

Phân tích biến dạng của hầm hiện hữu sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn khi thi công hố đào toàn chiều dài

Deformation analysis of existing tunnel using finite element method during construction of a full-length excavation pit

Nguyễn Trọng Tâm^{1,*}, Nguyễn Văn Hùng², Nguyễn Văn Bắc², Nguyễn Anh Tuấn¹

¹Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

²Trường Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội

*Email liên hệ: trongtam.nguyen@ut.edu.vn

Tóm tắt:

Sự phát triển của không gian ngầm đã, đang và sẽ dẫn đến sự giao cắt khác mức giữa các công trình, đặc biệt giao cắt với các tuyến đường hầm tàu điện ngầm hiện hữu. Khi thi công hố móng ngoài việc phải kiểm soát rủi ro của thi công, việc đảm bảo an toàn của công trình hầm hiện hữu cũng là vấn đề quan trọng trong kỹ thuật. Bài báo dựa trên dự án đường sắt đô thị tại Thành phố Hồ Chí Minh. Tại đây, công ngầm được thi công phía trên đường hầm khiên đào hiện hữu, giao cắt tim trục với đường hầm là trục giao. Trên cơ sở sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn với mô hình phân tích 3D, nhóm tác giả đánh giá ứng xử của đường hầm TBM (Tunnel Boring Machine) khi thi công công đào toàn chiều dài. Kết quả phân tích mô hình, quá trình thi công hố móng gây ra chuyển vị thẳng đứng lớn hơn đáng kể so với chuyển vị ngang của hầm. Kết quả mô phỏng cũng là cơ sở để đánh giá biện pháp thi công và cơ sở phục vụ trong quá trình quan trắc chuyển vị của đường hầm hiện hữu.

Từ khóa: Đường hầm hiện hữu; Hố đào toàn chiều dài; Hầm TBM; Chuyển vị của hầm; Phương pháp phần tử hữu hạn.

Abstract:

The development of underground space has been and will lead to severe intersections between works, especially intersections with existing subway tunnels. When constructing a foundation pit, in addition to controlling the risks of construction, ensuring the safety of the existing tunnel is also an important technical issue. This article is based on the actual project at urban railway project in Ho Chi Minh City. Here, the underground culvert is constructed above the existing shield tunnel, intersecting the center line with the tunnel is orthogonal. On the basis of using the finite element method with a 3D analysis model, the authors evaluate the behavior of a TBM (Tunnel Boring Machine) tunnel when constructing a full-length culvert. According to the model analysis results, the foundation pit construction process causes a vertical displacement significantly larger than the horizontal displacement of the tunnel. Simulation results are also the basis for evaluating construction methods and service facilities in the process of monitoring the displacement of the existing tunnel.

Keywords: Existing tunnel; Full-length excavation; TBM tunnel; Displacement of tunnel; Finite element method.

1. Giới thiệu

Đối với các thành phố có mật độ dân cư lớn, cư dân đông đúc, yêu cầu về phát triển không gian ngầm là tất yếu. Khi hệ thống giao thông, không gian ngầm

ngày càng phát triển và mở rộng, việc thi công giao cắt chong lán với các công trình hiện hữu là điều khó tránh khỏi. Điều này, có thể gây ra các chuyển vị làm hư hại những đường hầm hiện có. Thực tế,

điều này đã xảy ra tại tuyến đường hầm Pachiao Đài Loan, kết cấu vỏ hầm đã bị hư hại do việc đào tầng hầm tòa nhà lân cận [1]. Do đó, việc xác định các đặc điểm, thành phần chuyển vị của đường hầm tàu điện ngầm hiện hữu trong quá trình thi công hố móng lân cận là rất quan trọng.

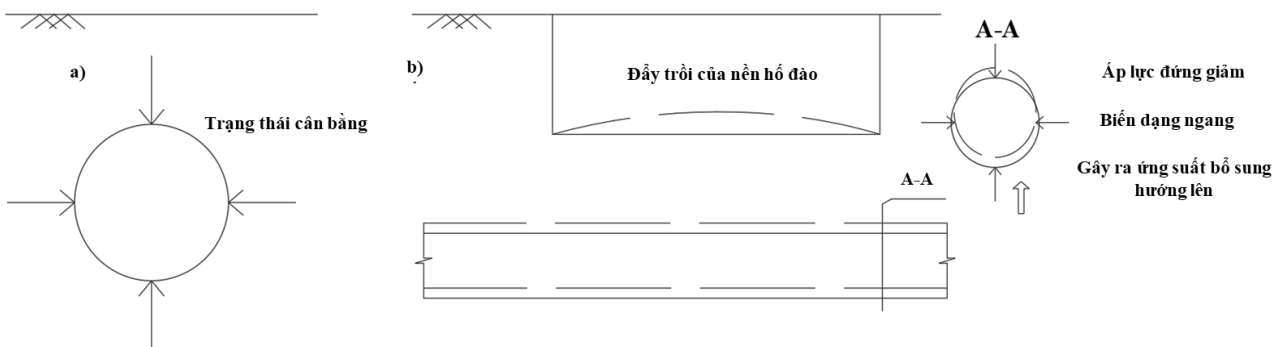
Để đánh giá sự an toàn của các đường hầm hiện hữu, nhiều phương pháp đã được xem xét sử dụng như: Phương pháp phần tử hữu hạn, mô hình ly tâm, cũng như xây dựng lời giải lý thuyết kết hợp với quan trắc hiện trường [2]-[5]. Thông thường, do hạn chế về thời gian và ngân sách, việc tiến hành các thử nghiệm thực địa rộng rãi hoặc sử dụng máy ly tâm để khảo sát ảnh hưởng của thi công phía trên đến các đường hầm hiện hữu khó được triển khai, lời giải lý thuyết thường có xu hướng đánh giá quá cao chuyển vị của các đường hầm. Khi thi công công ngầm, hầm nông hay các tầng hầm sẽ làm giảm áp lực địa tầng và gây ra chuyển động không đối xứng cho đường hầm hiện hữu không chỉ dọc theo hướng thi công mà còn cả các hướng dọc của tuyến hầm. Ứng xử của hầm khi đào phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau, từ độ cứng chống uốn của hầm, đặc điểm trạng thái ứng suất biến dạng trạng thái ban đầu, vị trí tương đối giữa hố đào và hầm hiện hữu, trình tự thi công của kết cấu, thông số hố đào,... Vì vậy việc đánh giá đầy đủ ảnh hưởng từ thi công hay

xác định ứng xử của hầm là rất phức tạp. Vì vậy, để có được những đánh giá tổng quan và cơ sở để điều chỉnh các phương án thiết kế và thi công, việc sử dụng phương pháp mô hình 3D là lựa chọn phù hợp hơn cả.

Trong bài báo này, dựa trên công tác xây dựng công ngầm bên trên đường hầm tàu điện ngầm, chuyển vị của đường hầm được nghiên cứu, khi công tác đào được thực hiện theo toàn bộ chiều dài của hố móng.

2. Cơ chế biến dạng của hầm do đào hố móng

Trước khi đào hố móng, tương tác giữa hầm và địa tầng đã ổn định, hầm ở trạng thái cân bằng lực như hình 1a. Khi đào đất phía trên đường hầm, trạng thái ứng suất của địa tầng thay đổi, điều này ảnh hưởng đến kết cấu hầm bên dưới. Việc dỡ tải theo phương thẳng đứng gây ra sự trôi lên của đất bên dưới hố đào và chuyển vị nâng lên của đường hầm bên dưới do giảm áp lực của đất bên trên. Ứng suất ngang trên cả hai mặt của đường hầm được tăng lên bởi tác động ép của đất. Ảnh hưởng của việc dỡ tải đào lên áp lực đất bên trên của đường hầm được giảm xuống và mặt cắt ngang của đường hầm có dạng hình elipsoid thẳng đứng “nén ngang và kéo dài theo phương thẳng đứng”, như hình 1b.



Hình 1. a) Trạng thái cân bằng trước khi thi công hố đào;
 (b) Trạng thái ứng suất biến dạng thay đổi khi thi công hố đào.

3. Giới thiệu dự án

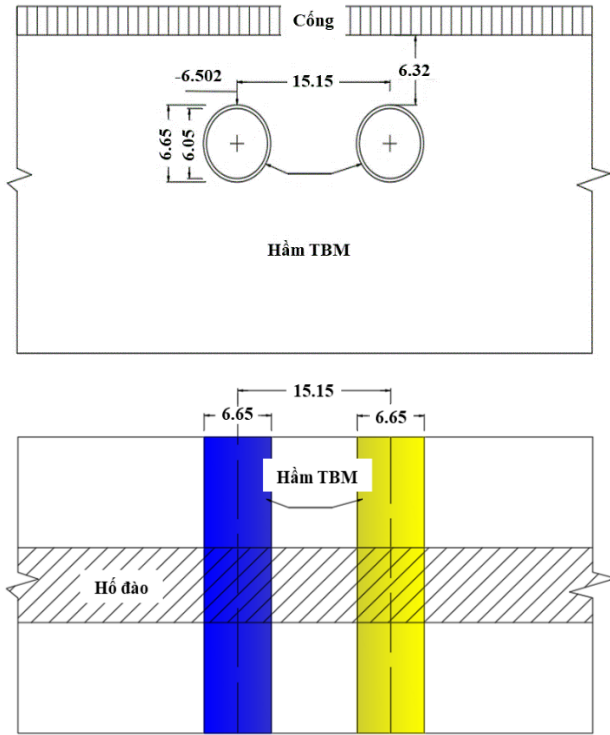
3.1. Thông tin dự án

Tuyến đường sắt đô thị số 1 (Line 1) Thành phố Hồ Chí Minh có tổng chiều dài 19,7 km, trong đó 2,6 km đi ngầm và 17,1 km đi trên cao [6]. Đoạn hầm ngầm gồm hai đường hầm khiên đào: Hầm phía Đông (Eastbound - EB) và phía Tây (Westbound -

WB), được thi công bằng máy đào TBM cân bằng áp lực đất.

Vị trí giao cắt của dự án công ngầm thoát nước và đường hầm TBM Line 1 là tại km 1+555 (theo lý trình của hệ thống đường sắt đô thị). Cách không xa các ống hầm TBM là lối đi bộ ngầm thuộc dự án tuyến số 1. Tuy nhiên, trong bài báo này, nhóm tác

giả chỉ tập trung đến ứng xử của hầm TBM, cụ thể, xem xét ảnh hưởng của đường hầm đi bộ lên ứng xử của hai hầm TBM được xem xét trong bài toán khác. Vị trí tương quan giữa cống đào và đường hầm được thể hiện trong hình 2.



Hình 2. Tổng quan vị trí hầm TBM hiện hữu và cống ngầm.

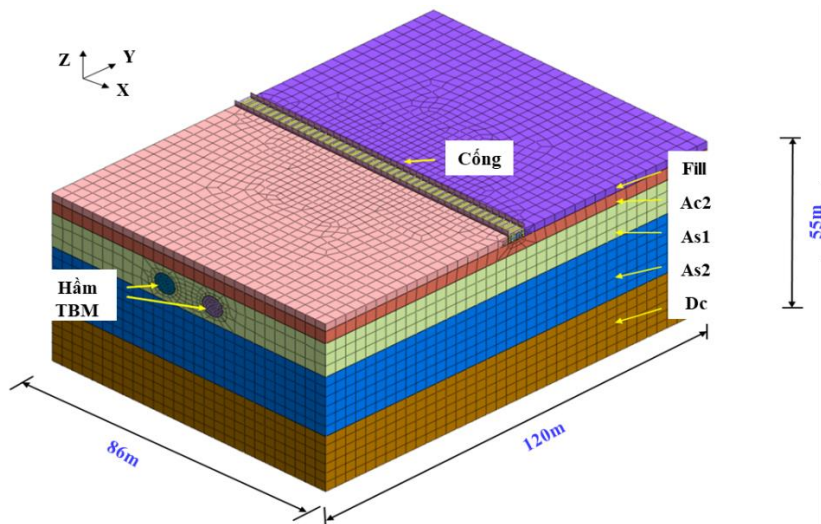
3.2. Điều kiện địa chất dự án

Theo kết quả khảo sát địa chất từ dự án đường sắt đô thị số 1 Bến Thành – Suối Tiên, mực nước ngầm tại khu vực giao cắt dao động từ 2,2 m đến 2,8 m dưới mặt đất. Số liệu địa chất thủy văn được 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. Qua phân tích, các lớp đất được chia thành ba loại cơ bản: Đất đắp, đất bồi, đất lũ tích. Chi tiết hơn, các lớp tại khu vực giao cắt gồm năm lớp đất chính: Fill, AC2, AS1, AS2, DC. Sự phân bố của các lớp được thể hiện trong hình 3, hầm TBM nằm trong lớp 3-AS1.

4. Chi tiết mô hình

4.1. Mô hình tính toán và giả thiết cơ bản

Kích thước mô hình được xác định dựa trên các hướng dẫn của CIRIA C760 [7] và khuyến cáo trong các nghiên cứu trước [5], phương dọc theo hướng thi công công hộp được xác định là 86 m, dọc theo chiều dài hầm TBM và lối đi bộ là 120 m, chiều sâu mô hình dựa trên phạm vi ảnh hưởng và chiều sâu lỗ khoan, được mô hình là 55 m. Kích thước mô hình và vị trí tương quan giữa các công trình và các lớp đất được thể hiện trong hình 3.



Hình 3. Kích thước mô hình 3D.

4.2. Mô hình phần tử hữu hạn

Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn dựa trên nền tảng phần mềm MIDAS GTS, với các lớp đất sử dụng mô hình Mohr-Coulomb với loại phần tử

Hexadetrol, vỏ hầm được mô phỏng dạng tấm dày (plate) [8]. Số liệu điều kiện địa chất và thủy văn sử dụng theo các báo cáo địa chất của tuyến đường sắt Metro, được dẫn ra trong **Error! Reference source not found.** Thông số, đặc tính kết cấu được sử

dụng theo Bảng 2. Mực nước thi công được giả định tại mặt đất tự nhiên. Thông số kỹ thuật của các lớp đất và mô hình vật liệu dùng trong mô phỏng tính toán, cũng như thông số kỹ thuật của vỏ hầm được tham khảo từ “Technical design: Geotechnical interpretative (Bored tunnel) – Revision C” và “Ground Movement Analysis Report - TBM Tunnel Section” [9] và các báo kỹ thuật khác liên quan. Thông số độ cứng của hầm khi đào được xác định dựa trên so sánh tính toán lý thuyết và kết quả thí nghiệm kết cấu vỏ hầm, sử dụng hệ số giảm 0,185 tham khảo theo tài liệu [10] và kết quả thí nghiệm. Phần tử tiếp giáp (interface) được sử dụng để mô phỏng tương tác giữa đất với kết cấu tường chắn và hầm. Hệ số giảm cường độ được chọn là $R_{inter} = 0,67$. Các công tác thi công bao gồm: Đóng cọc ván thép, lắp đặt hệ khung chống, đào đất, thi công bê tông lót và kết cấu vĩnh cửu, lấp đất, rút bỏ hệ thống khung chống và cọc ván, hoàn trả mặt bằng. Kết cấu chống đỡ và kích thước hố đào được thể hiện trong hình 4.

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

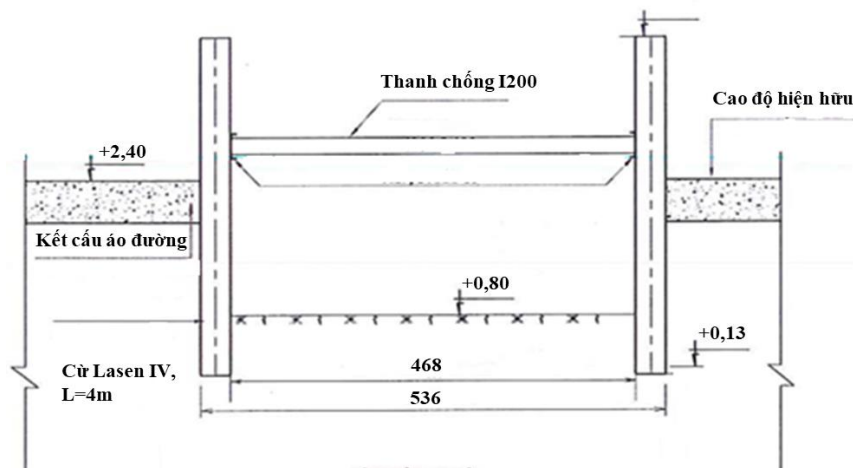
Thông số	Lớp đất				
	Fill	AC2	AS1	AS2	DC
E (kPa)	10000	3000	12500	37500	136000

Thông số	Lớp đất				
	Fill	AC2	AS1	AS2	DC
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 (°)	25	24	30	33	0

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

Thông số	Vỏ hầm
E* (kPa)	$7,2 \times 10^6$
ν	0,2
γ (kN/m ³)	24
Chiều dày (m)	0,3

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

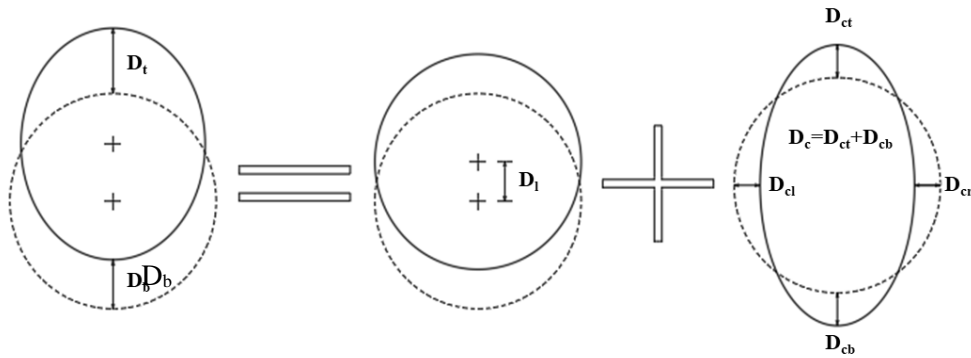


Hình 4. Kích thước hố đào toàn khối.

5. Kết quả và thảo luận

Chuyển vị thẳng đứng của hầm được cấu thành từ chuyển vị thẳng đứng do uốn dọc hầm và chuyển vị

bởi uốn trong mặt cắt ngang của hầm. Hình 5 thể hiện các thành phần cấu thành của chuyển vị này.



Hình 5. Chuyển vị của đường hầm.

Trong đó, D_l (longitudinal displacement of tunnel cross section) là chuyển vị thẳng đứng của trục đường hầm khi uốn dọc; D_t là chuyển vị của đỉnh hầm; D_b là chuyển vị của đáy hầm; D_{cv} (convergence of tunnel cross section) chuyển vị thẳng đứng khi uốn trong mặt cắt ngang của đường hầm được cấu thành từ hai thành phần; D_{ct} (displacement of tunnel crown) chuyển vị uốn đỉnh hầm; D_{cb} (Displacement of tunnel invert) chuyển vị uốn đáy hầm; D_{cl}, D_{cr} lần lượt là chuyển vị ngang của hông bên trái và bên phải trong mặt cắt ngang của tiết diện. Trong bài báo này để đơn giản hóa phân tích xem hai giá trị D_{ct} và D_{cb} là bằng nhau. Chuyển vị thẳng đứng của trục đường hầm khi chịu uốn:

$$D_l = (D_t + D_b)/2 \quad (1)$$

Tổng chuyển vị thẳng đứng của đỉnh và đáy khi uốn trong mặt cắt tiết diện hầm:

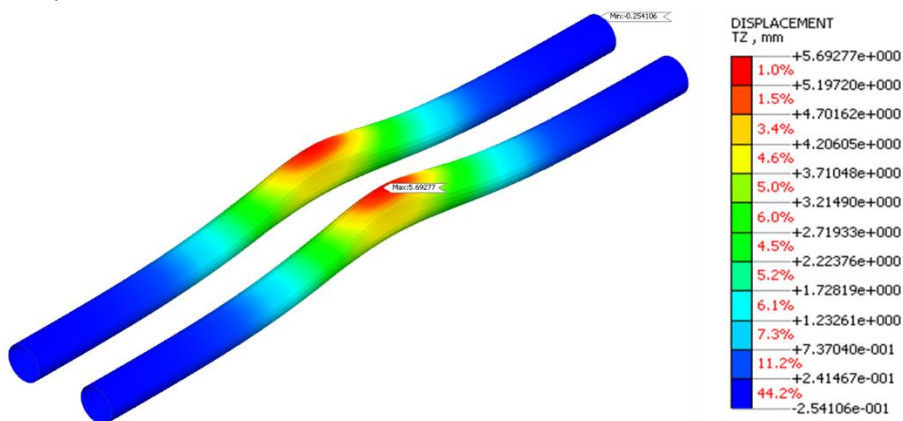
$$D_{cv} = D_{ct} + D_{cb} = D_t - D_b \quad (2)$$

Tổng chuyển vị ngang của hông bên trái và bên phải khi uốn trong mặt cắt tiết diện hầm (về giá trị tuyệt đối):

$$D_{ch} = D_{cl} + D_{cr} \quad (3)$$

5.1. Chuyển vị thẳng đứng của hai hầm khiên đào

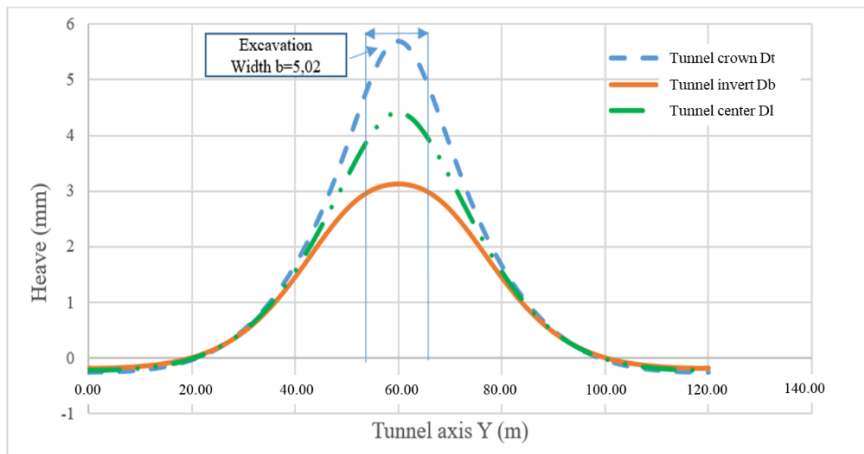
Kết quả mô hình cho thấy chuyển vị thẳng đứng của hai hầm TBM, thu được đối xứng qua trục công ngầm, chuyển vị nhỏ dần khi cách xa tim đào. Chuyển vị lớn nhất của đỉnh hầm 5,7 mm (hình 6). Chuyển vị tại ngoài cùng -0,25 mm, điều này thể hiện kích thước mô hình ảnh hưởng đến kết quả chuyển vị, tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng này tương đối nhỏ.



Hình 6. Chuyển vị thẳng đứng hai đường hầm.

Giá trị chuyển vị thẳng đứng cực đại của đáy hầm và đỉnh hầm thu được từ mô hình lần lượt ~5,7 mm và 3,13 mm, các giá trị này nhỏ hơn giá trị giới hạn 15 mm cho phép của kết cấu hầm khiên đào [11].

Hình 7 chỉ ra sự thay đổi của chuyển vị thẳng đứng theo phương dọc hầm được xác định tại vị trí đỉnh, đáy và tim đường hầm.



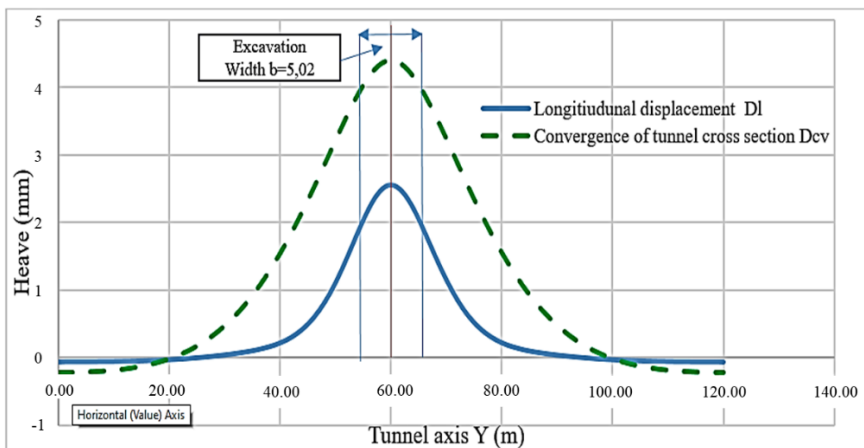
Hình 7. Chuyển vị thẳng đứng hầm.

Với giả sử biến dạng theo mặt cắt ngang của đường hầm $D_{ct} = D_{cb}$, từ đó chuyển vị dọc thẳng đứng được xác định theo giá trị trung bình của chuyển vị dọc tại đỉnh hầm và đáy hầm.

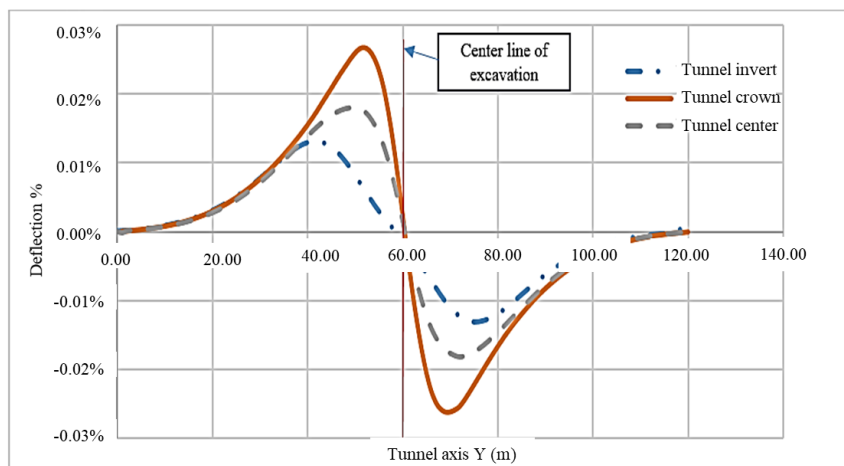
Giá trị chuyển vị cực đại của tim đường hầm đạt 4,4 mm. Tổng chuyển vị thẳng đứng của đỉnh và đáy hầm trong mặt cắt ngang được xác định qua hiệu của hai chuyển vị thẳng đứng, giá trị lớn nhất

tương ứng $D_{cv} = 2,5$ mm. Sự biến thiên của chuyển vị thẳng đứng trong mặt cắt theo chiều dọc hầm được chỉ ra trong hình 8.

Qua biểu đồ ta thấy chuyển vị thẳng đứng của tim hầm và tổng chuyển vị thẳng đứng của đỉnh và đáy hầm trong tiết diện cùng đạt giá trị lớn nhất tại vị trí tim hố đào. Tại vị trí tim hố đào tỷ lệ này đạt giá trị lớn nhất $Max(D_{cv}/DI) = 56\%$.



Hình 8. Sự thay đổi của chuyển vị do uốn dọc và uốn theo mặt cắt ngang theo chiều dọc hầm.



Hình 9. Độ nghiêng theo phương dọc của đỉnh hầm, đáy hầm và tim hầm.

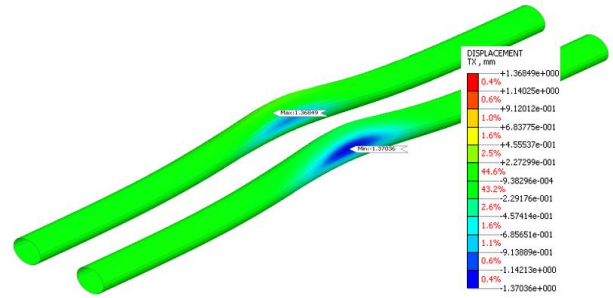
Độ nghiêng theo phương dọc của đỉnh hầm đạt cực đại $\pm 0,026\%$ tại vị trí cách tim hố đào 9 m, Độ nghiêng theo phương dọc của đáy hầm đạt cực đại $\pm 0,013\%$ tại vị trí cách tim hố đào 14 m, tương tự đối với trục đường hầm độ nghiêng theo phương dọc đạt cực đại $\pm 0,018\%$ tại vị trí cách tim hố đào 12 m (hình 9), các vị trí đạt cực đại này được gọi là điểm uốn.

5.2. Chuyển vị ngang của 2 hầm TBM

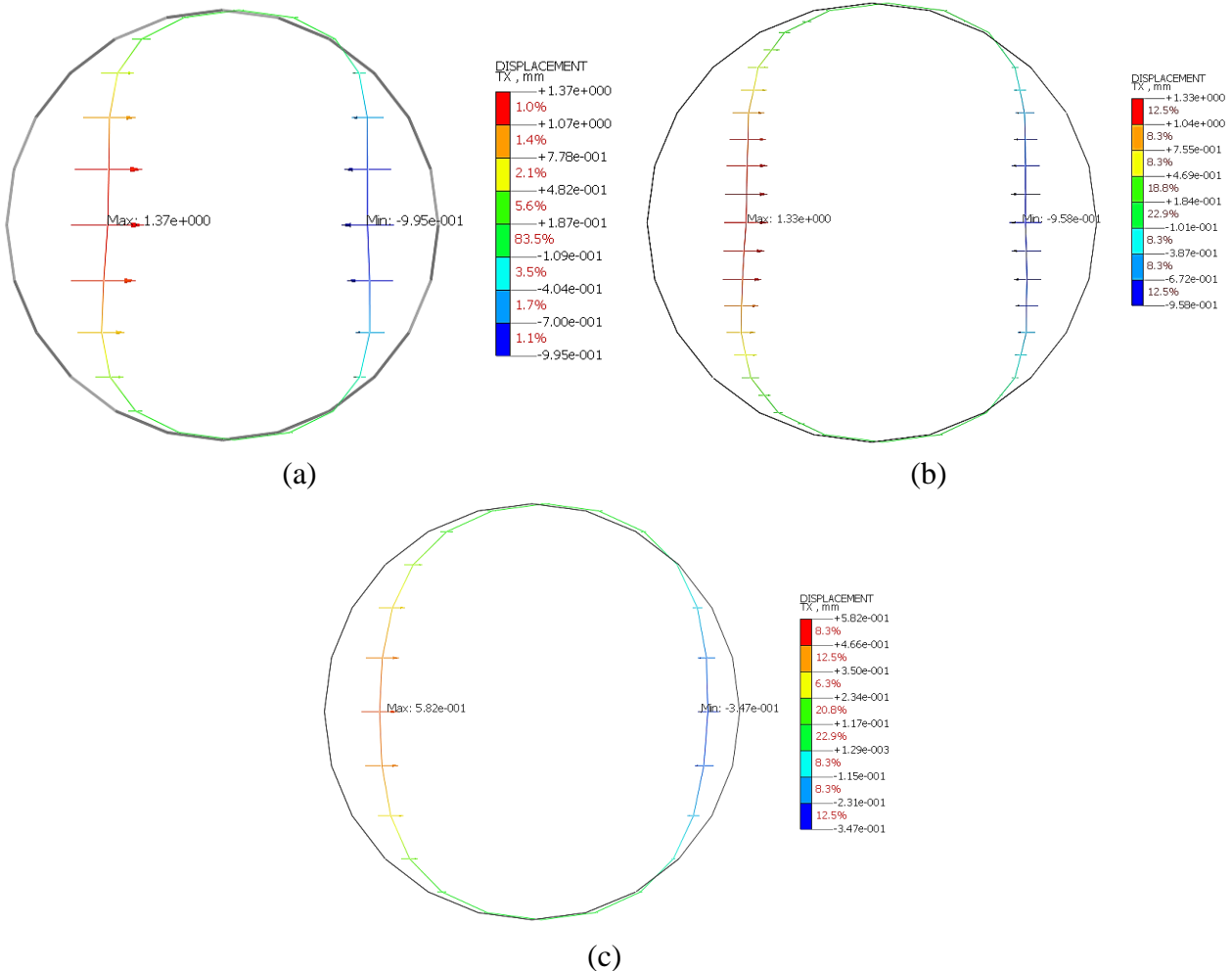
Theo chiều dọc của hầm, chuyển vị ngang của hầm cũng đạt cực đại tại vị trí giao cắt với tim đường đào. Giảm dần khi xa đường hầm, chuyển vị ngang gần như bằng không tại các khi vực xa tim hố đào $\Delta y \sim 35$ m. Kết quả cũng cho thấy chuyển vị ngang phía giữa hai hầm nhỏ hơn chuyển vị ngang phía ngoài. Điều này cho thấy có sự ảnh hưởng về khoảng cách giữa hai hầm trong trường hợp này. Chuyển vị ngang của hai hầm được thể hiện trong

hình 10 với các chuyển vị hướng từ ngoài vào tim hầm có giá trị lớn nhất 1,37 mm về mặt độ lớn.

Chuyển vị ngang của mặt cắt ngang hầm tại một số vị trí: Tim hố đào, vị trí mép hố đào và vị trí điểm uốn dọc của hầm (cách tim hố đào 12 m) được thể hiện trong hình 11 (a, b, c). Tại vị trí tim hố đào và mép hố đào giá trị chuyển vị về độ lớn gần bằng nhau $1,37 \div 1,33$ mm, tại vị trí mặt cắt cách tim hố đào 12 m chuyển vị lớn nhất 0,58 mm.



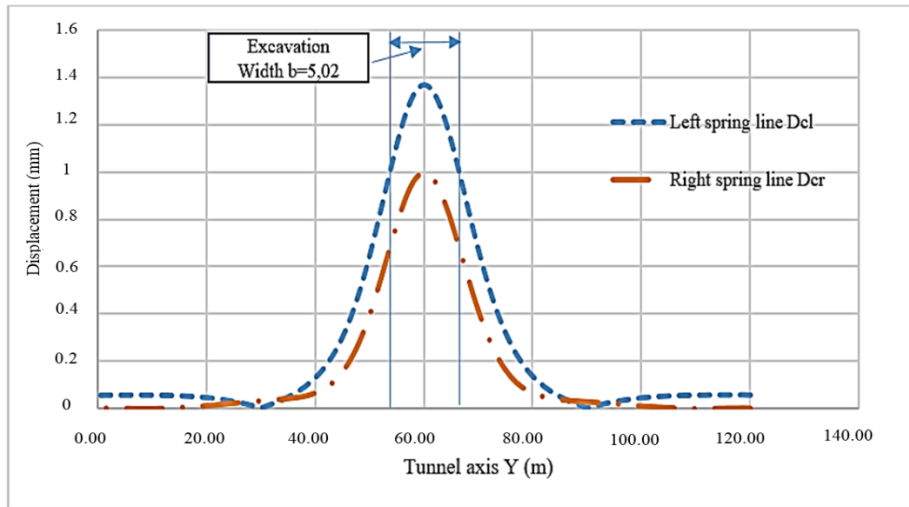
Hình 10. Chuyển vị ngang hai đường hầm.



Hình 11. Chuyển vị ngang của tiết diện hầm tại một số vị trí: (a) tim hố đào; (b) mép hố đào; (c) cách tim hố đào 12 m (điểm uốn).

Hai hàm cho kết quả chuyển vị đối xứng nhau, giá trị tuyệt đối của chuyển vị ngang dọc theo chiều dài của phía trong (right spring line) (mép vỏ hầm nằm

tại đoạn giữa hai hàm) và ngoài (left spring line) của hầm bên trái được biểu diễn trong hình 12.



Hình 12. Giá trị tuyệt đối của chuyển vị ngang mép trong và mép ngoài của đường hầm.

Theo hình 12 chuyển vị ngang cực đại thu được là $Max(D_{cl}) = 1,37$ mm và khoảng $Max(D_{cr}) = 1,0$ mm. Tổng chuyển vị ngang của hông bên trái và hông bên phải của hầm (về độ lớn) $D_{ch} = 2,37$ mm, giá trị này gần tương đương với tổng chuyển vị đứng của đáy và đỉnh hầm trong tiết diện $D_{cv} = 2,5$ mm. Từ kết quả của hai giá trị tổng chuyển vị trong tiết diện vỏ hầm gần bằng nhau, nhận thấy rằng kết cấu vỏ hầm chịu áp lực gần như đối xứng qua các trục và biến dạng do chịu uốn là chính.

So sánh với chuyển vị thẳng đứng bởi uốn dọc hầm tại mục 5.1 với giá trị lớn nhất tại đỉnh hầm và đáy hầm đạt $\sim 5,7$ mm ÷ 3,13mm, nhận thấy chuyển vị theo phương ngang của tiết diện vỏ hầm (1,3 mm) nhỏ hơn đáng kể so với chuyển vị thẳng đứng.

6. Kết luận và kiến nghị

Kết quả mô hình cho thấy dỡ tải khi thi công hố móng, gây chuyển vị đứng của đỉnh hầm 5,3mm lớn hơn đáy hầm 3,17 mm và hai giá trị này đều nằm trong giới hạn an toàn. Chuyển vị thẳng đứng tim đường hầm 4,4 mm, tổng chuyển vị thẳng đứng của đỉnh và đáy trong tiết diện 2,5 mm. Các giá trị này đạt cực đại tại vị trí tim hố đào.

Tổng chuyển vị ngang của hông bên trái và hông bên phải 2,36 mm, giá trị này gần bằng tổng chuyển vị

vị đứng của đáy và đỉnh trong tiết diện, điều này thể hiện kết cấu chịu biến dạng do mô men uốn là chính.

Độ nghiêng đỉnh hầm và đáy hầm theo phương dọc tương ứng $\pm 0,026\%$ và $\pm 0,013\%$ độ nghiêng của tim hầm do uốn dọc hầm $\pm 0,018\%$, khoảng cách giữa hai điểm uốn của tim hầm 24 m.

Kích thước mô hình ảnh hưởng tới kết quả, trong bài toán xem xét thì mức độ ảnh hưởng này tương đối nhỏ. Sự xuất hiện của đường hầm thứ hai, ảnh hưởng đến chuyển vị ngang của đường hầm, điều này thể hiện qua sự khác biệt giữa chuyển vị ngang của hầm tại hai vị trí: phía ngoài và giữa hai đường hầm. Kết quả so sánh trong bài báo có tính chất tham khảo với các trường hợp tương tự, cần có những đánh giá cụ thể về mức độ ảnh hưởng của kích thước mô hình tới kết quả chuyển vị của hầm và ảnh hưởng khoảng cách hai hầm đến chuyển vị theo phương ngang.

Phân tích ứng xử của hầm dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn có thể sử dụng để triển khai trong bước đầu của dự án giúp đánh giá phương án thi công hố đào toàn chiều dài. Ngoài ra cũng cần phải bố trí các thiết bị quan trắc hiện trường để kịp thời phát hiện các điểm bất thường khi thi công.

Tài liệu tham khảo

- [1] C. T. Chang, C. W. Sun, S. W. Duann, R. N.Hwang; "Response of a Taipei rapid transit

- system (TRTS) tunnel to adjacent excavation”. Tunnelling and underground space technology. 2001; 16(3):151-158. DOI:10.1016/S0886-7798(01)00049-9.
- [2] K. Y. Lo, J. A. Ramsay; “The effect of construction on existing subway tunnels – a case study from Toronto”. Tunnelling and underground space technology. 1991; 6(3):287-297. DOI:10.1016/0886-7798(91)90140-Y.
- [3] X. Huang, H. W. Huang, D. M. Zhang; “Centrifuge modelling of deep excavation over existing tunnels”. Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Geotechnical Engineering. 2014; 167 (1):3-18. DOI:10.1680/geng.11.00045.
- [4] R. Liang, T. Xia, Y. Hong, F. Yu; “Effects of above – crossing tunnelling on the existing shield tunnels”. Tunnelling and Underground Space Technology. 2016; 58:159-176. DOI:10.1016/j.tust.2016.05.002.
- [5] H. Liu, P. Li, J. Liu; “Numerical investigation of underlying tunnel heave during a new tunnel construction”. Tunnelling and underground space technology. 2011; 26(2):276-283. DOI:10.1016/j.tust.2010.10.002.
- [6] Ban Quản lý đường sắt đô thị Thành phố Hồ Chí Minh; “Giới thiệu tuyến đường sắt số 1”. Available: <http://maur.hochiminhcity.gov.vn/web/bqlds/tuyen-so-1>. Accessed on: 10/09/2022.
- [7] A. Gaba, S. Hardy, L. Doughty, W. Powrie, D. Selemetas; “Guidance on embedded retaining wall design”. London, UK: The Institution of Structural Engineers. 2017.
- [8] MIDAS; “MIDAS GTS NX Manuals and Tutorials”. Available: <https://globalsupport.midasuser.com/helpdesk/KB/View/32636343-midas-gts-nx-manuals-and-tutorials>. Accessed on: 10/09/2022.
- [9] Technical design; “Geotechnical interpretative report (bored tunnel), Ho Chi Minh City Urban Railway construction Project Ben Thanh – Suoi Tien Section (Line 1) Contract Package 1b: Civil (Underground Section from km 0+615 to Km 2+360)”. 2013.
- [10] Май Дык Мин; “Расчет тоннелей на сейсмические воздействия”; Диссертация кандидата; Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ); 2014.
- [11] Министерство регионального развития РФ; “СП 122.13330.2012 Тоннели железнодорожные и автодорожные”; Свод правил; ФАУ «ФЦС»; 2012.