

# Study on the behaviour of segmental lining in sub-rectangular tunnel under static loading



Hoi Xuan Do <sup>1</sup>, Vi Van Pham <sup>2,4</sup>, Anh Ngoc Do <sup>3,4,\*</sup>

<sup>1</sup> PhD student, Department of Underground and Mining Construction, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup> Electric Power University, Hanoi, Vietnam

<sup>3</sup> Department of Underground and Mining Construction, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

<sup>4</sup> Research Group of Tunnelling and Underground Space (TUS), Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 13<sup>th</sup> Oct. 2025

Revised 26<sup>th</sup> Jan. 2026

Accepted 20<sup>th</sup> Feb. 2026

### Keywords:

Internal forces,  
Joint,  
Segmental lining,  
Sub-rectangular,  
Tunnel.

## ABSTRACT

*The cross-sectional shape of a tunnel is one of the key factors significantly influencing the structural behavior of the tunnel lining (i.e., internal forces and deformations) and the surrounding soil medium. Studies on conventional tunnels, such as circular and rectangular, have been carried out under various conditions related to the geotechnical environment, as well as different types and configurations of the support structures. However, the behavior of sub-rectangular tunnels has only recently been studied by a few researchers. These studies have primarily focused on analyzing the influence of the sub-rectangular shape on the behavior of the continuous tunnel lining, without considering the existence of joints.*

*The present study is conducted to evaluate the influence of joint parameters (number, location, and characteristics of joints) and of geotechnical parameters (such as deformation modulus, horizontal pressure coefficient, etc.) on the behavior of the segmental lining in a sub-rectangular tunnel under static loading.*

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

\*Corresponding author

E - mail: dongocanh@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(3).02



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

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

# Nghiên cứu ứng xử của vỏ chống lấp ghép trong đường hầm tiết diện chữ nhật cong chịu tải trọng tĩnh

Đỗ Xuân Hội<sup>1</sup>, Phạm Văn Vĩ<sup>2,4</sup>, Đỗ Ngọc Anh<sup>3,4,\*</sup>

<sup>1</sup> NCS Bộ môn Xây dựng Công trình ngầm và Mỏ, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup> Trường Đại học Điện lực, Hà Nội, Việt Nam

<sup>3</sup> Bộ môn Xây dựng Công trình ngầm và Mỏ, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

<sup>4</sup> Nhóm nghiên cứu Xây dựng Hầm và Không gian Ngầm (TUS), Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 13/10/2025

Sửa xong 26/1/2026

Chấp nhận đăng 20/2/2026

Từ khóa:

Chữ nhật cong,

Đường hầm,

Mối nối,

Nội lực,

Vỏ lấp ghép.

### TÓM TẮT

Hình dạng tiết diện ngang đường hầm là một trong những yếu tố có ảnh hưởng lớn tới biểu hiện ứng xử của kết cấu chống giữ đường hầm (nội lực, biến dạng) và môi trường khối đất đá xung quanh. Các nghiên cứu đối với đường hầm tiết diện tròn, chữ nhật, móng ngựa, ô-van,... đã được thực hiện tương đối chi tiết, trong nhiều điều kiện đầu vào khác nhau về môi trường khối đất mà đường hầm đào qua, loại hình và cấu tạo của kết cấu chống giữ. Tuy nhiên, ứng xử của đường hầm tiết diện hình chữ nhật cong mới chỉ được nghiên cứu gần đây bởi một số nhóm tác giả trong và ngoài nước, tập trung chủ yếu vào phân tích ứng xử của vỏ chống đường hầm khi chịu các loại tải trọng khác nhau với giả thiết vỏ chống liên tục, không có mối nối.

Nghiên cứu này được thực hiện với các mục tiêu: đánh giá ảnh hưởng của các thông số mối nối, bao gồm số lượng, vị trí, đặc tính kỹ thuật của mối nối trong kết cấu vỏ chống lấp ghép của đường hầm tiết diện hình chữ nhật cong đến ứng xử của vỏ chống khi chịu tải trọng tĩnh; đánh giá ảnh hưởng của các thông số môi trường khối đất (mô đun biến dạng, hệ số áp lực ngang,...) đến ứng xử của vỏ chống lấp ghép bên trong đường hầm.

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

\*Tác giả liên hệ

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

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(3).02

## 1. Mở đầu

Hình dạng tiết diện ngang đường hầm là một trong những yếu tố có ảnh hưởng lớn tới biểu hiện ứng xử của kết cấu chống giữ trong đường hầm (nội lực, biến dạng) môi trường khối đất đá xung quanh. Các nghiên cứu đối với đường hầm tiết diện tròn, chữ nhật, móng ngựa, ovan, ... đã được thực hiện tương đối chi tiết, trong nhiều điều kiện đầu vào khác nhau về môi trường khối đất mà đường hầm đào qua, loại hình và cấu tạo của kết cấu chống giữ. Tuy nhiên, ứng xử của đường hầm tiết diện hình chữ nhật cong mới chỉ được nghiên cứu gần đây bởi một số nhóm tác giả trong và ngoài nước (Đặng và nnk., 2021), sử dụng các phương pháp nghiên cứu giải tích (Zhang và nnk., 2021), nghiên cứu trên mô hình thực, mô hình tương đương (Liu Xian và nnk., 2018a, 2018b; Zhang và nnk., 2021), mô phỏng số (Du và nnk., 2020; Do và nnk., 2020; Nguyen và nnk., 2020; Pham và nnk., 2021; Zhang và nnk., 2021; Pham và nnk., 2022). Các nghiên cứu nêu trên tập trung chủ yếu vào phân tích ảnh hưởng của hình dạng tiết diện chữ nhật cong đến biểu hiện ứng xử của vỏ chống đường hầm khi chịu các loại tải trọng khác nhau với giả thiết vỏ chống liên tục, không có mối nối.

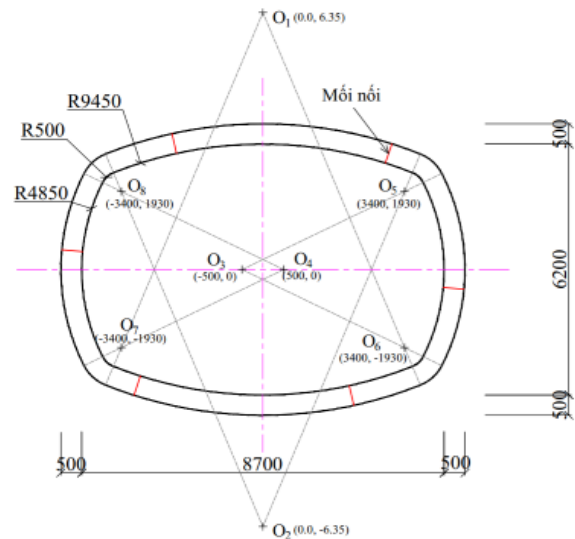
Trong thực tế, vỏ chống bên trong đường hầm tiết diện chữ nhật cong chủ yếu sử dụng kết cấu bê tông cốt thép lắp ghép. Sự làm việc của kết cấu này khi chịu tải trọng tĩnh phụ thuộc rất lớn vào các thông số kỹ thuật (số lượng, vị trí, đặc tính liên kết) của mối nối. Mặc dù vậy, những yếu tố ảnh hưởng này gần như chưa được nghiên cứu đầy đủ, chi tiết. Do đó, việc xem xét ảnh hưởng của mối nối đến ứng xử cơ học của vỏ chống lắp ghép trong đường hầm chữ nhật cong đến việc phân tích, thiết kế, xây dựng, vận hành và đánh giá rủi ro của công trình ngầm là rất quan trọng.

Nghiên cứu được thực hiện với các mục tiêu đánh giá ảnh hưởng của các thông số mối nối (bao gồm số lượng, vị trí, đặc tính kỹ thuật của mối nối trong vỏ chống lắp ghép của đường hầm tiết diện hình chữ nhật cong), thông số môi trường khối đất (mô đun biến dạng, hệ số áp lực ngang, ...) đến ứng xử của vỏ chống lắp ghép bên trong đường hầm.

## 2. Mô hình số mô phỏng đường hầm chữ nhật cong

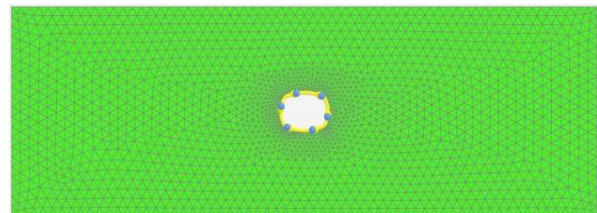
Trong nghiên cứu này, phần mềm phần tử

hữu hạn Plaxis2D (Brinkgreve và nnk., 2019) được sử dụng để mô hình số bài toán đường hầm đào trong khối đất. Các thông số về mặt cắt ngang của đường hầm tiết diện chữ nhật cong trong nghiên cứu này được lấy từ đường hầm đã được xây dựng ở Thượng Hải, Trung Quốc (Do và nnk., 2020; Phạm và nnk., 2022). Kích thước của đường hầm tiết diện chữ nhật cong có chiều rộng là 9,7 m và chiều cao là 7,2 m và có tiết diện đào 60 m<sup>2</sup> như trong Hình 1. Độ sâu từ mặt đất đến tâm đường hầm là 20 m. Trong thực tế, đường hầm được chống giữ bằng kết cấu bê tông lắp ghép có chiều dày 0,5 m.



Hình 1. Đường hầm tiết diện chữ nhật cong ở Thượng Hải (Do và nnk., 2020; Phạm và nnk., 2022), đơn vị là mm.

Mô hình có chiều rộng là 120 m theo phương x, chiều cao 40 m theo phương z và hai bên hông được cố định theo phương ngang. Mặt trên của mô hình là mặt tự do và đáy mô hình bị hạn chế dịch chuyển theo mọi hướng. Mô hình bao gồm 4402 phần tử và 9314 nút (Hình 2). Ứng xử của đất và vỏ chống đường hầm được mô phỏng tuân theo mô hình đàn hồi.

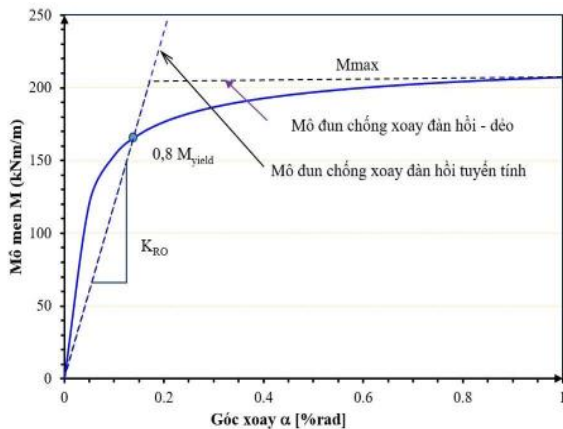


Hình 2. Mô hình mô phỏng đường hầm tiết diện chữ nhật cong, vỏ chống lắp ghép có 6 mối nối trong phần mềm Plaxis 2D.

Trong quá trình nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của các thông số, 3 điều kiện liên kết của mối nối được thể hiện qua độ cứng chống xoay  $K_{ro}$  tại mối nối được xem xét, bao gồm:

- Mối nối xoay tự do: độ cứng chống xoay tại vị trí mối nối  $K_{ro}$  được gán bằng 0, có nghĩa là mô men uốn tại vị trí mối nối bằng 0;

- Mối nối có độ cứng chống xoay đàn hồi tuyến tính: độ cứng chống xoay  $K_{ro}$  tại vị trí mối nối được giả thiết là hằng số và mô men tại mối nối tăng tuyến tính (có thể đến vô cùng) với góc xoay tại mối nối (Hình 3);



Hình 3. Đặc tính mô đun chống xoay đàn hồi tuyến tính và đàn hồi dẻo tại mối nối (Janssen, 1983; Do và nnk, 2013).

- Mối nối có độ cứng chống xoay đàn hồi dẻo: đặc tính chống xoay tại vị trí mối nối được đặc trưng bằng độ cứng chống xoay  $K_{ro}$  và giá trị mô men giới hạn  $M_{max}$  sinh ra tại mối nối. Khi mô men tại mối nối còn nhỏ hơn  $M_{max}$ , mô men uốn  $M$  quan hệ tuyến tính với góc xoay tại mối nối. Khi mô men tại vị trí mối nối đạt tới giá trị cực trị  $M_{max}$  thì mối nối tiếp tục xoay trong khi giá trị mô men uốn tại đó không tăng thêm và giữ nguyên bằng  $M_{max}$  (Hình 3). Đặc tính của mối nối được thể hiện thông qua công thức sau (Janssen, 1983):

Đàn hồi tuyến tính:

$$\left\{ \varphi = 12 \frac{M}{Eh^2b} \right\}; M < \frac{1}{6} F_n h \Rightarrow \varphi < \frac{2F_n}{Ehb} \quad (1)$$

Dẻo lý tưởng:

$$\left\{ \varphi = \frac{8F_n}{9bhE \left( \frac{2M}{F_n h} - 1 \right)^2} \right\}; \quad (2)$$

$$M \geq \frac{1}{6} F_n h \Rightarrow \varphi \geq \frac{2F_n}{Ehb}$$

Trong đó:  $\alpha$  - góc xoay mỗi nối, %rad;  $M$  - mô men uốn tại mỗi nối, kNm;  $N$  - lực dọc tại mỗi nối, kN;  $E$  - mô đun đàn hồi của vỏ chống đường hầm;  $b$  - chiều rộng, m;  $h$  - chiều cao của mỗi nối, m.

### 3. Nghiên cứu ảnh hưởng của mối nối đến nội lực trong vỏ chống đường hầm chữ nhật cong

Mục tiêu của phần này là làm sáng tỏ ảnh hưởng của mối nối (số mối nối, vị trí phân bố mối nối, điều kiện liên kết tại mối nối) đến nội lực (mô men  $M$ , lực dọc  $N$  và lực cắt  $Q$ ) trong vỏ chống đường hầm chữ nhật cong. Các trường hợp được khảo sát bao gồm: 4, 5, 6, 7 và 8 mối nối. Với mỗi trường hợp số mối nối, phương án phân bố các mối nối đầu tiên được chọn tại đó mối nối thứ nhất nằm tại chính giữa đỉnh vòm của đường hầm, các phương án tiếp theo được xác định bằng cách chuyển đồng thời vị trí các mối nối trên biên theo chiều kim đồng hồ đến khi mối nối cuối cùng tiến gần sát nhất và nằm phía bên trái đỉnh vòm của đường hầm.

Trong quá trình nghiên cứu khảo sát các tham số ảnh hưởng, các thông số thiết kế cơ sở (Bảng 1) được chấp nhận trên cơ sở tham khảo điều kiện thực tế tại dự án đường hầm đã được xây dựng ở Thượng Hải, Trung Quốc (Do và nnk., 2020, Phạm và nnk., 2021, 2022).

Trước khi phân tích ảnh hưởng của mối nối đến nội lực trong vỏ chống, cần nhấn mạnh rằng trong điều kiện vỏ chống liên tục không có mối nối chịu tải trọng tĩnh, kết quả nghiên cứu của Do và nnk. (2020) đã chỉ ra quy luật phân bố của nội lực (mô men uốn  $M$  và lực dọc  $N$ ) quanh chu vi biên đường hầm, với điều kiện hệ số áp lực ngang  $< 1$ , như sau:

- Mô men uốn dương cực đại  $M_{max}$  đạt tại các điểm đỉnh và đáy của đường hầm, mô men âm xuất hiện tại hai bên hông và vai của đường hầm;

- Lực dọc cực đại  $N_{max}$  xuất hiện tại hai bên hông của đường hầm và đạt cực tiểu tại đỉnh và đáy của đường hầm.

Kết quả khảo sát nội lực cực đại trong vỏ chống đối với các trường hợp điều kiện liên kết của mối nối khác nhau được thể hiện trên các hình từ Hình 4 đến Hình 5. Sự phụ thuộc của nội lực cực đại vào các tham số của mối nối được thể hiện theo hai cách khác nhau nhằm nhấn mạnh: (1) sự biến đổi của nội lực cực đại khi thay đổi vị trí mối nối; (2) dải phân bố của nội lực cực đại theo số mối nối.

Bảng 1. Giá trị các tham số thiết kế của đất và vỏ chống (Phạm và nnk, 2021, 2022).

TT	Tham số	Đơn vị	Giá trị	Ghi chú
A	<i>Đất</i>			
1	Mô đun đàn hồi của đất, $E_s$	MPa	100	
2	Hệ số áp lực ngang của đất, $K_0$	-	0,5	
3	Dung trọng của đất, $\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	18	
4	Hệ số Poisson	-	0,34	
B	<i>Vỏ chống bê tông</i>			
1	Mô đun đàn hồi, $E_l$	GPa	35	
2	Hệ số Poisson	-	0,15	
3	Chiều dày vỏ chống, $t$	m	0,5	
4	Độ cứng chống xoay đàn hồi tuyến tính tại mỗi nối, $K_{r0}$	MNm/rad	117	Áp dụng công thức (1) và (2) với giá trị lực dọc đều vào N tính toán với giả thiết vỏ chống liên tục.
5	Mô men uốn lớn nhất tại mỗi nối	kNm	207	

Từ kết quả thể hiện trên các hình vẽ có thể nhận thấy sự ảnh hưởng rõ rệt của số mối nối, vị trí phân bố của mối nối và điều kiện liên kết tại mối nối đến nội lực trong vỏ chống đường hầm tiết diện chữ nhật cong khi chịu tải trọng tĩnh từ môi trường khối đất.

### 3.1. Ảnh hưởng đến lực dọc cực đại $N_{max}$

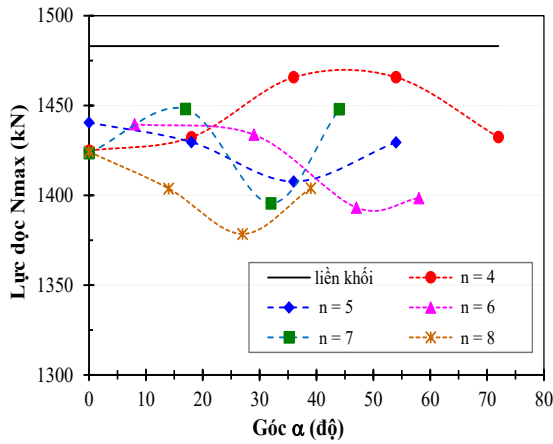
Số lượng mối nối ảnh hưởng khác nhau tới lực dọc và mô men uốn lớn nhất trong vỏ chống. Đối với lực dọc  $N_{max}$ , nhìn chung lực dọc  $N_{max}$  trên biểu đồ có xu hướng giảm khi số lượng mối nối tăng lên (Hình 4b, d, f). Nhìn vào biểu đồ thể hiện sự thay đổi lực dọc  $N_{max}$  cho các trường hợp số mối nối khác nhau (Hình 4b, d, f) có thể nhận thấy, lực dọc tại phần hông đường hầm (nơi lực dọc đạt giá trị cực đại) giảm đáng kể so với trường hợp vỏ chống liên tục không mối nối, còn lực dọc tại phần đỉnh đường hầm (nơi lực dọc đạt cực tiểu) lại tăng lên đáng kể. Điều này thể hiện có sự phân bố lại đáng kể của lực dọc từ phần hông sang phần đỉnh, từ vị trí lực dọc lớn sang vị trí lực dọc nhỏ hơn, khi có thêm mối nối trong vỏ chống. Số lượng mối nối càng lớn, tức là độ cứng tổng thể của vỏ chống càng giảm hay vỏ chống càng linh hoạt, sự điều chuyển lực dọc này diễn ra ở mức độ càng cao. Sự ảnh hưởng của số mối nối đến sự thay đổi khác nhau của lực dọc trong vỏ chống đường hầm tiết diện chữ nhật cong thể hiện sự khác biệt với đường hầm tiết diện tròn. Kết quả nghiên cứu của Đỗ và nnk. (2013) về ảnh hưởng của mối nối trong kết cấu vỏ chống lắp ghép của đường hầm tiết diện tròn chỉ ra rằng, số mối nối có sự ảnh hưởng không

đáng kể tới sự thay đổi của lực dọc cực đại trong vỏ chống. Nguyên nhân có thể là do trong thực tế, khả năng truyền lực dọc trong kết cấu vỏ chống đường hầm tiết diện tròn tốt hơn so với tiết diện chữ nhật do ở tiết diện chữ nhật cong có những vị trí tại đó bán kính cong nhỏ, làm giảm khả năng truyền lực dọc giữa các phần của vỏ chống, ví dụ từ vòm hay nền sang hông và ngược lại. Vì vậy, trong tiết diện chữ nhật cong, mức độ ảnh hưởng của sơ đồ phân bố vị trí mối nối đến sự thay đổi lực dọc tùy thuộc vào vị trí mối nối nằm tại đoạn có bán kính cong lớn (nóc, đáy và hông đường hầm) hay bán kính cong nhỏ (vai đường hầm).

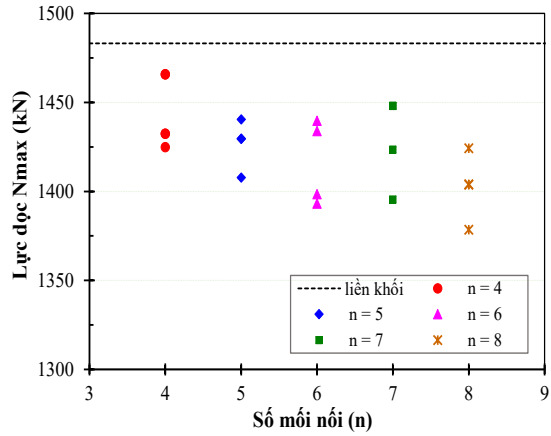
Trong từng điều kiện liên kết của mối nối, ảnh hưởng của số mối nối đến dải phân bố lực dọc  $N_{max}$  tùy thuộc vào vị trí của mối nối nhưng thay đổi không đáng kể. Tuy nhiên khi xét đến sự thay đổi điều kiện liên kết giữa các mối nối, mức độ thay đổi giá trị lực dọc cực đại  $N_{max}$  trong vỏ chống phụ thuộc vào vị trí phân bố của mối nối trên chu vi vỏ chống đường hầm, trong trường hợp mối nối xoay tự do, lớn hơn so với các trường hợp điều kiện liên kết của mối nối còn lại (liên kết đàn hồi và liên kết đàn hồi dẻo) (Hình 4b, d, f). Khoảng biến thiên của lực dọc  $N_{max}$  đối với 3 điều kiện liên kết của mối nối xoay tự do, đàn hồi tuyến tính và đàn hồi dẻo tuyến tính lần lượt xấp xỉ là: 1375÷1470 kN, 1440÷1475 kN, 1430÷1480 kN. Nguyên nhân có thể là do tính chất linh hoạt xoay tại vị trí mối nối trong trường hợp mối nối có liên kết xoay tự do cho phép các tấm vỏ chống dễ dàng thay đổi vị trí tiếp xúc tại bề mặt mối nối khi truyền lực dọc. Trong khi đó, sự ảnh hưởng của vị trí phân bố của

mỗi nối trên chu vi vỏ chống đường hầm đến sự thay đổi lực dọc cực đại trong 2 trường hợp điều kiện liên kết đàn hồi tuyến tính và liên kết đàn hồi dẻo không có sự khác biệt đáng kể (Hình 4d, f).

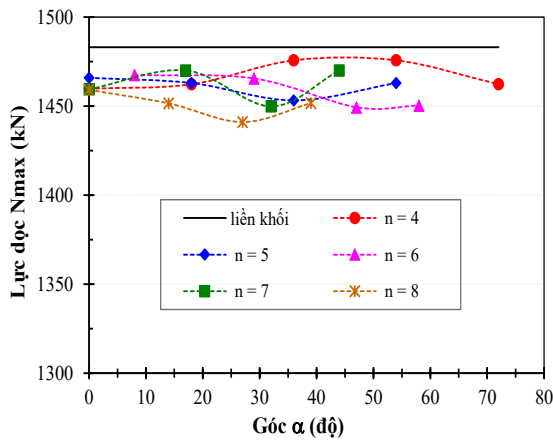
Tùy thuộc vào sơ đồ phân bố vị trí mỗi nối, nếu có nhiều mỗi nối nằm càng gần vị trí có lực dọc lớn (tại hông đường hầm), mức độ giảm lực dọc cực đại  $N_{max}$  càng lớn.



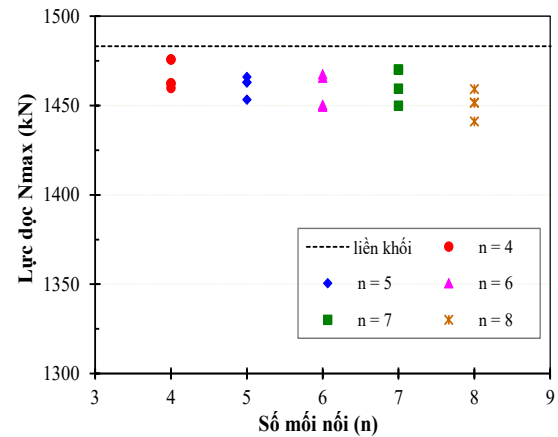
a) Mỗi nối xoay tự do.



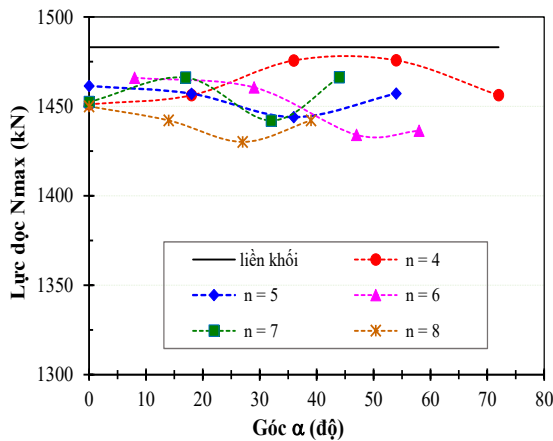
b) Mỗi nối xoay tự do.



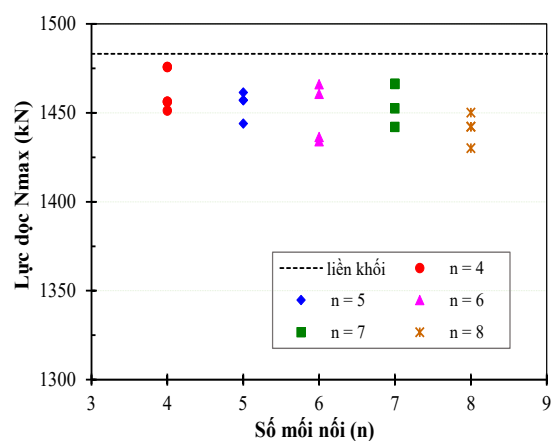
c) Mỗi nối xoay đàn hồi tuyến tính.



d) Mỗi nối xoay đàn hồi tuyến tính.

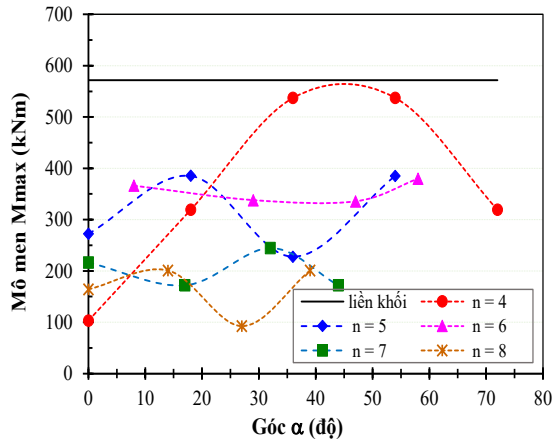


e) Mỗi nối xoay đàn hồi dẻo tuyến tính.

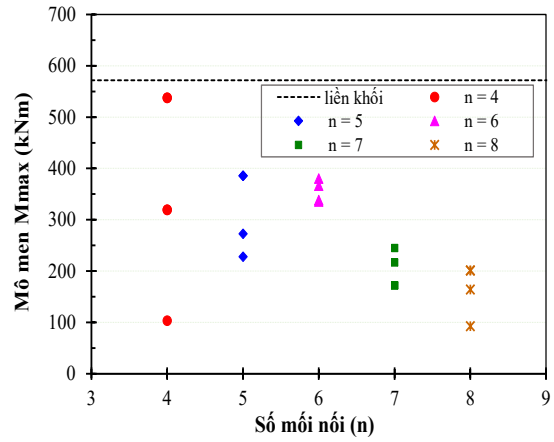


f) Mỗi nối xoay đàn hồi dẻo tuyến tính.

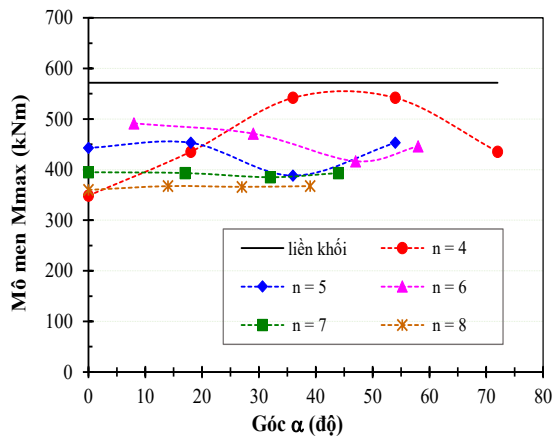
Hình 4. Ảnh hưởng của số lượng và vị trí mỗi nối đến lực dọc  $N_{max}$  trong vỏ chống đường hầm.



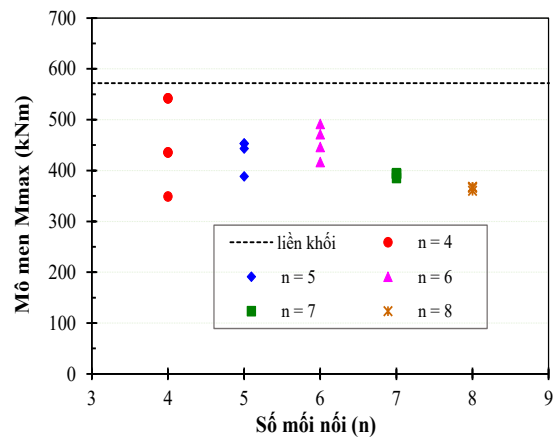
a) Mối nối xoay tự do.



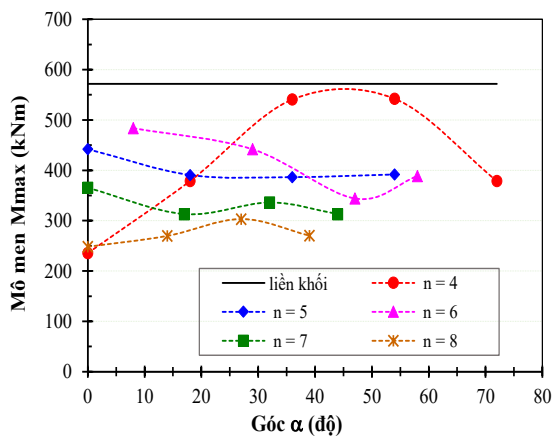
b) Mối nối xoay tự do.



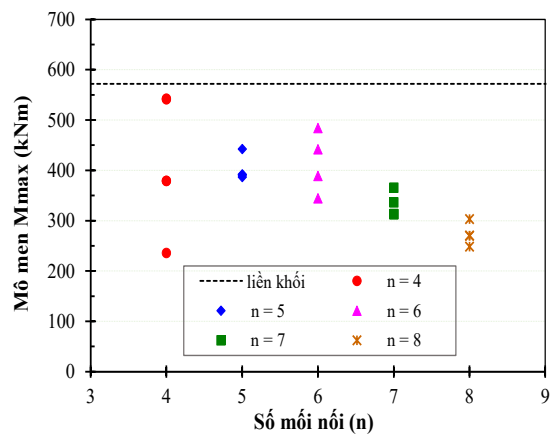
c) Mối nối xoay đàn hồi tuyến tính.



d) Mối nối xoay đàn hồi tuyến tính.



e) Mối nối xoay đàn hồi dẻo tuyến tính.



f) Mối nối xoay đàn hồi dẻo tuyến tính.

Hình 5. Ảnh hưởng của số lượng và vị trí mối nối đến mô men uốn  $M_{max}$  trong vỏ chống đường hầm.

Xét tới ảnh hưởng của điều kiện liên kết tại mối nối cho 3 trường hợp: mối nối xoay tự do, mối nối chống xoay đàn hồi tuyến tính và mối nối chống xoay đàn hồi dẻo tuyến tính, có thể nhận

thấy trường hợp mối nối xoay tự do có khả năng làm giảm lực dọc  $N_{max}$  nhiều nhất so với giá trị lực dọc trong vỏ chống liên tục không có mối nối, đặc biệt khi số mối nối tăng lên (5 đến 8 mối nối).

Trong khi đó, sự khác biệt giữa hai trường hợp mỗi nối chống xoay đàn hồi tuyến tính và mỗi nối chống xoay đàn hồi dẻo tuyến tính có sự khác biệt không đáng kể (xem Hình 4b, d, f).

### 3.2. Ảnh hưởng đến mô men uốn cực đại $M_{max}$

- Đối với mô men uốn cực đại  $M_{max}$ , có xu hướng tương tự như lực dọc cực đại  $N_{max}$  tức là khi số mỗi nối tăng lên, mô men uốn  $M_{max}$  trên biểu đồ phân bố có xu hướng giảm (Hình 5b, d, f). Rõ ràng, mỗi nối được coi là điểm linh hoạt của vỏ chống và có tác dụng làm giảm mô men uốn tại đó so với trường hợp kết cấu vỏ chống liên tục (không có mỗi nối). Vì vậy, khi số lượng mỗi nối tăng lên, độ linh hoạt của kết cấu vỏ chống đường hầm cũng tăng lên, hiệu ứng giảm mô men uốn trong vỏ chống theo chu vi đường hầm cũng lớn hơn. Tác dụng giảm mô men uốn của mỗi nối lớn nhất khi vị trí mỗi nối trùng với vị trí tại đó mô men uốn trong kết cấu vỏ chống liên tục đạt giá trị cực trị.

- Khi số mỗi nối tăng, dải phân bố của mô men uốn cực đại  $M_{max}$  phụ thuộc vào vị trí phân bố của mỗi nối cũng giảm đi (Hình 5b, d, f). Nói cách khác, khi số mỗi nối tăng, mô men uốn cực đại  $M_{max}$  ít phụ thuộc hơn vào sự phân bố của vị trí mỗi nối trên chu vi vỏ chống đường hầm. Điều này có thể giải thích dựa vào thực tế là khi số mỗi nối tăng, chiều dài từng đoạn vỏ chống giữa hai mỗi nối giảm, do đó sự khác biệt về tải trọng phân bố từ phía môi trường khối đất tác dụng dọc theo chu vi từng đoạn vỏ chống giữa hai mỗi nối cũng giảm và kết quả là làm giảm mô men uốn sinh ra trong đoạn vỏ chống.

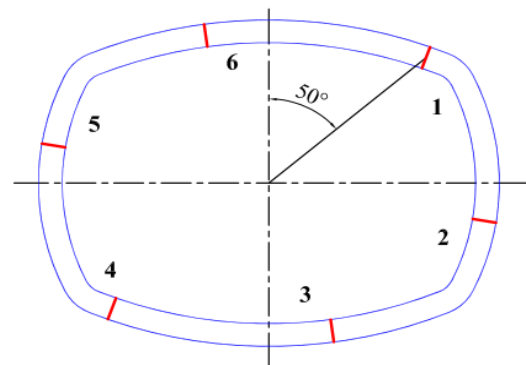
- Xét tới ảnh hưởng của điều kiện liên kết tại mỗi nối cho 3 trường hợp: mỗi nối xoay tự do, mỗi nối chống xoay đàn hồi tuyến tính và mỗi nối chống xoay đàn hồi dẻo tuyến tính, có thể nhận thấy trong trường hợp mỗi nối chống xoay đàn hồi tuyến tính, sự phụ thuộc (dải phân bố giá trị) của mô men uốn cực đại  $M_{max}$  vào sơ đồ phân bố mỗi nối nhỏ hơn so với hai trường hợp điều kiện liên kết tại mỗi nối còn lại (xem Hình 5d). Ngoài ra, trong trường hợp điều kiện liên kết này, mức độ giảm mô men uốn cực đại  $M_{max}$  trong vỏ chống cũng ít hơn so với 2 điều kiện liên kết mỗi nối xoay tự do và mỗi nối chống xoay đàn hồi dẻo tuyến tính. Nguyên nhân có thể giải thích là do trong trường hợp mỗi nối có độ cứng chống xoay đàn hồi tuyến tính, mức độ giảm mô men tại vị trí mỗi nối thấp hơn so với trường hợp mỗi nối xoay tự

do và mỗi nối chống xoay đàn hồi dẻo tuyến tính. Trong trường hợp mỗi nối xoay tự do, mô men tại vị trí mỗi nối bằng 0. Trong trường hợp mỗi nối xoay đàn hồi dẻo tuyến tính, khi mô men tại vị trí mỗi nối đạt tới giá trị tới hạn, nó sẽ không tiếp tục tăng lên trong khi mỗi nối vẫn tiếp tục xoay. Tuy nhiên, trong trường hợp mỗi nối có độ cứng chống xoay đàn hồi tuyến tính, mô men tại vị trí mỗi nối tăng tuyến tính với góc xoay tại mỗi nối.

## 4. Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số của vỏ chống và khối đất

Mục tiêu của nội dung nghiên cứu trong phần này là làm sáng tỏ ảnh hưởng của một số thông số cơ bản của môi trường khối đất (mô đun biến dạng, hệ số áp lực ngang), chiều dày vỏ chống và độ cứng chống xoay của mỗi nối đến ứng xử của vỏ chống lắp ghép trong đường hầm chữ nhật cong. Đây là những thông số có ảnh hưởng lớn đến khả năng làm việc và ứng xử của vỏ chống đường hầm trong suốt thời gian tồn tại. Giá trị của các tham số trên được thay đổi thể hiện trong Bảng 2. Ở đây chỉ xét cho trường hợp vỏ chống có 6 mỗi nối là số mỗi nối đã được áp dụng trong thực tế tại dự án hầm đã được xây dựng ở Thượng Hải, Trung Quốc (Do và nnk., 2020) (Hình 6). Trong quá trình khảo sát ảnh hưởng sự thay đổi của từng tham số tới ứng xử của vỏ chống, thể hiện qua sự thay đổi nội lực trong vỏ chống, các tham số đầu vào khác của môi trường khối đất và vỏ chống được giả thiết là không đổi và lấy bằng với giá trị trong trường hợp thiết kế cơ sở (Bảng 2).

Để làm sáng tỏ ảnh hưởng của điều kiện liên kết chống xoay tại mỗi nối đến nội lực sinh ra trong vỏ chống khi khảo sát mức độ tác động của từng tham số, ba điều kiện liên kết chống xoay tại



Hình 6. Vỏ chống đường hầm tiết diện chữ nhật cong có 6 mỗi nối.

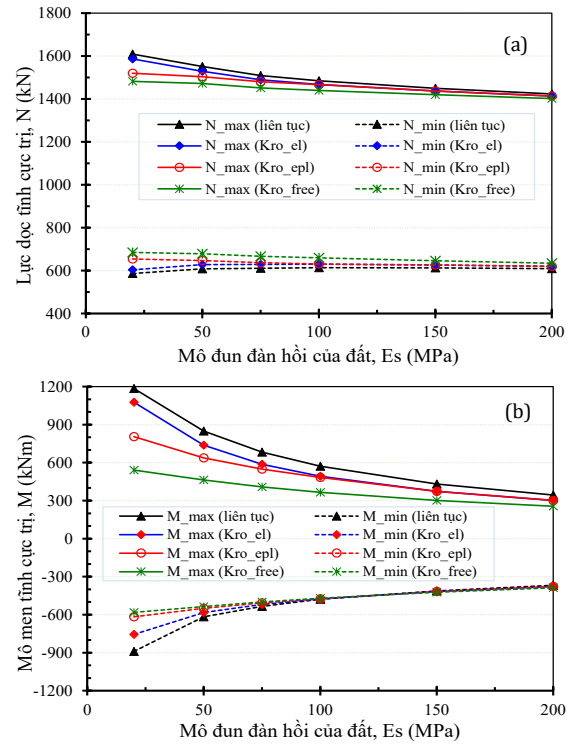
Bảng 2. Giá trị các tham số đầu vào thay đổi của đất và vỏ chống.

TT	Tham số	Đơn vị	Giá trị thiết kế cơ sở	Giá trị khảo sát
1	Mô đun biến dạng đàn hồi của đất, $E_s$	MPa	100	20; 50; 75; 100; 150; 200
2	Hệ số áp lực ngang của đất, $K_0$	-	0,5	0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5
3	Chiều dày vỏ chống, $t$	m	0,5	0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8
4	Độ cứng chống xoay của mối nối, $K_{r0}$	MNm /rad	117	25; 50; 75; 100; 125; 150; 250; 365; 500

mối nối gồm: mối nối xoay tự do, độ cứng chống xoay đàn hồi tuyến tính, độ cứng chống xoay đàn hồi dẻo được khảo sát. Trong trường hợp mối nối có độ cứng chống xoay đàn hồi dẻo, giá trị mô men  $M_{max}$  tại mối nối được gán cố định bằng 207 kNm, giá trị này được xác định dựa vào phương pháp tính toán theo công thức của Janssen (1983) trong trường hợp các tham số đầu vào được lấy theo giá trị thiết kế cơ sở.

**4.1. Ảnh hưởng của mô đun biến dạng đàn hồi của đất,  $E_s$**

Hình 7 thể hiện sự phụ thuộc của nội lực (M và N) trong vỏ chống vào mô đun biến dạng đàn hồi của đất  $E_s$ , các giá trị khác của môi trường khối đất và vỏ chống được lấy theo trường hợp thiết kế cơ sở trong Bảng 1 và Bảng 2. Có thể nhận thấy, khi đường hầm đào trong đất mềm yếu với giá trị mô đun biến dạng đàn hồi  $E_s$  thấp, nội lực M, N trong vỏ chống đều tăng so với trường hợp đất có mô đun biến dạng đàn hồi lớn hơn. Nguyên nhân là do sự tăng của áp lực đất xung quanh lên vỏ chống đường hầm trong môi trường đất mềm yếu liên quan tới mức độ dịch chuyển lớn hơn của môi trường khối đất xung quanh gây ra áp lực tác dụng lên vỏ chống. Mức độ ảnh hưởng của mô đun biến dạng đàn hồi  $E_s$  đến nội lực trong vỏ chống rõ rệt nhất khi  $E_s$  nhỏ hơn 100 MPa. Khi mô đun biến dạng đàn hồi của đất  $E_s$  tăng lớn hơn 100 MPa, mức độ ảnh hưởng của  $E_s$  tới nội lực trong vỏ chống có xu hướng giảm dần.



Hình 7. Ảnh hưởng của mô đun đàn hồi của đất ( $E_s$ ) đến nội lực trong KCC đường hầm lắp ghép tiết diện chữ nhật cong. (a) Lực dọc tĩnh cực trị; (b) Mô men tĩnh cực trị.

Phân tích ảnh hưởng của mô đun biến dạng đàn hồi  $E_s$  của đất trong 4 điều kiện: (1) vỏ chống liên tục (không có mối nối), (2) vỏ chống lắp ghép, với mối nối xoay tự do ( $K_{r0\_free}$ ), (3) vỏ chống lắp ghép, với mối nối có mô đun chống xoay đàn hồi ( $K_{r0\_el}$ ), (4) vỏ chống lắp ghép với mối nối có mô đun chống xoay đàn hồi dẻo ( $K_{r0\_ep1}$ ), có thể nhận thấy:

- Vỏ chống liên tục, không có mối nối, luôn có giá trị nội lực M, N lớn hơn so với trường hợp vỏ chống lắp ghép có mối nối trong phạm vi miền giá trị mô đun đàn hồi  $E_s$  đã khảo sát. Nguyên nhân là do vỏ chống liên tục có độ cứng lớn, dẫn đến biến dạng nhỏ hơn, chịu áp lực lớn hơn từ phía khối đất, và do đó phát sinh nội lực lớn hơn so với các kết cấu vỏ chống lắp ghép.

- Vỏ chống lắp ghép với mối nối xoay tự do cho kết quả mô men M và lực dọc N nhỏ nhất, tiếp đến là kết cấu với mối nối với mô đun chống xoay đàn hồi - dẻo. Trường hợp mối nối với mô đun chống xoay đàn hồi tuyến tính cho kết quả lực dọc M và N lớn nhất. Nguyên nhân là do tính linh hoạt của vỏ chống giảm dần từ điều kiện mối nối xoay tự do, mối nối với mô đun chống xoay đàn hồi - dẻo và

mối nối với mô đun chống xoay đàn hồi tuyến tính.

- Ảnh hưởng của đặc tính độ cứng chống xoay tại mối nối đến nội lực trong vỏ chống rõ rệt nhất khi đường hầm đào trong đất yếu, với mô đun biến dạng đàn hồi của đất  $E_s$  dưới 75 MPa. Rõ ràng, mối nối lắp ghép thường có độ cứng nhỏ hơn so với bê tông nên thường có tác dụng làm tăng tính linh hoạt hay khả năng biến dạng trong vỏ chống. Vì vậy, sự tồn tại của mối nối làm giảm độ cứng tổng thể của vỏ chống và đây là nguyên nhân dẫn tới sự suy giảm mô men uốn, lực dọc sinh ra trong vỏ chống lắp ghép so với trường hợp vỏ chống liên tục. Tuy nhiên, như đã chỉ ra ảnh hưởng của mối nối đến nội lực trong vỏ chống lắp ghép chỉ rõ rệt trong điều kiện đất mềm yếu với mô đun đàn hồi của đất  $E_s$  thấp hơn 75 MPa. Trong điều kiện đất cứng hơn, độ ổn định của đường hầm sau khi đào tăng dần và do đó là mức độ dịch chuyển của khối đất xung quanh đường hầm và đồng thời là tải trọng từ môi trường khối đất tác dụng lên vỏ chống có xu hướng giảm dần, dẫn đến mức độ chuyển vị xoay tại các mối nối ngày càng giảm và nhỏ hơn giới hạn dẻo của chuyển vị xoay tại mối nối trong trường hợp mối nối có đặc tính đàn hồi-dẻo. Đó là lý do khi đất có mô đun đàn hồi  $E_s$  lớn hơn 75 MPa, nội lực trong vỏ chống với mối nối có độ cứng chống xoay đàn hồi và đàn hồi dẻo cho kết quả tương đương nhau.

- Mức độ chênh lệch của mô men uốn  $M_{max}$  giữa vỏ chống liên tục và vỏ chống lắp ghép rõ rệt hơn khi khối đất càng mềm yếu (xem Hình 7b). Cụ thể giữa vỏ chống liên tục và vỏ chống lắp ghép với mối nối xoay tự do, sự khác biệt là 54% khi mô đun biến dạng đàn hồi  $E_s = 20$  MPa. Đối với mô men âm  $M_{min}$  gây ra biến dạng của vỏ chống về phía khối đất, ảnh hưởng của mối nối đến ứng xử của vỏ chống không đáng kể so với mô men dương  $M_{max}$ . Nguyên nhân là sự tồn tại của khối đất góp phần hạn chế sự biến dạng, thay đổi hình dạng biên của vỏ chống tại những vị trí mô men âm.

#### 4.2. Ảnh hưởng hệ số áp lực ngang, $K_0$

Đối với bài toán ổn định của đường hầm, hệ số áp lực ngang  $K_0$  là đại lượng có ảnh hưởng lớn đến ứng xử và nội lực trong vỏ chống. Trong hầu hết các loại đất,  $K_0$  thường nhỏ hơn 1. Tuy nhiên trong một số điều kiện nhất định, ví dụ đất quá cố kết, khối đất chịu thêm tải trọng ngang từ công trình xung quanh, giá trị  $K_0$  có thể lớn hơn 1 (Ziccarelli, 2024). Để làm rõ ảnh hưởng của hệ số

áp lực ngang  $K_0$  đến ứng xử của đường hầm tiết diện chữ nhật cong, trong nghiên cứu này giá trị  $K_0$  được giả thiết thay đổi trong khoảng từ  $0,25 \div 1,5$ . Các giá trị khác của môi trường khối đất và vỏ chống được lấy theo trường hợp thiết kế cơ sở trong Bảng 1 và Bảng 2. Kết quả khảo sát thông số trên mô hình số cho thấy:

- Đối với lực dọc N, hệ số áp lực ngang của đất  $K_0$  có ảnh hưởng rất lớn. Khi  $K_0$  càng lớn, lực dọc trong vỏ chống, cả 2 trường hợp kết cấu lắp ghép và kết cấu liên tục, đều tăng. Trong thực tế, lực dọc trong vỏ chống phụ thuộc vào cường độ trung bình của áp lực đất thẳng đứng và áp lực đất theo phương ngang và do đó là áp lực đất tác dụng xung quanh vỏ chống (Einstein & Schwartz, 1979). Vì vậy khi áp lực đất theo phương ngang tăng lên do tăng giá trị của  $K_0$ , lực dọc có xu hướng tăng như chỉ ra trên Hình 8a. Cụ thể, Hình 9a cho thấy khi  $K_0$  nhỏ hơn 1, lực dọc tại phần hông đường hầm lớn hơn so với phần đỉnh và đáy đường hầm. Khi  $K_0 = 1$ , lực dọc tại phần hông và đáy đường hầm xấp xỉ nhau. Khi  $K_0$  lớn hơn 1, lực dọc tại phần hông nhỏ hơn so với tại phần đỉnh và đáy đường hầm, và lực dọc lớn nhất quan sát được tại đáy đường hầm.

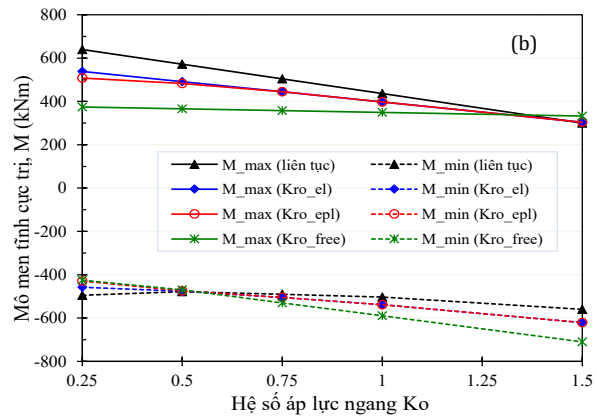
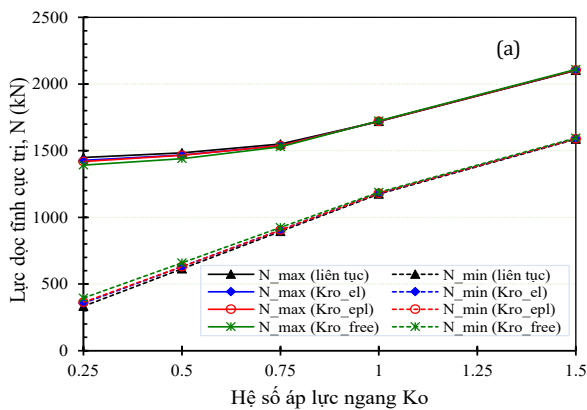
- Ảnh hưởng của mối nối đến giá trị lực dọc  $N_{max}$  trong vỏ chống chủ yếu khi  $K_0$  nhỏ hơn 1 (Hình 8a). Khi tiếp tục tăng giá trị  $K_0$ , lực dọc  $N_{max}$  trong vỏ chống liên tục và vỏ chống lắp ghép không có sự khác biệt đáng kể.

- Ảnh hưởng của điều kiện liên kết tại mối nối đến lực dọc  $N_{max}$  trong vỏ chống lắp ghép có thể bỏ qua khi thay đổi giá trị của  $K_0$  (Hình 8a).

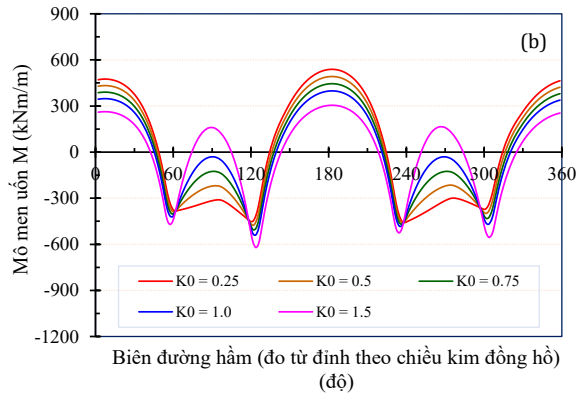
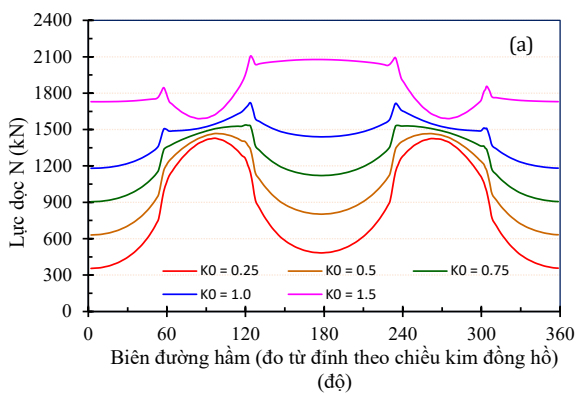
Ảnh hưởng của hệ số áp lực ngang  $K_0$  đến giá trị mô men uốn  $M_{max}$  trong vỏ chống đường hầm tiết diện chữ nhật cong có sự khác biệt lớn đối với đường hầm tròn. Đối với đường hầm tiết diện tròn, các nghiên cứu (ví dụ: Einstein & Schwartz, 1979) đều chỉ ra rằng mô men uốn  $M_{max}$  đạt giá trị cực tiểu khi  $K_0$  bằng 1 tương ứng với điều kiện ứng suất thủy tĩnh. Lý do là khi  $K_0$  tiến gần đến 1, sự chênh lệch giữa áp lực đất theo phương thẳng đứng và áp lực đất theo phương nằm ngang lên đường hầm tiết diện tròn giảm dần và do đó giá trị mô men uốn trong lớp vỏ chống đường hầm tiến gần tới 0 (Einstein & Schwartz, 1979). Tuy nhiên, kết quả trên Hình 8b chỉ ra rằng khi  $K_0$  càng lớn, mô men uốn  $M_{max}$  trong vỏ chống của đường hầm tiết diện chữ nhật cong, cả trường hợp vỏ chống liên tục và vỏ chống lắp ghép, đều có xu hướng giảm tuyến tính. Nguyên nhân của sự khác biệt

này giữa đường hầm tiết diện tròn và đường hầm tiết diện chữ nhật cong liên quan đến khả năng truyền/phân bố lại lực thấp hơn giữa phần vòm hay đáy sang phần hông của vỏ chống đường hầm chữ nhật cong và ngược lại do sự tồn tại của các góc đường hầm với bán kính cong nhỏ. Nói cách khác, giá trị mô men trong vỏ chống của đường hầm tiết diện chữ nhật cong không phụ thuộc đơn thuần vào sự chênh lệch giữa áp lực đất theo hai phương, thẳng đứng và nằm ngang, mà còn phụ thuộc vào bán kính cong tại 4 góc của đường hầm, quyết định đến khả năng phân bố lại lực trong vỏ chống. Sự suy giảm tuyến tính của mô men uốn  $M_{max}$  trong vỏ chống lắp ghép của đường hầm tiết diện chữ nhật cong vào hệ số áp lực ngang  $K_0$  cũng được quan sát thấy trong nghiên cứu của Liu và nnk. (2024), tuy nhiên trong nghiên cứu đó các tác giả chỉ khảo sát trong phạm vi  $K_0$  thay đổi từ 0,4÷0,7.

Kết quả phân bố mô men dọc theo chu vi vỏ chống trên Hình 9b cho thấy, khi  $K_0$  nhỏ hơn 1, mô men dương cực trị xuất hiện tại phần vòm và đáy của đường hầm còn tại phần hông xuất hiện mô men cực trị âm. Khi  $K_0$  tăng dần và tiến đến lớn hơn 1, mô men dương tại đỉnh và đáy đường hầm có xu hướng giảm dần, mô men tại hông chuyển dần từ giá trị âm sang giá trị dương, tuy nhiên giá trị tuyệt đối của mô men âm tại 4 góc của đường hầm có xu hướng tăng lên. Điều này có thể được giải thích bởi ảnh hưởng của áp lực ngang tại phần hông, khi giá trị áp lực này tăng lên trước hết gây ra sự suy giảm của mô men âm tại đáy và tiến tới chuyển sang thành mô men dương. Ngoài ra một phần áp lực hông cũng phân bố sang phần đỉnh và đáy, góp phần làm giảm mô men dương tại đây nhưng mức độ phân bố lại này nhỏ hơn so với trường hợp đường hầm tiết diện tròn do việc truyền/phân bố lực trong vỏ chống qua 4 góc bán kính cong nhỏ.



Hình 8. Ảnh hưởng của hệ số áp lực ngang  $K_0$  đến nội lực trong KCC đường hầm lắp ghép tiết diện chữ nhật cong. (a) Lực dọc tĩnh cực trị; (b) Mô men tĩnh cực trị.



Hình 9. Ảnh hưởng của hệ số áp lực ngang  $K_0$  đến nội lực phân bố trong KCC đường hầm lắp ghép tiết diện chữ nhật cong (mỗi nối dãn hồi tuyến tính). (a) Phân bố lực dọc  $N$ ; (b) Phân bố mô men  $M$ .

- Ảnh hưởng của điều kiện liên kết tại mỗi nối đến mô men uốn  $M_{max}$  trong kết cấu vỏ chống lấp ghép của đường hầm chữ nhật cong chỉ rõ rệt với trường hợp  $K_0$  nhỏ. Khi  $K_0$  tăng thì sự khác biệt về giá trị  $M_{max}$  giảm dần. Điều này có thể liên quan tới giá trị lực dọc trong vỏ chống nhỏ khi  $K_0$  nhỏ (Hình 9a), dẫn đến khả năng chịu uốn của vỏ chống giảm và do đó mô men uốn  $M_{max}$  tại phần đỉnh/đáy của đường hầm chịu sự ảnh hưởng lớn của điều kiện liên kết tại mỗi nối.

**4.3. Ảnh hưởng của chiều dày vỏ chống đường hầm, t**

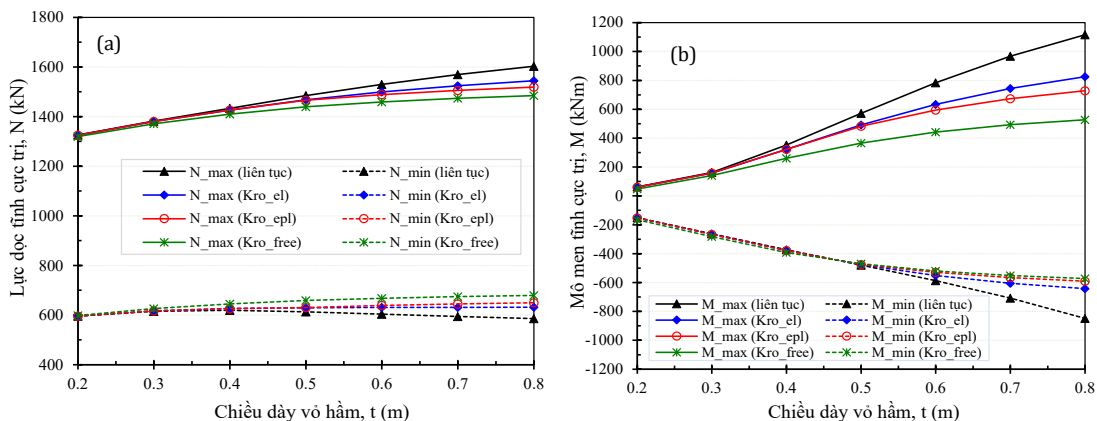
Trong thiết kế vỏ chống đường hầm, chiều dày của vỏ chống là một thông số quan trọng ảnh hưởng tới độ ổn định của kết cấu và giá thành xây dựng đường hầm. Chiều dày kết cấu tác động trực tiếp đến độ cứng của vỏ chống, khả năng biến dạng và do đó đến nội lực phát sinh trong kết cấu khi chịu tải trọng từ môi trường khối đất xung quanh. Với giả thiết chiều dày vỏ chống thay đổi từ 0,2÷0,8 m, các giá trị khác của môi trường khối đất và vỏ chống được lấy theo trường hợp thiết kế cơ sở trong Bảng 1 và Bảng 2, kết quả khảo sát trên Hình 10 cho thấy sự thay đổi đáng kể của lực dọc N và mô men uốn M cũng như ảnh hưởng không thể bỏ qua của mỗi nối và các điều kiện liên kết tại mỗi nối, cụ thể:

- Đối với lực dọc  $N_{max}$ , nhìn chung lực dọc  $N_{max}$  có xu hướng tăng tuyến tính từ 1400 kN lên xấp xỉ 1600 kN khi chiều dày vỏ chống tăng từ 0,2÷0,8 m (Hình 10a). Trong tất cả các trường hợp chiều dày vỏ chống khảo sát, lực dọc trong vỏ chống lấp ghép luôn nhỏ hơn trong vỏ chống liên tục. Nguyên nhân là do đặc tính linh hoạt của vỏ chống lấp ghép có mỗi nối cho phép biến dạng lớn hơn và do đó giảm tác dụng của áp lực đất lên vỏ chống. Lực dọc

trong vỏ chống lấp ghép với mỗi nối xoay tự do luôn nhỏ hơn so với trường hợp mỗi nối có độ cứng chống xoay đàn hồi dẻo và đàn hồi tuyến tính. Nguyên nhân là do khả năng thay đổi hình dạng của vỏ chống lấp ghép với mỗi nối xoay tự do lớn hơn so với hai trường hợp mỗi nối còn lại dẫn đến tăng khả năng phân bố lại nội lực trong vỏ chống và do đó cho phép giảm nội lực tập trung trong vỏ chống.

- Ảnh hưởng của sự tồn tại mỗi nối đến lực dọc  $N_{min}$  trong kết cấu vỏ chống lấp ghép so với vỏ chống liên tục không đáng kể khi chiều dày của vỏ chống (t) nhỏ hơn 0,4 m. Lý do là khi chiều dày vỏ chống mỏng, độ cứng chống uốn và độ cứng chống nén của vỏ chống đều giảm, độ linh hoạt của vỏ chống tăng lên. Do đó hiệu ứng tăng thêm độ linh hoạt do có thêm mỗi nối trong kết cấu vỏ chống lấp ghép sẽ giảm đi so với trường hợp vỏ chống có chiều dày lớn.

- Ảnh hưởng của chiều dày vỏ chống đến lực dọc  $N_{min}$  có thể bỏ qua (Hình 10a). Đối với mô men uốn  $M_{max}$  (Hình 10b), nhìn chung khi chiều dày vỏ chống càng lớn đồng nghĩa với độ cứng kháng uốn của vỏ chống (tỷ lệ bậc 3 với chiều dày kết cấu) càng tăng thì khả năng biến dạng của vỏ chống càng giảm và do đó mô men uốn tăng lên. Khi chiều dày vỏ chống  $t < 0,4$  m, không có sự khác biệt đáng kể về mô men uốn  $M_{max}$  trong kết cấu vỏ chống lấp ghép và liên tục. Tuy nhiên khi chiều dày vỏ chống tiếp tục tăng lên, sự khác biệt này trở nên rõ ràng hơn. Nguyên nhân là do khi chiều dày vỏ chống lớn, độ cứng kháng uốn của vỏ chống nhìn chung tăng lên, khi đó mỗi nối trở thành điểm yếu và ảnh hưởng rõ rệt hơn đến khả năng kháng uốn tổng thể của vỏ chống. Nói cách khác, mức độ ảnh hưởng của mỗi nối tồn tại trong vỏ chống lấp ghép đến tính linh hoạt của kết cấu vỏ chống tăng lên.



Hình 10. Ảnh hưởng của chiều dày vỏ chống (t) đến nội lực trong KCC đường hầm lấp ghép tiết diện chữ nhật cong. (a) Lực dọc tĩnh cực trị; (b) Mô men tĩnh cực trị.

- Ngoài ra, khi chiều dày vỏ chống lớn, mối nối trở thành điểm yếu và ảnh hưởng rõ rệt hơn đến khả năng kháng uốn tổng thể của vỏ chống. Khả năng xoay của mối nối lại phụ thuộc vào điều kiện liên kết tại mối nối. Vì vậy, khi tăng chiều dày vỏ chống, mức độ ảnh hưởng của điều kiện liên kết tại mối nối đến mô men gây uốn  $M_{max}$  trong vỏ chống lắp ghép tăng lên như chỉ ra trên Hình 10b. Mô men uốn trong điều kiện mối nối có độ cứng chống xoay đàn hồi tuyến tính là lớn nhất, giá trị mô men nhỏ nhất khi mối nối xoay tự do.

- Đối với mô men uốn  $M_{min}$  gây ra biến dạng của vỏ chống về phía khối đất, ảnh hưởng của mối nối trong kết cấu chỉ rõ rệt khi chiều dày vỏ chống  $t > 0,6$  m.

**4.4. Ảnh hưởng của độ cứng chống xoay của mối nối,  $K_{ro}$**

Để làm rõ ảnh hưởng của độ cứng chống xoay  $K_{ro}$  tại mối nối đến biểu hiện ứng xử của vỏ chống, giá trị của nó được thay đổi từ 25 MNm/rad đến 500 MNm/rad, các thông số khác của đất và vỏ chống được lấy theo trường hợp thiết kế cơ sở trong Bảng 1 và Bảng 2. Rõ ràng, khi độ cứng chống xoay  $K_{ro}$  càng lớn, độ linh hoạt của mối nối và do đó của vỏ chống tổng thể càng giảm.

- Đối với lực dọc  $N_{max}$ , nhìn chung khi độ cứng chống xoay  $K_{ro}$  càng nhỏ, lực dọc  $N_{max}$  trong vỏ chống càng giảm (Hình 11a). Tuy nhiên ảnh hưởng này chỉ đáng kể khi  $K_{ro} < 150$  MNm/rad. Trường hợp  $K_{ro}$  lớn hơn có thể dẫn tới mối nối trở nên kém linh hoạt nên không gây ra sự khác biệt về lực dọc  $N_{max}$  giữa vỏ chống lắp ghép và vỏ chống liên tục.

- Ngoài ra, ảnh hưởng của điều kiện liên kết tại vị trí mối nối đến lực dọc  $N_{max}$  trong vỏ chống

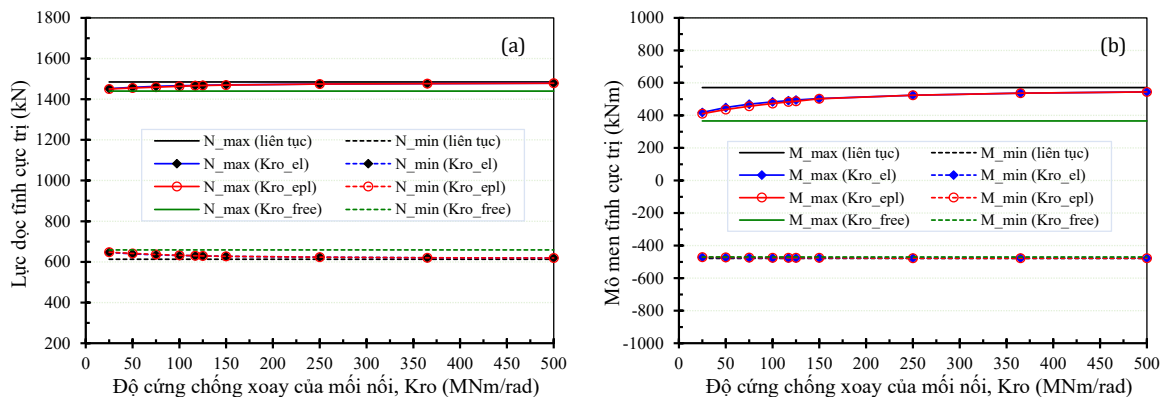
là không đáng kể. Hình 11a thể hiện thêm kết quả của lực dọc  $N_{max}$  trong trường hợp mối nối xoay tự do để thấy rõ hơn tác dụng làm giảm lực dọc trong vỏ chống khi mối nối linh hoạt xoay tự do hoàn toàn.

- Đối với mô men uốn  $M_{max}$ , với mọi giá trị  $K_{ro}$  được khảo sát,  $M_{max}$  trong vỏ chống lắp ghép luôn nhỏ hơn trong vỏ chống liên tục. Độ cứng chống xoay càng nhỏ thì sự khác biệt giữa vỏ chống liên tục và vỏ chống lắp ghép càng lớn, ảnh hưởng rõ rệt nhất khi  $K_{ro} < 150$  MNm/rad (Hình 11b). Tuy nhiên, ảnh hưởng của điều kiện liên kết tại vị trí mối nối đến mô men uốn  $M_{max}$  trong vỏ chống là không đáng kể. Cần lưu ý thêm mô men uốn  $M_{min}$  gần như không thay đổi khi  $K_{ro}$  biến đổi. Điều này có thể nhận thấy trên Hình 12 khi thay đổi  $K_{ro}$  tại vị trí mối nối, chủ yếu tác động đến giá trị mô men dương  $M_{max}$  tại đỉnh và đáy đường hầm, trong khi đó mô men âm tại 4 góc của đường hầm với bán kính cong nhỏ gần như không thay đổi.

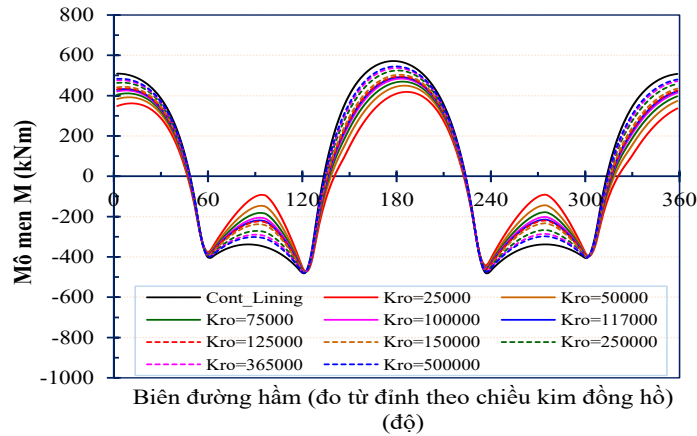
**5. Kết luận**

Trong bài báo, tác giả đã xây dựng mô hình số mô phỏng vỏ chống liên tục và vỏ chống lắp ghép của đường hầm tiết diện chữ nhật cong phát triển trên cơ sở mô hình số của đường hầm tiết diện tròn đã được kiểm chứng bằng cách so sánh với kết quả từ phương pháp giải tích kinh điển của Einstein và Schwartz (1979) cũng như kết quả mô phỏng số trên phần mềm sai phân hữu hạn của Do và nnk. (2013).

Sử dụng mô hình số mới phát triển, tác giả đã nghiên cứu làm sáng tỏ được ảnh hưởng của mối nối, bao gồm số mối nối, điều kiện liên kết tại mối nối đến ứng xử của vỏ chống lắp ghép trong đường hầm tiết diện chữ nhật cong. Ngoài ra,



Hình 11. Ảnh hưởng của độ cứng chống xoay  $K_{ro}$  đến nội lực trong KCC đường hầm lắp ghép tiết diện chữ nhật cong. (a) Lực dọc tĩnh cực trị; b) Mô men tĩnh cực trị.



Hình 12. Ảnh hưởng của độ cứng chống xoay  $K_{ro}$  đàn hồi tuyến tính đến phân bố mô men uốn trong KCC đường hầm lắp ghép tiết diện chữ nhật cong.

các nghiên cứu khảo sát tham số cũng được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của các thông số như mô đun biến dạng đàn hồi  $E_s$  của đất, hệ số áp lực ngang  $K_0$ , chiều dày vỏ chống  $t$ , độ cứng chống xoay  $K_{ro}$  tại mỗi nối, đến ứng xử của vỏ chống lắp ghép trong điều kiện chịu tải trọng tĩnh. Các kết quả nghiên cứu đã chỉ ra quy luật và mức độ ảnh hưởng không thể bỏ qua của mỗi nối và điều kiện liên kết tại mỗi nối trong quá trình thiết kế vỏ chống đường hầm. Dựa trên các kết quả nghiên cứu thu được, có thể rút ra một số kết luận:

- Nhìn chung lực dọc  $N_{max}$  có xu hướng giảm khi số lượng mỗi nối tăng lên. Sự ảnh hưởng của số mỗi nối đến sự thay đổi khác nhau của lực dọc trong vỏ chống đường hầm tiết diện chữ nhật cong có sự khác biệt với đường hầm tiết diện tròn. Khi xét đến sự thay đổi điều kiện liên kết giữa các mỗi nối, mức độ thay đổi giá trị lực dọc cực đại  $N_{max}$  trong vỏ chống phụ thuộc vào vị trí phân bố của mỗi nối trên chu vi vỏ chống đường hầm, trong trường hợp mỗi nối xoay tự do, lớn hơn so với các trường hợp điều kiện liên kết của mỗi nối còn lại (liên kết đàn hồi và liên kết đàn hồi dẻo).

- Khi số mỗi nối tăng lên, mô men uốn  $M_{max}$  có xu hướng giảm, dải phân bố của mô men uốn cực đại  $M_{max}$  phụ thuộc vào vị trí phân bố của mỗi nối cũng giảm. Nói cách khác, khi số mỗi nối tăng, mô men uốn cực đại  $M_{max}$  ít phụ thuộc hơn vào sự phân bố của vị trí mỗi nối trên chu vi vỏ chống đường hầm.

- Trong trường hợp mỗi nối chống xoay đàn hồi tuyến tính, sự phụ thuộc (dải phân bố giá trị) của mô men uốn cực đại  $M_{max}$  vào sơ đồ phân bố

mối nối nhỏ hơn so với hai trường hợp điều kiện liên kết tại mỗi nối còn lại.

- Mức độ chênh lệch của mô men uốn  $M_{max}$  giữa vỏ chống liên tục và vỏ chống lắp ghép rõ rệt hơn khi khối đất càng mềm yếu. Ảnh hưởng của đặc tính độ cứng chống xoay tại mỗi nối đến nội lực trong vỏ chống rõ rệt nhất khi đường hầm đào trong đất yếu, với mô đun biến dạng đàn hồi của đất  $E_s$  nhỏ hơn 75 MPa.

- Ảnh hưởng của mỗi nối đến giá trị lực dọc  $N_{max}$  trong vỏ chống chủ yếu khi hệ số áp lực ngang  $K_0$  nhỏ hơn 1. Khi tiếp tục tăng giá trị  $K_0$ , lực dọc  $N_{max}$  trong vỏ chống liên tục và vỏ chống lắp ghép không có sự khác biệt đáng kể.

- Ảnh hưởng của hệ số áp lực ngang  $K_0$  đến giá trị mô men uốn  $M_{max}$  trong vỏ chống đường hầm tiết diện chữ nhật cong có sự khác biệt lớn đối với đường hầm tròn. Khi  $K_0$  càng nhỏ, ảnh hưởng của điều kiện liên kết tại mỗi nối đến mô men uốn  $M_{max}$  trong kết cấu vỏ chống lắp ghép của đường hầm chữ nhật cong càng rõ rệt.

- Ảnh hưởng của mỗi nối đến lực dọc  $N_{max}$  và mô men  $M_{max}$  trong kết cấu vỏ chống lắp ghép so với vỏ chống liên tục không đáng kể khi chiều dày của vỏ chống ( $t$ ) nhỏ hơn 0,4 m.

- Độ cứng chống xoay tại mỗi nối càng nhỏ thì sự khác biệt giữa vỏ chống liên tục và vỏ chống lắp ghép càng lớn, ảnh hưởng rõ rệt nhất khi  $K_{ro} < 150$  MNm/rad.

### Đóng góp của các tác giả:

Đỗ Xuân Hội - mô hình số, khảo sát thông số, viết bản thảo bài báo; Phạm Văn Vĩ - mô hình số,

chỉnh sửa bài báo; Đỗ Ngọc Anh - phương pháp nghiên cứu, chỉnh sửa bài báo.

### Tài liệu tham khảo

- Brinkgreve, R., Zampich, L., Ragimanoj, N. (2019). Plaxis connect Edition v20. Delft University of Technology & Plaxis b, the Netherlands.
- Đặng, V. K, Đỗ, N. A., Nguyễn, T. T., Nguyễn, H. A. D. và Phạm, V. V. (2021). Nghiên cứu tổng quan về vỏ hầm metro tiết diện ngang hình chữ nhật cong, *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Mỏ - Địa chất*, số 62, kỳ 4, tr. 68-78.
- Do, N. A., Dias, D., Oreste, P. P., & Djeran-Maigre, I. (2013). 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 115-127.
- Do, N. A., Dias, D., Zixin, Z., Xin, H., Nguyen, T. T., Pham, V. V., Ouahcène, N. R. (2020). Study on the behavior of squared and sub-rectangular tunnels using the Hyperstatic Reaction Method. *Transp. Geotech.*, 22, 100321.
- Du, D. C., Dias, D., Do, N. A. (2020), Lining performance optimization of sub-rectangular tunnels using the Hyperstatic Reaction Method, *Comp Geotech*, 117, 103279. doi:10.1016/j.compgeo.2019.103279.
- Einstein, H. H., & Schwartz, C. W. (1979). Simplified analysis for tunnel supports. *Journal of Geotechnical Engineering*, 105, GT4, 499-517.
- Janssen, P. (1983), Tragverhalten von Tunnelausbauten mit Gelenktübbings, Report-No. 83-41 University of Braunschweig, Department of civil engineering, Institute for structural analysis.
- Liu, Z., Chen, Y., Wu, Y., Liu, X. (2024). Experimental and Theoretical Investigations of the Mechanical Behavior of Column-Free Quasi-Rectangular Segmental Tunnel Linings. *Appl. Sci.*, 14, 2896. <https://doi.org/10.3390/app14072896>.
- Liu, X., Yuhang, Y., Zhen, L., Dezhong, H. (2018a). Mechanical behavior of Quasi-rectangular segmental tunnel linings: First results from full-scale ring tests. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 71, 440-454.
- Liu, X., Yuhang, Y., Zhen, L., Bai, Y., Zhu, Y. (2018b). Mechanical behavior of quasi-rectangular segmental tunnel linings: Further insights from full-scale ring tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71 [2018] 440-453.
- Nguyen, T. T., Do, N. A., Karasev, M. A., Dang, V. K., Dias, D. (2020), Tunnel Shape Influence on the Tunnel Lining Behavior. *Proceeding of ICE - Geotechnical Engineering*, 4: 355-371.
- Pham, V. V., Do, N. A., Dias, D. (2021), Sub-rectangular tunnels behavior under seismic loading, *Appl. Sci*, 11, 9909. doi.org/10.3390/app11219909 [ISSN: 2076-3417].
- Pham, V. V., Do, N. A., Dias, D., Nguyen, C. T., Dang, V. K. (2022). Sub-rectangular tunnels behavior under static loading. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 10: 488-503. Doi: 10.1007/s40515-022-00230-w.
- Yu, H., Chen, G. (2021). Pseudo-static simplified analytical solution for seismic response of deep tunnels with arbitrary cross-section shapes. *Computers and Geotechnics*, 137, 104306. doi:10.1016/j.compgeo.2021.104306.
- Zhang, W., De, C. W., Liu, X., Taerwe, L. (2021). Optimization Study on Longitudinal Joints in Quasi-Rectangular Shield Tunnels, *Applied Sciences*, 11, 573. doi.org/10.3390/app11 020 573.
- Ziccarelli, M. (2024). The Coefficient of Earth Pressure at Rest K0 of Sands up to Very High Stresses. *Geosciences*, 14, 264. <https://doi.org/10.3390/geosciences14100264>.