

Đánh giá ảnh hưởng của kích thước hố móng thi công toàn chiều dài tới biến dạng dọc trục của đường hầm khi thi công hố đào phía trên đường hầm hiện hữu bằng phương pháp giải tích

Evaluate the influence of the excavation geometry of full-length construction on the longitudinal deformation of the existing tunnel when constructing the excavation using an analytical approach

Nguyễn Văn Hùng^{1*}, Nguyễn Trọng Tâm²

¹Trường Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội

²Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

*Tác giả liên hệ: vanhung.nguyen@vnu.edu.vn

Ngày nhận bài: 6/3/2024; Ngày chấp nhận đăng: 2/5/2024

Tóm tắt:

Trong việc xây dựng các công trình bằng phương pháp đào lấp tại các thành phố lớn, một trong những thách thức lớn nhất là bảo vệ các công trình ngầm hiện hữu khỏi tác động tiêu cực từ quá trình thi công phía trên. Việc giảm tải trọng do hoạt động đào đất phía trên có thể dẫn đến ứng xử không mong muốn và gây hỏng các công trình ngầm, đặc biệt là những công trình yêu cầu tính an toàn cao như đường hầm TBM. Bài báo đề xuất một phương pháp đơn giản để đánh giá ảnh hưởng của các tham số hố đào khi thi công toàn chiều dài tới chuyển vị trục của đường hầm TBM có thi công hố móng phía trên. Trước hết, xác định ứng suất thay đổi khi đào đất tại mặt phẳng tim hầm, sau đó, xác định biến dạng của đường hầm bằng phương pháp giải tích. Kết quả giải tích được so sánh với mô hình 3D, cho thấy sự chênh lệch nhỏ. Từ đó, sử dụng phương pháp phân tích này đánh giá ảnh hưởng của các thông số hố đào đến biến dạng của đường hầm hiện hữu.

Từ khóa: Đường hầm hiện hữu; Hố đào toàn chiều dài, Hầm TBM; Chuyển vị của hầm; Phương pháp giải tích.

Abstract:

In constructing structures using excavation methods in large cities, one of the greatest challenges is protecting existing underground structures from adverse impacts during the construction process. Reducing the load due to the excavation activities above can lead to undesired behaviors and potential damage to underground structures, especially those requiring high safety standards, such as TBM tunnels. This article proposes a simple method to assess the influence of excavation parameters when constructing the full-length tunnel axis displacement of TBM tunnels during upper-level excavation pit construction. Initially, stress changes are determined when excavating soil at the tunnel face, and then tunnel deformation is determined using analytical methods. The analytical results were also compared with the results from a 3D model, yielding minor discrepancies. Thus, this analytical method allows for the assessment of the influence of excavation parameters on the deformation of existing tunnels.

Keywords: Existing tunnel; Full-length excavation pit; TBM tunnel; Longitudinal displacement of tunnel; Analytical approach.

1. Giới thiệu

Hiện nay, các tuyến đường sắt đô thị đầu tiên đã được đưa vào vận hành khai thác tại Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh. Và theo quy hoạch, hệ thống tàu điện ngầm có thể kéo dài hàng trăm km tại các thành phố này. Khi xây dựng hệ thống tàu điện ngầm này, sẽ không tránh khỏi các quá trình thi công những công trình giao cắt khác mức với các kết cấu hiện hữu, cụ thể, như hệ thống các hố đào phía trên đường hầm TBM (Tunnel Boring Machine) hiện hữu. Khi thi công các hố đào phía trên đường hầm, sự thay đổi tải trọng do dỡ tải có thể gây ra các ảnh hưởng đáng kể đến đường hầm ngầm, thậm chí, có thể gây hỏng hóc. Một ví dụ điển hình được ghi nhận tại dự án Pachio ở Đài Loan [1], việc xây dựng một tòa nhà gần đó gây hư hại vỏ hầm TBM. Do đó, việc đánh giá ứng xử của vỏ hầm khi có thay đổi tải trọng phía trên là rất cần thiết, đặc biệt, trong bối cảnh của các đô thị hiện nay.

Ứng xử của đường hầm hiện hữu bên dưới được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm, tiếp cận bằng các phương pháp khác nhau, như quan trắc [2], mô hình vật lý [3], [4], phương pháp phần tử hữu hạn [5], [6], [7], [8], [9] và phương pháp giải tích [10], [11], [12], [13].

Trong các phương pháp này, giải tích là hướng tiếp cận nhanh và tốn ít chi phí để có thể dự đoán được biến dạng của đường hầm chịu tác động của việc đào đất ở trên. Đây cũng được xem là một hướng tiếp cận phù hợp trong giai đoạn đầu của quá trình thiết kế và xây dựng các dự án. Trong các nghiên cứu đã công bố, đường hầm trong khối địa tầng được quy về bài toán dầm trên nền đàn hồi, mô hình dầm sử dụng dầm Euler-Bernoulli hoặc dầm Timoshenko liên tục, trên mô hình nền Winkler hoặc Pasternak.

Trong bài báo này, nhóm tác giả cung cấp một hướng tiếp cận giải tích, với đường hầm được sử dụng dầm Euler-Bernoulli, nền đất sử

dụng mô hình nền Winkler. Kết quả giải tích được so sánh với mô hình 3D bằng phần mềm phần tử hữu hạn dựa trên số liệu của tuyến đường sắt đô thị số 1 Thành phố Hồ Chí Minh.

2. Phương pháp giải tích

Một số giả thiết khi tiếp cận bằng phương pháp giải tích: Môi trường đất được xem là môi trường đàn hồi tuyến tính, đẳng hướng và đồng nhất; đường hầm được xem như dầm trên nền đàn hồi (bài toán 1D, không xem xét tới biến dạng bên trong tiết diện) với chiều dài vô tận.

2.1. Tải trọng tác dụng lên trục đường hầm

Sau khi đào hố móng, áp lực dỡ tải $p(x)$ hướng lên được tạo ra trên đáy hố móng. $p(x)$ là sự thay đổi bằng trọng lượng đất đào trên một đơn vị diện tích. Với trường hợp đào hố móng toàn chiều dài, bài toán môi trường 3D trở thành bài toán biến dạng phẳng với lực phân bố đều p_0 trong đoạn $2a$ (a - chiều rộng hố móng), tương ứng với điều kiện biên:

$$p(x) = \begin{cases} -p_0, & |x| < a \\ 0, & |x| > 0 \end{cases} \quad (1)$$

Bài toán áp lực phân bố đều đặt trên bề mặt bán không gian vô tận đã được Sneddon dùng biến đổi Fourier đưa ra lời giải vào năm 1951 [14], với thành phần ứng suất thẳng đứng được xác định theo công thức:

$$\sigma_{zz} = -\frac{p_0}{\pi} \left(\arctan\left(\frac{x+a}{z}\right) - \arctan\left(\frac{x-a}{z}\right) + \frac{(x+a)z}{(x+a)^2 + z^2} - \frac{(x-a)z}{(x-a)^2 + z^2} \right) \quad (2)$$

Trong bài toán này ảnh hưởng của đường hầm tới ứng suất phát sinh, cũng như các ứng suất dọc và ứng suất cắt bên trong đường hầm được bỏ qua. Khi đó, ứng suất theo phương thẳng đứng tại độ sâu H , gây ra bởi tải trọng phân bố đặt tại đáy hố đào với hướng từ dưới lên được xác định theo công thức sau:

$$[\sigma_{zz}(x)]_{z=H} = -\frac{\gamma_0 H_0}{\pi} \left(\arctan\left(\frac{x+a}{H-H_0}\right) - \arctan\left(\frac{x-a}{H-H_0}\right) + \frac{(x+a)(H-H_0)}{(x+a)^2 + (H-H_0)^2} - \frac{(x-a)(H-H_0)}{(x-a)^2 + (H-H_0)^2} \right) \quad (3)$$

Trong đó, γ_0 là trọng lượng riêng của lớp đất trong hố đào, H_0 là khoảng cách từ đáy hố đào tới mặt đất, H là khoảng cách từ tim hầm hiện hữu tới mặt đất.

2.2. Phương trình biến dạng của hầm

Đường hầm hiện hữu được xem xét dưới dạng dầm Euler-Bernoulli nằm trên mô hình nền đàn hồi một hệ số Winkler. Phương trình vi phân của dầm trên nền đàn hồi được thể hiện:

$$EI_{eq} \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + KDw(x) = D\sigma_{zz}(x) \quad (4)$$

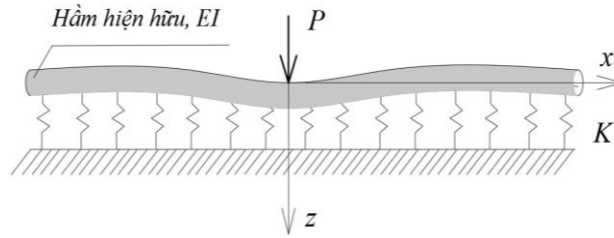
Trong đó, D là đường kính ngoài của hầm hiện hữu, E là mô đun đàn hồi của vật liệu hầm, I_{eq} là mô men quán tính tương đương của hầm hiện

hữu kể đến ảnh hưởng của mối nối dọc hầm, K là hệ số nền của môi trường đất xung quanh vỏ hầm, $w(x)$ là chuyển vị của trục đường hầm, $\sigma_{zz}(x)$ là ứng suất tác dụng lên hầm theo phương thẳng đứng. Nghiệm thuần nhất của phương trình (4) có dạng sau:

$$w(x) = e^{-\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) \quad \text{khi } x \geq 0 \quad (5)$$

Trong đó: $\beta = \sqrt[4]{\frac{KD}{4EI_{eq}}}$

Để phân tích tác động của việc đào phía trên với đường hầm bên dưới, đầu tiên, cần xem xét đến ứng xử của đường hầm dưới tải trọng tập trung trên nền Winkler. Tổng ứng suất thẳng đứng P , được đơn giản hóa để tác dụng lên trục trung hòa của đường hầm, và sau đó, có thể tác dụng trực tiếp lên móng dưới dạng tải trọng tập trung, như minh họa trên Hình 1.



Hình 1. Hầm trên nền đàn hồi chịu tác dụng bởi tải trọng tập trung.

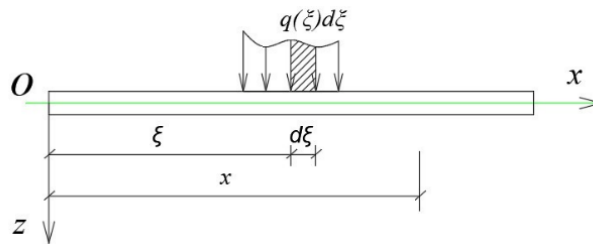
Sử dụng điều kiện biên với trường hợp tải trọng tập trung và tìm được phương trình chuyển vị của hầm:

$$w(x) = \frac{PD}{8EI\beta^3} e^{-\beta|x|} (\cos \beta|x| + \sin \beta|x|) \quad (6)$$

Sau khi có được chuyển vị của hầm dưới tác dụng của tải trọng tập trung, có thể sử dụng kết quả này để suy ra biến dạng của đường hầm

hiện hữu dưới tải trọng phân bố đều. Như thể hiện tại Hình 2, tải trọng $q(\xi)d\xi$ đặt ở vị trí ξ , căn cứ theo phương trình (6) vi phân của chuyển vị $dw(x)$ tại một vị trí x bất kỳ của hầm có thể được xác định thông qua dịch chuyển trục tọa độ như sau:

$$dw(x) = \frac{q(\xi)D}{8EI_{eq}\beta^3} e^{-\beta|x-\xi|} (\cos \beta|x-\xi| + \sin \beta|x-\xi|) d\xi \quad (7)$$



Hình 2. Tải trọng phân bố tác dụng lên dầm.

Dựa vào phương trình (7), biến dạng và góc xoay của đường hầm hiện hữu gây ra bởi việc đào hố móng trong phạm vi (x_1, x_2) được xác định như sau:

$$w(x) = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sigma_{zz}(\xi)D}{8EI_{eq}\beta^3} e^{-\beta|x-\xi|} (\cos \beta|x-\xi| + \sin \beta|x-\xi|) d\xi \quad (8)$$

$$\varphi(x) = \frac{dw(x)}{dx} = - \int_{x_1}^{x_2} \operatorname{sgn}(x-\xi) \frac{\sigma_{zz}(\xi)D}{4EI_{eq}\beta^2} e^{-\beta|x-\xi|} \sin \beta|x-\xi| d\xi \quad (9)$$

Trong đó:

$$\operatorname{sgn}(x-\xi) = \begin{cases} 1 & \text{khi } x-\xi \geq 0 \\ -1 & \text{khi } x-\xi < 0 \end{cases}$$

Xét bài toán đào hố móng toàn chiều dài, khi đó, chuyển vị và góc xoay dọc trục đường hầm được xác định như sau:

$$w(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sigma_{zz}(\xi)D}{8EI_{eq}\beta^3} e^{-\beta|x-\xi|} (\cos \beta|x-\xi| + \sin \beta|x-\xi|) d\xi \quad (10)$$

$$\varphi(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{sgn}(x-\xi) \frac{\sigma_{zz}(\xi)D}{4EI_{eq}\beta^2} e^{-\beta|x-\xi|} \sin \beta|x-\xi| d\xi \quad (11)$$

Các tích phân chập (10) và (11) nhằm xác định chuyển vị và góc lệch được thực hiện trong MATLAB với khoảng lấy tích phân đủ lớn. Dựa theo vùng ảnh hưởng rõ rệt khi đào hố móng, lấy tích phân chuyển vị (10) và góc lệch (11) của trục đường hầm lấy từ $-10a$ tới $10a$.

2.3. Xác định các tham số

Ứng xử biến dạng của đường hầm bên dưới bị ảnh hưởng bởi sự tương tác giữa các địa tầng và khả năng chịu uốn của đường hầm. Do đó, việc xác định các tham số liên quan cần được đặc biệt chú ý, chẳng hạn như độ cứng chống uốn EI , phản ánh khả năng chống biến dạng của hầm lấp ghép và hệ số nền K , xác định mức độ dịch chuyển của nền.

Độ cứng chống uốn tương đương của vỏ hầm metro lấp ghép

Do có các mối nối đường hầm TBM cách nhau một khoảng $1 \div 1,5$ m theo hướng dọc nên hầm khiên có độ cứng uốn tổng thể nhỏ hơn đáng kể so với kết cấu bê tông liên tục. Vì vậy, một số tác giả đã đề xuất khái niệm độ cứng chống uốn tương đương theo chiều dọc của hầm khiên đào.

Liao [15] kết luận rằng độ cứng uốn tương đương theo chiều dọc của đường hầm dạng khiên xấp xỉ $1/5 \div 1/7$ so với độ cứng uốn của đường hầm liên tục, khoảng giá trị này được cho là phù hợp với các kết quả thí nghiệm. Do đó, độ cứng chống uốn tương đương dọc trục EI_{eq} trong bài báo này có thể được xác định như sau:

$$EI_{eq} = \frac{E_c}{5 \sim 7} \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} \quad (12)$$

Trong đó, E_c là mô đun đàn hồi của vật liệu vỏ hầm, D là đường kính ngoài của đường hầm TBM, và d là đường kính trong của đường hầm TBM.

Hệ số nền

Việc xác định hệ số mô đun nền đất rất phức tạp, bị ảnh hưởng bởi kích thước, phân bố áp lực nền, độ chặt của đất, chiều sâu lớp đất, điều kiện thí nghiệm hiện trường và các yếu tố khác nền k . Đối với các hầm khiên đào, giá trị mô đun được xác định theo thực nghiệm trong tài liệu [16].

$$K = \frac{1,3E_s}{\eta D(1-\mu^2)} \sqrt[12]{\frac{E_s D^4}{EI_{eq}}} \quad (13)$$

Trong đó, E_s là mô đun đàn hồi của đất, μ là hằng số Poisson, D đường kính ngoài của đường hầm, và η hệ số hưởng của chiều sâu đặt hầm được xác định bởi Yu và cộng sự [6]:

$$\eta = \begin{cases} 2,18 & H/D \leq 0,5 \\ 1 + \frac{1}{1,7H/D} & H/D > 0,5 \end{cases} \quad (14)$$

Với, H là chiều sâu đặt hầm hiện hữu trong bài báo này.

3. So sánh

Để có các giá trị so sánh với kết quả giải tích thu được, nhóm tác giả xem xét một ví dụ về một công trình thực tế tại Thành phố Hồ Chí Minh và đối sánh với kết quả từ mô hình 3D phần tử hữu hạn (PTHH).

3.1. Trường hợp nghiên cứu

Tuyến đường sắt đô thị số 1 (Line 1) Thành phố Hồ Chí Minh có tổng chiều dài 19,7 km, trong đó, có 2,6 km đi ngầm. Đoạn hầm ngầm gồm hai đường hầm khiên đào, được thi công bằng máy đào TBM cân bằng áp lực đất. Số liệu địa chất thủy văn sử dụng trong mô hình được lấy từ các kết quả thí nghiệm tại hố khoan U-175 (km 1+553) cách vị trí giao cắt khoảng 2 m dựa trên phương dọc theo tuyến hầm TBM. Các lớp tại khu vực giao cắt gồm năm lớp đất chính: Fill (đất đắp), Ac2 (đất sét 2), As1 (cát 1), As2 (cát

2), Dc (lũ tích). Phân bố của các lớp địa tầng được thể hiện trong Hình 3, hầm TBM nằm trong lớp 3-As1. Số liệu điều kiện địa chất và thủy văn sử dụng theo các báo cáo địa chất của tuyến đường sắt metro, được dẫn trong Bảng 1. Các thông số liên của vỏ hầm được thể hiện trong Bảng 2.

Hố đào có kích thước tương ứng: Bề rộng $2a = 4,68$ m; chiều sâu hố đào: $H_0 = 1,6$ m; hố đào nằm trong lớp đất bề mặt Fill, $\gamma_0 = 19$ kN/m³. Giá trị tải trọng phân bố đều do quá trình dỡ tải khối đất trong hố đào: $p_0 = \gamma_0 * H_0 = 30,4$ (kPa).

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của các lớp đất.

Thông số	Lớp đất				
	Fill	Ac2	As1	As2	Dc
E (kPa)	10000	3000	12500	37500	136000
ν	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
γ (kN/m ³)	19	16,5	20,5	20,5	21
K_0	0,577	1	0,5	0,455	1
γ_{sat} (kN/m ³)	19	16,5	20,5	20,5	21
k (m/s)	1×10^{-6}	1×10^{-9}	2×10^{-5}	2×10^{-5}	1×10^{-8}
c (kPa)	10	0	0	0	170
φ (o)	25	24	30	33	0

Bảng 2. Thông số kỹ thuật của kết cấu hầm TBM.

Thông số	Vỏ hầm
Đường kính trong hầm, D_{int} (m)	6,1
Chiều dày vỏ hầm (m)	0,3
Vị trí tim hầm, H (m)	11
Mô đun đàn hồi tương đương, E^* (kPa)	$7,2 \times 10^6$
Hệ số Poisson, ν	0,2a
Trọng lượng riêng, γ (kN/m ³)	24

(*) Giá trị E trong các bảng là giá trị tương đương, thể hiện việc giảm độ cứng chống uốn của hầm khiên đào trong mô hình.

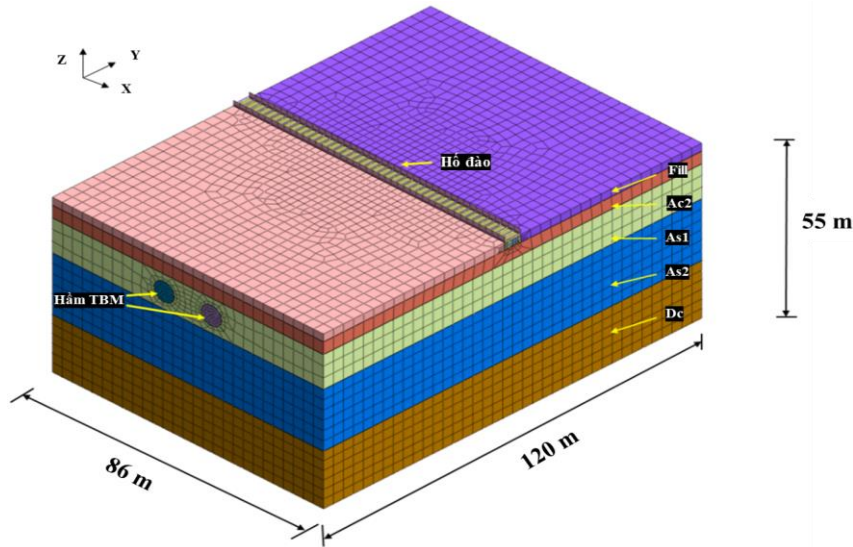
3.2. Mô hình phần tử hữu hạn

Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn MIDAS GTS mô hình quá trình thi công, với các lớp đất

dùng mô hình Mohr-Coulomb, vỏ hầm được mô phỏng dạng tấm. Phần tử tiếp giáp (interface) được sử dụng để mô phỏng tương tác giữa đất

với kết cấu tường chắn và hầm với số giảm cường độ $R_{inter} = 0,67$. Kích thước mô hình được thể hiện tại Hình 3 [7]. Chuyển vị của trục

đường hầm được xác định bằng trung bình tổng của chuyển vị đỉnh và đáy đường hầm.

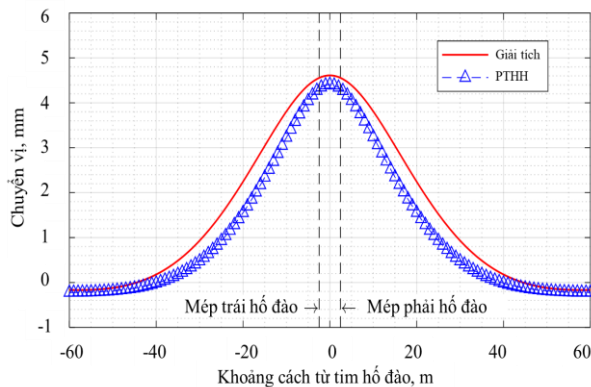


Hình 3. Kích thước và phân lớp địa tầng của mô hình 3D.

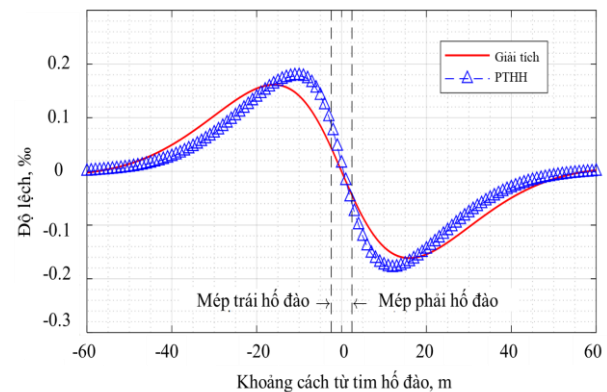
3.3. Kết quả phân tích

Chuyển vị của trục đường hầm được thể hiện tại Hình 4, giá trị chuyển vị lớn nhất của trục đường hầm theo phương pháp giải tích là 4,6 mm, theo phương pháp PTHH tương ứng 4,4 mm. Góc lệch dọc trục đường hầm được thể hiện tại Hình 5, giá

trị lớn nhất của góc lệch theo phương pháp giải tích tương ứng 0,165 %, và phương pháp phần tử hữu hạn là 0,178%. Điểm uốn tương ứng với phương pháp giải tích tại vị trí cách tim hố đào khoảng 16 m, trong khi với phương pháp PTHH là gần 10 m.



Hình 4. Chuyển vị của trục đường hầm.



Hình 5. Góc lệch của trục đường hầm.

3.4. Thảo luận

Giá trị chuyển vị của trục đường hầm theo phương pháp giải tích lớn hơn theo phương pháp PTHH gần 4.3%, và vùng biến dạng theo giải tích lớn hơn PTHH. Vùng ảnh hưởng tác động tới chuyển vị của trục đường hầm trong phạm vi cách tim hố đào khoảng 40 m (~10 lần bề rộng hố đào) sang mỗi bên, nếu vượt quá 40 m thì giá trị chuyển vị không còn đáng kể. Góc

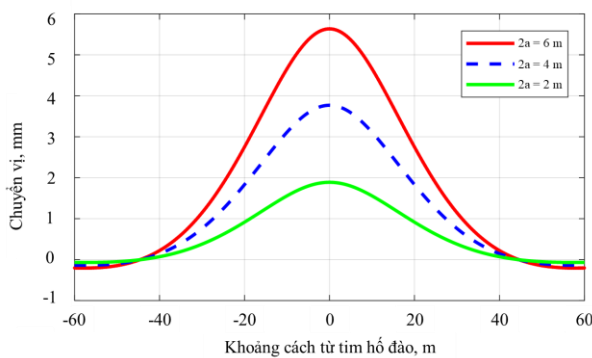
lệch dọc trục đường hầm theo hai phương pháp gần bằng nhau, lệch chỉ khoảng 1%. Điểm uốn theo hai phương pháp lệch nhau gần 40%, vị trí điểm uốn theo phương pháp giải tích cách tim hố đào xa hơn phương pháp PTHH. Từ phân tích các kết quả trên, nhận thấy rằng, kết quả giải tích cho mức độ an toàn cao hơn về mặt chuyển vị, việc này có thể được lý giải do những nguyên nhân sau: (i) mô hình nền đất

chưa xem xét tới tính tương tác trượt với nhau (mô hình nền hai hệ số); (ii) ảnh hưởng của các lớp đất khác nhau chưa được xem xét trong mô hình xác định hệ số nền.

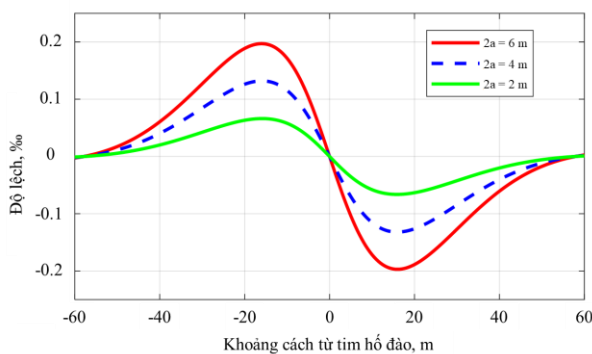
4. Ảnh hưởng của kích thước hình học hố đào

4.1. Ảnh hưởng của chiều rộng hố đào

Các thông số địa chất nền, độ cứng của hầm, chiều sâu đặt hầm được lấy như thực nghiệm trên, chiều sâu $H = 1,6$ m, khảo sát với chiều rộng hố đào thay đổi $2a = 2$ m, 4 m, 6 m.



Hình 6. Chuyển vị của trục đường hầm thay đổi theo chiều rộng hố đào.



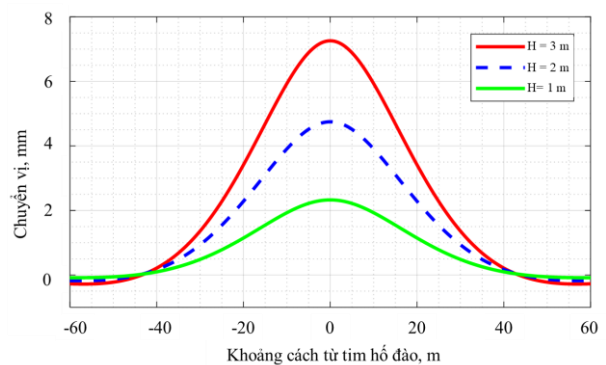
Hình 7. Độ lệch của trục đường hầm thay đổi theo chiều rộng hố đào.

Hình 6 và 7 cho thấy chuyển vị tối đa và độ lệch của đường hầm tăng gần như tuyến tính khi giá trị chiều rộng hố đào tương ứng với kích thước thực tế. Cụ thể, khi tăng chiều rộng gấp đôi, giá trị chuyển vị cực đại và độ lệch cực đại có khoảng tăng tương ứng. Vị trí điểm uốn của đường cong chuyển vị và độ lệch gần như không đổi.

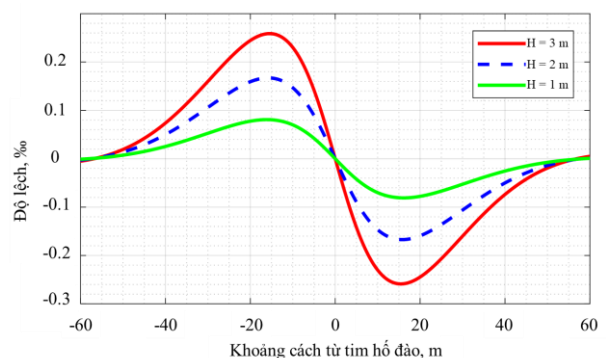
4.2. Ảnh hưởng của chiều sâu hố đào

Các thông số địa chất nền, độ cứng của hầm, chiều sâu đặt hầm được lấy như thực nghiệm

trên, chiều rộng hố đào $2a = 4$ m, khảo sát với chiều sâu hố đào thay đổi $H = 1$ m, 2 m, 3 m.



Hình 8. Chuyển vị của trục đường hầm thay đổi theo chiều sâu hố đào.



Hình 9. Độ lệch của trục đường hầm thay đổi theo chiều rộng hố đào.

Hình 8 và 9 cho thấy chuyển vị tối đa và độ lệch của đường hầm tăng gần như tuyến tính khi giá trị chiều rộng hố đào tương ứng với kích thước thực tế. Cụ thể, khi chiều sâu hố đào thay đổi, từ 1 m thành 2 m và 3 m, giá trị chuyển vị cực đại đã tăng tương ứng là 104% và 212% so với chuyển vị tại khoảng sâu $H = 1$ m. Độ lệch có mức tăng tương ứng khi thay đổi chiều sâu hố đào. Trong khi đó, vị trí điểm uốn của đường cong chuyển vị và độ lệch gần như không đổi.

5. Kết luận

Việc tiếp cận giải tích xác định chuyển vị của trục đường hầm khi thi công hố móng công ngầm toàn chiều dài là một bài toán có ý nghĩa thực tế để đưa ra các đánh giá ban đầu và kiểm soát trong quá trình thi công công ngầm.

Cách tiếp cận giải tích giúp quá trình xác định chuyển vị và độ lệch của trục đường hầm diễn ra đơn giản, nhanh gọn, không cần sử dụng

nhiều công cụ phức tạp như phương pháp phần tử hữu hạn. Ngoài ra, kết quả phân tích theo phương pháp giải tích thu được mang tính an toàn hơn phương pháp phần tử hữu hạn, vì chưa xét được hết các yếu tố ảnh hưởng tới kết quả như độ cứng nền, mô hình nền hai hệ số.

Các thông số đào như chiều rộng và chiều sâu của hố đào có ảnh hưởng lớn đến ứng xử của đường hầm. Điều này cho thấy khi có yêu cầu về diện tích đào cần phải cân nhắc lựa chọn các thông số chiều rộng, chiều sâu phù hợp để hạn chế tối đa những tác động tiêu cực đến hầm.

Tài liệu tham khảo

- [1] C. -T. Chang, C. -W. Sun, S. W. Duann, and R. N. Hwang, "Response of a Taipei rapid transit system (TRTS) tunnel to adjacent excavation," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 151-158, Jul. 2001, doi: 10.1016/S0886-7798(01)00049-9.
- [2] Z. Yang and X. Wang, "Influence of metro tunnel excavation on deformation of existing pedestrian underpass in Changzhou railway station platform," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 55860-55871, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2981343.
- [3] C. W.W.Ng., S. Jiangwei, and Y. Hong, "Three-dimensional centrifuge modelling of basement excavation effects on an existing tunnel in dry sand," *Can. Geotech. J.*, vol. 50, no. 8, pp. 874-888, 2013, doi: 10.1139/cgj-2012-0423.
- [4] X. Huang, H. Huang, and D. Zhang, "Centrifuge modelling of deep excavation over existing tunnels," *Proc. ICE - Geotech. Eng.*, vol. 167, no. 1, pp. 3-18, 2014, doi: 10.1680/geng.11.00045.
- [5] N. V. Hùng, N. T. Tâm, "Ảnh hưởng của quá trình thi công công ngầm với phân đoạn thi công khác nhau lên đường hầm hiện hữu," *TC GTVT*, số tháng 10/2022, tr. 30-34, 2022.
- [6] P. Lou, Y. Li, S. Lu, H. Xiao, and Z. Zhang, "Deformation and mechanical characteristics of existing foundation pit and tunnel itself caused by shield tunnel undercrossing," *Symmetry*, vol. 14, no. 2, 2022, Art. no. 263, doi: 10.3390/sym14020263.
- [7] N. T. Tâm, N. V. Hùng, N. V. Bắc, và N. A. Tuấn, "Phân tích biến dạng của hầm hiện hữu sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn khi thi công hố đào toàn chiều dài," *TC KHCN GTVT*, tập 12, số 1, tr. 1-9, 1. 2023, doi: 10.55228/JTS T.12(1).1-9.
- [8] X. Tao, P. Luan, J. Ma, and W. Song, "Influence of sublevel unloading excavation with deep consideration of the Superposition effect on deformation of an existing tunnel under an intelligent geotechnical concept," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2022, Art. no. , 2022, doi: 10.1155/2022/1400114.
- [9] X. Zhao, Z. Li, G. Dai, H. Wang, Z. Yin, and S. Cao, "Numerical study on the effect of large deep foundation excavation on underlying complex intersecting tunnels," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 9, Art. no. 4530, 2022, doi: 10.3390/app12094530.
- [10] J. Liu, C. Shi, M. Lei, C. Cao, and Y. Lin, "Improved analytical method for evaluating the responses of shield tunnel to adjacent excavations and its application," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 98, Art. no. 103339, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.tust.2020.103339.
- [11] T. N. Tam and H. N. Van, "Analytical approach to determine longitudinal deformation of the existing precast tunnel during construction of a full-length excavation pit," *Int. J. Comput. Civ. Struct. Eng.*, vol. 20, no.1, pp. 46-56, 2024, doi: 10.22337/2587-9618-2024-20-1-46-56.
- [12] Z. Zhang, M. Huang, and W. Wang, "Evaluation of deformation response for adjacent tunnels due to soil unloading in excavation engineering," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 38, pp. 244-253, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.tust.2013.07.002.
- [13] X. Zhuang, X. Ou, J. Yang, and J. Fu, "Deformation response of an existing tunnel to upper excavation of foundation pit and associated dewatering," *Int. J. Geomech.*, vol. 17, no. 4, Art. no. 04016112, Apr. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.000081
- [14] A. Verruijt, *An introduction to soil dynamics*, Dordrecht, Netherlands: Springer Dordrecht, 2010.

- [15] S. -M. Liao, F. -L. Peng, S. -L. Shen, "Analysis of shearing effect on tunnel induced by load transfer along longitudinal direction," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 23, no. 4, pp. 421-430, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.tust.2007.07.001
- [16] A. Klar, T. E. B. Vorster, K. Soga, and R. J. Mair, "Soil – pile interaction due to tunnelling: comparison between Winkler and elastic continuum solutions," *Geotechnique*, vol. 55, no. 6, pp. 461-466, Aug. 2005, doi: 10.1680/geot.2005.55.6.461.