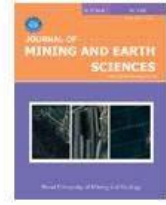




Journal of Mining and Earth Sciences

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



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

Hoi Xuan Do ¹, Vi Van Pham ^{2, 4}, Anh Ngoc Do ^{3, 4, *}

¹ PhD student, Department of Underground and Mining Construction, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

² Electric Power University, Hanoi, Vietnam

³ Department of Underground and Mining Construction, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received 05th Jan. 2026

Revised 26th Apr. 2026

Accepted 18th May 2026

Keywords:

Internal forces,
Segmental lining,
Seismic loading,
Sub-rectangular,
Tunnel.

ABSTRACT

Recently, research on the behavior of underground support structures under seismic loading has primarily focused on circular and rectangular tunnels. Recently, the sub-rectangular cross-section tunnel has been introduced and applied as an effective solution to overcome the drawbacks of above mentioned shapes. Under seismic loads, the behavior of sub-rectangular tunnels differs significantly from that of circular and rectangular ones. Recent studies have mainly focused on the behavior of segmental linings in sub-rectangular tunnels under static loading, or on continuous linings under seismic loads. Therefore, investigating the internal forces in segmental linings of sub-rectangular tunnels under seismic loading, as well as study on the influence of soil and tunnel lining parameters is of great scientific and practical significance. This study aims to evaluate the influence of joint parameters (including the number, position, and characteristics of joints in the segmental lining), lining thickness, seismic acceleration and deformation modulus of ground on the seismic behavior of segmental linings in sub-rectangular tunnels.

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(5).01



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

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



Nghiên cứu ứng xử của kết cấu chống lấp ghép trong đường hầm tiết diện chữ nhật cong chịu tải trọng động đất

Đỗ Xuân Hội¹, Phạm Văn Vĩ^{2,4}, Đỗ Ngọc Anh^{3,4,*}

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

²Trường Đại học Điện lực, Hà Nội, Việt Nam

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

⁴Nhóm 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,

Động đất,

Đường hầm,

Nội lực,

Vỏ lấp ghép.

TÓM TẮT

Trong nhiều năm qua, các nghiên cứu về ứng xử của kết cấu chống trong công trình ngầm khi chịu tải trọng động đất chủ yếu dành sự quan tâm đặc biệt tới hầm tròn và hầm chữ nhật. Đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong được nghiên cứu và ứng dụng trong thời gian gần đây được xem là một giải pháp hiệu quả để khắc phục một số nhược điểm của các dạng đường hầm với mặt cắt ngang truyền thống như hình tròn hay hình chữ nhật. Khi chịu tải trọng động đất, ứng xử của đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong có sự khác biệt đáng kể so với đường hầm mặt cắt ngang hình tròn khi xét đến điều kiện liên kết giữa kết cấu chống và khối đất. Các nghiên cứu đến thời điểm hiện nay chủ yếu tập trung biểu hiện ứng xử của kết cấu lấp ghép trong đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong khi chịu tải trọng tĩnh hoặc của kết cấu chống liên tục không có mối nối khi chịu tải trọng động đất. Việc nghiên cứu xác định nội lực trong kết cấu chống lấp ghép của công trình ngầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong khi chịu tải trọng động đất cũng như khảo sát các thông số ảnh hưởng (thông số của kết cấu chống đường hầm, thông số của môi trường khối đất xung quanh,...) tới sự làm việc của kết cấu chống đường hầm khi chịu tải trọng động đất là vấn đề có ý nghĩa thực tiễn và khoa học. 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 chống lấp ghép của đường hầm tiết diện hình chữ nhật cong), mô đun biến dạng đàn hồi của đất, cường độ động đất và chiều dày kết cấu chống đến ứng xử của kết cấu chống lấp ghép bên trong đường hầm khi chịu tải trọng động đất.

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

*Tác giả liên hệ

E - mail: dongocanh@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(5).01

1. Mở đầu

Trong nhiều năm qua, các nghiên cứu về ứng xử của kết cấu chống (KCC) trong công trình ngầm (CTN) khi chịu tải trọng động đất chủ yếu dành sự quan tâm đặc biệt tới hầm tròn và hầm chữ nhật (Wang, 1993; Penzien, 2000; Bobet, 2003; Hashash và nnk., 2005; Naggar và Hinchberger, 2008; Kouretzis và nnk., 2013; Abate và nnk., 2015; Baziar và nnk., 2016; Yue và Zheng, 2019; Sandoval và Bobet, 2020; Sun và nnk., 2020; Feizi và nnk., 2022; Wu và nnk., 2023). Đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong được nghiên cứu và ứng dụng trong thời gian gần đây được xem là một giải pháp hiệu quả để khắc phục một số nhược điểm của các dạng đường hầm với mặt cắt ngang truyền thống như hình tròn hay hình chữ nhật (Do và nnk., 2020, 2023; Pham và nnk., 2021). Khi chịu tải trọng động đất, ứng xử của đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong có sự khác biệt đáng kể so với đường hầm mặt cắt ngang hình tròn khi xét đến điều kiện liên kết giữa KCC-khối đất. Cụ thể, mô men uốn trong KCC đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong ở điều kiện không trượt lớn hơn ở điều kiện trượt, nó ngược lại hoàn toàn với mô men uốn trong KCC đường hầm mặt cắt ngang hình tròn (Pham và nnk., 2021, 2022b). Khi chịu tải trọng động đất, vị trí chuyển vị lớn nhất xuất hiện xung quanh biên đường hầm mặt cắt ngang hình tròn có sự biến thiên rõ rệt ở điều kiện trượt. Trong khi đó, gần như không có sự biến thiên về vị trí của chuyển vị lớn nhất xuất hiện trên biên đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong cả ở hai điều kiện trượt và không trượt (Pham và nnk., 2022b). Đây là nguyên nhân dẫn đến khác biệt trong ứng xử của đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong so với đường hầm mặt cắt ngang hình tròn khi chịu tải trọng động đất. Trong một số nghiên cứu gần đây của Pham và nnk. (2021, 2025), một số sơ đồ tải trọng giả tĩnh tương đương mới đã được đề xuất để tính toán nội lực trong KCC liên tục bên trong đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong khi chịu tải động đất.

Tuy nhiên, những nghiên cứu trên chưa đề cập đến sự làm việc của kết cấu lắp ghép đến ứng xử của KCC đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong khi chịu tải trọng động đất. Việc nghiên cứu để tính toán nội lực, biến dạng phát sinh trong KCC lắp ghép của CTN mặt cắt ngang hình chữ nhật cong khi chịu tải trọng động đất cũng như

khảo sát các thông số ảnh hưởng (thông số của KCC đường hầm, thông số của môi trường khối đất xung quanh,...) tới sự làm việc của KCC đường hầm khi chịu tải trọng động đất là vấn đề có ý nghĩa thực tiễn và khoa học. Bên cạnh đó, xu hướng hiện nay khi chống giữ công trình ngầm thi công trong khu vực có động đất là sử dụng các kết cấu có tính linh hoạt cao như KCC lắp ghép. Các kết quả tổng hợp nghiên cứu bước đầu đề cập ở trên đã cho thấy ảnh hưởng không thể bỏ qua của mối nối trong kết cấu CTN và cần phải được nghiên cứu đầy đủ để đạt được thiết kế đáng tin cậy.

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 kết cấu chống lắp ghép của đường hầm tiết diện hình chữ nhật cong), mô đun biến dạng đàn hồi của đất, cường độ động đất và chiều dày kết cấu chống đến ứng xử của kết cấu chống lắp ghép bên trong đường hầm khi chịu tải trọng động đất.

2. Mô hình số mô phỏng đường hầm chữ nhật cong chịu tải trọng động đất

Trong nghiên cứu này, phương pháp mô phỏng tải trọng động đất giả tĩnh được thực hiện trong nghiên cứu của Pham và nnk. (2021, 2025) cho đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong được sử dụng. Giả thiết này được chấp nhận vì trong thực tế, kích thước mặt cắt ngang của hầm thường nhỏ hơn nhiều so với bước sóng của vận tốc đỉnh của mặt đất, nên lực quán tính gây ra bởi động đất có thể được bỏ qua, và kết cấu hầm có thể được thiết kế theo phương pháp giả tĩnh (Wang, 1993; Penzien và Wu, 1998; Kontoe và nnk., 2014; Rashidell và nnk., 2018; Yu và Chen, 2021). Tải trọng hoặc biến dạng do động đất gây ra có thể được tính xấp xỉ gần đúng dựa vào ứng suất cắt, τ (Hình 1b) và được xác định theo công thức sau (Penzien và Wu, 1998; Hashash và nnk., 2001; Yu và Chen, 2021, Do và nnk., 2023, Pham và nnk., 2025):

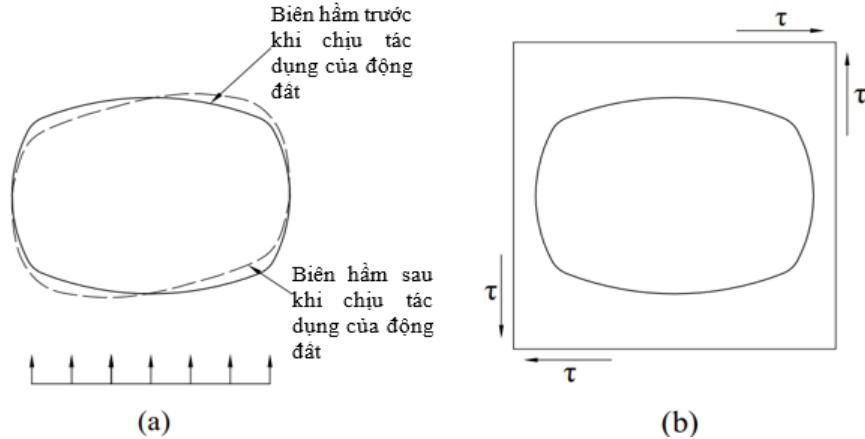
$$\tau = \frac{E_s \cdot \gamma_{max}}{2(1 + \nu_s)} \quad (1)$$

Biến dạng cắt lớn nhất γ_{max} , được xác định theo công thức sau (Penzien và Wu, 1998, Hashash và nnk., 2001, Sederat và nnk., 2009):

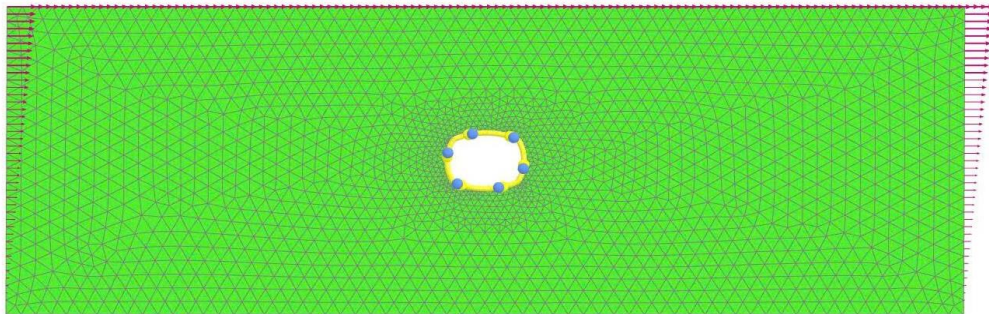
$$\gamma_{max} = \frac{V_{max}}{V_s} \quad (2)$$

Trong đó: V_{max} - vận tốc dao động cực đại; V_s - vận tốc sóng cắt của đất; E_s - mô đun biến dạng đàn hồi (Young's modulus) của đất; ν_s - hệ số Poisson của đất.

Sơ đồ nguyên lý tác dụng của tải trọng động đất và mô hình mô phỏng đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong chịu tải trọng động đất giả tĩnh trên phần mềm Plaxis 2D (Brinkgreve và nnk., 2019) được thể hiện trên Hình 2. Các thông số của đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong và KCC trong điều kiện cơ sở được trình bày trong Bảng 1.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý tác dụng tải trọng động đất lên mô hình đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong (Pham và nnk., 2025).



Hình 2. Mô hình số với điều kiện biên tải trọng giả tĩnh cho đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong.

Bảng 1. Các thông số của đất và KCC đường hầm chịu tải trọng động đất.

TT	Tham số	Đơn vị	Giá trị	Ghi chú
A	Đất			
1	Mô đun biến dạng 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, γ	kN/m ³	18	
4	Hệ số Poisson, ν_s	-	0,34	
B	Kết cấu chống bê tông đường hầm			
1	Mô đun biến dạng đàn hồi	GPa	35	
2	Hệ số Poisson, ν	-	0,15	
3	Chiều dày kết cấu chống, t	m	0,5	
4	Độ cứng chống xoay đàn hồi tuyến tính tại mỗi nối, K_{r0}	MNm/rad	117	
5	Mô men uốn lớn nhất M_{max} tại mỗi nối	kNm	207	
C	Thông số tải trọng động đất			
1	Gia tốc đỉnh cực đại, a_H	g	0,5	

Trình tự các bước mô phỏng trên mô hình số được thực hiện như sau:

Bước 1: Xây dựng mô hình mô phỏng số cho đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong chịu tải trọng tĩnh;

Bước 2: Đào đường hầm và lắp đặt KCC trong điều kiện chịu tải trọng tĩnh, đưa mô hình về trạng thái cân bằng, xác định nội lực trong KCC trong điều kiện tải trọng tĩnh;

Bước 3: Gán điều kiện biên tải trọng động đất (giả tĩnh) lên biên mô hình, chạy mô hình đến khi đạt tới trạng thái cân bằng, xác định nội lực trong KCC trong điều kiện tải trọng động đất.

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 chuyển dịch 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. Mỗi nối được mô phỏng bằng phần tử liên kết nửa cứng “semi-rigid joints” thông qua 2 tham số cơ bản là độ cứng chống xoay K_{ro} , mô men uốn giới hạn tại mỗi nối M_{max} (Đỗ và nnk., 2026). Điều kiện biên tải trọng động đất giả tĩnh được xác định thông qua độ lớn của chuyển vị áp đặt lên biên của mô hình. Giá trị của chuyển vị được tính thông qua biến dạng cắt lớn nhất, γ_{max} , phụ thuộc vào gia tốc ngang lớn nhất, a_H , và các thông số của khối đất, đường hầm (xem công thức 2). Trên Hình 2, dịch chuyển ngang do tác dụng của tải trọng động đất được gán lên 2 biên hông và đỉnh của mô hình, trong khi đó phần đáy mô hình được giữ cố định (Sederat và nnk., 2009; Do và nnk., 2015; Phạm và nnk., 2024). Véc tơ đặt trên biên mô hình là chuyển vị cưỡng bức tương đương tải trọng động đất theo phương pháp giả tĩnh.

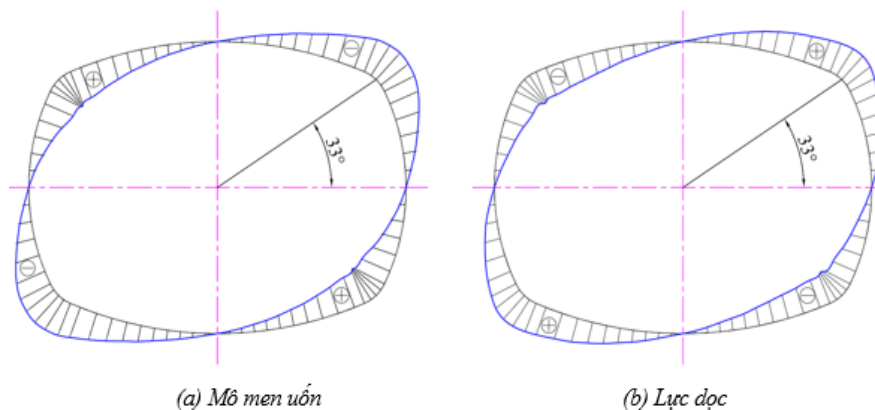
Cần nhấn mạnh rằng, các giá trị nội lực trong KCC đường hầm được trình bày trong phần này được hiểu là giá trị nội lực gia tăng (mô men uốn M, lực dọc N) dưới tác dụng của tải trọng động đất. Giá trị nội lực gia tăng được tính bằng cách lấy giá trị nội lực tổng trong KCC khi chịu tải trọng động đất (xác định tại Bước 3), trừ đi phần nội lực sinh ra tại cùng vị trí trên KCC trên biên đường hầm khi chịu tải trọng tĩnh trước đó (xác định tại Bước 2).

3. Nghiên cứu ảnh hưởng của mỗi nối đến nội lực trong KCC đường hầm mặt cắt ngang chữ nhật cong

Mục tiêu của phần này là làm sáng tỏ ảnh hưởng của mỗi nối (số mỗi nối, vị trí phân bố mỗi nối, điều kiện liên kết tại mỗi nối) đến nội lực gia tăng (mô men M, lực dọc N) trong KCC đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong khi chịu tải trọng động đất (giả tĩnh). Các trường hợp số mỗi nối và phân bố vị trí các mỗi nối được khảo sát bao gồm: 4, 5, 6, 7 và 8 mỗi nối. Trong quá trình nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của các tham số, các thông số thiết kế cơ sở (Bảng 1) được chấp nhận.

Trước khi phân tích ảnh hưởng của mỗi nối đến nội lực trong KCC, cần nhấn mạnh rằng trong điều kiện KCC liên tục không có mỗi nối, kết quả nghiên cứu của Phạm và nnk. (2021, 2024) đã chỉ ra quy luật phân bố của nội lực gia tăng (mô men uốn M và lực dọc N) (Hình 3) quanh chu vi biên đường hầm khi chịu tác dụng của tải trọng động đất (giả tĩnh) theo mô tả trên Hình 1 và 2 như sau:

- Mô men uốn gia tăng M dương (gây căng thớ trong của vỏ hầm) và đạt cực đại tại các điểm góc trên bên trái và góc dưới bên phải của đường hầm, trong khi đó mô men uốn gia tăng âm (gây căng

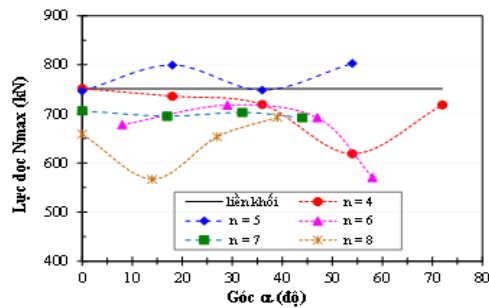


Hình 3. Quy luật phân bố điển hình của nội lực gia tăng a) mô men uốn và b) lực dọc trong đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong chịu tải trọng động (Phạm và nnk., 2021).

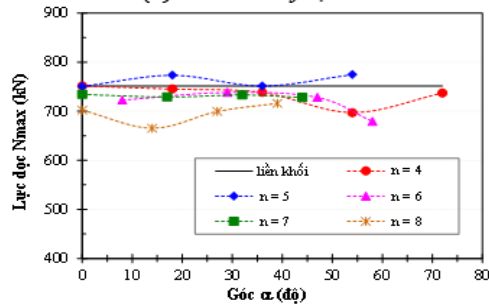
thờ ngoài của vỏ hầm) đạt cực tiểu tại góc trên bên phải và góc dưới bên trái nơi có bán kính cong nhỏ. Mô men uốn gia tăng bằng 0 tại đỉnh, đáy và hai điểm giữa hông của đường hầm.

- Tương tự, lực dọc gia tăng N dương (gây nén trong vỏ hầm) đạt cực đại tại các điểm góc phần tư bên phải phía trên và bên trái phía dưới của đường hầm, lực dọc gia tăng N âm (gây kéo trong vỏ hầm) đạt cực tiểu tại các điểm góc phần tư bên phải phía dưới và bên trái phía trên của đường hầm nơi có bán kính cong nhỏ và bằng 0 tại đỉnh, đáy và hai điểm giữa hông của đường hầm.

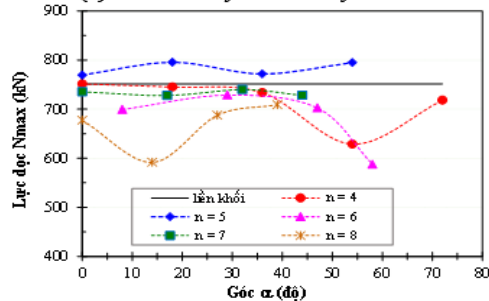
Kết quả khảo sát nội lực gia tăng cực đại (N_{max} , M_{max}) trong KCC đối với các trường hợp điều kiện liên kết tại mỗi nối khác nhau được thể theo hai cách khác nhau nhằm nhấn mạnh: (1) sự biến đổi của nội lực gia tăng cực đại khi thay đổi vị trí mỗi nối; (2) dải phân bố của nội lực gia tăng cực đại theo số mỗi nối.



(a) Mỗi nối xoay tự do.



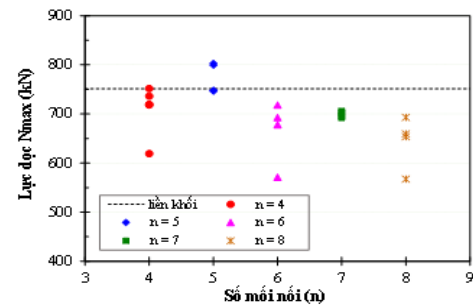
(c) Mỗi nối xoay đàn hồi tuyến tính.



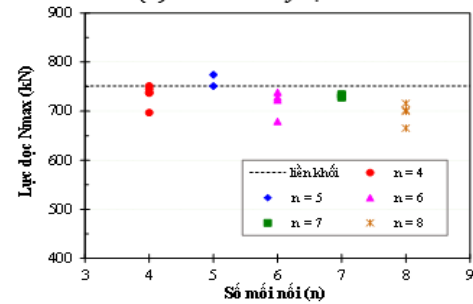
(e) Mỗi nối xoay đàn hồi dẻo tuyến tính.

3.1. Ảnh hưởng đến lực dọc gia tăng cực đại N_{max}

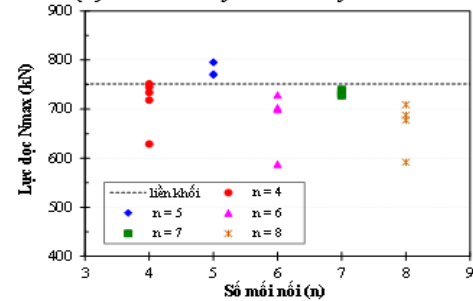
- Khi chịu tải trọng động đất, dải thay đổi của lực dọc gia tăng N_{max} trong KCC đường hầm khi thay đổi số mỗi nối và vị trí các mỗi nối được quan sát rõ rệt và xấp xỉ nhau trong hai trường hợp điều kiện liên kết mỗi nối xoay tự do (Hình 4a,b) và đàn hồi dẻo tuyến tính (Hình 4e,f). Trường hợp điều kiện liên kết mỗi nối đàn hồi tuyến tính, phạm vi thay đổi này nhỏ hơn rất nhiều (Hình 4c,d). Cụ thể, khoảng biến thiên của lực dọc gia tăng N_{max} đối với 3 điều kiện liên kết của mỗi nối xoay tự do, đàn hồi tuyến tính và đàn hồi dẻo tuyến tính lần lượt xấp xỉ là: 560÷800 kN, 650÷775 kN, 585÷800 kN. Nói cách khác, trong trường hợp điều kiện liên kết mỗi nối đàn hồi tuyến tính, lực dọc gia tăng cực đại N_{max} khi chịu tải trọng động đất ít phụ thuộc hơn vào số mỗi nối và sự phân bố vị trí của mỗi nối so



(b) Mỗi nối xoay tự do.



(d) Mỗi nối xoay đàn hồi tuyến tính.

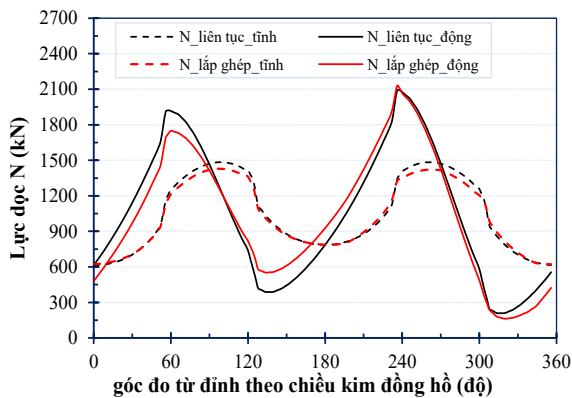


(f) Mỗi nối xoay đàn hồi dẻo tuyến tính.

Hình 4. Ảnh hưởng của số lượng và vị trí mỗi nối đến lực dọc gia tăng N_{max} trong KCC đường hầm (n là số mỗi nối trong KCC lắp ghép).

với 2 điều kiện liên kết mỗi nối còn lại (xoay tự do và đàn hồi dẻo tuyến tính). Nguyên nhân có thể giải thích là do trong 2 điều kiện liên kết mỗi nối xoay tự do và đàn hồi dẻo tuyến tính, các mối nối này cho phép chuyển vị tương đối lớn giữa các tấm KCC. Khi thay đổi số lượng và vị trí mỗi nối, sự phân bố lực dọc trong vỏ bị ảnh hưởng mạnh do KCC có tính linh hoạt cao hơn tại các vị trí mỗi nối nên khả năng biến dạng và phân bố ứng suất thay đổi nhiều khi cấu hình mỗi nối thay đổi dẫn đến mức độ biến thiên N_{max} lớn hơn. Trong trường hợp mỗi nối có độ cứng chống xoay đàn hồi tuyến tính, mỗi nối có độ cứng lớn nên hạn chế chuyển vị tương đối giữa các tấm KCC, do đó KCC ít nhạy cảm hơn với sự thay đổi về số lượng hoặc vị trí mỗi nối.

- Nhìn chung, khi số mỗi nối càng lớn, giá trị lực dọc gia tăng cực đại N_{max} trong KCC càng có xu hướng giảm. Kết quả này quan sát thấy trong cả 3 điều kiện liên kết của mỗi nối (Hình 4b,d,f). Nguyên nhân có thể giải thích là do tính linh hoạt của KCC tăng lên khi tăng số mỗi nối trong KCC, dẫn tới tăng khả năng biến dạng hay thay đổi hình dạng của KCC và do đó là sự phân phối lại hay điều chuyển lực dọc hài hòa giữa các vị trí của KCC theo chu vi biên đường hầm. Tuy nhiên, Hình 4b,d,f cũng cho thấy một hiện tượng khác biệt đối với trường hợp KCC lắp ghép có 5 mỗi nối, khi đó lực dọc gia tăng cực trị N_{max} trong KCC lắp ghép có thể lớn hơn so với giá trị trong KCC liên tục. Nguyên nhân là do như đã trình bày ở trên, nội lực gia tăng khi chịu tải trọng động được tính bằng giá trị nội lực tổng trừ đi giá trị nội lực tĩnh. Hình 5 miêu tả một ví dụ thể hiện đồng thời biểu đồ phân bố lực



Hình 5. Biểu đồ phân bố lực dọc trong KCC liên tục và KCC lắp ghép khi chịu tải trọng tĩnh và tải trọng động, trường hợp 5 mỗi nối, phương án phân bố vị trí mỗi nối thứ 4.

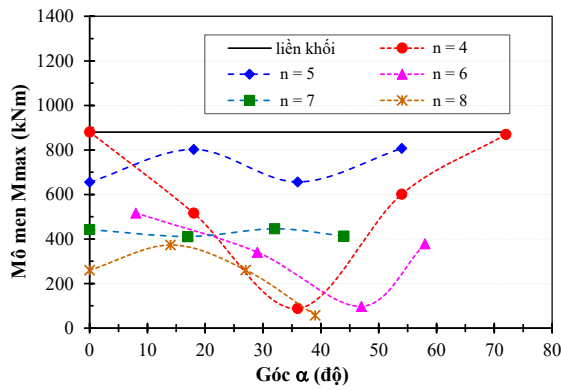
dọc trong điều kiện tải trọng tĩnh và điều kiện tải trọng động, có thể thấy lực dọc tổng trong KCC lắp ghép khi chịu tải trọng động vẫn luôn nhỏ hơn giá trị trong KCC liên tục, chúng xấp xỉ nhau tại điểm góc trái bên dưới của đường hầm. Tuy nhiên, vì giá trị lực dọc tĩnh trong KCC lắp ghép tại cùng vị trí đó nhỏ hơn khá nhiều so với trong KCC liên tục, dẫn đến giá trị lực dọc gia tăng trong KCC lắp ghép lại lớn hơn so với trong KCC liên tục.

- Trường hợp mỗi nối xoay tự do có khả năng xảy ra sự suy giảm lực dọc gia tăng cực đại N_{max} nhiều nhất so với giá trị của nó trong trường hợp KCC liên tục. Điều này được quan sát thấy với KCC có số mỗi nối bằng 6 hoặc 8. Trong trường hợp 5 và 7 mỗi nối, sự thay đổi của lực dọc gia tăng cực đại N_{max} phụ thuộc vào vị trí phân bố của mỗi nối là không đáng kể, xảy ra trong cả 3 điều kiện liên kết tại mỗi nối.

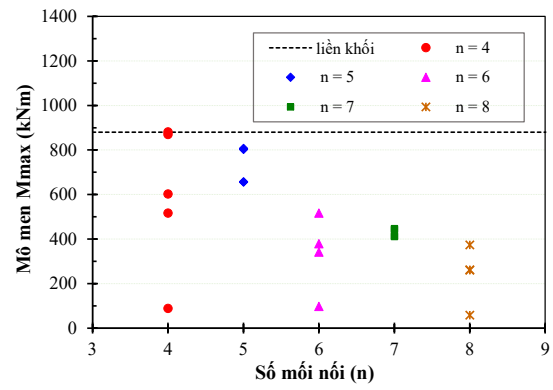
3.2. Ảnh hưởng đến mô men uốn gia tăng cực đại M_{max}

- Hình 6 cho thấy sự phụ thuộc lớn của mô men gia tăng cực đại trong KCC lắp ghép vào số mỗi nối và sự phân bố của mỗi nối trong KCC đường hầm. Nhìn chung, khi số mỗi nối càng lớn, mô men uốn gia tăng cực đại M_{max} trong KCC có xu hướng giảm. Mức độ phụ thuộc này khác nhau giữa các điều kiện liên kết mỗi nối. Cụ thể, khả năng suy giảm mô men uốn gia tăng cực đại M_{max} nhiều nhất xảy ra với trường hợp mỗi nối xoay tự do, với giá trị mô men uốn gia tăng M_{max} nhỏ nhất có thể bằng xấp xỉ 40 kNm trong trường hợp có 8 mỗi nối. Tiếp theo là trong trường hợp mỗi nối chống xoay đàn hồi dẻo tuyến tính và đàn hồi tuyến tính với giá trị M_{max} nhỏ nhất lần lượt bằng khoảng 400 kNm và 500 kNm. Sự suy giảm này phù hợp với quy luật định tính do độ linh hoạt lớn nhất trong KCC lắp ghép với mỗi nối xoay tự do, tiếp theo là KCC có mỗi nối liên kết chống xoay đàn hồi dẻo tuyến tính và độ linh hoạt thấp nhất của KCC với mỗi nối liên kết chống xoay đàn hồi tuyến tính.

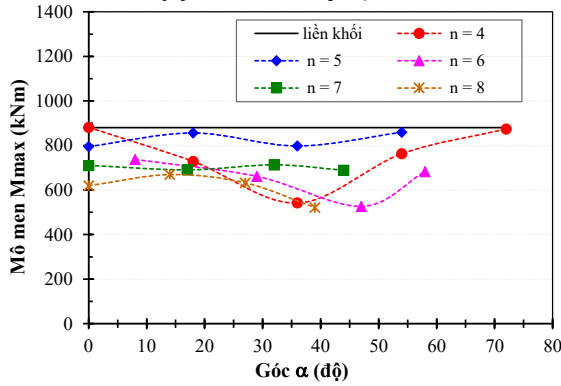
- Cũng do tính linh hoạt của mỗi nối, biên độ thay đổi hay sự phụ thuộc của mô men uốn gia tăng cực đại M_{max} vào vị trí mỗi nối quan sát được lớn nhất trong trường hợp mỗi nối liên kết chống xoay tự do (b), và nhỏ nhất trong trường hợp mỗi nối liên kết đàn hồi dẻo tuyến tính (Hình 6d).



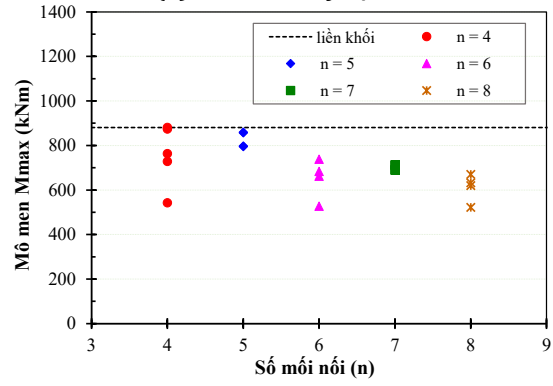
(a) Mối nối xoay tự do.



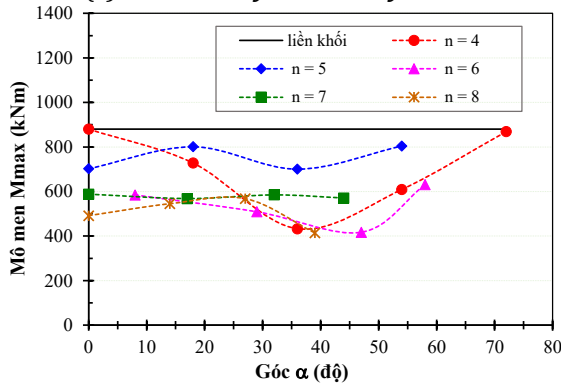
(b) Mối nối xoay tự do.



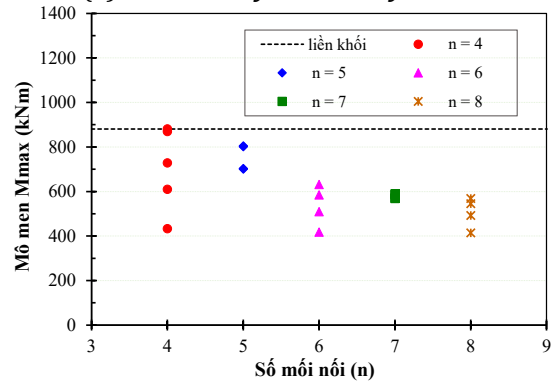
(c) Mối nối xoay đàn hồi tuyến tính.



(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 6. Ảnh hưởng của số lượng và vị trí mối nối đến mô men uốn gia tăng M_{max} trong KCC đường hầm (n là số mối nối trong KCC lắp ghép).

- Một nhận xét thú vị là khi số mối nối lẻ (5 hay 7 mối nối), biên độ thay đổi của mô men uốn gia tăng cực đại M_{max} trong KCC lắp ghép khi thay đổi vị trí phân bố của mối nối trên chu vi KCC nhỏ hơn nhiều so với trường hợp số mối nối chẵn (4, 6 và 8). Hiện tượng này quan sát thấy trong cả 3 điều kiện liên kết của mối nối. Nguyên nhân có thể liên quan đến tính chất bất đối xứng của các mối nối qua tâm đường hầm khi số mối nối lẻ, trong khi đối với trường hợp số mối nối chẵn (4, 6 và 8) các

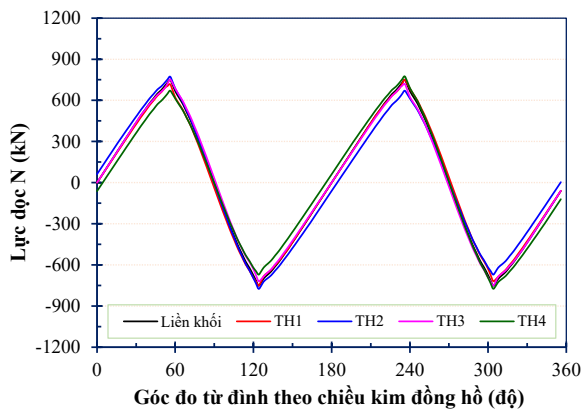
mối nối thường đối xứng với nhau qua tâm. Như thể hiện trên Hình 3 về quy luật phân bố điển hình của nội lực gia tăng trong KCC đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong khi chịu tải trọng động, có thể thấy được tính đối xứng của nội lực qua các trục xuyên tâm của đường hầm. Trường hợp khi số mối nối chẵn và phân bố có tính đối xứng tương đối qua tâm của đường hầm, khi có cặp 2 mối nối đối xứng nằm gần các vị trí có mô men uốn gia tăng lớn sẽ có tác dụng làm giảm đáng kể mô men

uốn gia tăng tại đó. Nếu các cặp 2 mối nối đều không nằm gần vị trí có mô men uốn gia tăng lớn thì tác dụng giảm mô men uốn gia tăng trong kết cấu sẽ giảm đi đáng kể. Đây là nguyên nhân dẫn tới biên độ thay đổi lớn của mô men uốn gia tăng trong KCC đường hầm trong trường hợp số mối nối chắn khi thay đổi vị trí phân bố mối nối xung quanh chu vi biên đường hầm như thể hiện trên (Hình 6b, d, f.) Đối với trường hợp số mối nối lẻ, do tính không đối xứng của các mối nối nên không xảy ra xác suất cặp 2 mối nối cùng nằm tại các vị trí có mô men uốn gia tăng lớn, dẫn tới biên độ thay đổi của mô men uốn gia tăng cực trị không đáng kể.

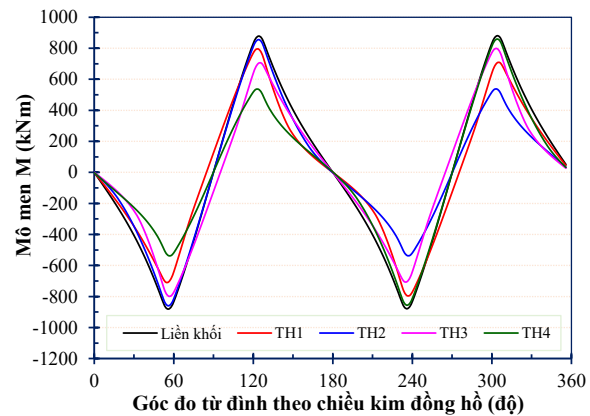
Biểu đồ phân bố mô men uốn gia tăng xung quanh KCC đường hầm cho 2 trường hợp KCC lắp ghép có 5 mối nối (Hình 7) và 6 mối nối (Hình 8) minh họa rõ hơn ảnh hưởng của tính chất phân bố không đối xứng khi KCC có số mối nối lẻ, và phân bố đối xứng khi KCC có số mối nối chẵn. Khi số mối

nối $n = 5$, các trường hợp TH1, TH2, TH3, TH4 tương ứng với góc đo từ đỉnh hầm tới vị trí mối nối đầu tiên theo chiều kim đồng hồ lần lượt là 0, 18, 36, 54 độ. Khi số mối nối $n = 6$, các trường hợp TH1, TH2, TH3, TH4 tương ứng với góc đo lần lượt là 0, 21, 40, 50 độ.

Khi số mối nối lẻ, biểu đồ phân bố mô men tại 2 phía hông của đường hầm có tính chất bất đối xứng rõ rệt khi có mối nối nằm gần vị trí các góc của đường hầm (TH2 và TH4), tại đó mô men uốn giảm đáng kể so với KCC liên tục. Tuy nhiên ở phía hông đối diện, do mối nối nằm cách xa các vị trí góc mô men uốn gia tăng lớn nên giá trị thay đổi không đáng kể. Kết quả là mô men uốn gia tăng cực trị $M_{\max}$ thay đổi không đáng kể. Trong trường hợp mối nối phân bố không nằm gần các vị trí góc có mô men uốn gia tăng lớn (TH1 và TH3), biểu đồ mô men có tính đối xứng cao hơn do ảnh hưởng của các mối nối đến sự suy giảm mô men tại đó đều nhỏ.

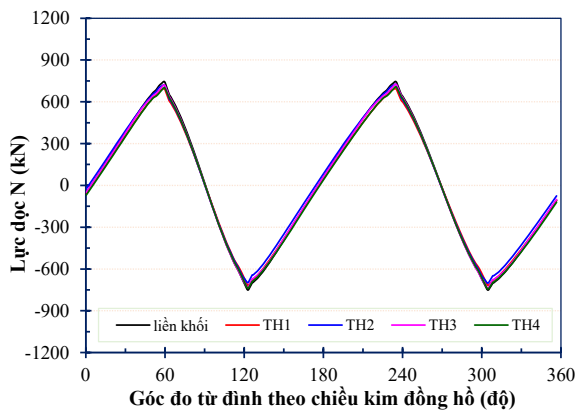


(a) Lực dọc.

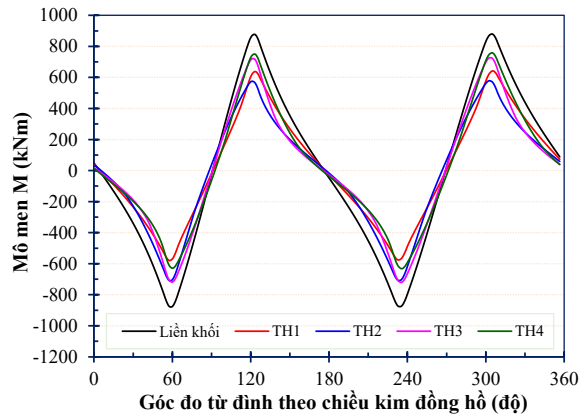


(b) Mô men.

Hình 7. Phân bố nội lực trong KCC lắp ghép có 5 mối nối với độ cứng chống xoay đàn hồi tuyến tính.



(a) Lực dọc.



(b) Mô men.

Hình 8. Phân bố nội lực trong KCC lắp ghép có 6 mối nối với độ cứng chống xoay đàn hồi tuyến tính.

Với trường hợp có 6 mối nối, biểu đồ mô men uốn gia tăng trong KCC lắp ghép thay đổi nhiều nhất so với trong KCC liên tục trong trường hợp TH1, thay đổi ít hơn trong trường hợp TH2 và TH4, thay đổi ít nhất trong trường hợp TH3. Nguyên nhân là do trong trường hợp TH1 có cặp mối nối đối xứng nhau và nằm sát các góc của đường hầm. Trong trường hợp TH2 và TH3, khoảng cách từ cặp mối nối này đến các góc tăng dần. Trường hợp TH4, không có cặp mối nối nào nằm gần vị trí góc này. Hình 7 và Hình 8 cũng cho thấy ảnh hưởng không đáng kể của mối nối đến lực dọc gia tăng trong KCC lắp ghép.

4. Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số của kết cấu chống và khối đất

Mục tiêu của 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 KCC, độ cứng chống uốn của mối nối và điều kiện tải trọng động đất (gia tốc cực đại a_H) đến ứng xử của KCC lắp ghép trong đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong. Giá trị của các tham số trên được thay đổi thể hiện trong Bảng 2. Trong phần này chỉ khảo sát cho trường hợp KCC

có 6 mối nối, là trường hợp số mối 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). Trong quá trình khảo sát ảnh hưởng sự thay đổi của từng tham số tới ứng xử của KCC, thể hiện qua sự thay đổi nội lực gia tăng trong KCC, các tham số đầu vào khác của môi trường khối đất và KCC được giả thiết là không đổi và lấy bằng với giá trị trong trường hợp thiết kế cơ sở (Bảng 2).

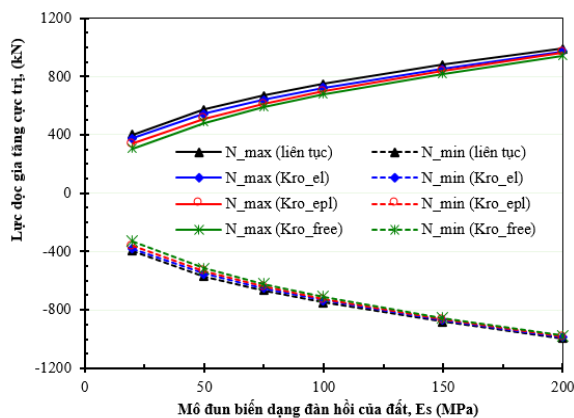
Để làm sáng tỏ ảnh hưởng của điều kiện liên kết chống xoay tại mối nối đến nội lực sinh ra trong KCC, ba điều kiện liên kết chống xoay tại mối nối gồm: mối nối xoay tự do (Kro_free), mối nối có độ cứng chống xoay đàn hồi tuyến tính (Kro_el), mối nối có độ cứng chống xoay đàn hồi dẻo (Kro_epl) được khảo sát.

4.1. Ảnh hưởng của mô đun biến dạng đàn hồi của đất (E_s)

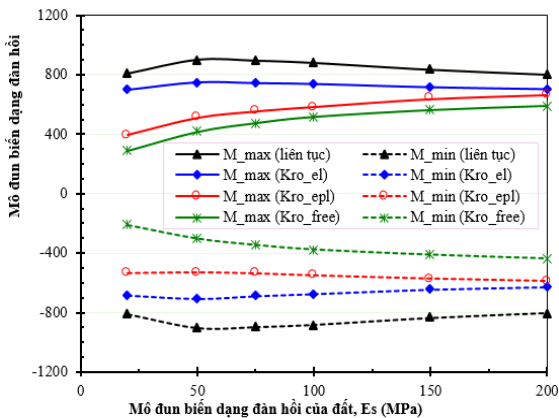
Hình 9 thể hiện sự phụ thuộc của nội lực (M và N) gia tăng trong kết cấu chống vào mô đun biến dạng đàn hồi của đất E_s thay đổi từ 25 đến 200 MPa, các giá trị khác của môi trường khối đất và KCC được lấy theo trường hợp thiết kế cơ sở trong các Bảng 1 và 2.

Bảng 2. Giá trị các tham số đầu vào thay đổi của đất và kết cấu 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	Chiều dày KCC, t	m	0,5	0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8
3	Độ cứng chống xoay của mối nối, K_{ro}	MNm/rad	117	25; 50; 75; 100; 125; 150; 250; 365; 500
4	Gia tốc ngang cực đại, a_H	g	0,5	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,75



(a) Lực dọc gia tăng cực trị.



(b) Mô men gia tăng cực trị.

Hình 9. Ảnh hưởng của mô đun biến dạng đàn hồi của đất (E_s) đến nội lực gia tăng trong KCC đường hầm lắp ghép mặt cắt ngang hình chữ nhật cong.

Hình 9a cho thấy khi mô đun biến dạng đàn hồi E_s của đất tăng lên, lực dọc gia tăng N_{max} trong KCC đều có xu hướng tăng trong cả trường hợp KCC liên tục và KCC lắp ghép. Mức độ thay đổi giữa các loại hình KCC và giữa các điều kiện liên kết tại mỗi nối là xấp xỉ nhau. Trong đó, lực dọc gia tăng trong KCC liên tục luôn lớn nhất, tiếp tục giảm dần từ trường hợp KCC lắp ghép với mỗi nối đàn hồi tuyến tính, mỗi nối đàn hồi dẻo tuyến tính và nhỏ nhất là trường hợp mỗi nối xoay tự do. Trong thực tế, khi xảy ra động đất, nền đất quanh hầm dao động và dao động này truyền vào KCC. Kết cấu chống bê tông đường hầm không chịu trực tiếp lực quán tính của đất ở xa, mà chủ yếu chịu biến dạng do sóng địa chấn lan truyền đến khối đất bao quanh. Nói cách khác, động đất gây ra biến dạng cưỡng bức của đất nền, và KCC đường hầm phải chịu ứng suất tương ứng. Nếu đất mềm với mô đun biến dạng nhỏ dẫn đến chuyển vị lớn nhưng ứng suất truyền vào lớp bê tông vỏ hầm nhỏ hơn. Nếu đất cứng (mô đun biến dạng lớn), gây ra chuyển vị nhỏ nhưng ứng suất truyền vào lớp KCC lớn hơn dẫn đến làm tăng nội lực trong vỏ bê tông. Đây chính là lý do trong nền đất cứng, động đất có thể tạo ứng suất lớn trong KCC, dù biến dạng tổng thể nhỏ. Khi thay đổi điều kiện liên kết tại mỗi nối tương ứng với mỗi nối với độ cứng chống xoay đàn hồi tuyến tính, đàn hồi dẻo tuyến tính và xoay tự do, độ cứng tổng thể của KCC giảm dần, độ linh hoạt của KCC tăng lên dẫn đến giảm ứng suất tác dụng trong KCC và do đó lực dọc trong KCC giảm như chỉ ra trên (Hình 9a).

Hình 9b thể hiện sự phụ thuộc của mô men uốn gia tăng cực trị (M) trong KCC vào mô đun biến dạng đàn hồi của đất E_s . Có thể nhận thấy ảnh hưởng rõ rệt của sự tồn tại mỗi nối và điều kiện liên kết tại mỗi nối đến ứng xử của KCC thông qua giá trị mô men uốn gia tăng khi thay đổi E_s . Trường hợp KCC liên tục không có mỗi nối và KCC lắp ghép với mỗi nối có độ cứng chống xoay đàn hồi tuyến tính, mô men uốn gia tăng có xu hướng đạt cực trị khi mô đun biến dạng đàn hồi E_s xấp xỉ 50 MPa. Trong 2 trường hợp còn lại, KCC lắp ghép với mỗi nối có độ cứng chống xoay đàn hồi dẻo tuyến tính và mỗi nối xoay tự do, mô men uốn gia tăng cực trị có xu hướng tăng dần giá trị tuyệt đối khi E_s tăng. Nguyên nhân của hiện tượng này có thể giải thích như sau:

- Trường hợp KCC liên tục hoặc KCC lắp ghép với mỗi nối đàn hồi tuyến tính, có thể coi gần đúng

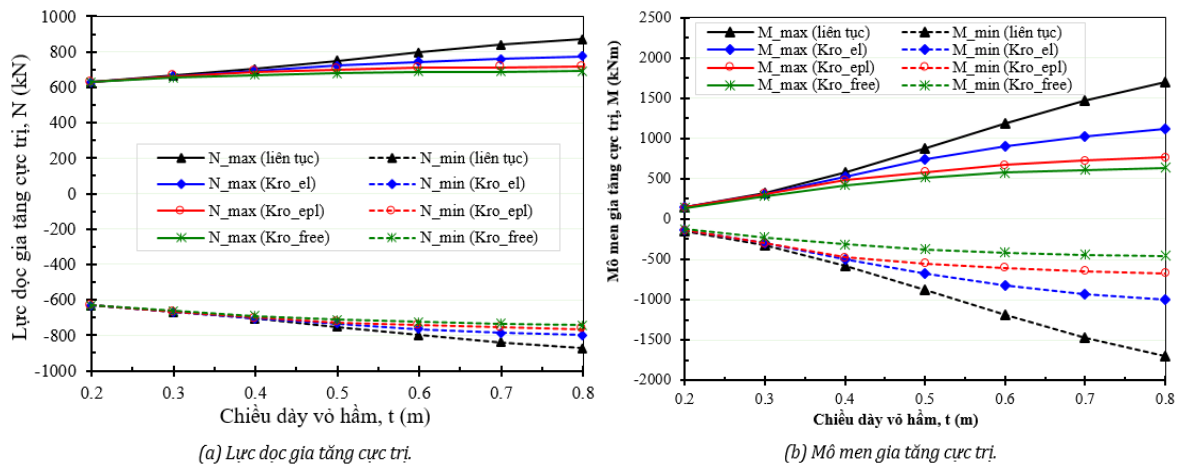
như KCC liên tục, dẫn đến KCC có khả năng phát triển và truyền mô men uốn lớn. Khi E_s nhỏ (đất mềm), đất hấp thụ tải trọng động, dẫn đến mô men uốn gia tăng trong KCC nhỏ. Tuy nhiên, khi E_s tăng hay đất cứng hơn, tải trọng động sẽ truyền nhiều hơn vào KCC dẫn đến làm tăng mô men uốn. Tại một giá trị trung gian, trong trường hợp này là xấp xỉ $E_s = 50$ MPa, độ cứng của đất và KCC gần tương thích tối ưu dẫn đến KCC bị nén ép nhiều nhất và gây ra mô men uốn gia tăng đạt cực trị. Nếu tiếp tục tăng E_s (đất quá cứng), biến dạng của đất nền giảm, KCC và đất nền đồng biến dạng dẫn đến tăng thêm mô men uốn gia tăng không đáng kể, do đó mô men uốn gia tăng có xu hướng giảm hoặc đạt tới giá trị tiệm cận. Kết quả này cũng tương đồng với nghiên cứu của Phạm và nnk. (2024) cho cả 3 trường hợp KCC đường hầm mặt cắt ngang hình tròn, chữ nhật và chữ nhật cong.

- Trường hợp mỗi nối đàn hồi dẻo tuyến tính và mỗi nối xoay tự do, khi E_s nhỏ (đất mềm), đất hấp thụ tải trọng động, mô men uốn gia tăng trong KCC thấp. Khi E_s tăng dần, KCC chịu nhiều tải trọng động hơn dẫn đến làm tăng mô men uốn gia tăng. Tuy nhiên, do mỗi nối có khả năng xoay lớn, đặc biệt là trường hợp mỗi nối xoay tự do với mô men bằng 0 tại vị trí mỗi nối, mô men không bị “khóa” lại ở mức cực trị mà tiếp tục tăng theo độ cứng của đất. Kết quả là mô men có xu hướng tăng dần theo E_s và không đạt cực trị như trường hợp vỏ có độ cứng lớn.

Có thể nhận thấy, xu hướng biến đổi của mô men uốn gia tăng trong KCC của đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong khi chịu tải trọng động phụ thuộc vào mô đun biến dạng đàn hồi của đất E_s hoàn toàn khác biệt so với khi chịu tải trọng tĩnh. Trong điều kiện chịu tải trọng tĩnh, khi E_s tăng, mô men uốn tĩnh trong KCC có xu hướng giảm (Phạm và nnk., 2022a).

4.2. Ảnh hưởng của chiều dày kết cấu chống đường hầm, t

Với giả thiết chiều dày KCC thay đổi từ 0,2m đến 0,8 m, các giá trị khác của môi trường khối đất và KCC được lấy theo trường hợp thiết kế cơ sở trong các Bảng 1 và 2. Kết quả khảo sát (Hình 10) cho thấy sự thay đổi đáng kể của lực dọc gia tăng N và mô men uốn gia tăng M cũng như ảnh hưởng không thể bỏ qua của mỗi nối và các điều kiện liên kết tại mỗi nối, cụ thể:



Hình 10. Ảnh hưởng của chiều dày KCC (t) đến nội lực gia tăng trong KCC đường hầm lấp ghép mặt cắt ngang hình chữ nhật cong.

- Đối với lực dọc N_{max} , nhìn chung lực dọc N_{max} có xu hướng tăng tuyến tính khi chiều dày KCC tăng từ 0,2÷0,8 m (Hình 10a). Trong tất cả các trường hợp chiều dày KCC khảo sát, lực dọc gia tăng trong KCC lấp ghép luôn nhỏ hơn trong KCC liên tục. Nguyên nhân là do đặc tính linh hoạt của mối nối, khi động đất gây biến dạng trong KCC lấp ghép, mối nối làm giảm khả năng truyền và tích lũy ứng suất dọc trục kết cấu, cho phép KCC giải phóng một phần biến dạng cưỡng bức hay ứng suất tác dụng từ nền đất. Mối nối càng linh hoạt, mức độ giải phóng ứng suất trong KCC càng lớn và do đó lực dọc gia tăng do tải trọng động sinh ra trong KCC càng giảm. Đó là lý do tại sao lực dọc gia tăng trong KCC lấp ghép với mối nối xoay tự do luôn nhỏ nhất, tăng lên trong KCC có mối nối xoay đàn hồi dẻo và lớn nhất khi mối nối có độ cứng chống xoay đàn hồi tuyến tính.

- Ảnh hưởng của sự tồn tại mối nối đến lực dọc gia tăng N_{max} trong KCC lấp ghép so với KCC liên tục không đáng kể khi chiều dày của KCC (t) nhỏ hơn 0,4 m (Hình 10a). Nguyên nhân là tải trọng động đất gây ra biến dạng cưỡng bức trong đất nền và lớp KCC đường hầm, trong trường hợp vỏ mỏng có tính linh hoạt cao và dễ biến dạng, tỉ số độ cứng KCC/đất thấp hơn, tương tác biến dạng giữa KCC và đất nền chủ yếu phụ thuộc vào độ cứng của đất nền, ít phụ thuộc vào độ cứng của KCC. Vì vậy tính chất linh hoạt do có thêm mối nối trong KCC lấp ghép không gây ra ảnh hưởng lớn đến nội lực gia tăng sinh ra trong KCC bởi biến dạng cưỡng bức từ khối đất nền.

- Đối với mô men uốn gia tăng M_{max} (Hình 10b), nhìn chung khi chiều dày KCC càng lớn đồng nghĩa với độ cứng của KCC càng tăng thì khả năng biến dạng của KCC càng giảm và do đó mô men uốn tăng lên. Khi chiều dày kết cấu chống $t < 0,4$ m, không có sự khác biệt đáng kể về mô men uốn M_{max} trong KCC lấp ghép và liên tục. Nguyên nhân là với KCC mỏng (t nhỏ), độ cứng chống uốn của kết cấu thấp, KCC dễ dàng biến dạng theo đất nền khi chịu tải trọng động. Việc có tồn tại mối nối hay không, độ cứng mối nối lớn hay nhỏ cũng không thay đổi nhiều phân bố mô men gia tăng vì KCC bản thân đã mềm, dẫn đến giá trị mô men uốn gia tăng M_{max} trong các trường hợp gần tương đương nhau. Khi chiều dày KCC tăng lên, độ cứng chống uốn của KCC cũng tăng, dẫn đến KCC khó bị uốn theo biến dạng cưỡng bức từ khối đất nền. Khi đó, mối nối trở thành điểm yếu quyết định khả năng vỏ “chịu xoay”. Nếu mối nối cứng (KCC liên tục, KCC lấp ghép với mối nối chống xoay đàn hồi tuyến tính), mối nối giữ chặt góc xoay, vỏ bị cưỡng bức uốn gây ra tăng mô men uốn gia tăng. Nếu mối nối mềm (đàn hồi dẻo tuyến tính, xoay tự do), mối nối cho phép xoay nhiều hơn và giải phóng một phần ứng suất dẫn đến mô men uốn gia tăng giảm, nhưng khi đó phân bố nội lực thay đổi rõ rệt. Nói cách khác, khi chiều dày KCC càng lớn, độ cứng chống uốn tăng lên, khả năng truyền mô men phụ thuộc nhiều vào điều kiện liên kết tại mối nối. Do đó, ảnh hưởng của mối nối và dạng liên kết (cứng, đàn hồi tuyến tính, đàn hồi dẻo tuyến tính, xoay tự do) đến mô men uốn gia tăng M_{max} càng lớn.

Cần lưu ý, trong thực tế, độ cứng chống xoay của mỗi nối nửa cứng có liên hệ với độ cứng uốn của các tấm vỏ hầm và có thể thay đổi khi chiều dày vỏ chống thay đổi. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này độ cứng chống xoay của mỗi nối được giữ không đổi khi khảo sát ảnh hưởng của chiều dày kết cấu nhằm tách riêng vai trò của chiều dày vỏ chống đến nội lực trong kết cấu chống. Giả thiết này cho phép đánh giá rõ xu hướng biến đổi nội lực do thay đổi độ cứng tổng thể của vỏ chống, đồng thời vẫn đảm bảo phản ánh được ảnh hưởng của sự tồn tại mỗi nối trong kết cấu lắp ghép.

4.3. Ảnh hưởng của độ cứng chống xoay của mỗi nối, K_{ro}

Để làm rõ ảnh hưởng của độ cứng chống xoay K_{ro} tại mỗi nối đến biểu hiện ứng xử của KCC khi chịu tải trọng động, giá trị của K_{ro} được thay đổi từ 25÷500 MNm/rad, các thông số khác của đất và KCC được lấy theo trường hợp thiết kế cơ sở trong các Bảng 1 và 2.

Đối với lực dọc N_{max} , nhìn chung khi độ cứng chống xoay K_{ro} càng nhỏ, lực dọc gia tăng N_{max} trong KCC 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 mỗi nối trở nên cứng hơn và KCC lắp ghép có biểu hiện ứng xử gần với KCC liên tục nên không gây ra sự khác biệt về lực dọc N_{max} gia tăng giữa KCC lắp ghép và KCC liên tục. Ngoài ra, ảnh hưởng của điều kiện liên kết tại vị trí mỗi nối đến lực dọc gia tăng N_{max} trong KCC khi chịu tải trọng động đất là không đáng kể. Nguyên nhân là điều kiện liên kết tại mỗi nối chủ

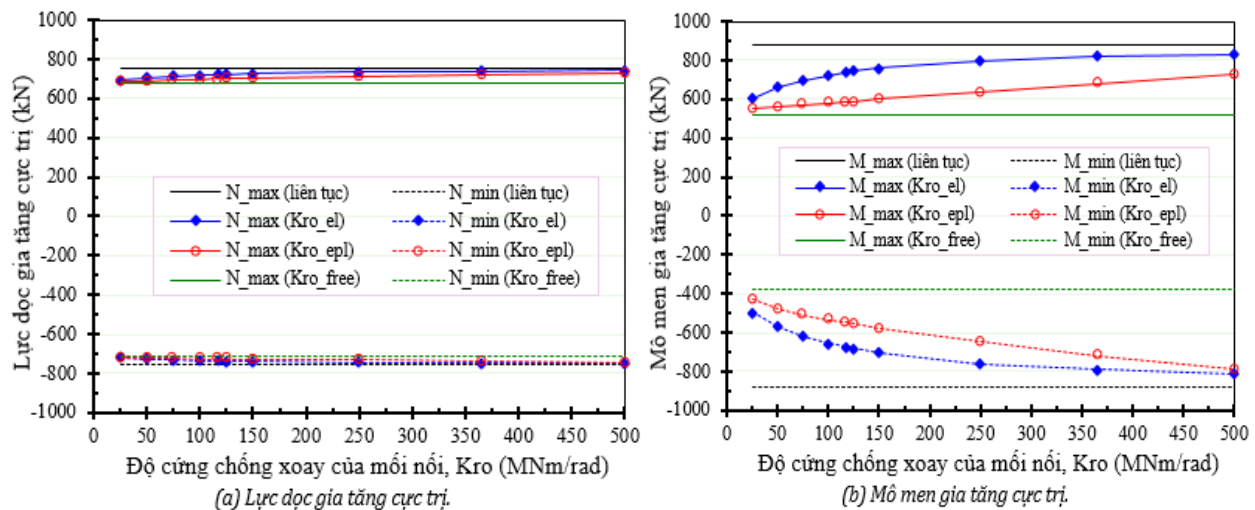
yếu ảnh hưởng đến truyền mô men (M) chứ không ảnh hưởng đáng kể đến truyền lực dọc (N) (Do và nnk., 2013). Thực tế, lực dọc trong KCC đường hầm khi chịu tải trọng động đất được quyết định chủ yếu bởi biến dạng cường bức của đất và độ cứng dọc trục kết cấu ($E_t A$) (trong đó E_t là mô đun biến dạng của vật liệu làm KCC, A là diện tích tiết diện ngang KCC), nên ảnh hưởng của điều kiện mỗi nối đến giá trị N_{max} là không đáng kể.

Đối với mô men uốn gia tăng M_{max} , với mọi giá trị K_{ro} được khảo sát, M_{max} trong KCC lắp ghép luôn nhỏ hơn trong KCC liên tục (Hình 11b). Khả năng xoay càng lớn hay độ cứng chống xoay càng nhỏ thì sự khác biệt giữa KCC liên tục và KCC lắp ghép càng lớn. Hình 11b chỉ ra sự ảnh hưởng lớn của K_{ro} tới giá trị mô men uốn gia tăng M_{min} . Nguyên nhân của hiện tượng này là do trong điều kiện tải trọng động đất, mô men uốn gia tăng âm gây ra do biến dạng cường bức từ khối đất nền, giá trị của K_{ro} quyết định khả năng truyền hoặc giải phóng mô men uốn nên sẽ có ảnh hưởng rõ rệt đến giá trị M_{min} .

4.4. Ảnh hưởng của cường độ động đất, a_H

Phần này làm rõ ảnh hưởng của cường độ động đất thông qua giá trị gia tốc ngang a_H đến nội lực gia tăng cực trị trong KCC. Giá trị của a_H được thay đổi từ 0,1÷0,75g, các thông số khác của đất và KCC được lấy theo trường hợp thiết kế cơ sở trong Bảng 1 và 2.

Kết quả phụ thuộc của nội lực gia tăng cực trị N_{max} và N_{min} vào gia tốc ngang cực đại a_H trên Hình 12a cho thấy, khi a_H càng lớn, lực dọc gia tăng cực



Hình 11. Ảnh hưởng của độ cứng chống xoay K_{ro} đến nội lực gia tăng trong KCC đường hầm lắp ghép mặt cắt ngang hình chữ nhật cong.

trị tăng tuyến tính, lớn nhất trong KCC liên tục, và giảm dần theo mức độ tăng tính linh hoạt của mỗi nối trong KCC lắp ghép. Sự khác biệt lớn nhất giữa lực dọc gia tăng trong KCC liên tục và KCC lắp ghép với mỗi nối chống xoay đạt xấp xỉ 9,75% khi a_H bằng 0,75g.

Hình 12b cho thấy sự phụ thuộc tuyến tính của mô men gia tăng cực trị $M_{\max}$ và $M_{\min}$ vào gia tốc ngang cực đại a_H , tuy nhiên mức độ phụ thuộc này rõ rệt hơn rất nhiều so với lực dọc. Tương tự lực dọc, mô men uốn gia tăng cực trị lớn nhất trong KCC liên tục, và giảm dần theo mức độ tăng tính linh hoạt của mỗi nối trong KCC lắp ghép. Sự khác biệt lớn nhất giữa mô men uốn gia tăng trong KCC liên tục và KCC lắp ghép với mỗi nối chống xoay đạt xấp xỉ 48% khi a_H bằng 0,75g. Nguyên nhân là do trong vỏ lắp ghép có mỗi nối cho phép xoay tương đối giữa các phần của kết cấu, một phần biến dạng uốn gây ra bởi gia tốc động đất thông qua biến dạng cường bức từ khối đất nền được giải phóng tại vị trí mỗi nối.

5. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả đã nghiên cứu thông số trên mô hình số xác định ảnh hưởng của mỗi nối trong KCC lắp ghép của đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong, bao gồm số mỗi nối, điều kiện liên kết tại mỗi nối đến nội lực gia tăng phát sinh trong KCC khi chịu tải trọng động đất bằng phương pháp giả tĩnh. Ngoài ra, 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, chiều dày KCC (t), độ cứng chống xoay (K_{ro}) tại mỗi nối, gia tốc ngang cực đại a_H đến ứng xử của KCC lắp ghép trong điều kiện chịu tải trọng tĩnh. Các kết quả nghiên cứu đã chỉ ra quy luật và mức độ ảnh hưởng đáng kể của mỗi nối và điều kiện liên kết tại mỗi nối, sự khác biệt so với đường hầm mặt cắt ngang hình tròn.

- Khi số mỗi nối càng lớn, giá trị lực dọc gia tăng cực đại $N_{\max}$, mô men uốn gia tăng cực đại $M_{\max}$ trong KCC có xu hướng giảm. Mức độ ảnh hưởng của mỗi nối đến lực dọc gia tăng nhỏ hơn nhiều so với ảnh hưởng đến mô men uốn gia tăng.

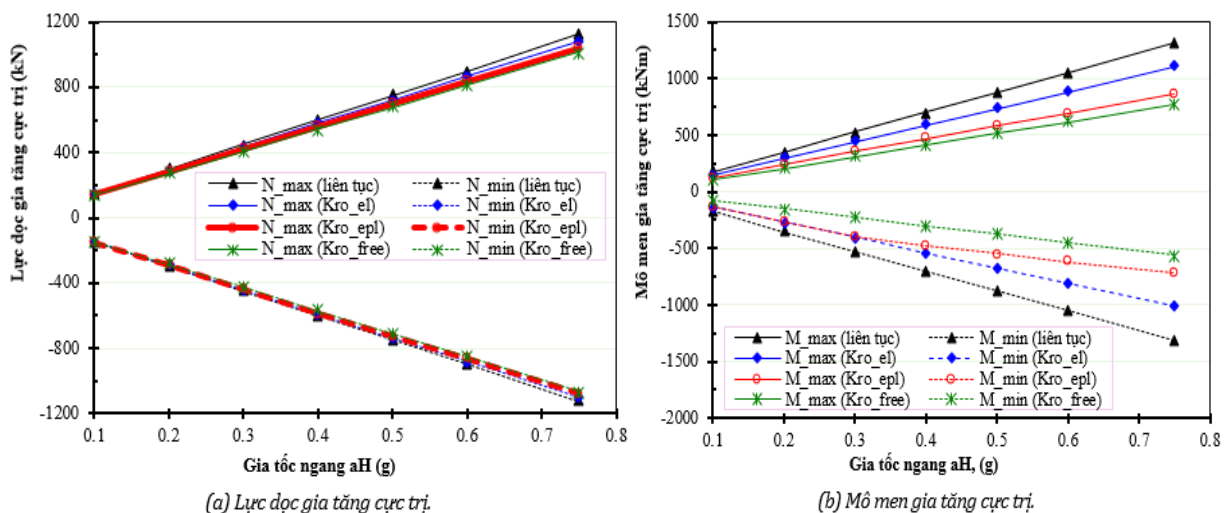
- Khả năng thay đổi nội lực gia tăng cực đại $M_{\max}$, $N_{\max}$ nhiều nhất xảy ra với trường hợp mỗi nối xoay tự do, tiếp theo là trong trường hợp mỗi nối chống xoay đàn hồi dẻo tuyến tính và đến mỗi nối đàn hồi tuyến tính.

- Khi số mỗi nối lẻ (5 hay 7 mỗi nối), biên độ thay đổi của mô men uốn gia tăng cực đại $M_{\max}$ trong KCC lắp ghép khi thay đổi vị trí phân bố của mỗi nối trên chu vi KCC nhỏ hơn nhiều so với trường hợp số mỗi nối chẵn (4, 6 và 8).

- Xu hướng biến đổi của mô men uốn gia tăng trong KCC của đường hầm mặt cắt ngang hình chữ nhật cong khi chịu tải trọng động phụ thuộc vào mô đun biến dạng đàn hồi của đất E_s , và hoàn toàn khác biệt so với khi chịu tải trọng tĩnh.

- Khi chiều dày KCC mỏng (nhỏ hơn 0,4m), ảnh hưởng của sự tồn tại mỗi nối đến nội lực gia tăng không đáng kể.

- Khi xem xét ảnh hưởng của mỗi nối, sự thay đổi gia tốc ngang cực đại a_H gây ra biến đổi mô men uốn gia tăng nhiều hơn so với lực dọc gia tăng.



Hình 12. Ảnh hưởng của gia tốc động đất a_H đến nội lực gia tăng trong KCC đường hầm lắp ghép mặt cắt ngang hình chữ nhật cong.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số DFG.105-2022.03, được thực hiện kết hợp với tài trợ của Quỹ Khoa học Đức (DFG) qua đề tài mã số (Project no. 518862444).

Đóng góp của các tác giả

Đỗ Xuân Hội - mô hình số, khảo sát thông số, viết bản thảo bài báo; Phạm Văn Vĩ - phương pháp nghiên cứu, chỉnh sửa bài báo; Đỗ Ngọc Anh - đưa ra ý tưởng bài báo, phương pháp nghiên cứu, viết bản thảo và chỉnh sửa bài báo.

Tài liệu tham khảo.

Abate G., Massimino M. R. & Maugeri M. (2015), Numerical modelling of centrifuge tests on tunnel-soil systems, *Bull Earthquake Eng*, 13: 1927-1951, Doi.org/10.1007/s10518-014-9703-0.

Baziar, M. H., Moghadam, M. R., Choo, Y. W., & Kim, D. S. (2016). Tunnel flexibility effect on the ground surface acceleration response. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15(3), 457-476. Doi.org/10.1007/s11803-016-0336-y.

Bobet A. (2003). Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18, 377-393.

Brinkgreve, R., Zampich, L., Ragimanoj, N. (2019). Plaxis connect Edition v20. Delft University of Technology & Plaxis b, the Netherlands.

Do N. A., Dias D., Oreste P. P., Djeran-Maigre I. (2013), 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior, *Tunneling and Underground Space Technology*, 37, 115-127.

Do N. A., Dias D., Oreste P. P., Djeran-Maigre I. (2015), 2D Numerical Investigation of Segmental Tunnel Lining under Seismic Loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 72, 66-76. Doi:10.1016/j.soildyn.2015.01.015.

Do N. A., Dias D., Zhang Z. X., Huang X., Nguyen T. T., Pham V. V., Nait-Rabah O. (2020), Study on the behaviour of squared and sub-rectangular tunnels using the Hyperstatic Reaction Method, *Transp Geotech*, 22, 10021.

Do N. A., Pham V. V., Dias D. (2023), A new pseudostatic loading scheme for the hyperstatic reaction method - case of sub-rectangular tunnels under seismic conditions, *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 340-356, Doi:10.1080/23789689.2023.2200521

Đỗ X. H., Phạm V. V., Đỗ N. A. (2026), Nghiên cứu ứng xử của vỏ chống lấp ghép trong đường hầm tiết diện chữ nhật cong chịu tải trọng tĩnh, *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất*, 67(3), 1 - 16. DOI: 10.46326/JMES.2026.67(3).02.

Feizi, D., Asgari Marnani, J., Alielahi, H., & Panji, M. (2022). Seismic ground amplification induced by box-shaped tunnels. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 21(3), 697-714.

Hashash Y. M., Hook J. J., Schmidt B., Yao J. I. C. (2001), Seismic design and analysis of underground structures, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16 (4): 247-293, Doi:10.1016/s0886-f7798(01)00051-7.

Hashash Y. M. A., Park D., Yao J. I. (2005), Ovaling deformations of circular tunnels under seismic loading, an update on seismic design and analysis of underground structures, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20, 435-441.

Kontoe S., Avgerinos V., Potts D.M. (2014), Numerical validation of analytical solutions and their use for equivalent-linear seismic analysis of circular tunnels, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, 206-219.

Kouretzis, G., Sloan, S. W., & Carter, J. P. (2013), Effect of interface friction on tunnel liner internal forces due to seismic S- and P-wave propagation, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 46, 41-51.

Naggar H. E., Hinchberger S. D. (2008), An analytical solution for jointed tunnel linings in elastic soil or rock, *Canadian Geotechnical Journal*, 45, 1572-1593.

- Penzien Z. (2000), Seismically induced racking of tunnel linings, *Int. J. Earthquake Eng. Struct. Dynamic*, 29, 683-691.
- Penzien J., Wu C. L. (1998), Stresses in linings of bored tunnels, *Int. J. Earthquake Eng. Struct. Dynamics*, 27, 283-300.
- Pham V. V., Do N. A., Dias D. (2021), Sub-rectangular tunnels behavior under seismic loading, *Applied Sciences*, 11(21), 9909. doi.org/10.3390/app1-1219909.
- Pham V. V., Do N. A., Dias D., Nguyen C. T., Dang V. K., (2022a), Sub-rectangular tunnels behavior under static loading, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, Doi: 10.1007/s40515-022-00230-w.
- Pham V. V., Do N. A., Vo T. H., Dias D., Nguyen C. T., Do X. H. (2022b), Effect of Soil's Young's modulus on Sub-rectangular tunnels behavior under quasi-static loadings, *Journal of Mining and Earth Sciences*, 63(3a), 10 - 21.
- Pham V. V., Do N. A., Osinski P., Do N. T., Dias D. (2024), Study on the Tunnel Shape and Soil-Lining Interaction Influencing the Lining Behavior under Seismic Loading, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 23, 845-862, Doi.org/10.1007/s11803-024-2276-2.
- Pham V. V., Do N. A., Osinski P., Bui H. G., Dias D. (2025), New Hyperstatic Reaction Method for Design of Subrectangular Tunnel Under Quasi-Static Loading in Full-Slip Condition, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 49(9), 2095-2114, Doi.org/10.1002/nag.3973.
- Rashid A., Koopialipour M. R., Hadei M. R., Rahmannedjad R. (2018), Numerical investigation of closed-form solutions for seismic design of a circular tunnel lining by quasi-static method, *Civil Engineering Journal*, Vol. 4, No. 1, Doi.org/10.28991/cej-030983.
- Sandoval E., Bobet A. (2020), Seismic response of underground structures under undrained loading with excess pore pressures accumulation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 99, 103255.
- Sederat H., Kozak A., Hashash Y. M., Shamsabadi A., Krimotat A. (2009), Contact interface in seismic analysis of circular tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24, 482-490.
- Sun Q. Q., Du D. and Dias D. (2020), An improved Hyperstatic Reaction Method for tunnels under seismic loading, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Doi.org/10.1016/j.tust.2020.103687.
- 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.
- Yue C., Zheng Y. (2019), Shaking table test study on seismic behavior of underground structure with intermediate columns enhanced by concrete-filled steel tube (CFT), *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 127: 105838.
- Wang J. N. (1993), Seismic design of tunnels: A state-of-the-art approach, *Brinckerhoff Quade and Douglas Inc.*, New York.
- Wu Q., Ding X., Zhang Y. and Zhang Y. (2023), Numerical analysis of seismic response of rectangular underground structure in coral sand, *Underground Space*, 9, 155-172. Doi.org/10.1016/j.undsp.2022.07.005.