự thi công hầm dưới-trên, với giá trị chiều sâu  $Z_{tr}$  là  $1,5D$  thì giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm dưới là 947,46 kN, khi tăng chiều sâu  $Z_{tr}$  từ  $1,5D$  lên các giá trị:  $2,0D$ ;  $2,5D$ ;  $3,0D$ ;  $3,5D$  thì giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm dưới tăng lần lượt là: 15,85%; 31,92%; 47,93%; 64,12%. Ảnh hưởng của chiều sâu thi công đường hầm đến mô men trong các vỏ hầm được thể hiện trong Hình 8. Các giá trị lực dọc lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm với chiều sâu thi công  $Z_{tr}$  (D) khác nhau được tập hợp trong Bảng 6.



(a)

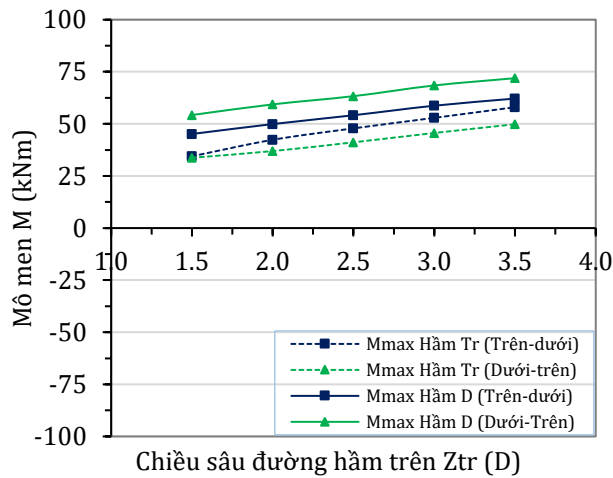


(b)

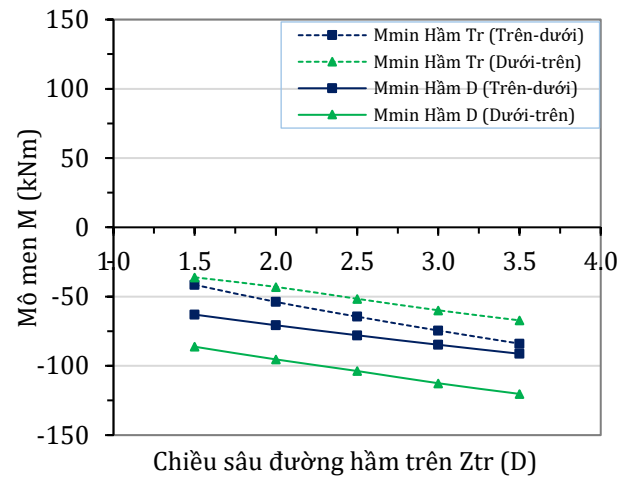
Hình 7. Ảnh hưởng của chiều sâu đường hầm  $Z_{tr}$  (D) đến giá trị lực dọc lớn nhất  $N_{max}$  (kN) (a), và nhỏ nhất  $N_{min}$  (kN) (b).

Bảng 6. Giá trị lực dọc lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm với chiều sâu thi công đường hầm  $Z_{Tr}$  (D) khác nhau.

STT	Chiều sâu thi công đường hầm $Z_{Tr}$ (D)	Trình tự thi công	Lực dọc trong vỏ hầm (kN)			
			Hầm trên		Hầm dưới	
			Max	Min	Max	Min
1	1,5	Tr-D	388,84	246,89	884,15	564,66
		D-Tr	357,15	219,35	947,46	614,17
2	2,0	Tr-D	530,08	335,48	1030,35	669,48
		D-Tr	491,25	307,75	1097,65	720,99
3	2,5	Tr-D	677,00	431,52	1177,90	776,15
		D-Tr	622,30	396,58	1249,90	831,05
4	3,0	Tr-D	825,26	532,63	1325,79	883,62
		D-Tr	765,12	502,14	1401,57	940,52
5	3,5	Tr-D	975,59	636,96	1474,32	991,53
		D-Tr	907,85	603,73	1554,99	1051,96



(a)



(b)

Hình 8. Ảnh hưởng của chiều sâu đường hầm  $Z_{Tr}$  (D) đến giá trị Mô men lớn nhất  $M_{max}$  (kNm) (a), và nhỏ nhất  $M_{min}$  (kNm) (b).

Kết quả ảnh hưởng của chiều sâu đường hầm đến mô men vỏ hầm trên và vỏ hầm dưới đều cho thấy khi chiều sâu tăng thì mô men trong vỏ hầm trên và vỏ hầm dưới đều tăng, đối với hầm trên thì trình tự thi công hầm trên trước, hầm dưới sau thì gây ra mô men trong vỏ hầm trên lớn hơn so với trình tự hầm dưới trước, hầm trên sau. Theo trình tự thi công hầm trên trước, hầm dưới sau với các giá trị chiều sâu đường hầm  $Z_{Tr}$  là 1,5D; 2,0D; 2,5D; 3,0D; 3,5D thì giá trị mô men dương, mô men âm lớn nhất trong vỏ hầm trên lần lượt là: 34,45/-41,49 kNm; 42,36/-53,83 kNm; 47,85/-64,47 kNm; 52,88/-74,50 kNm; 57,99/-83,96 kNm. Theo trình tự thi công hầm trên trước, hầm dưới sau, với

chiều sâu  $Z_{Tr}$  tăng từ 1,5D lên các giá trị: 2,0D; 2,5D; 3,0D; 3,5D thì độ lớn mô men âm lớn nhất trong vỏ hầm trên tăng lần lượt là: 29,76%; 55,40%; 79,57%; 102,38%. Đối với hầm dưới, theo trình tự thi công hầm dưới trước, hầm trên sau gây ra mô men trong vỏ hầm dưới lớn hơn so với trình tự thi công hầm trên trước, hầm dưới sau, với các giá trị chiều sâu đường hầm  $Z_{Tr}$  là 1,5D; 2,0D; 2,5D; 3,0D; 3,5D trong trình tự thi công hầm dưới trước, hầm trên sau thì giá trị mô men dương, mô men âm lớn nhất trong vỏ hầm dưới lần lượt là: 54,24/-86,19 kNm; 59,36/-95,37 kNm; 463,29/-103,72 kNm; 68,43/-112,56 kNm; 71,94/-120,26 kNm. Theo trình tự thi công hầm dưới trước, trên sau, với

chiều sâu  $Z_{tr}$  tăng từ 1,5D lên các giá trị: 2,0D; 2,5D; 3,0D; 3,5D thì độ lớn mô men âm lớn nhất trong vỏ hầm dưới tăng lần lượt là: 10,65%; 20,34%; 30,60%; 39,54%. Các giá trị mô men lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm với chiều sâu thi công  $Z_{tr}$  (D) khác nhau được tập hợp trong Bảng 7.

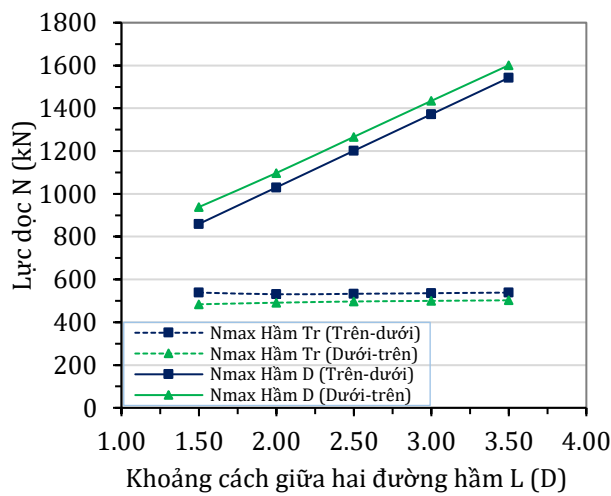
Kết quả bài toán khảo sát về chiều sâu đặt đường hầm cho thấy, giá trị lực dọc và mô men trong vỏ hầm trên và vỏ hầm dưới vẫn tuân theo quy luật là đường hầm thi công trước hay là đường hầm đã có hiện hữu thì chịu ảnh hưởng từ hoạt động khai đào đường hầm thi công sau, do đó lực dọc và mô men trong vỏ hầm lớn hơn so với trình tự được thi công sau. Khi tăng chiều sâu đặt đường hầm thì lực dọc và mô men trong các vỏ hầm càng tăng.

### 3.4. Kết quả phân tích ảnh hưởng của khoảng cách giữa hai đường hầm đến nội lực trong các vỏ hầm

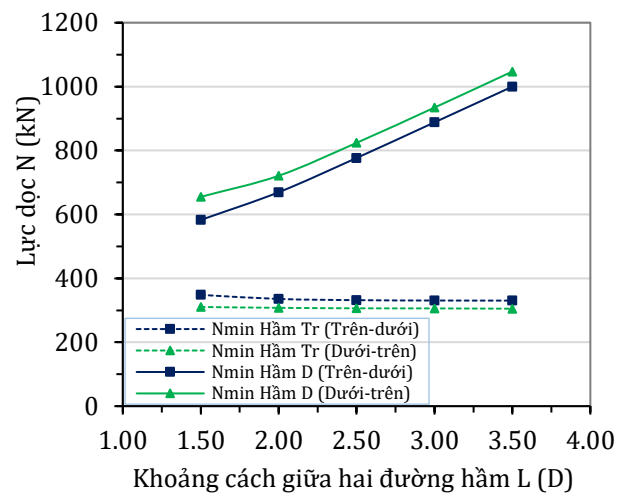
Trong phân tích ảnh hưởng của khoảng cách giữa hai đường hầm đến nội lực trong các vỏ hầm, tác giả thực hiện một số bài toán khi thay đổi khoảng cách giữa hai đường hầm  $L = 1,5D; 2,0D; 2,5D; 3,0D; 3,5D$  trong đó D là đường kính của các đường hầm, trong khi vẫn giữ nguyên các tham số chiều sâu đường hầm trên  $Z_{tr} = 2D$ , lượng mất thể tích  $VL = 0,5\%$ ; thực hiện với các trình tự thi công hầm trên-dưới và trình tự thi công hầm dưới-trên. Ảnh hưởng của khoảng cách giữa hai đường hầm đến lực dọc trong các vỏ hầm được thể hiện trong Hình 9.

Bảng 7. Giá trị mô men lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm với chiều sâu thi công đường hầm  $Z_{tr}$  (D) khác nhau.

STT	Chiều sâu thi công đường hầm $Z_{Tr}$ (D)	Trình tự thi công	Mô men trong vỏ hầm (kNm)			
			Hầm trên		Hầm dưới	
			Max	Min	Max	Min
1	1,5	Tr-D	34,45	-41,49	45,15	-63,00
		D-Tr	33,73	-36,11	54,24	-86,19
2	2,0	Tr-D	42,36	-53,83	49,90	-70,68
		D-Tr	36,95	-43,00	59,36	-95,37
3	2,5	Tr-D	47,85	-64,47	54,14	-77,90
		D-Tr	41,15	-51,59	63,29	-103,72
4	3,0	Tr-D	52,88	-74,50	58,71	-84,78
		D-Tr	45,62	-59,88	68,43	-112,56
5	3,5	Tr-D	57,99	-83,96	62,15	-91,27
		D-Tr	49,82	-67,17	71,94	-120,26



(a)



(b)

Hình 9. Ảnh hưởng của khoảng cách giữa hai đường hầm  $L$  (D) đến giá trị lực dọc lớn nhất  $N_{max}$  (kN) (a), và nhỏ nhất  $N_{min}$  (kN) (b).

Trong sơ đồ hai đường hầm song song cùng trục thẳng đứng, khi giữ nguyên chiều sâu đường hầm trên ( $Z_{tr}$ ) và tăng khoảng cách giữa hai đường hầm ( $L$ ) tức là tăng chiều sâu của đường hầm phía dưới, kết quả cho thấy lực dọc trong vỏ hầm dưới tăng khi  $L$  tăng như Hình 9. Đối với hầm trên, trong trình tự thi công hầm trên-dưới, với khoảng cách giữa hai đường hầm có giá trị  $L = 1,5D; 2,0D; 2,5D; 3,0D; 3,5D$  thì giá trị lực dọc lớn nhất và nhỏ nhất trong vỏ hầm trên lần lượt là 538,69/348,31 kN; 530,80/335,48 kN; 532,93/331,71 kN; 535,81/330,55 kN; 538,55/330,33 kN. Để thấy rõ ảnh hưởng của tương tác giữa hai đường hầm tác giả đưa ra giá trị lực dọc lớn nhất và nhỏ nhất trong vỏ hầm trên, kết quả cho thấy, trong trình tự thi công hầm trên trước, hầm dưới thi công sau thì với khoảng cách giữa hai đường hầm  $L$  nhỏ nhất cho giá trị lực dọc trong vỏ hầm trên là lớn nhất. Theo trình tự thi công hầm trên-dưới, với giá trị khoảng cách giữa hai hầm  $L$  là 1,5D thì giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm trên là 538,69 kN, khi tăng khoảng cách giữa hai hầm  $L$  từ 1,5D lên các giá trị: 2,0D; 2,5D; 3,0D; 3,5D thì giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm trên giảm lần lượt là: 1,46%; 1,07%; 0,53%; 0,03%.

Lực dọc trong hầm dưới được thể hiện trong hình 9, khi tăng  $L$  cho thấy khoảng cách giữa hai đường hầm tăng, tức là chiều sâu đường hầm dưới tăng, kết quả cho thấy khi tăng ( $L$ ) thì lực dọc trong hầm dưới tăng và trong trình tự thi công hầm dưới trước, hầm trên sau thì lực dọc trong vỏ hầm dưới lớn hơn so với trình tự thi công hầm trên trước, hầm dưới sau. Với khoảng cách giữa hai đường

hầm có giá trị  $L = 1,5D; 2,0D; 2,5D; 3,0D; 3,5D$  thì giá trị lực dọc lớn nhất và nhỏ nhất trong vỏ hầm dưới lần lượt là 938,47/654,97 kN; 1097,65/720,99 kN; 1266,49/824,06 kN; 1434,59/934,41 kN; 1601,36/1047 kN. Theo trình tự thi công hầm dưới-trên, với giá trị khoảng cách giữa hai hầm  $L$  là 1,5D thì giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm dưới là 938,47 kN, khi tăng khoảng cách giữa hai hầm  $L$  từ 1,5D lên các giá trị: 2,0D; 2,5D; 3,0D; 3,5D thì giá trị lực dọc lớn nhất trong vỏ hầm dưới tăng lần lượt là: 16,96%; 34,95%; 52,87%; 70,64%.

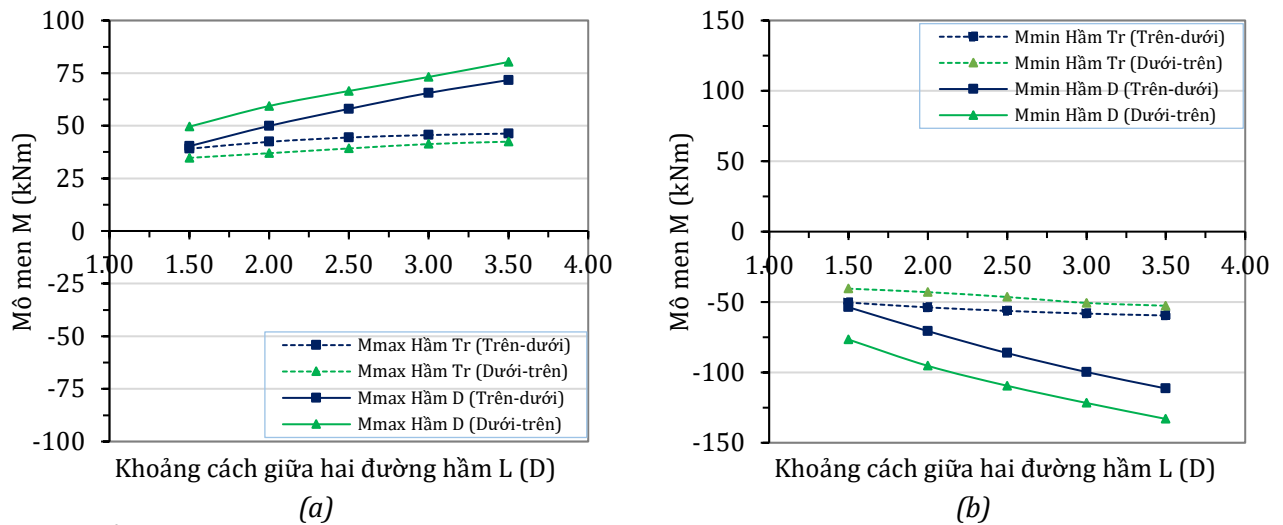
Từ kết quả cho thấy khi tăng ( $L$ ) thì lực dọc trong vỏ hầm dưới tăng. Các giá trị lực dọc lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm với khoảng cách giữa hai đường hầm  $L$  ( $D$ ) khác nhau được tập hợp trong Bảng 8 dưới đây.

Ảnh hưởng của khoảng cách giữa hai đường hầm đến mô men trong các vỏ hầm được thể hiện trong Hình 10.

Kết quả ảnh hưởng của khoảng cách giữa hai đường hầm ( $L$ ) đến mô men trong vỏ hầm trên cho thấy, trong trình tự thi công hầm trên trước, hầm dưới sau thì mô men trong vỏ hầm trên lớn hơn so với trình tự thi công hầm dưới trước, hầm trên sau. Với khoảng cách giữa hai đường hầm  $L = 1,5D; 2,0D; 2,5D; 3,0D; 3,5D$  thì giá trị mô men lớn nhất và nhỏ nhất trong vỏ hầm trên khi thi công theo trình tự hầm trên trước, hầm dưới sau có giá trị lần lượt là: 39,07/-50,38 kNm; 42,36/-53,83 kNm; 44,40/-56,31 kNm; 45,57/-58,25 kNm; 46,28/-59,59 kNm. Theo trình tự thi công hầm trên-dưới, khi tăng khoảng cách giữa hai hầm  $L$  từ

Bảng 8. Giá trị lực dọc lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm với khoảng cách giữa hai đường hầm  $L$  ( $D$ ) khác nhau.

STT	Khoảng cách giữa hai đường hầm $L$ ( $D$ )	Trình tự thi công	Lực dọc trong vỏ hầm (kN)			
			Hầm trên		Hầm dưới	
			Max	Min	Max	Min
1	1,5	Tr-D	538,69	348,31	859,62	582,63
		D-Tr	483,95	310,38	938,47	654,97
2	2,0	Tr-D	530,80	335,48	1030,35	669,48
		D-Tr	491,25	307,75	1097,65	720,99
3	2,5	Tr-D	532,93	331,71	1201,52	776,69
		D-Tr	496,99	306,22	1266,49	824,06
4	3,0	Tr-D	535,81	330,55	1372,26	888,20
		D-Tr	499,96	305,92	1434,59	934,41
5	3,5	Tr-D	538,55	330,33	1542,58	999,94
		D-Tr	502,56	304,96	1601,36	1047,27



Hình 10. Ảnh hưởng của khoảng cách giữa hai đường hầm  $L$  (D) đến Mô men  $M$  (kNm) vỏ hầm trên (a), hầm dưới (b).

1,5D lên các giá trị: 2,0D; 2,5D; 3,0D; 3,5D thì độ lớn mô men âm lớn nhất trong vỏ hầm trên tăng lần lượt là: 6,85%; 11,76%; 15,61%; 18,27%.

Đối với hầm phía dưới, khi thi công theo trình tự hầm dưới trước, hầm trên sau thì mô men trong vỏ hầm dưới lớn hơn so với trình tự thi công hầm trên trước, hầm dưới sau. Với khoảng cách giữa hai đường hầm  $L = 1,5D; 2,0D; 2,5D; 3,0D; 3,5D$  thì giá trị mô men lớn nhất và nhỏ nhất trong vỏ hầm dưới khi thi công theo trình tự hầm dưới trước, hầm trên sau có giá trị lần lượt là: 49,55/-76,68 kNm; 59,36/-95,37 kNm; 66,51/-109,52 kNm; 73,16/-121,75 kNm; 80,28/-133,07 kNm. Theo trình tự thi công hầm dưới-trên, khi tăng khoảng cách giữa hai hầm  $L$  từ 1,5D lên các giá trị: 2,0D; 2,5D; 3,0D; 3,5D thì

độ lớn mô men âm lớn nhất trong vỏ hầm dưới tăng lần lượt là: 24,38%; 42,83%; 58,78%; 73,54%. Các giá trị mô men lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm với khoảng cách giữa hai đường hầm  $L$  (D) khác nhau được tập hợp trong Bảng 9.

Kết quả bài toán khảo sát về khoảng cách giữa hai đường hầm cho thấy, giá trị lực dọc và mô men trong vỏ hầm trên và vỏ hầm dưới vẫn tuân theo quy luật là đường hầm thi công trước hay là đường hầm đã có hiện hữu thì chịu ảnh hưởng từ hoạt động khai đào đường hầm thi công sau, do đó lực dọc và mô men trong vỏ hầm lớn hơn so với trình tự được thi công sau, Kết quả lực dọc trong vỏ hầm thì khoảng cách  $L = 2D$  thì lực dọc trong vỏ hầm trên là nhỏ nhất, lực dọc trong vỏ hầm trên (Tr-D)

Bảng 9. Giá trị lực mô men lớn nhất và nhỏ nhất trong các vỏ hầm với khoảng cách giữa hai đường hầm  $L$  (D) khác nhau.

STT	Khoảng cách giữa hai đường hầm $L$ (D)	Trình tự thi công	Mô men trong vỏ hầm (kNm)			
			Hầm trên		Hầm dưới	
			Max	Min	Max	Min
1	1,5	Tr-D	39,07	-50,38	40,29	-53,71
		D-Tr	34,73	-40,53	49,55	-76,68
2	2,0	Tr-D	42,36	-53,83	49,90	-70,68
		D-Tr	36,95	-43,00	59,36	-95,37
3	2,5	Tr-D	44,40	-56,31	58,00	-86,30
		D-Tr	39,21	-46,46	66,51	-109,52
4	3,0	Tr-D	45,57	-58,25	65,56	-99,76
		D-Tr	41,30	-50,65	73,16	-121,75
5	3,5	Tr-D	46,28	-59,59	71,69	-111,43
		D-Tr	42,42	-52,68	80,28	-133,07



$M_{max} = 530,80$  KN. Đối với sơ đồ bố trí hai đường hầm song song cùng trục thẳng đứng khi giữ nguyên vị trí hầm trên và tăng khoảng cách giữa hai đường hầm, tức là tăng chiều sâu của hầm phía dưới, thì khi tăng khoảng cách giữa hai đường hầm thì lực dọc và mô men trong vỏ hầm dưới càng tăng, bên cạnh đó đường hầm trên có sự thay đổi không lớn về giá trị lực dọc và mô men trong vỏ hầm.

#### 4. Kết luận

Công tác xây dựng hệ thống đường hầm tàu điện ngầm đô thị cung cấp một giải pháp bền vững để đáp ứng nhu cầu giao thông và thúc đẩy phát triển kinh tế. Để tối ưu hóa công tác vận hành, các tuyến đường hầm thường được thiết kế thành hai đường hầm song song gần nhau. Tương tác cơ học giữa các đường hầm này tác động đến nội lực vỏ hầm. Nghiên cứu này phân tích nội lực vỏ hầm trong sơ đồ bố trí hai đường hầm song song cùng trục thẳng đứng. Dựa trên kết quả nghiên cứu có thể rút ra các kết luận sau:

- Trình tự thi công các đường hầm có ảnh hưởng đến nội lực trong vỏ hầm, đường hầm thi công trước chịu ảnh hưởng của công tác thi công đường hầm thi công sau, cụ thể là lực dọc và mô men trong vỏ hầm trên có giá trị lớn nhất khi thi công theo trình tự hầm trên thi công trước và hầm dưới thi công sau, bên cạnh đó lực dọc và mô men vỏ hầm dưới đạt giá trị lớn nhất khi thi công theo trình tự hầm dưới thi công trước, hầm trên thi công sau.

- Trong các nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của lượng mất thể tích, chiều sâu bố trí đường hầm và khoảng cách giữa hai đường hầm, kết quả cho thấy đối với hầm trên trình tự thi công hầm trên trước, hầm dưới thi công sau gây ra lực dọc và mô men trong vỏ hầm trên lớn hơn, còn đối với hầm dưới thì trình tự thi công hầm dưới trước, hầm trên sau, gây ra lực dọc và mô men trong vỏ hầm dưới lớn hơn.

- Lượng mất thể tích có ảnh hưởng đến nội lực trong vỏ hầm, khi lượng mất thể tích nhỏ thì nội lực trong các vỏ hầm lớn hơn.

- Chiều sâu bố trí đường hầm có ảnh hưởng đến lực dọc và mô men trong vỏ hầm, khi tăng chiều sâu đặt đường hầm thì lực dọc và mô men trong các vỏ hầm tăng.

- Đối với sơ đồ bố trí hai đường hầm song song cùng trục thẳng đứng, khi cố định vị trí hầm phía trên và tăng khoảng cách giữa hai đường hầm, tức

tăng chiều sâu đường hầm phía dưới thì lực dọc và mô men hầm phía dưới tăng, lực dọc và mô men vỏ hầm phía trên có sự thay đổi không đáng kể.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đề tài khoa học và công nghệ cấp Cơ sở của Trường Đại học Mỏ - Địa chất, mã số T25-41. Tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Mỏ - Địa chất.

#### Đóng góp của tác giả

Đỗ Ngọc Thái - lên ý tưởng, thu thập dữ liệu, viết phần phương pháp, chương trình tính, hoàn thiện bản thảo, rà soát và chỉnh sửa hoàn thiện bài báo.

#### Tài liệu tham khảo

- Addenbrooke, T.I., & Potts, D.M. (2001). Twin tunnel interaction: surface and subsurface effects. *International Journal of Geomechanics*, 1, 2, 249-271.
- Bousbia N. (2024). Influence of the Angular Position of a New Tunnel on Movement in the Surrounding Existing Tunnel. *Journal of Civil Engineering*, 19(1), 2024. <https://doi.org/10.2478/sspijce-2024-0016>
- Cording, E.J. and Hansmire, W.H. (1975). Displacements around soft ground tunnels. In: *5th Pan American Conf. on Soil Mech. and Found. Engng.* Buenos Aires, 1975, pp. 571-632.
- Das, R.D., Singh, P.K., Kainthola, A., Panthee, S., & Singh, T.N. (2017). Numerical analysis of surface subsidence in asymmetric parallel highway tunnels. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9, 1, 170-179.
- Divall, S. (2013). *Ground movements associated with twin-tunnel construction in clay*. Ph.D. Thesis, City University London, England, 256p.
- Divall, S., Goodey, R.James, J., M.C. R. Davies, Le, B.Thanh & Nguyen, T.T.T. (2023). Twin-tunnelling: Case studies in clay. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 64(6), 66-78. [https://doi.org/10.46326/JMES.2023.64\(6\).08](https://doi.org/10.46326/JMES.2023.64(6).08)
- Do, N.A., Dang, T.T., Dias, D. (2022a). 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. <https://doi.org/10.15625/2615-9783/16442>
- Do, N.T., Protosenya, A.G., & Vo, C.C.T. (2022b). Prediction of ground surface settlement induced by twin tunnelling in urban areas. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 63, 3a, 22-28. [https://doi.org/10.46326/JMES.2022.63\(3a\)](https://doi.org/10.46326/JMES.2022.63(3a))
- Do, N.A., Dias, D., Oreste, P. (2014). Three-dimensional numerical simulation of mechanized twin stacked tunnels in soft ground. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 15(11), 896-913. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1400117>
- Do, N.A., Dias, A., Oreste, P. (2015). 3D numerical investigation on the interaction between mechanized twin tunnels in soft ground. *Environmental Earth Sciences*, 73(5):2101-2113. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3561-6>
- Hunt, D. (2005). *Predicting the ground movements above twin tunnels constructed in london clay*. Ph.D. Thesis, City University Birmingham, England, 355p.
- Koungelis, D. (2007). *Tools for numerical modelling of tunnelling interactions*. Doctoral thesis, Durham University, Durham, England, 309p.
- Kunst, D.J. (2017). *Modelling construction phases of bored tunnels with respect to internal lining forces*. Master of Science at the Delft University of Technology, Delft, Netherlands. 148p.
- Le, B. T., Nguyen, T. T. T., Divall, S., & Davies, M. C. R. (2023). A study on large volume losses induced by EBPM tunnelling in sandy soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 132, p.104847.
- Liu, Z., Xue, J., & Ye, J. (2021). Qian J. A simplified two-stage method to estimate the settlement and bending moment of upper tunnel considering the interaction of undercrossing twin tunnels. *Transportation Geotechnics*, 29, 100558.
- Mair, R. J. and Taylor, R. N. (1997). Bored tunnelling in the urban environment. *Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 4, pp. 2353-2385.
- Oteo, C. S. and Sagaseta, C. (1982). Prediction of settlements due to underground openings. *Proc. Int. Sym. On Numerical Methods in Geomechanics*, Zurich, 653-659.
- Pedro, A.M.G., Grazina, J.C.D., & Sousa, J.N.V.A. (2022). Lining forces in tunnel interaction problems. *International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 45, 3. <https://doi.org/10.28927/SR.2022.077221>
- Wang, H.N., Zeng, G.S, Utili, S., Jiang, M.J, & Wu, L. (2017). Analytical solutions of stresses and displacements for deeply buried twin tunnels in viscoelastic rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 93, 13-29.
- Wang, C., Li, X., Song, D., Wang, E., He, Z., & Tan, R. (2024). Structural response of former tunnel in the construction of closely-spaced cross-river twin tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 147, 105652. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105652>.