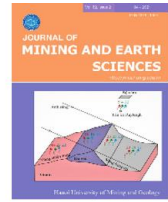




## Journal of Mining and Earth Sciences

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



# Research on calculating the effects of earthquakes on the lining tunnel in Hanoi metro system



Thanh Chi Nguyen, Anh Ngoc Do \*, Vi Van Pham

*Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam*

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article history:

Received 28<sup>th</sup> Nov. 2020

Revised 09<sup>th</sup> Mar. 2021

Accepted 31<sup>st</sup> Mar. 2021

#### Keywords:

Earthquake,  
Effect,  
Hanoi,  
Metro tunnel.

*At present, systems of infrastructure are built and developed very strongly in Hanoi. The metro tunnel system is also being designed and built in Hanoi to meet the requirements of economic and social development. The paper uses analytical methods (the Wang's method, Penzien's method), hyperstatic reaction method and a numerical analysis method by Abaqus software to evaluate the effect of the strongest earthquake that could occur in to the lining tunnel in Hanoi metro system. Based on results obtained from assessing the effect of earthquakes to the lining tunnel in Hanoi metro system, this paper has compared and commented to these results for the purpose of finding the most accurate results about the impact of earthquakes on the lining tunnel in Hanoi metro system. These results and comments will be used in the design and construction tunnel in the Hanoi metro system under the impact of the earthquakes that could occur in Hanoi.*

Copyright © 2021 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

\*Corresponding author

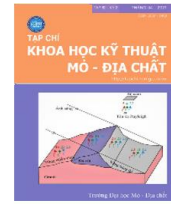
E - mail: [nguyenthanh.xdctn47@gmail.com](mailto:nguyenthanh.xdctn47@gmail.com)

DOI: 10.46326/JMES.2021.62(2).04



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

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



# Nghiên cứu tính toán ảnh hưởng của động đất đến kết cấu chống của đường tàu điện ngầm Hà Nội

Nguyễn Chí Thành, Đỗ Ngọc Anh \*, Phạm Văn Vĩ

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

### THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:  
 Nhận bài 18/11/2020  
 Sửa xong 09/3/2021  
 Chấp nhận đăng 31/3/2021

Từ khóa:  
 Ảnh hưởng,  
 Động đất,  
 Hà Nội,  
 Tàu điện ngầm.

### TÓM TẮT

Hiện nay, hệ thống cơ sở hạ tầng được xây dựng và phát triển rất mạnh trên địa bàn Thủ đô Hà Nội. Hệ thống đường tàu điện ngầm cũng đang được thiết kế và xây dựng tại Hà Nội nhằm đáp ứng yêu cầu phát triển kinh tế - xã hội. Bài báo này đã sử dụng các phương pháp tính toán giải tích của Wang, phương pháp của Penzien, phương pháp lực kháng và phương pháp số 2D sử dụng phần mềm Abaqus để tính toán tác động của trận động đất mạnh nhất có thể xảy ra ở Hà Nội đến kết cấu chống đường tàu điện ngầm Hà Nội. Dựa trên các kết quả tính toán này, bài báo đã tiến hành phân tích, so sánh và nhận xét ảnh hưởng của động đất đến kết cấu chống của đường tàu điện ngầm Hà Nội. Các kết quả và nhận xét này sẽ được sử dụng trong quá trình thiết kế và thi công các đường hầm thuộc hệ thống metro Hà Nội.

© 2021 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

## 1. Mở đầu

Ngày nay, mạng lưới đường tàu điện ngầm đã trở thành một phần thiết yếu của hệ thống giao thông và cơ sở hạ tầng của các đô thị lớn trên thế giới. Tại Việt Nam, các tuyến tàu điện ngầm đã được xác định là một phần không thể thiếu được của hệ thống giao thông và sẽ sớm đưa vào xây dựng, hoạt động để giải quyết các nhu cầu cấp thiết về giao thông của Thủ đô Hà Nội và của Thành phố Hồ Chí Minh. Do có đặc điểm vị trí nằm gần bề mặt và trong khối đất yếu nên các đường hầm thuộc hệ thống metro sẽ là đối tượng chịu ảnh hưởng lớn của động đất. Với vai trò quan

trọng của các đường tàu điện ngầm trong hệ thống giao thông và giá trị xây dựng lớn thì thiệt hại khi xảy ra sự cố hay làm ngưng trệ hoạt động của các hệ thống metro này do ảnh hưởng của động đất là rất lớn. Thực tế trên thế giới, đã có nhiều sự cố xảy ra cho các đường hầm dưới ảnh hưởng của trận động đất như: sự phá hủy ga tàu điện ngầm Daikai ở Kobe, Nhật Bản trong trận động đất Hyogoken - Nambu, 1995; sự sụp đổ của đường hầm Bolu tại Thổ Nhĩ Kỳ trong trận động đất Düzce, 1999; sự hư hỏng lớn và bị phá hủy của các đoạn đường hầm Longxi trong trận động đất tại Vân Xuyên, Trung Quốc, 1998 (ITA, 1998),... Thủ đô Hà Nội là vùng nằm giữa hai hệ thống đứt gãy địa chất lớn ở khu vực phía Bắc của Việt Nam là hệ thống đứt gãy Điện Biên - Sơn La - Lai Châu và hệ thống đứt gãy Sông Cháy - Sông Hồng (Gospodarikov và nnk., 2017) nên khả năng chịu ảnh hưởng của động đất là khá lớn. Do đó, cần có sự nghiên cứu chi tiết và

\*Tác giả liên hệ

E - mail: [nguyenthanh.xdctn47@gmail.com](mailto:nguyenthanh.xdctn47@gmail.com)

DOI: 10.46326/JMES.2021.62(2).04

đầy đủ về ảnh hưởng của tải trọng động đất đối với việc thiết kế, xây dựng, vận hành của các đường hầm thuộc hệ thống metro. Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu đặc tính cơ bản của các trận động đất có thể ảnh hưởng đến khu vực Hà Nội và một số phương pháp tính toán ảnh hưởng của động đất tới các công trình ngầm hiện có trên thế giới, từ đó tính toán ảnh hưởng của động đất đến đường hầm tàu điện ngầm Hà Nội.

## 2. Đặc tính của địa chất, động đất khu vực đặt đường tàu điện ngầm Hà Nội

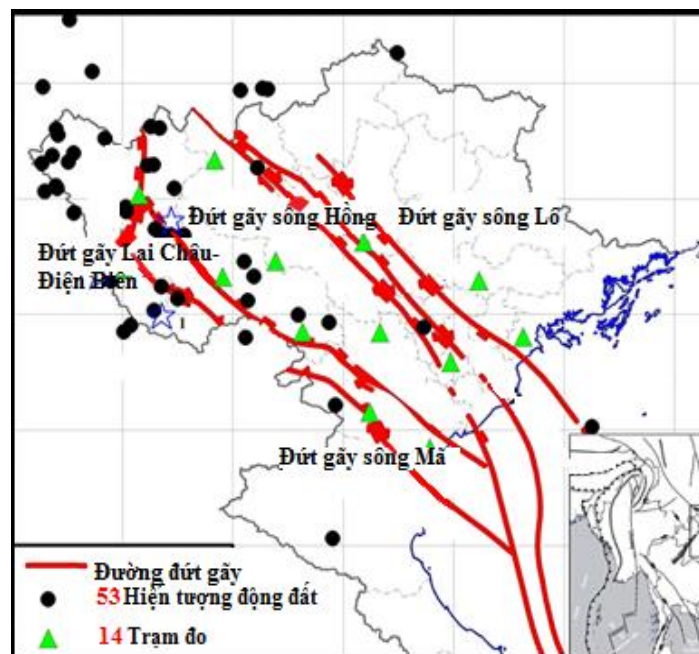
Hà Nội là thủ đô của Việt Nam với mật độ dân số rất lớn, cùng dân số thường trực khoảng 6÷8 triệu người. Khu vực Hà Nội nằm giữa hai hệ thống đứt gãy lớn là hệ thống đứt gãy Điện Biên - Sơn La - Lai Châu và hệ thống đứt gãy sông Chảy - sông Hồng (Hình 1), do đó Hà Nội được đánh giá là khu vực có khả năng chịu ảnh hưởng bởi các trận động đất có cường độ lớn, có khả năng lên đến 6,7 độ Richter và tâm chấn cách Hà Nội khoảng 50 km. Trong lịch sử, Hà Nội đã từng chịu ảnh hưởng của các trận động đất có cường độ lớn như trận động đất 6,7 độ Richter tại Tuần Giáo - Điện Biên vào năm 1983 (Nguyễn L. M. và nnk., 2012). Hệ thống tàu điện ngầm (metro) Hà Nội đã được tiến hành xây dựng những tuyến đầu tiên để có thể đáp ứng được những yêu cầu phát triển về kinh tế, dân cư,... của Hà Nội. Tại dự án xây dựng metro Hà Nội,

được xây dựng trên vùng đồng bằng, đất yếu là hạ lưu của sông Hồng. Chiều sâu đặt các đường hầm thuộc hệ thống metro Hà Nội là tương đối nhỏ, trung bình 20 m so với mặt đất và được xếp vào loại công trình ngầm nằm nông. Điều này đặt ra yêu cầu thiết yếu là phải có các nghiên cứu, đánh giá sự tác động của các trận động đất đến kết cấu chống của các đường hầm thuộc hệ thống metro Hà Nội. Đường tàu điện ngầm Hà Nội được thi công bằng phương pháp sử dụng máy đào (TBM) và có các đặc tính cơ bản như sau: hầm có tiết diện ngang hình tròn, đường kính của đường hầm là  $R = 6,3$  m, vỏ hầm được chế tạo từ bê tông cốt thép với module đàn hồi  $E = 35500$  MPa, hệ số Poisson  $\nu_h = 0,15$ ; chiều dày của vỏ chống  $t = 0,35$  m (Systra, 2005).

## 3. Các phương pháp tính toán ảnh hưởng của động đất đến công trình metro Hà Nội

### 3.1. Phương pháp Wang

Trong phương pháp tính toán của mình, Wang đã chia thành hai trường hợp tính toán riêng biệt: Trường hợp vỏ của công trình ngầm liên kết chặt chẽ với môi trường đất/đá xung quanh và không có sự trượt, dịch chuyển của vỏ hầm với môi trường đất/đá xung quanh; trường hợp thứ hai là vỏ hầm dịch chuyển tự do so với môi trường đất/đá xung quanh đường hầm.



Hình 1. Bản đồ đứt gãy của khu vực phía Bắc Việt Nam (Le Minh Nguyen và nnk., 2012).

Bảng 1. Đặc tính địa chất cơ bản của khu vực đặt đường tàu điện ngầm Hà Nội (Systra, 2005).

TT lớp đất	Module đàn hồi các lớp đất ( $E$ ), MPa	Hệ số Poisson ( $\mu$ )	Chiều dày của các lớp đất ( $h$ ), m	Chiều sâu của các lớp đất, m	Dung trọng của các lớp đất ( $\rho$ ), g/cm <sup>3</sup>	Mức nước ngầm trung bình, m
1	9,25	0,41	4,6	4,6	1,75	3,0
2	7,68	0,38	1,1	5,7	1,76	
3	15,3	0,35	11,8	17,5	1,81	
4	35,02	0,33	12,5	30	1,78	
5	53,9	0,32	11,0	41	1,83	
6	65	0,3	7,0	48	1,86	

Trong điều kiện có xét đến sự trượt của khối đất xung quanh công trình ngầm với kết cấu chống, Wang đã diễn tả các đại lượng lực trung bình ( $T$ ) và mô men ( $M$ ) theo các công thức sau (Wang và nnk., 1993):

$$T = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E}{(1+\nu)} R \gamma_{max} \cos \left[ 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (1)$$

$$M = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E}{(1+\nu)} \gamma_{max}^2 \cos \left[ 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{12(1-\nu)}{2F+5-6\nu} \quad (3)$$

Trong trường hợp không có sự trượt giữa vỏ chống của công trình ngầm với môi trường đất/đá xung quanh:

$$T = \pm \frac{1}{2} K_2 \frac{E}{(1+\nu)} R \gamma_{max} \cos \left[ 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (4)$$

Trong đó:

$$K_2 = 1 + \frac{F[(1-2\nu)-(1-2\nu)C] - \frac{1}{2}(1-2\nu)^2 + 2}{F[(3-2\nu)+(1-2\nu)C] + C\left[\frac{5}{2}-8\nu+6\nu^2\right] + 6-8\nu} \quad (5)$$

$$C = \frac{E(1-\nu_s^2)R}{E_s t(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (6)$$

$$F = \frac{E(1-\nu_s^2)R^3}{6E_s J_s(1+\nu)} \quad (7)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (8)$$

Trong đó:  $K_1$  - hệ số phản ứng trong trường hợp có xét đến sự trượt của công trình ngầm và đất xung quanh;  $K_2$  - hệ số phản ứng trong trường hợp không có sự trượt giữa công trình ngầm và đất xung quanh;  $F$  - tỉ số linh hoạt của vỏ đường hầm;  $C$  - tỉ số nén của vỏ chống;  $E_s$  - hệ số mô đun đàn hồi Young của vỏ công trình ngầm, MPa;  $\nu_s$  - hệ số Poisson của vỏ công trình ngầm;  $R$  - bán kính

của công trình ngầm, m;  $t$  - chiều dày của lớp vỏ công trình ngầm, m;  $J_s$  - mô men quán tính của lớp vỏ công trình ngầm trên một đơn vị chiều dài của công trình, m<sup>4</sup>/m;  $E$  - hệ số mô đun đàn hồi Young của khối đất xung quanh công trình ngầm, MPa;  $\nu$  - hệ số Poisson của khối đất xung quanh công trình ngầm;  $\gamma_{max}$  - biến dạng trượt tối đa của đất, %;  $\theta$  - góc đo ngược chiều kim đồng hồ từ trục ngang của công trình ngầm sang bên phải, độ;  $T$  - lực dọc, kN;  $M$  - momen uốn, kN.m.

Chú ý rằng, trong điều kiện không có sự trượt của lớp vỏ công trình ngầm với khối đất xung quanh công trình ngầm thì theo phương pháp Wang không xác định được giá trị của  $M$  là mô men xuất hiện trong kết cấu chống của công trình ngầm, kN.m. Để khắc phục điều này, Kouretzis và nnk. (2013), đã đề xuất một biểu thức để xác định giá trị mô men để cải thiện phương pháp của Wang:

$$M_K = \pm(2 - K_3 - 2K_4)\tau_{max} \frac{R^2}{2} \quad (9)$$

Trong đó:  $\tau_{max}$  - giá trị ứng suất trượt lớn nhất, MPa:

$$\tau_{max} = \pm V_{max} \sqrt{\rho_{max} G_{max}} \quad (10)$$

Cùng với  $\rho_{max}$  - tỷ trọng của khối đất xung quanh công trình ngầm, g/cm<sup>3</sup>;  $G_{max}$  - giá trị mô đun cắt lớn nhất của khối đất xung quanh công trình ngầm, MPa và  $V_{max}$  - giá trị vận tốc lớn nhất của sóng địa chấn cắt, m/s.

$$K_3 = 1 + \frac{(1-2\nu)(1-C)F - 0.5(1-2\nu)C + 2}{[(3-2\nu)+(1-2\nu)C]F + [0.5(5-6\nu)](1-2\nu)C + (6-8\nu)} \quad (11)$$

$$K_4 = \frac{[1+(1-2\nu)C]F - [0.5(1-2\nu)C] - 2}{[(3-2\nu)+(1-2\nu)C]F + [0.5(5-6\nu)](1-2\nu)C + (6-8\nu)} \quad (12)$$

### 3.2. Phương pháp Penzien

Năm 1998, Penzien đã trình bày phương pháp tính toán ảnh hưởng của động đất đến công trình ngầm. Trên nền tảng phương pháp của (Wang và nnk., 1993). Penzien đã phát triển và hoàn thiện các công thức tính toán trong cả hai trường hợp không trượt và trượt hoàn toàn giữ vỏ chống công trình ngầm và môi trường đất xung quanh (Penzien Wu, 1998):

$$T = -\frac{12E_s I \Delta d_{lining}^n}{d^3(1-\nu_s^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (13)$$

$$M = -\frac{6E_s I \Delta d_{lining}^n}{d^2(1-\nu_s^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (14)$$

$$V = -\frac{24E_s I \Delta d_{lining}^n}{d^3(1-\nu_s^2)} \sin 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (15)$$

$$\pm \Delta d_{lining}^n = \pm R^n \Delta d_{free-field} \quad (16)$$

$$R^n = \pm \frac{4(1-\nu)}{\alpha^{n+1}} \quad (17)$$

$$\alpha^n = \frac{12E_s I(5-6\nu)}{d^3 G(1-\nu_s^2)} \quad (18)$$

Trong trường hợp không có sự trượt giữa vỏ chống công trình ngầm và môi trường xung quanh:

$$\pm \Delta d_{lining} = \pm R \Delta d_{free-field} = \frac{R \gamma_{max} d}{2} \quad (19)$$

$$T = -\frac{24E_s I \Delta d_{lining}}{d^3(1-\nu_s^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (20)$$

$$M = -\frac{6E_s I \Delta d_{lining}}{d^2(1-\nu_s^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (21)$$

$$R = \pm \frac{4(1-\nu)}{\alpha+1} \quad (22)$$

$$\alpha = \frac{24E_s I(3-4\nu)}{d^3 G(1-\nu_s^2)} \quad (23)$$

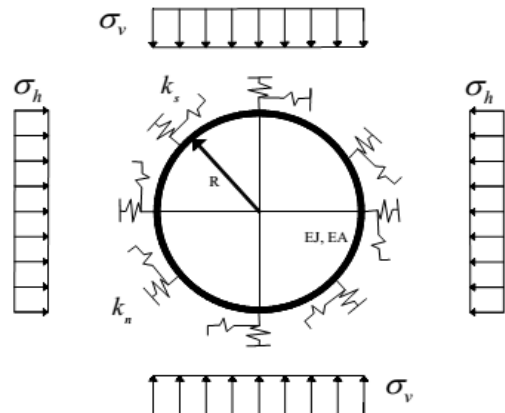
Trong đó:  $E_s$  - modun đàn hồi của môi trường đất, MPa;  $\nu_s$  - hệ số Poisson của môi trường đất;  $G$  - modun cắt của môi trường đất, MPa;  $\Delta d_{lining}^n$  - tỷ lệ dịch chuyển của vỏ chống dưới ảnh hưởng của động đất, m;  $I$  - mômen quán tính của vỏ hầm trên một đơn vị chiều dài đối với vỏ hầm tròn,  $m^4/m$ ;  $d$  - đường kính của đường hầm, m;  $R^n$  - tỷ lệ của vỏ chống-đất khi chỉ xét đến tác dụng của tải trọng pháp tuyến;  $\Delta d_{free-field}$  - tỷ lệ biến dạng theo

đường kính của đường hầm của môi trường đất;  $\theta$  - góc xác định vị trí của vỏ hầm tại tâm, độ;  $\alpha^n$  - hệ số dùng để tính toán tỷ lệ biến dạng của vỏ chống-đất của đường hầm tròn khi chỉ chịu tải trọng pháp tuyến;  $\alpha$  - hệ số dùng để tính toán tỷ lệ biến dạng của vỏ chống-đất của đường hầm tròn;  $\gamma_{max}$  - biến dạng cắt tối đa của đất dưới ảnh hưởng của động đất, %.

### 3.3. Phương pháp lực kháng (HRM)

Phương pháp lực kháng (HRM) đã được đưa ra bởi Duddeck và Erdmann, (1985); Takano, (2000); Oreste, (2007); và phương pháp này đã được thay đổi, phát triển bởi các tác giả Đỗ Ngọc Anh và nnk. (2014); Gospadarikov và nnk. (2019). Phương pháp lực kháng HRM là một phương pháp số được xây dựng trên nền tảng ngôn ngữ Matlab, trong đó mô phỏng sự liên kết của môi trường đất/đá xung quanh công trình ngầm với vỏ chống của công trình ngầm bằng các lò xo kiểu "Winkler" độc lập. Các lò xo này được biểu diễn thông qua các độ cứng pháp tuyến  $k_n$  và tiếp tuyến  $k_s$ . Khi công trình ngầm chịu tải trọng động đất, cần phải xác định tải trọng động do động đất gây ra trên vỏ công trình ngầm qua các biến dạng của môi trường xung quanh công trình ngầm. Có thể thấy sơ đồ tính toán cho công trình ngầm chịu ảnh hưởng của động đất trong phương pháp lực kháng HRM như trong Hình 2.

Trong đó:  $\sigma_v$  - tải trọng thẳng đứng trong đường hầm-môi trường đất xung quanh, MPa;  $\sigma_h$  - tải trọng ngang trong đường hầm-môi trường đất xung quanh, MPa;  $k_n$  - độ cứng pháp tuyến của lò xo tương tác, kN/m;  $k_s$  - độ cứng tiếp tuyến của lò xo tương tác, kN/m;  $R$  - bán kính đường hầm, m;



Hình 2. Sơ đồ tính toán cho công trình ngầm chịu tải trọng động đất.

$EJ$  và  $EA$  - mô men uốn đơn vị,  $N.m^2/m$  và độ cứng đơn vị của vỏ hầm,  $kN/m$ .

Lưu ý rằng, phương pháp lực kháng HRM, tải trọng tác dụng của động đất lên kết cấu chống của công trình ngầm thay đổi và phụ thuộc vào sự biến dạng của môi trường đất xung quanh công trình ngầm. Với sự xuất hiện của lò xo kết nối giữa nút của kết cấu với môi trường đất xung quanh theo phương pháp tuyến và lò xo kết nối theo phương tiếp tuyến dọc theo phương bố trí kết cấu đường hầm, đây là những nguyên nhân gây ra sự thay đổi độ cứng của các phần tử kết cấu của đường hầm theo các hướng tương ứng trong quá trình chịu ảnh hưởng của trận động đất (Hình 3). Bằng cách sửa đổi giá trị tương ứng cho các phần tử dọc theo đường chéo của ma trận độ cứng cục bộ của từng phần tử của kết cấu chống của đường hầm và tiếp theo, việc sửa đổi ma trận cấu trúc trong độ cứng tổng thể có thể nhận được:

$$\begin{aligned}
 K_{3i-2,3i-2}^* &= K_{3i-2,3i-2} + k_{n,i} \cos^2 \left( \frac{\alpha_{i+1}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2} \right) + k_{s,i} \sin^2 \left( \frac{\alpha_{i+1}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2} \right) \\
 K_{3i-1,3i-1}^* &= K_{3i-1,3i-1} + k_{n,i} \cos^2 \left( \frac{\alpha_{i+1}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2} \right) + k_{s,i} \sin^2 \left( \frac{\alpha_{i+1}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2} \right) \\
 K_{3i-1,3i-2}^* &= K_{3i-1,3i-2} + (k_{n,i} - k_{s,i}) \cos \left( \frac{\alpha_{i+1}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2} \right) \sin \left( \frac{\alpha_{i+1}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2} \right)
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

$$K_{3i-2,3i-1}^* = K_{3i-2,3i-1} + (k_{n,i} - k_{s,i}) \cos \left( \frac{\alpha_{i+1}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2} \right) \sin \left( \frac{\alpha_{i+1}}{2} + \frac{\alpha_i}{2} - \frac{\pi}{2} \right)$$

Trong đó: “ $i$ ” - số của nút trên kết cấu chống của đường hầm;  $k_{n,i}$  - độ cứng của lò xo tương tác thông thường được nối trong nút “ $i$ ”;  $k_{s,i}$  - độ cứng của lò xo tương tác tiếp tuyến được nối trong nút “ $i$ ” và là góc giữa hệ tọa độ địa phương với hệ quy chiếu toàn phần cho phần tử “ $i$ ” và cho phần tử “ $i + 1$ ” độ;  $K$  - ma trận của hệ quy chiếu Descartes toàn cục của đường hầm lót phân đoạn.

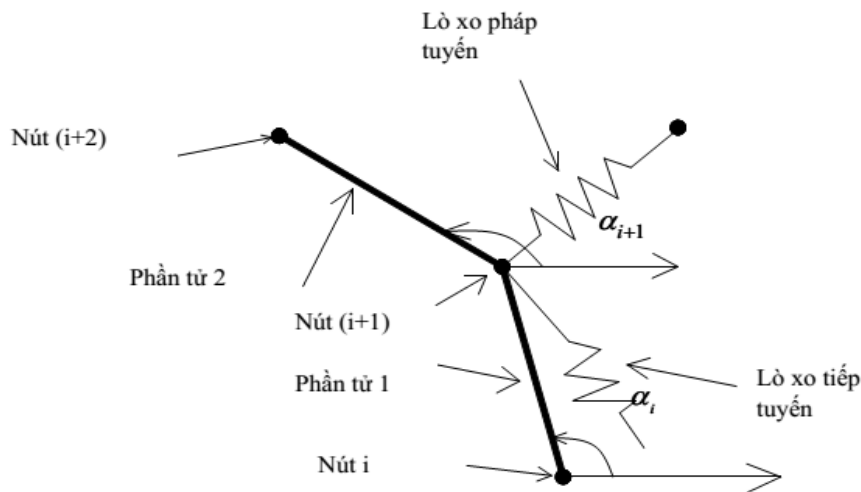
Mối quan hệ giữa véc tơ chuyển vị  $S_i$  tại các nút và ma trận độ cứng cục bộ của các nút cùng với ứng suất trên các nút  $T_i$  của phần tử “ $i$ ” được biểu thị bằng phương trình:

$$T_i = S_i Z_i \tag{25}$$

Oreste và nnk. (2007) đã đưa ra phương trình thể hiện mối quan hệ giữa độ biến dạng của cấu trúc và áp suất phản ứng, đây là mối quan hệ phi tuyến.

$$p = p_{lim} \left( 1 - \frac{p_{lim}}{p_{lim} + \eta_0 \delta} \right) \tag{26}$$

Trong đó:  $p$  - ứng suất phản lực, MPa;  $p_{lim}$  - ứng suất phản lực lớn nhất của đất nền, MPa;  $\eta_0$  - độ cứng ban đầu của đất nền bao quanh vỏ hầm,  $kN/m$ ;  $\delta$  - biến dạng của kết cấu, m. Theo Đỗ Ngọc Anh và nnk., (2014), độ cứng theo phương pháp tuyến ban đầu của môi trường đất xung quanh đường hầm được xác định theo công thức sau:



Hình 3. Tương tác giữa kết cấu chống của đường hầm với môi trường đất xung quanh đường hầm thông qua các lò xo dạng Winkler kết nối với các nút trên kết cấu chống.



$$\eta_{n,0} = \beta \frac{1}{1+\nu} \frac{E}{R} \quad (27)$$

$$\eta_s = \frac{1}{3} \eta_n \quad (28)$$

Trong đó  $E$  - mô đun của mặt đất Young, MPa;  $\nu$  - hệ số Poisson của khối đất xung quanh công trình ngầm;  $R$  - bán kính đường hầm, m;  $\beta$  - hệ số không thứ nguyên,  $\eta_s$  - độ cứng tiếp tuyến của mặt đất, kN/m.

Có thể xác định giá trị của ứng suất pháp tuyến cực đại của môi trường đất xung quanh đường hầm, dựa vào các giá trị thuộc tính của môi trường đất như lực dính  $c$ , MPa;  $\Phi$  - góc ma sát của môi trường đất, độ và xét đến ảnh hưởng của áp lực tác dụng của trận động đất.

$$p_{n,lim} = \frac{2ccos\phi}{1-sin\phi} + \frac{1+sin\phi}{1-sin\phi} \Delta\sigma_{conf} \quad (29)$$

$$\Delta\sigma_{conf} = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} \cdot \frac{\nu_s}{1-\nu_s} \quad (30)$$

Theo cách tương tự, ứng suất theo phương tiếp tuyến lớn nhất của môi trường đất xung quanh đường hầm được xác định giá trị theo công thức:

$$p_{s,lim} = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} tg\phi \quad (31)$$

Trong đó:  $\sigma_h$  - ứng suất ngang tác dụng lên vỏ hầm tương ứng theo phương ngang khi chịu ảnh hưởng của động đất, MPa;  $\sigma_v$  - ứng suất thẳng đứng tác dụng lên vỏ hầm tương ứng theo phương ngang khi chịu ảnh hưởng của động đất, MPa.

Xác định hệ số áp suất môi trường đất bên  $K_0$ :

$$\sigma_h = K_0 \sigma_v \quad (32)$$

Trong phương pháp lực kháng HRM mới do Đỗ Ngọc Anh và nnk. (2014) đề xuất, sự thay đổi độ cứng quay của lò xo tại các khớp trong liên kết giữa các mảnh của kết cấu chống của đường hầm thông qua hệ số cố định. Trong phương pháp này, coi mỗi ghép giữa các mảnh kết cấu chống của đường hầm như một lò xo có độ cứng quay được sử dụng rộng rãi trong phân tích kết cấu bán cứng. "Hệ số cố định" được định nghĩa để phản ánh độ cứng tương đối của khớp liên kết và độ cứng quay của lò xo liên kết:

$$r_j = \frac{1}{1 + \frac{3E_s I_s}{K_{RO} L_i}} \quad (33)$$

Phần tử kết nối "l" trong kết cấu chống của đường hầm có ma trận độ cứng đàn hồi với hai đầu nối nửa cứng và với mô đun độ cứng quay và ma trận độ cứng của phần tử "l" được biểu diễn bằng ma trận hiệu chỉnh bán cứng:

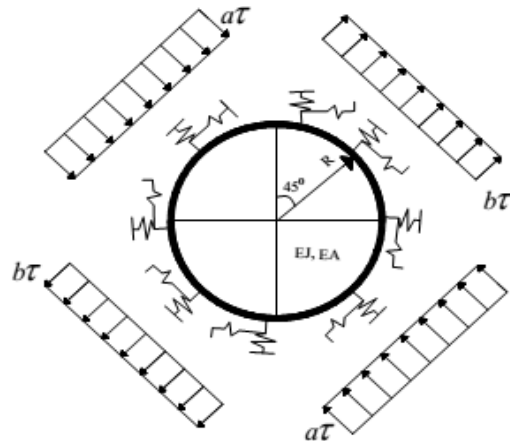
$$K_i^{SR} = Z_i C_i \quad (34)$$

Trong đó:  $K_i^{SR}$  - ma trận hiệu chỉnh bán cứng của phần tử kết nối "l" trong cấu trúc kết cấu chống của đường hầm;  $Z_i$  - ma trận độ cứng của cấu kiện được coi là có các đầu mút cứng và  $C_i$  - ma trận hiệu chỉnh;  $L_i$  - chiều dài của phần tử cấu trúc kết cấu chống của đường hầm, m.

Khi có tác dụng của động đất đến đường hầm, biểu đồ tải trọng địa chấn lên kết cấu chống của đường hầm theo phương pháp lực kháng HRM có tính chất như biểu đồ tĩnh tải trên vỏ hầm nhưng các thành phần tải trọng ngang ngược hướng thì tải trọng bên ngoài có tác động đến kết cấu chống của đường hầm được quay ngược chiều kim đồng hồ 45°. Trong phương pháp lực kháng HRM (Hình 4), tải trọng bên ngoài tác động lên kết cấu chống của đường hầm có thể khác với lý thuyết mà Naggar đã đưa ra từ năm 2008 (Naggar và nnk., 2008). Tại thời điểm này, tải trọng bên ngoài tác dụng lên vỏ hầm được xác định bằng các hệ số  $a$ ,  $b$  và ứng suất cắt (Hình 4).

Tham số  $b$  là không đổi và bằng 1,25; tham số  $a$  phụ thuộc vào bán kính đường hầm  $R$  và có thể được xác định bằng cách sử dụng biểu thức sau:

$$a = -0,7 \ln(R) + 0,885 \quad (35)$$



Hình 4. Các tải trọng tác dụng vào kết chống của đường hầm khi chịu tải trọng động đất trong phương pháp lực kháng HRM.

Ứng suất cắt lớn nhất của môi trường đất xung quanh đường hầm có thể được xác định theo công thức:

$$p_{s,lim} = \frac{(b-a)\tau}{2} t g \phi \quad (36)$$

Ứng suất hướng tâm được tính theo công thức:

$$\Delta\delta_{conf} = \frac{(b-a)\tau}{2} \cdot \frac{v_s}{1-v_s} \quad (37)$$

Trong đó:  $v_s$  - hệ số Poisson của môi trường đất;  $\tau$  - ứng suất cắt trong mặt phẳng;  $\tau = \gamma * G$  - môđun cắt của đất, MPa;  $\gamma$  - biến dạng trượt của môi trường đất xung quanh đường hầm, %.

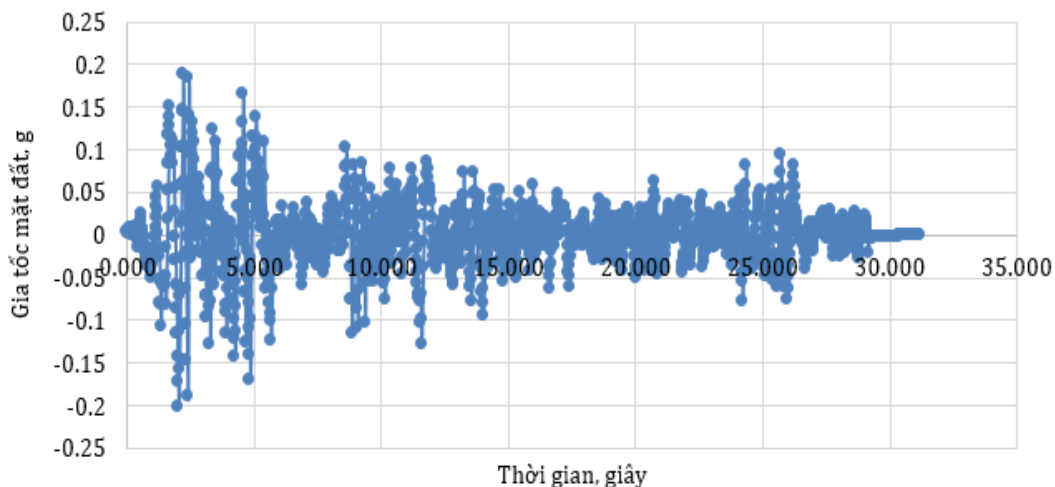
### 3.4. Phương pháp số sử dụng phần mềm Abaqus

Phương pháp số sử dụng phần tử hữu hạn là một trong những phương pháp thường được sử dụng để mô phỏng mô hình của công trình ngầm chịu ảnh hưởng của động đất bởi các ưu điểm của chúng như: cho độ chính xác cao, kết quả dễ nhận biết và sử dụng, có thể xác định được các yếu tố khác ngoài nội lực xuất hiện trong vỏ chống của công trình ngầm như: độ dịch chuyển của vỏ hầm, sự biến dạng của vỏ hầm,... Trong bài báo này, sử dụng phần mềm Abaqus để thiết lập mô hình 2D của đường tàu điện ngầm Hà Nội chịu ảnh hưởng của động đất, trong đó sử dụng các giá trị đầu vào như sau: cường độ của trận động đất  $M_w = 6,5$  richter; gia tốc đỉnh mặt đất  $a_{max} = 0,2$  g; môđun đàn hồi Young trung bình của môi trường đất xung quanh công trình ngầm  $E_d = 35,75$  MPa; hệ số Poisson của môi trường đất  $\nu = 0,34$ ; hệ số

giảm xóc của môi trường và vỏ hầm  $\xi = 5\%$ ; đường tàu điện ngầm có chiều sâu  $h = 20$  m; đường kính đào  $D = 6,3$  m; vỏ hầm bằng bê tông cốt thép liền khối dày  $t = 0,35$  m. Môi trường đất xung quanh vỏ hầm và vỏ hầm làm việc trong trạng thái đàn hồi - dẻo và không có hiện tượng trượt. Sử dụng các dữ liệu của trận động đất El Centro để thực hiện việc tính toán ảnh hưởng của trận động đất đến đường tàu điện ngầm Hà Nội (Hình 5). Mô hình của đường tàu điện ngầm Hà Nội chịu tác dụng của động đất được chia thành hai phần (Hình 10). Phần 1 là đường hầm với vỏ chống và các tính năng như đã nêu ở trên, phần 2 là môi trường đất xung quanh đường hầm và được liên kết chặt chẽ với đường hầm. Ngoài ra, xung quanh đường tàu điện ngầm và môi trường đất bao xung quanh còn có 1 vùng không gian mà phần tử ở đây là phần tử vô hạn, cho phép sóng động đất truyền qua mà không bị phản xạ ngược lại, làm ảnh hưởng đến kết quả.

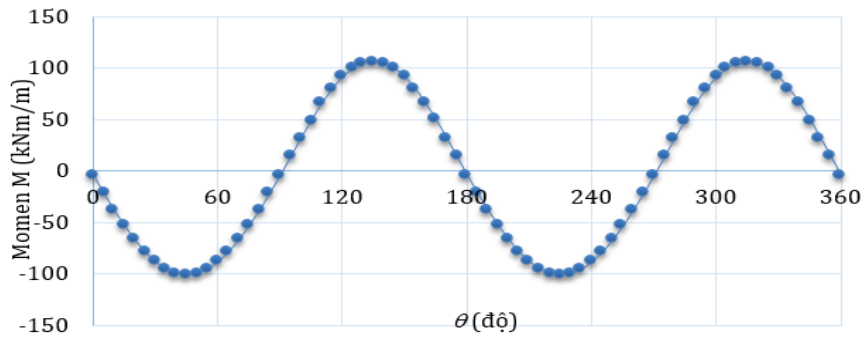
### 4. Các kết quả tính toán và thảo luận

Từ việc sử dụng các phương pháp tính toán đã trình bày ở phần trên để tính toán cho đường hầm tàu điện ngầm Hà Nội dưới ảnh hưởng của trận động đất có cường độ  $M_w = 6,5$  richter, thu được một số kết quả về nội lực xuất hiện trong vỏ đường hầm tàu điện ngầm Hà Nội. Từ các kết quả thu được trên các Hình 6, 7, 8, 9, 10, 11 và 12. Tiến hành tổng hợp các kết quả này trên Bảng 2, có thể nhận thấy dưới ảnh hưởng của trận động đất, ứng suất xuất hiện trong vỏ chống của đường tàu điện ngầm Hà Nội đều nằm trong phạm vi cho phép.

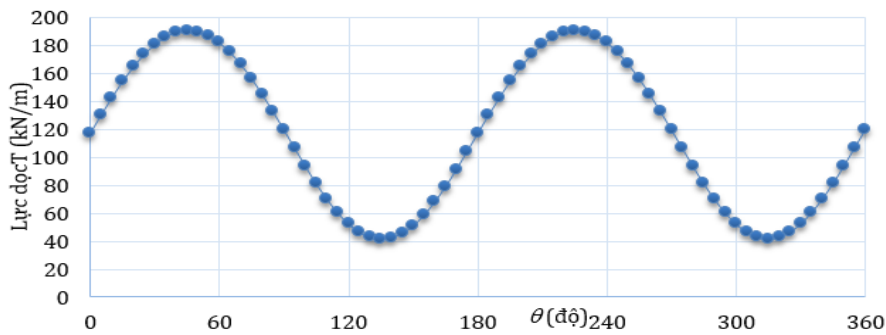


Hình 5. Đồ thị gia tốc mặt đất của trận động đất El Centro (SCEDC, 2018).

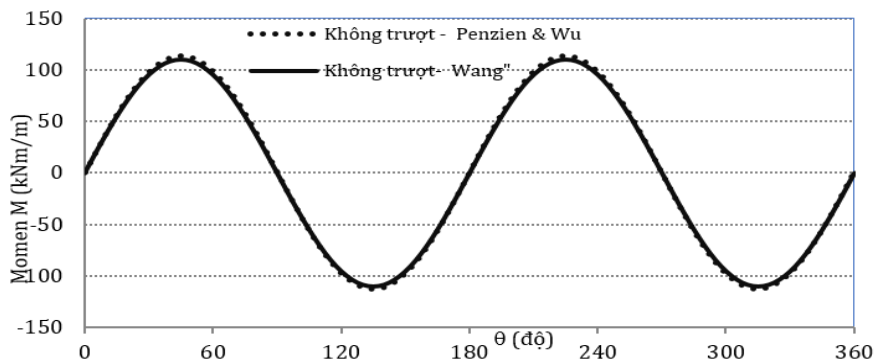




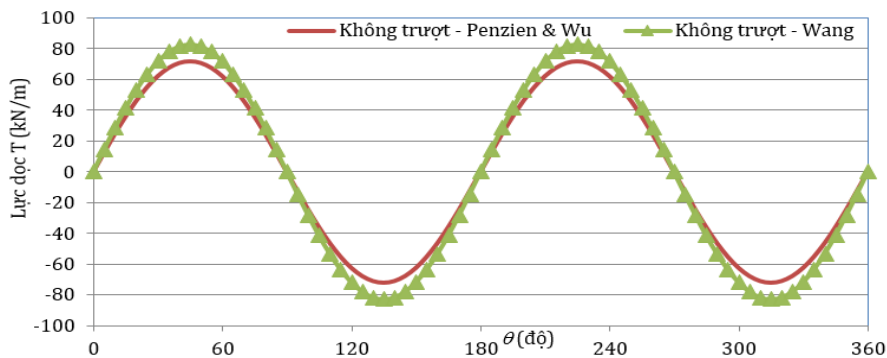
Hình 6. Biểu đồ mô men trong vỏ tàu điện ngầm Hà Nội dưới ảnh hưởng của động đất theo phương pháp lực kháng HRM.



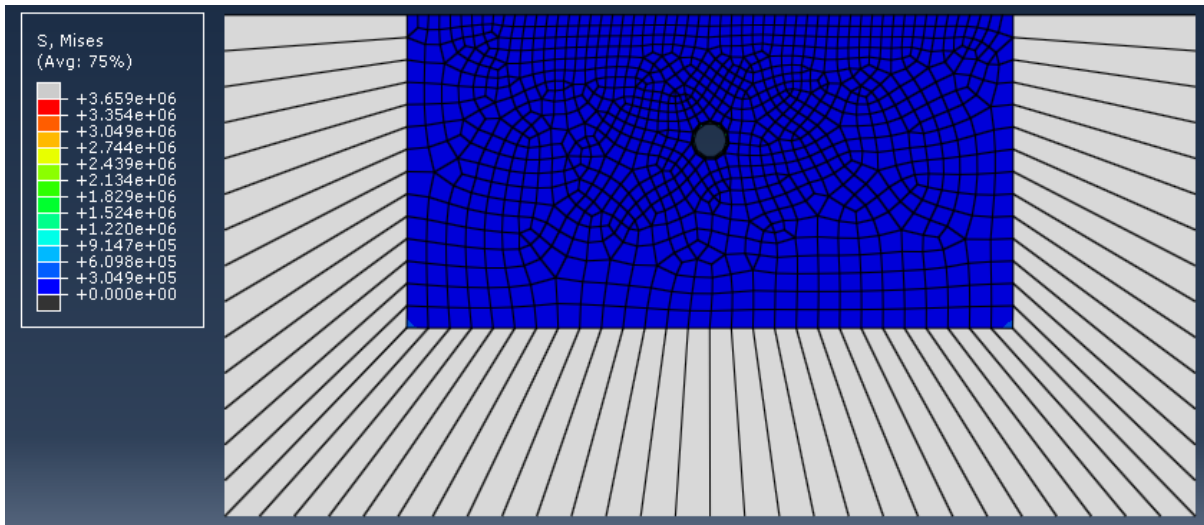
Hình 7. Biểu đồ lực dọc trong vỏ tàu điện ngầm Hà Nội dưới ảnh hưởng của động đất theo phương pháp lực kháng HRM.



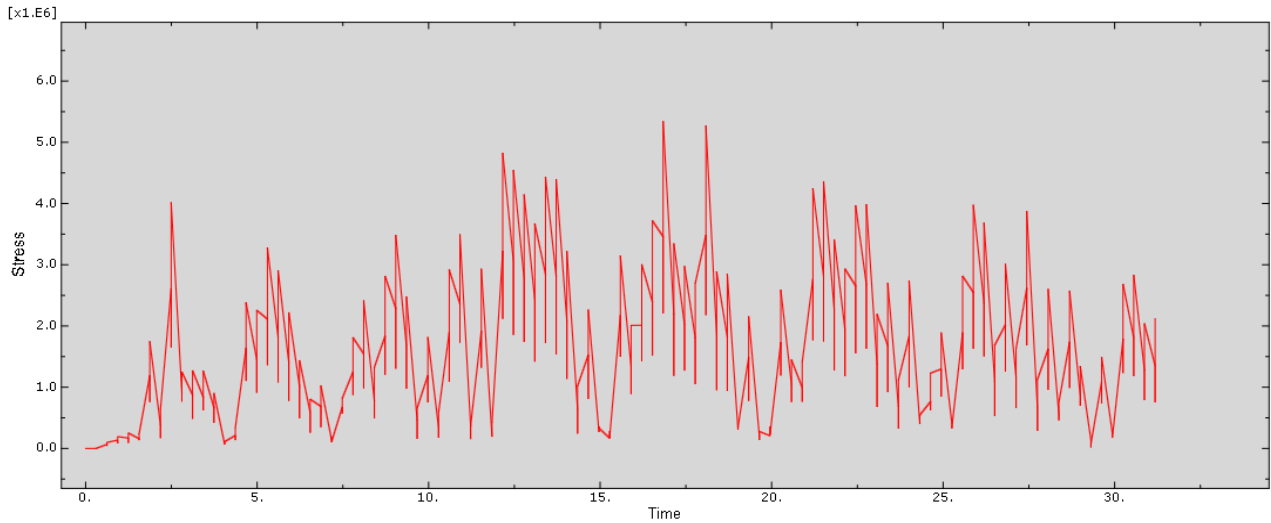
Hình 8. Biểu đồ mô men trong vỏ tàu điện ngầm Hà Nội dưới ảnh hưởng của động đất theo phương pháp của Wang và Penzien.



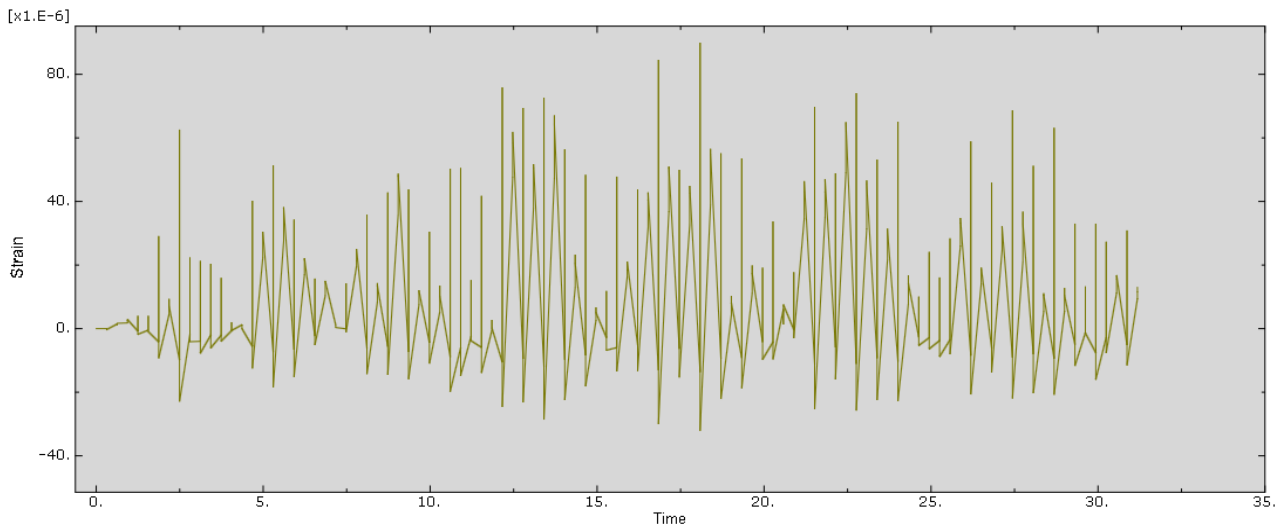
Hình 9. Biểu đồ lực dọc trong vỏ tàu điện ngầm Hà Nội dưới ảnh hưởng của động đất theo phương pháp của Wang và Penzien.



Hình 10. Kết quả tính toán của phương pháp số 2D (sử dụng chương trình Abaqus).



Hình 11. Ứng suất xuất hiện trong vỏ tàu điện ngầm dưới ảnh hưởng của động đất (sử dụng chương trình Abaqus).



Hình 12. Biến dạng của vỏ tàu điện ngầm dưới ảnh hưởng của động đất (sử dụng chương trình Abaqus).

Bảng 2. Tổng hợp và phân tích các kết quả nội lực trong vỏ hầm dưới ảnh hưởng động đất.

Nội lực xuất hiện trong vỏ hầm	Phương pháp Wang	Phương pháp Penzien	Phương pháp lực kháng HRM	Phương pháp số 2D
$M$ (kN.m/m)	112,21	114,13	106,64	-
$T$ (kN/m)	81,62	72,16	186,53	-
$\sigma$ (MPa)	5,593	5,729	5,782	5,211

Trong các giá trị ứng suất thu được bằng các phương pháp của Wang (5,593 MPa), Penzien (5,729 MPa), Lực kháng HRM (5,782 MPa) và Abaqus (5,211 MPa) thì giá trị ứng suất trong vỏ hầm của phương pháp số sử dụng Abaqus là nhỏ nhất. Điều này có thể được giải thích bởi trong phương pháp tính toán ảnh hưởng của động đất đến vỏ tàu điện ngầm Hà Nội sử dụng Abaqus, sự ảnh hưởng của môi trường xung quanh đường hầm đã được tính toán với độ chính xác cao nhờ liên kết giữa vỏ hầm và môi trường này. Ngoài ra, sự xuất hiện của độ giảm chấn  $\xi = 5\%$  cũng đã làm giảm ứng suất xuất hiện trong vỏ hầm do nó làm giảm độ chấn động của vỏ hầm và môi trường đất xung quanh theo thời gian.

## 5. Kết luận

Trong bài báo này, các tác giả đã tiến hành nghiên cứu, phân tích và sử dụng các phương pháp khác nhau để tính toán tác động của động đất đến vỏ tàu điện ngầm Hà Nội tại một mặt cắt địa chất điển hình của khu vực chứa đường hầm. Kết quả nội lực xuất hiện trong vỏ hầm tàu điện ngầm Hà Nội được xác định bằng phương pháp của Wang, phương pháp Penzien, phương pháp lực kháng HRM và phương pháp số 2D sử dụng phần mềm Abaqus đã được trình bày và so sánh. Dưới tác động của trận động đất có cường độ mạnh nhất có thể xảy ra tại khu vực Hà Nội (với cường độ  $M_w = 6.5$  richter), ứng suất xuất hiện trong vỏ đường hầm tàu điện ngầm Hà Nội nhỏ hơn giá trị ứng suất giới hạn của vỏ hầm ( $[\sigma_{gh}] = 22 \text{ MPa}$ ). Ngoài ra, biến dạng tỷ đối của vỏ hầm dưới ảnh hưởng của động đất thu được từ phương pháp 2D sử dụng phần mềm Abaqus có giá trị lớn nhất  $\varepsilon = 8 * 10^{-5}$ , thỏa mãn yêu cầu biến dạng của vỏ hầm làm từ bê tông cốt thép. Từ đây, có thể kết luận rằng vỏ đường hầm tàu điện ngầm Hà Nội (với các đặc điểm đã chọn) có thể vận hành an toàn dưới tác động của sóng động đất. Tuy nhiên, việc phân tích các kết quả nội lực thu được trong vỏ hầm

dưới ảnh hưởng của động đất đã chỉ ra một số khác biệt giữa các kết quả nội lực được xác định bằng phương pháp giải tích và phương pháp số. Có sự khác biệt khá lớn về kết quả của ứng suất trên vỏ hầm khi sử dụng các phương pháp giải tích, phương pháp lực kháng HRM và phương pháp số 2D sử dụng phần mềm Abaqus. Những sự khác biệt này được giải thích bởi những nguyên nhân sau đây:

1. Phương pháp số 2D sử dụng phần mềm Abaqus có đề cập đến sự liên kết và tương tác của môi trường đất quanh đường hầm và vỏ hầm;
2. Phương pháp số 2D sử dụng phần mềm Abaqus đã sử dụng mô hình Mohr - Coulomb cho môi trường đất xung quanh đường hầm và lớp vỏ hầm hoạt động theo mô hình đàn hồi tuyến tính (trong các phương pháp giải tích và phương pháp lực kháng (HRM) đã xem xét môi trường đất xung quanh đường hầm hoạt động theo mô hình vật liệu đàn hồi);
3. Phương pháp số 2D sử dụng phần mềm Abaqus có tính đến ảnh hưởng của hệ số giảm chấn  $\xi = 5\%$ .

Các kết quả thu được khi sử dụng các phương pháp giải tích, phương pháp lực kháng HRM và phương pháp số 2D sử dụng phần mềm Abaqus đã khẳng định độ an toàn của đường hầm tàu điện ngầm Hà Nội dưới tác động của động đất. Tuy nhiên, cần nghiên cứu và phát triển các mô hình đường hầm và khối đất/đá xung quanh đường hầm để có thể phản ánh được đầy đủ, chính xác các yếu tố đầu vào (như sự phân lớp của môi trường đất đá, ảnh hưởng của nước ngầm, sự phân đoạn của vỏ hầm bê tông cốt thép,...) khi tính toán cho đường hầm dưới ảnh hưởng của động đất nhằm nâng cao sự chính xác.

## Lời cảm ơn

Bài báo này được hỗ trợ bởi Quỹ Phát triển KH-CN Quốc gia Việt Nam (NAFOSTED) theo tài trợ số 17/2020/STS02, Bộ Giáo dục và Đào tạo Việt Nam và Trường đại học Mỏ - Địa chất.

### Các đóng góp của các tác giả

Nguyễn Chí Thành - đề xuất ý tưởng về nội dung chính của bài báo, tập trung tài liệu để nghiên cứu, xây dựng mô hình số của đường hầm thuộc hệ thống metro Hà Nội và môi trường đất đá xung quanh khi chịu ảnh hưởng của động đất bằng phần mềm Abaqus cũng như thực hiện các tính toán ảnh hưởng của động đất tới đường hầm thuộc hệ thống metro Hà Nội bằng các phương pháp khác, viết các nội dung của bài báo; Đỗ Ngọc Anh - xây dựng mô hình số của đường hầm chịu ảnh hưởng của động đất và môi trường xung quanh bằng phương pháp lực kháng HRM, thực hiện việc tính toán ảnh hưởng của trận động đất tới đường hầm đang nghiên cứu bằng các phương pháp khác nhau cũng như kiểm tra các kết quả này, tham gia viết các nội dung của bài báo và là tác giả liên hệ; Phạm Văn Vĩ - tổng hợp, tập trung các số liệu phục vụ cho việc viết bài báo, tính toán ảnh hưởng của trận động đất tới đường hầm và tham gia vào việc hoàn thành bài báo.

### Tài liệu tham khảo

Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi, (2017). Liquefaction possibility of soil layers during earthquake in Hanoi, *International Journal of GEOMATE*, 13(39), 148 - 155.

Gospodarikov Alexandr, Thanh Nguyen Chi, (2018). The impact of earthquakes of tunnel linings: a case study from the Hanoi metro system. *International Journal of GEOMATE*, 14(41), 2018, 151 - 158.

ITA, (1988). ITA guidelines for the design of tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 3(3), 237-249.

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.

Ngoc Anh Do, Daniel Dias, Pierpaolo Oreste & Irini Djeran Maigre. (2014). The behaviour of the segmental tunnel lining studied by the hyperstatic reaction method, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(4). 498 - 510.

Ngoc Anh Do. (2014). *Numerical analyses of segmental tunnel lining under static and dynamic loads*. PhD thesis, Lyon, 2014, 1 - 363.

Le Minh Nguyen, Ting Li Lin, Yih Min Wu, Bor Shouh Huang, Chien Hsin Chang, Win Gee Huang, Tu Son Le, Quoc Cuong Nguyen, Van Toan Dinh. (2012). The First Peak Ground Motion Attenuation Relationships for North of Vietnam, *Journal of Asian Earth Sciences*, 43, 241-253.

Oreste, P. P. (2007). A numerical approach to the hyperstatic reaction method for the dimensioning of tunnel supports. *Tunnelling and Underground space technology*, 22, 185 - 205.

Penzien J., Wu, C. (1998). Stresses in linings of bored tunnels. *Journal of Earthquake Eng. Structural Dynamics*, 27, 1998, 283-300.

Systra, (2005). Hanoi Pilot LRT Line Feasibility Study, *Executive summary*, Hanoi, Vietnam.

Takano YH, (2000). Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining, *Tunneling and Underground Space Technology*, 15(3), 303 - 331.

The Southern California Earthquake Data Center(SCEDC), (2018). *Data of El Centro earthquake*, <http://scedc.caltech.edu/>, USA.

Wang J. N. (1993). Seismic design of tunnels: A state of the art approach. *Parsons Brinkerhoff Quad & Douglas Inc.*, New York, NY, Monograph, 7.