



TREND ANALYSIS OF GROUND DEFORMATION INDUCED BY TUNNELLING USING A DISPLACEMENT-CONTROLLED MODEL (DCM)

Pham Tuyen Duong

Hoang Ha Trading Construction Consultant Joint Stock Company, A12/18 Street no.4 extended, Binh Hung commune, Ho Chi Minh City, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 21/10/2025

Revised: 31/01/2026

Accepted: 06/02/2026

Published online: 15/02/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.2.3>

* *Corresponding author*

Email: duongtuyenduong2@gmail.com

Abstract. Ground deformation induced by tunnelling in saturated soft ground is a critical issue affecting construction safety and the stability of adjacent structures. This study investigates ground deformation trends around tunnels using a Displacement-Controlled Model (DCM) within the framework of the Finite Element Method (FEM), under the assumption of small-strain behaviour. The tunnelling process is represented by prescribed displacements along the tunnel boundary, reflecting the mechanism of ground convergence towards the tunnel void during excavation. The model is validated against The Heathrow Express Trial Tunnel, in which the difference in maximum surface settlement is less than 5% compared with field monitoring data, demonstrating a good agreement in terms of deformation shape and trend. Based on the validated model, a systematic parametric study is conducted to examine the influences of tunnel diameter, burial depth, and volume loss ratio on ground deformation. The results indicate that the maximum settlement increases almost linearly with tunnel diameter, decreases significantly with increasing burial depth, and rises nonlinearly when the volume loss ratio exceeds approximately 1.5%. A case study of Ho Chi Minh City Metro Line No. 1 (Ben Thanh - Suoi Tien section) shows that the DCM approach can reasonably capture ground deformation trends under similar geological conditions. The findings provide a useful reference for trend assessment of ground deformation and surface settlement in urban tunnelling problems, without aiming to replace detailed design analyses.

Keywords: Ground deformation; tunnelling; displacement-controlled model (DCM); finite element method (FEM); parametric study; Ben Thanh - Suoi Tien Metro.

@ 2026 University of Transport and Communications



PHÂN TÍCH XU HƯỚNG BIẾN DẠNG NỀN ĐẤT DO ĐÀO HÀM BẰNG MÔ HÌNH KIỂM SOÁT CHUYỂN VỊ (DCM)

Phạm Tuyên Dương

Công ty Cổ phần Tư vấn Xây dựng Thương mại Hoàng Hà, A12/18 đường số 4 nối dài,
xã Bình Hưng, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 21/10/2025

Ngày nhận bài sửa: 31/01/2026

Ngày chấp nhận đăng: 06/02/2026

Ngày xuất bản Online: 15/02/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.2.3>

* Tác giả liên hệ

Email: duongtuyenduong2@gmail.com

Tóm tắt. Biến dạng nền đất do đào hầm trong điều kiện đất yếu bão hòa là một vấn đề quan trọng, ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn thi công và ổn định công trình lân cận. Nghiên cứu này phân tích xu hướng biến dạng nền đất quanh hầm bằng mô hình kiểm soát chuyển vị (DCM) trong khuôn khổ phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), với giả định làm việc trong phạm vi biến dạng nhỏ. Hiệu ứng đào hầm được mô phỏng thông qua chuyển vị cưỡng bức tại biên hầm, phản ánh cơ chế hội tụ của nền đất vào khoảng trống hầm trong quá trình đào. Mô hình được kiểm chứng bằng bài toán Hầm thử nghiệm Heathrow (The Heathrow Express Trial Tunnel), cho thấy sai khác độ lún cực đại tại mặt đất nhỏ hơn 5% so với số liệu quan trắc, qua đó khẳng định khả năng tái hiện hình dạng và xu hướng biến dạng. Trên cơ sở mô hình đã được kiểm chứng, nghiên cứu tiến hành khảo sát có hệ thống ảnh hưởng của đường kính hầm, độ sâu chôn hầm và tỷ lệ thất thoát thể tích đến biến dạng nền đất. Kết quả cho thấy độ lún cực đại tăng gần tuyến tính khi đường kính hầm tăng, giảm rõ rệt khi độ sâu chôn hầm lớn hơn, và gia tăng nhanh theo xu hướng phi tuyến khi tỷ lệ thất thoát thể tích vượt khoảng 1,5%. Nghiên cứu điển hình cho tuyến Metro số 1 TP. Hồ Chí Minh (Bến Thành - Suối Tiên) cho thấy mô hình kiểm soát chuyển vị có khả năng mô tả hợp lý xu hướng biến dạng nền đất trong điều kiện địa chất tương tự. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở tham khảo cho việc đánh giá xu hướng biến dạng và lún mặt đất trong các bài toán hầm đô thị, không nhằm thay thế các phân tích thiết kế chi tiết.

Từ khóa: Biến dạng nền đất; đào hầm; mô hình kiểm soát chuyển vị (DCM); phương pháp phần tử hữu hạn (FEM); khảo sát tham số; Metro Bến Thành - Suối Tiên.

@ 2026 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, cùng với quá trình đô thị hóa nhanh, nhiều công trình hầm đã được triển khai tại các đô thị lớn của Việt Nam, đặc biệt là Thành phố Hồ Chí Minh. Điều kiện địa chất khu vực này thường bao gồm các lớp đất yếu bão hòa, phân lớp phức tạp và mực nước ngầm cao, gây nhiều thách thức trong việc kiểm soát biến dạng nền đất và đảm bảo an toàn cho các công trình lân cận trong quá trình thi công hầm [1-3]. Thực tế thi công cho thấy biến dạng nền đất quá mức có thể dẫn đến lún mặt đất, nứt hư hỏng kết cấu phía trên hoặc mất ổn định cục bộ, ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn thi công và khai thác công trình hầm.

Các nghiên cứu kinh điển về đào hầm trong đất yếu đã chỉ ra rằng hình dạng và mức độ biến dạng nền đất chịu ảnh hưởng mạnh bởi các tham số hình học của hầm, đặc biệt là đường kính hầm và độ sâu chôn hầm [4], [5]. Đối với hầm nông hoặc hầm có đường kính lớn, vùng ảnh hưởng biến dạng có xu hướng mở rộng và biên độ lún mặt đất tăng lên đáng kể, trong khi điều kiện phân lớp địa chất và độ cứng của đất đóng vai trò quyết định đến hình dạng phễu (máng) lún và phân bố biến dạng đứng - ngang [6], [7]. Những kết quả này cho thấy việc dự báo tốt biến dạng nền đất đòi hỏi phải xem xét đồng thời các yếu tố hình học, điều kiện địa chất và phương pháp phân tích được sử dụng.

Trong lĩnh vực mô phỏng số đào hầm, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) đã được sử dụng rộng rãi để mô phỏng quá trình giải phóng ứng suất và hội tụ biến dạng của đất nền quanh hầm. Các tiếp cận truyền thống thường dựa trên việc giảm dần tải trọng hoặc thay đổi trạng thái ứng suất tại biên hầm, kết hợp với phân tích đường ứng suất và kết quả quan trắc thực nghiệm để đánh giá biến dạng nền đất [7-9]. Tuy nhiên, các cách tiếp cận này gặp hạn chế trong việc mô tả trực tiếp cơ chế đào hầm và sự phân bố không đồng đều của trường chuyển vị quanh biên hầm, đặc biệt trong điều kiện đất mềm và hầm nông.

Để khắc phục các hạn chế nêu trên, mô hình kiểm soát chuyển vị (DCM) đã được đề xuất như một cách tiếp cận hiệu quả nhằm mô phỏng trực tiếp cơ chế đào hầm thông qua việc áp đặt trường chuyển vị cưỡng bức tại biên hầm trong nghiên cứu [10]. Nghiên cứu nền tảng này cho thấy mô hình kiểm soát chuyển vị có khả năng tái hiện hợp lý hơn quá trình hội tụ biến dạng và sự phân bố không đồng đều của chuyển vị quanh hầm so với các tiếp cận dựa trên ứng suất, đồng thời cho kết quả phù hợp với số liệu thực nghiệm. Các nghiên cứu đối chứng bằng phương pháp giải tích và thí nghiệm ly tâm cũng cho thấy hình dạng và biên độ biến dạng dự báo bằng mô hình kiểm soát chuyển vị có xu hướng phù hợp hơn với quan trắc thực tế trong đất mềm [7], [9].

Trong những năm gần đây, mô hình kiểm soát chuyển vị tiếp tục được phát triển và mở rộng nhằm nâng cao khả năng mô phỏng biến dạng nền đất do đào hầm, đặc biệt đối với các bài toán hầm nông, hầm đường kính lớn và tương tác công trình - nền đất [11-13]. Các nghiên cứu này chỉ ra rằng kết quả mô phỏng biến dạng nền đất chịu ảnh hưởng đáng kể bởi các tham số hình học của hầm, như đường kính và độ sâu chôn hầm, cũng như cách thức mô tả trường chuyển vị tại biên hầm trong khuôn khổ mô hình kiểm soát chuyển vị.

Song song với đó, nhiều công trình nghiên cứu đã khẳng định rằng kết quả dự báo biến dạng nền đất còn phụ thuộc mạnh vào việc lựa chọn mô hình vật liệu đất và cách mô tả phân lớp địa chất. Các nghiên cứu mô phỏng thi công hầm khi đào trong điều kiện địa chất phức tạp tại Hà Nội cho thấy sự khác biệt rõ rệt về độ lún mặt đất khi sử dụng các mô hình đất khác nhau, điển hình là mô hình Mohr-Coulomb và Hardening Soil [14], [15]. Điều này cho thấy việc lựa chọn mô hình đất, số lớp địa chất và phương pháp mô phỏng có thể dẫn đến sự khác biệt đáng kể trong dự báo biến dạng nền đất, từ đó ảnh hưởng đến đánh giá an toàn và thiết kế

công trình hầm.

Tuy nhiên, có thể nhận thấy rằng phần lớn các nghiên cứu hiện hữu chủ yếu tập trung vào so sánh mô hình vật liệu đất hoặc điều kiện tải trọng [5], [14], trong khi ảnh hưởng định lượng và có hệ thống của các tham số hình học đặc trưng của hầm, như đường kính hầm, độ sâu chôn hầm và tỷ lệ thất thoát thể tích, đến biến dạng nền đất vẫn chưa được đánh giá đầy đủ trong khuôn khổ mô hình kiểm soát chuyển vị. Đặc biệt, tại Việt Nam, các nghiên cứu ứng dụng mô hình kiểm soát chuyển vị trong dự báo biến dạng nền đất còn hạn chế, và việc kiểm chứng cũng như áp dụng mô hình kiểm soát chuyển vị cho điều kiện đất yếu bão hòa đặc trưng của Thành phố Hồ Chí Minh vẫn chưa được nghiên cứu một cách có hệ thống.

Tại Việt Nam, một số nghiên cứu gần đây đã bước đầu xem xét ảnh hưởng của các tham số hình học đến lún mặt đất trong quá trình thi công hầm khiên đào thông qua mô phỏng số, chủ yếu tập trung vào các bài toán hầm song song và phân tích theo hướng tham số trong những điều kiện địa chất cụ thể trong nghiên cứu [14], [15]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này phần lớn vẫn dựa trên các tiếp cận mô phỏng truyền thống dựa trên ứng suất hoặc giảm tải và mang tính nghiên cứu trường hợp, trong khi việc áp dụng một cách có hệ thống mô hình kiểm soát chuyển vị nhằm phân tích định lượng ảnh hưởng của các tham số hình học đặc trưng của hầm trong điều kiện đất yếu bão hòa vẫn còn hạn chế.

Xuất phát từ thực tế đó, nghiên cứu này sử dụng mô hình kiểm soát chuyển vị kết hợp với mô hình vật liệu rỗng đàn hồi (poroelastic model - PEM) trong khuôn khổ phương pháp phần tử hữu hạn để mô phỏng biến dạng nền đất quanh hầm trong điều kiện đất yếu bão hòa. Bài toán Hầm thử nghiệm Heathrow (The Heathrow Express Trial Tunnel) được lựa chọn để kiểm chứng khả năng tái hiện biến dạng của mô hình theo cách tiếp cận nghiên cứu [10] trước khi áp dụng cho nghiên cứu điển hình tuyến Metro số 1 Thành phố Hồ Chí Minh (đoạn Bến Thành - Suối Tiên). Trên cơ sở mô hình đã được kiểm chứng, nghiên cứu tiến hành phân tích có hệ thống ảnh hưởng của các tham số hình học chủ yếu, bao gồm đường kính hầm, độ sâu chôn hầm và tỷ lệ thất thoát thể tích, đến biến dạng nền đất.

Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ xu hướng biến dạng nền đất do đào hầm trong điều kiện đất yếu bão hòa, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học tham khảo cho việc đánh giá và dự báo xu hướng biến dạng nền đất, đặc biệt là lún mặt đất, khi ứng dụng mô hình kiểm soát chuyển vị trong các bài toán hầm đô thị điển hình tại Việt Nam, nơi điều kiện địa chất phức tạp và yêu cầu kiểm soát biến dạng ngày càng khắt khe.

2. MÔ HÌNH VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Biến dạng nền đất do đào hầm được mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong phần mềm ABAQUS, cho phép mô tả sự phát triển của trường ứng suất - biến dạng và hiệu ứng giải phóng ứng suất theo thời gian trong đất nền [16]. Trong nghiên cứu này, nền đất được lý tưởng hóa dưới dạng cấu trúc nhiều lớp, trong đó các lớp đất sét mềm bão hòa đóng vai trò chi phối đến xu hướng biến dạng. Phân tích được thực hiện trong phạm vi biến dạng nhỏ, sử dụng mô hình vật liệu rỗng đàn hồi, không xét đến cơ chế phá hoại hay quá trình thoát nước theo thời gian.

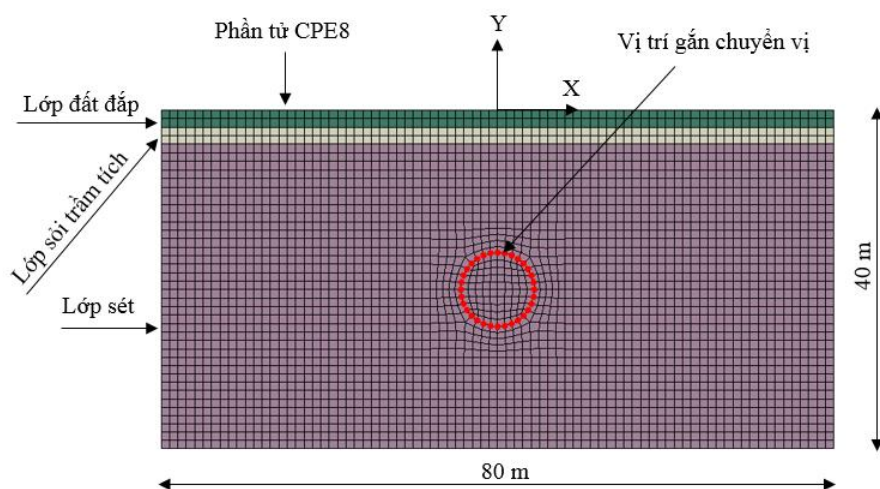
Mô hình kiểm soát chuyển vị mô tả quá trình giải phóng ứng suất bằng chuyển vị cưỡng bức tại biên hầm, thay vì loại bỏ tải trọng hay ứng suất ban đầu như trong mô hình kiểm soát lực. Cách tiếp cận này phù hợp khi cần phân tích xu hướng hội tụ biến dạng của khối đất mà không xét trực tiếp đến cơ chế phá hoại [10]. Việc lựa chọn mô hình vật liệu rỗng đàn hồi cho phép xem xét ảnh hưởng của độ rỗng và áp lực lỗ rỗng ban đầu, đồng thời giả định ứng xử đàn hồi tuyến tính của khung hạt đất, một giả định thường được chấp nhận trong điều kiện đất

sét bão hòa, biến dạng nhỏ và trạng thái ứng suất chưa tới giới hạn phá hoại [4], [17]. Điều kiện địa chất và mức độ biến dạng quan trắc trong các nghiên cứu thực tế tại Việt Nam cho thấy các giả định này là phù hợp trong giai đoạn thi công ban đầu của hầm [3]. Cách tiếp cận này được lựa chọn nhằm kiểm tra khả năng mô phỏng xu hướng biến dạng nền đất trong phạm vi đàn hồi tuyến tính, phù hợp với mục tiêu nghiên cứu.

Trong nghiên cứu này, việc phân loại đất yếu theo các tiêu chuẩn địa kỹ thuật không phải là mục tiêu trọng tâm. Mô hình số được thiết lập nhằm phân tích xu hướng biến dạng nền đất trong phạm vi đàn hồi - rỗng, với các thông số cơ lý đại diện cho từng lớp đất được kế thừa từ các nghiên cứu và số liệu đã công bố, phù hợp với mục tiêu khảo sát tham số của nghiên cứu.

Mô hình phần tử hữu hạn được thiết lập trong điều kiện biến dạng phẳng, như thể hiện trong Hình 1. Phần tử CPE8 (8 nút, 2D) được sử dụng cho khối đất, với biên đáy cố định hoàn toàn ($U_x = U_y = 0$), hai biên bên không chế chuyển vị ngang ($U_x = 0$), và biên trên tự do, mô phỏng điều kiện nền tự nhiên.

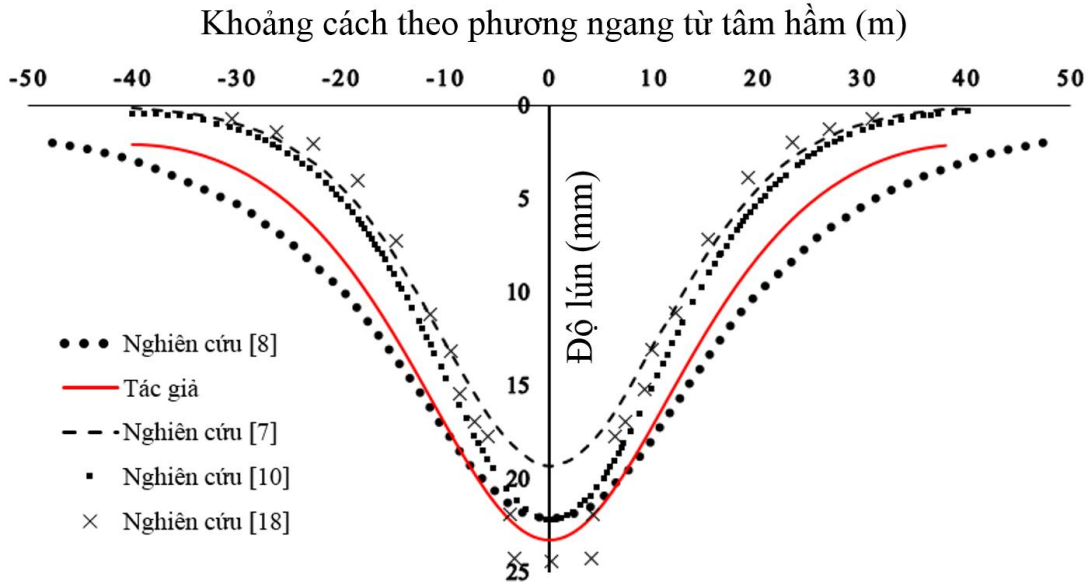
Hiệu ứng đào hầm được mô phỏng bằng chuyển vị cưỡng bức hướng tâm tại các nút biên, phản ánh quá trình giải phóng ứng suất dọc theo chu vi hầm. Phân bố chuyển vị được xác định dựa trên nguyên lý hội tụ biến dạng không đồng đều được trình bày trong nghiên cứu [10]. Nghiên cứu này cũng trình bày phương pháp tính toán giá trị chuyển vị tại mỗi điểm trên biên hầm, bảo đảm phân bố chuyển vị giảm dần từ đỉnh xuống đáy hầm và hội tụ về một điểm đặc trưng giữa tâm và đáy. Điểm này được xác định bởi tham số β . Giá trị β biểu thị đặc trưng hình học của vùng hội tụ, β càng nhỏ thì chuyển vị tập trung ở phần đỉnh hầm, β càng lớn thì phân bố đều hơn quanh biên [10].



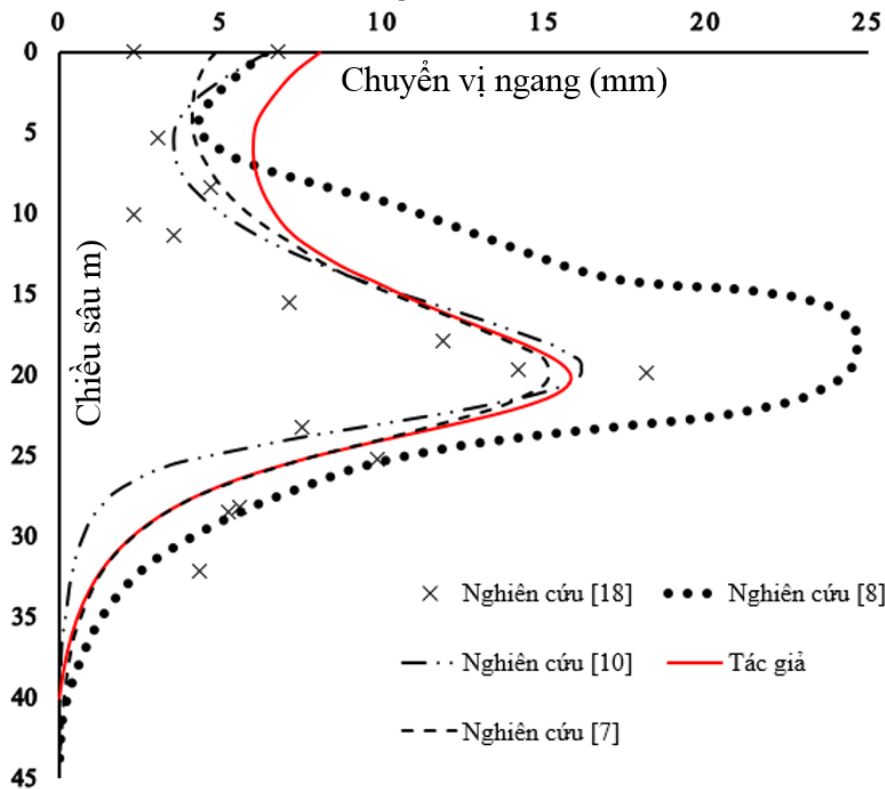
Hình 1. Mô hình phần tử hữu hạn (bài toán kiểm chứng).

Bài toán Hầm thử nghiệm Heathrow được lựa chọn để kiểm chứng phương pháp mô phỏng. Mô hình phần tử hữu hạn của bài toán được thể hiện trong Hình 1. Hầm có đường kính (D) 8,74m và đỉnh hầm tại độ sâu (C) 16,8m, tương ứng tỷ lệ $C/D = 1,92$. Quá trình đào được mô phỏng bằng DCM với tham số $\beta = 0,8$, phản ánh đặc trưng hội tụ biến dạng của đất quanh hầm.

Hình 2 trình bày đường cong lún bề mặt theo phương ngang, trong khi Hình 3 thể hiện phân bố chuyển vị ngang theo chiều sâu tại vị trí cách tâm hầm 6m. Kết quả mô phỏng được so sánh với các kết quả trong các nghiên cứu [7], [8], [10], [18] nhằm đánh giá mức độ phù hợp và độ tin cậy của mô hình.



Hình 2. Kết quả độ lún tại mặt nền.



Hình 3. Kết quả chuyển vị theo chiều sâu (vị trí xuất kết quả cách 6m so với tâm hầm).

Quan sát Hình 2 cho thấy đường cong lún bề mặt có dạng “máng” đối xứng, đặc trưng cho biến dạng nền đất khi đào hầm trong đất sét yếu. Độ lún cực đại đạt khoảng 23,22mm, nhỏ hơn giá trị thu được từ dữ liệu thực địa 3-5%, cho thấy mô hình mô phỏng bám sát xu hướng thực tế. Kết quả mô phỏng nằm giữa các đường cong trong nghiên cứu [7] và [8], thể hiện sự tương đồng tốt với các kết quả phân tích ngược và mô phỏng số. Phạm vi vùng ảnh hưởng của biến dạng khoảng 25-30m tính từ tâm hầm, phù hợp với kết quả phân tích lý thuyết và các nghiên cứu mô phỏng số về biến dạng nền đất do đào hầm [10], [12], [13].

Hình 3 cho thấy chuyển vị ngang giảm dần theo chiều sâu, tập trung lớn nhất tại khu vực đỉnh hầm trong phạm vi 1-1,5D. Xu hướng này phù hợp với kết quả mô phỏng số và đo đạc được công bố trong các nghiên cứu [7], [8], [18]. Biến dạng tại vùng đỉnh hầm lớn hơn do khối đất phía trên chịu giải phóng ứng suất mạnh hơn, trong khi vùng đáy hầm có xu hướng ổn định hơn. Sự phân bố này phản ánh đúng đặc trưng hội tụ biến dạng không đồng đều của đất quanh hầm được mô tả trong nghiên cứu [8].

Nhìn chung, kết quả mô phỏng thể hiện sự tương đồng tốt về hình dạng và biên độ so với các nghiên cứu [7], [8], [10], [18]. Điều này cho thấy mô hình kiểm soát chuyển vị kết hợp mô hình vật liệu rỗng đàn hồi có khả năng tái hiện tốt xu hướng biến dạng của nền đất trong giai đoạn đàn hồi, đồng thời cho kết quả chuyển vị lớn nhất theo phương đứng tại tâm hầm sát với kết quả các nghiên cứu trước. Mô hình được giới hạn trong phạm vi biến dạng nhỏ, không xét đến cơ chế phá hoại hay thoát nước, do đó kết quả mô phỏng chủ yếu phản ánh xu hướng biến dạng đàn hồi của khối đất quanh hầm.

Các thông số cơ lý của đất nền và thông số hình học hầm không được trình bày chi tiết tại Mục 2 mà được xác định tương ứng cho từng bài toán cụ thể. Cụ thể, các thông số vật liệu và đất nền của bài toán kiểm chứng được trình bày tại Mục 3, trong khi các thông số địa chất - hình học phục vụ nghiên cứu điển hình tuyến Metro số 1 (Bến Thành - Suối Tiên) được trình bày tại Mục 4, trên cơ sở số liệu khảo sát và các nghiên cứu đã công bố.

Nghiên cứu này không nhằm phân tích hoặc so sánh các công nghệ đào hầm cụ thể; hiệu ứng đào hầm được mô phỏng thông qua chuyển vị cưỡng bức tại biên hầm theo mô hình kiểm soát chuyển vị, nhằm tập trung đánh giá xu hướng biến dạng nền đất trong phạm vi đàn hồi. Do đó, cần lưu ý rằng các kết quả mô phỏng trong nghiên cứu này phản ánh ứng xử ngắn hạn của nền đất bão hòa trong khuôn khổ mô hình vật liệu rỗng đàn hồi; các hiệu ứng cổ kết theo thời gian, sự phát triển - tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng và ứng xử không đàn hồi của đất sét yếu chưa được xem xét.

3. KHẢO SÁT SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA ĐƯỜNG KÍNH HẦM, ĐỘ SÂU CHÔN HẦM VÀ THẤT THOÁT THỂ TÍCH ĐẾN BIẾN DẠNG NỀN ĐẤT

Bài toán hầm thử nghiệm Heathrow được tái sử dụng phục vụ việc khảo sát đường kính hầm (D), độ sâu chôn hầm (H), và thất thoát thể tích (V_L) đến biến dạng nền đất. Khu vực khảo sát gồm ba lớp đất chính, các đặc trưng cơ lý của từng lớp đất được trình bày trong Bảng 1.

Hầm có đường kính (D) 8,74m và đỉnh hầm tại độ sâu (C) 16,8m, tương ứng tỷ lệ $C/D = 1,92$. Mô hình kiểm soát chuyển vị kết hợp mô hình vật liệu rỗng đàn hồi đã kiểm chứng tại Mục 2 được sử dụng để khảo sát ảnh hưởng của D, H, V_L đến biến dạng nền đất xung quanh hầm.

Bảng 1. Thông số địa chất đại diện cho nền đất nhiều lớp có chứa đất yếu (đất sét mềm bão hòa) - Bài toán kiểm chứng Heathrow [18], [19]

	Ký hiệu	Lớp 1 Đất đắp nhân tạo	Lớp 2 Sỏi tràm tích	Lớp 3 Sét
Chiều dày (m)	h	2	2	-
Trọng lượng riêng (kN/m^3)	γ	19	20	20
Hệ số nén đàn hồi theo logarit	κ	-	-	0,0085
Mô đun đàn hồi (GPa)	E	0,01	0,05	-
Hệ số Poisson	ν	0,3	0,3	0,15
Hệ số rỗng ban đầu	e_0	-	-	0,82
Hệ số áp lực đất chủ động	K_0	0,43	0,43	1,15

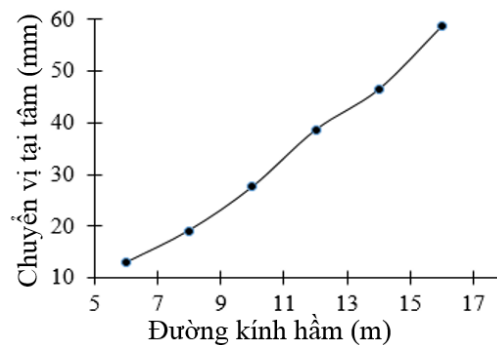
3.1. Ảnh hưởng của đường kính hầm

Đường kính hầm là thông số hình học chủ đạo trong thiết kế hầm, ảnh hưởng trực tiếp đến phạm vi lan truyền ứng suất và mức độ biến dạng của khối đất xung quanh [8], [9]. Các giá trị đường kính khảo sát được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Giá trị đường kính hầm tại các trường hợp

STT	Ký hiệu	Đường kính hầm (m)
1	TH1	6
2	TH2	8
3	TH3	10
4	TH4	12
5	TH5	14
6	TH6	16

Hình 4 thể hiện mối quan hệ giữa đường kính hầm và chuyển vị thẳng đứng lớn nhất của mặt đất, được xác định trên trục đối xứng đi qua tâm hầm. Kết quả mô phỏng cho thấy, khi đường kính tăng, chuyển vị tại tâm hầm tăng gần tuyến tính. Cụ thể, chuyển vị tăng từ 12,9mm ở $D = 6\text{m}$ lên 58,8mm ở $D = 16\text{m}$. Biến thiên này phản ánh rõ cơ chế vật lý của khối đất. Khi kích thước hầm lớn, vùng chịu giải phóng ứng suất mở rộng, làm biến dạng tổng thể tăng nhanh. Kết quả này phù hợp với các quan sát về cơ chế phát triển biến dạng trong nghiên cứu [8], trong đó ứng suất tại vùng vai hầm (springline) và đỉnh hầm gia tăng đáng kể, dẫn đến sự phát triển nhanh của biến dạng và phản ánh rõ tính phi tuyến trong quan hệ giữa điều kiện hình học hầm và chuyển vị.



Hình 4. Quan hệ giữa đường kính hầm và chuyển vị tại tâm hầm.

Độ dốc của đường cong trong Hình 4 mô tả tốc độ gia tăng chuyển vị tỷ lệ thuận với kích thước hầm. Khi đường kính hầm tăng vượt ngưỡng 10-12 m, phạm vi và cường độ biến dạng đất mở rộng nhanh, làm gia tăng tốc độ hội tụ biến dạng. Xu hướng này phù hợp với dữ liệu đo đạc thực tế tại hầm thử nghiệm Heathrow [18] và phân tích lý thuyết [9]. Kết quả cũng tương đồng với các mô hình kiểm soát chuyển vị và các nghiên cứu mô phỏng số gần đây về ảnh hưởng của tham số hình học đến biến dạng nền đất [10], [11], [20].

Về mặt cơ học, hiện tượng này có thể được lý giải như sau: Khi đường kính hầm tăng, vùng chịu giải phóng ứng suất mở rộng, dẫn đến sự gia tăng nhanh ứng suất cắt và giảm áp suất hữu hiệu trong lớp đất yếu xung quanh. Điều này làm suy giảm hiệu quả độ cứng tương đương của khối đất trong khu vực chịu giải phóng ứng suất, dẫn đến sự gia tăng nhanh chuyển vị và xu hướng hội tụ biến dạng phi tuyến tại tâm hầm.

Kết quả nghiên cứu cung cấp các xu hướng định lượng về ảnh hưởng của kích thước hầm đến biến dạng nền đất trong điều kiện đất yếu, có thể được sử dụng như cơ sở tham khảo

trong giai đoạn đánh giá và thiết kế sơ bộ công trình hầm. Khi kích thước hầm tăng, cần xem xét thận trọng các biện pháp kiểm soát biến dạng nhằm hạn chế phạm vi lan truyền biến dạng và độ lún bề mặt, đặc biệt trong điều kiện địa chất yếu và bão hòa.

3.2. Ảnh hưởng của độ sâu chôn hầm

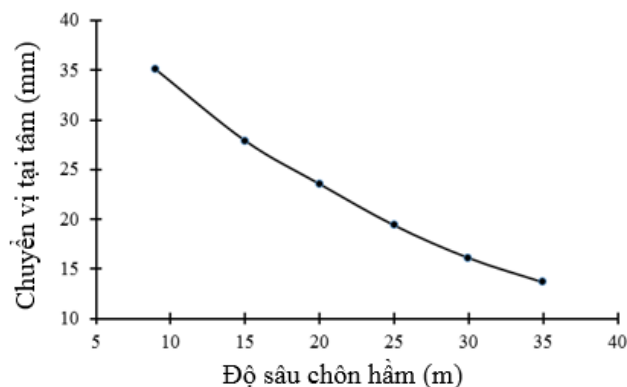
Độ sâu chôn hầm quyết định mức độ bao phủ của khối đất phía trên và khả năng “hạn chế sự lan truyền” biến dạng của nền xung quanh hầm. Khi hầm được đặt sâu hơn, khối đất phía trên hoạt động như một tấm chắn đàn hồi, giúp hạn chế sự lan truyền ứng suất và giảm đáng kể biến dạng tổng thể [9]. Các giá trị độ sâu khảo sát được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Giá trị độ sâu chôn hầm tương ứng tại các trường hợp.

STT	Ký hiệu	Độ sâu chôn hầm
1	TH1	9m
2	TH2	15m
3	TH3	20m
4	TH4	25m
5	TH5	30m
6	TH6	35m

Hình 5 thể hiện quan hệ giữa độ sâu chôn hầm và chuyển vị thẳng đứng lớn nhất của mặt đất, được xác định trên trục đối xứng đi qua tâm hầm. Kết quả mô phỏng cho thấy chuyển vị tại tâm hầm giảm rõ rệt khi độ sâu tăng, từ khoảng 35mm ($H = 9\text{m}$) xuống 13,7mm ($H = 35\text{m}$). Sự suy giảm này diễn ra phi tuyến: trong giai đoạn đầu ($H < 25\text{m}$), chuyển vị giảm nhanh khoảng 20%, sau đó chậm dần khi độ sâu tiếp tục tăng, phản ánh cơ chế phân bố lại ứng suất trong khối đất.

Tổng mức giảm tương ứng khoảng 61% biến dạng tổng thể cho thấy ảnh hưởng rõ rệt của ứng suất phủ gia tăng theo độ sâu, làm tăng các thành phần ứng suất bao quanh và từ đó làm giảm mức độ biến dạng của nền đất. Kết quả này phù hợp với xu hướng lý thuyết và các thí nghiệm trong nghiên cứu [9] cũng như mô phỏng số theo mô hình kiểm soát chuyển vị [10]. Cả hai nghiên cứu đều khẳng định độ sâu chôn hầm là tham số chủ đạo kiểm soát phạm vi và cường độ vùng biến dạng quanh hầm, đồng thời quyết định phạm vi ảnh hưởng đến công trình mặt đất phía trên.



Hình 5. Quan hệ giữa độ sâu chôn hầm và chuyển vị tại tâm hầm.

Hiện tượng giảm chuyển vị phi tuyến này phản ánh sự thay đổi trong cơ chế phân bố và truyền ứng suất theo chiều sâu. Khi độ sâu chôn hầm tăng, tải trọng phủ của lớp đất phía trên gia tăng, làm tăng ứng suất thẳng đứng và các thành phần ứng suất bao quanh hầm, từ đó làm giảm mức độ biến dạng của nền đất. Sự tái phân bố ứng suất theo cả phương đứng và phương

ngang làm giảm biên độ tác động của tải trọng lên biên hầm. Đồng thời, đất phía trên làm việc dưới mức ứng suất cao hơn, dẫn đến sự gia tăng độ cứng làm việc hiệu dụng và hạn chế sự mở rộng của vùng biến dạng. Do đó, biến dạng tổng thể của nền đất giảm dần theo độ sâu chôn hầm, phù hợp với quy luật phân bố ứng suất và xu hướng giảm biến dạng nền đất theo chiều sâu được ghi nhận trong nghiên cứu [9].

Về mặt ứng dụng, kết quả mô phỏng cho thấy việc tăng độ sâu chôn hầm có thể góp phần làm giảm lún mặt đất và kiểm soát biến dạng ngang trong điều kiện đất yếu. Tuy nhiên, độ sâu chôn hầm lớn hơn thường đi kèm với yêu cầu thi công phức tạp và chi phí gia tăng. Do đó, độ sâu chôn hầm cần được xem xét thận trọng trong giai đoạn thiết kế sơ bộ, trên cơ sở cân nhắc giữa yêu cầu kiểm soát biến dạng nền đất và các điều kiện địa chất - kỹ thuật cụ thể của công trình.

3.3. Ảnh hưởng của thất thoát thể tích

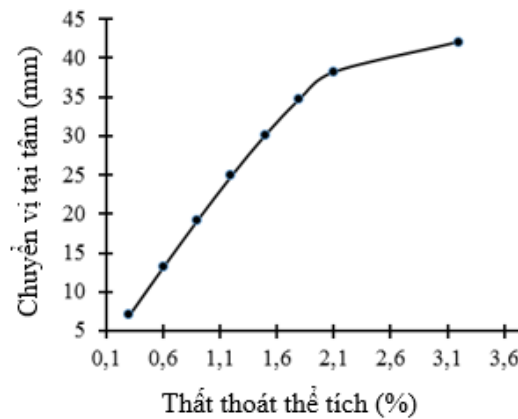
Thất thoát thể tích (V_L) là một tham số tổng hợp thường được sử dụng để đặc trưng cho mức độ hội tụ của nền đất vào khoảng trống hầm trong quá trình đào, được xác định thông qua hình dạng và biên độ lún mặt đất. Tham số này được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu giải tích, thí nghiệm và mô phỏng số nhằm đánh giá ảnh hưởng của quá trình đào hầm đến biến dạng nền đất [5], [7], [9]. Trong các mô hình số hiện đại, đặc biệt là các mô hình kiểm soát chuyển vị, ảnh hưởng của thất thoát thể tích được tái hiện gián tiếp thông qua trường chuyển vị cưỡng bức tại biên hầm, qua đó cho phép đánh giá xu hướng biến dạng nền đất mà không cần mô tả chi tiết ứng xử phi tuyến của vật liệu [10], [11], [13]. Khi thất thoát thể tích tăng, mức độ hội tụ của nền đất vào khoảng trống hầm gia tăng, kéo theo sự mở rộng của vùng ảnh hưởng biến dạng và biên độ lún bề mặt lớn hơn.

Các giá trị thất thoát thể tích được lựa chọn trong nghiên cứu này nằm trong khoảng từ 0,3% đến 3,2%, nhằm bao quát các điều kiện thi công từ được kiểm soát tốt đến bất lợi. Khoảng giá trị này phù hợp với các giá trị thất thoát thể tích thường được ghi nhận trong các nghiên cứu kinh điển về đào hầm trong đất mềm [5], các nghiên cứu giải tích và thí nghiệm lý tâm [7], [9], cũng như các nghiên cứu mô phỏng và quan trắc thực tế đối với hầm khiên đào trong điều kiện đô thị [1], [2], [3]. Việc khảo sát nhiều mức V_L khác nhau cho phép đánh giá có hệ thống ảnh hưởng của thất thoát thể tích đến xu hướng biến dạng nền đất trong khuôn khổ mô hình kiểm soát chuyển vị.

Bảng 4. Bảng tổng hợp giá trị khảo sát V_L .

STT	Ký hiệu	Thất thoát thể tích
1	TH1	0,3%
2	TH2	0,6%
3	TH3	0,9%
4	TH4	1,2%
5	TH5	1,5%
6	TH6	1,8%
7	TH7	2,1%
8	TH8	3,2%

Hình 6 thể hiện mối quan hệ giữa tỷ lệ thất thoát thể tích và chuyển vị thẳng đứng lớn nhất của mặt đất, được xác định trên trục đối xứng đi qua tâm hầm. Kết quả mô phỏng cho thấy, khi V_L tăng, chuyển vị tăng nhanh theo xu hướng phi tuyến. Cụ thể, khi V_L tăng từ 0,3% lên 1,2%, chuyển vị tăng từ 7,0mm lên 24,9mm; khi tiếp tục tăng đến 3,2%, chuyển vị đạt khoảng 42,1mm.



Hình 6. Quan hệ giữa V_L và chuyển vị.

Khi tỷ lệ thất thoát thể tích vượt khoảng 1,5%, quan hệ giữa chuyển vị và V_L thể hiện xu hướng phi tuyến rõ rệt hơn, cho thấy sự gia tăng nhanh của biên độ biến dạng và sự mở rộng phạm vi vùng chịu ảnh hưởng quanh hầm. Điều này phản ánh mức độ hội tụ tương đương của nền đất vào khoảng trống hầm tăng lên, kéo theo sự lan truyền biến dạng mạnh hơn từ khu vực biên hầm lên bề mặt đất.

Độ dốc của đường cong trong Hình 6 cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa hai giai đoạn biến dạng: khi V_L nhỏ hơn khoảng 1,5%, biến dạng chủ yếu tập trung quanh biên hầm; tuy nhiên, khi vượt qua ngưỡng này, phạm vi biến dạng mở rộng nhanh và ảnh hưởng rõ rệt đến khu vực gần bề mặt, dẫn đến độ lún tổng thể tăng đáng kể. Xu hướng này thể hiện rõ tính phi tuyến của mối quan hệ giữa V_L và đáp ứng chuyển vị của nền đất trong phạm vi khảo sát. Giá trị V_L lớn hơn tương ứng với mức độ hội tụ nền đất mạnh hơn, qua đó làm gia tăng chuyển vị và mở rộng vùng ảnh hưởng biến dạng quanh hầm [5], [9], [10].

Kết quả mô phỏng phù hợp với các nghiên cứu giải tích và thí nghiệm đã được công bố [5], [9], cũng như các mô phỏng số sử dụng mô hình kiểm soát chuyển vị [10], trong đó thất thoát thể tích được xem là một trong những tham số có ảnh hưởng chi phối đến độ lún bề mặt và đáp ứng chuyển vị của nền đất. Xu hướng này cũng tương đồng với số liệu quan trắc thực tế tại các hầm đào trong điều kiện đất yếu [3], [8], cho thấy mô hình có khả năng tái hiện hợp lý xu hướng biến dạng nền đất.

Từ góc độ ứng dụng, kết quả phân tích cho thấy tỷ lệ thất thoát thể tích là một tham số có ảnh hưởng đáng kể đến xu hướng biến dạng nền đất trong các bài toán mô phỏng đào hầm. Các giá trị V_L nhỏ hơn trong phạm vi khảo sát cho thấy xu hướng giảm biên độ lún bề mặt, qua đó nhấn mạnh vai trò của V_L như một tham số quan trọng trong việc đánh giá và so sánh xu hướng biến dạng nền đất bằng mô hình số. Đồng thời, V_L cũng là tham số đầu vào cần được xem xét trong quá trình xây dựng và hiệu chỉnh các mô hình mô phỏng nhằm đánh giá phạm vi ảnh hưởng của biến dạng nền đất do đào hầm.

4. NGHIÊN CỨU ĐIỂN HÌNH CHO TUYẾN METRO SỐ 1 (BẾN THÀNH - SUỐI TIỀN)

Trong nghiên cứu điển hình này, các thông số hình học hầm, thông số cơ lý đất nền và các tham số mô hình được lựa chọn dựa trên số liệu khảo sát địa chất khu vực Km 0+980 - Km 0+983 và các nghiên cứu đã công bố tại khu vực Thành phố Hồ Chí Minh [1], [2], [3]. Các thông số cơ bản của nền đất được tổng hợp trong Bảng 5, trong khi các tham số mô hình kiểm soát chuyển vị (DCM), bao gồm hệ số hội tụ β , được xác định theo cơ sở lý thuyết và phương pháp đề xuất trong nghiên cứu nền tảng trong nghiên cứu [10]. Nghiên cứu này không

xét bài toán cổ kết theo thời gian; việc mở rộng mô hình sang phân tích thấm - cổ kết và ứng xử không đàn hồi của đất sét yếu sẽ được xem xét trong các nghiên cứu tiếp theo.

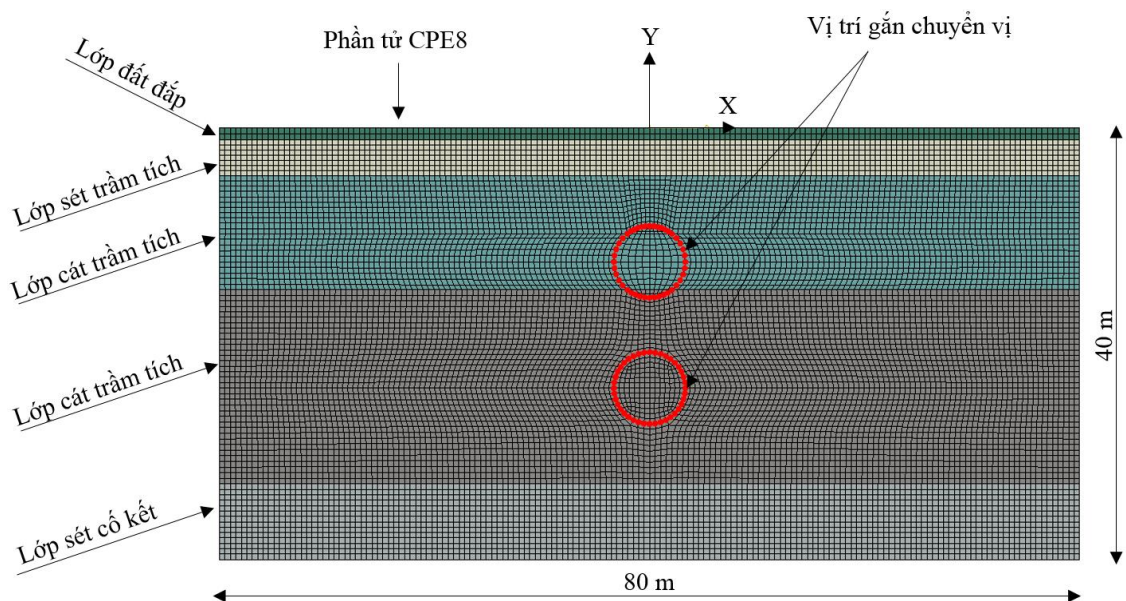
Kết quả mô phỏng được thực hiện cho tuyến Metro số 1 (Bến Thành - Suối Tiên) nhằm kiểm chứng khả năng dự báo biến dạng nền đất yếu của mô hình kiểm soát chuyển vị kết hợp mô hình vật liệu rỗng đàn hồi trong điều kiện địa chất thực tế khu vực TP. Hồ Chí Minh.

Bảng 5. Thông số địa chất tại Km 0+980, đại diện cho nền đất nhiều lớp có chứa các lớp đất yếu (đất sét mềm bão hòa) [1] [2] [3].

	Ký hiệu	Lớp 1 Lớp Đất đắp	Lớp 2 Sét trầm tích	Lớp 3 Cát trầm tích	Lớp 4 Cát trầm tích	Lớp 5 Sét cổ kết
Chiều dày (m)	h	1,1	3,3	10,6	18	7
Trọng lượng riêng bão hòa (kN/m ³)	γ	19	16,5	20,5	20,5	21
Hệ số Poisson	ν	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Hệ số áp lực đất chủ động	K_0	0,55	0,61	0,5	0,46	0,52
Góc nội ma sát	φ	27	23	30	33	29

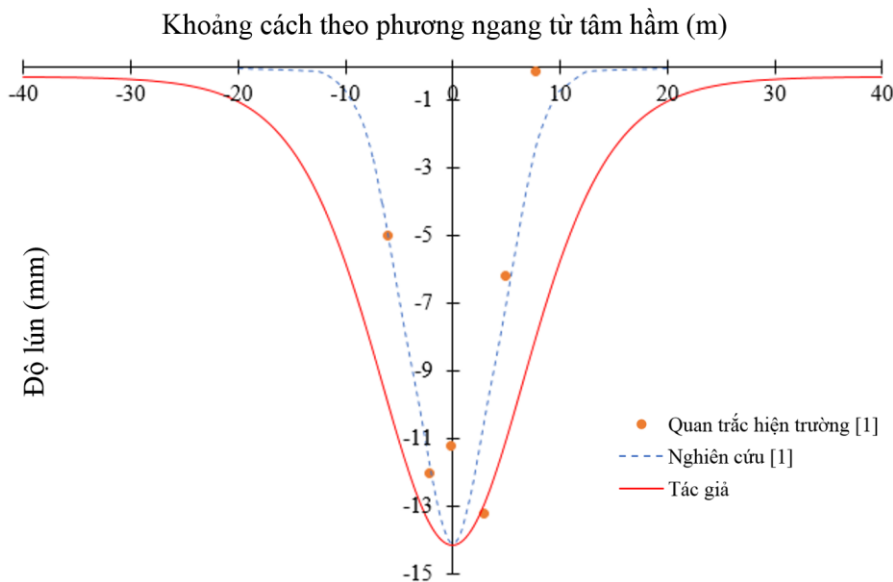
Khu vực nghiên cứu nằm tại đoạn Km 0+980 - Km 0+983, nơi hai hầm song song được bố trí ở hai cao độ khác nhau, gồm: Hầm hướng Tây (tuyến tàu chạy từ Bến Thành → Ba Son) và Hầm hướng Đông (tuyến tàu chạy từ Ba Son → Suối Tiên). Việc bố trí hai hầm phù hợp với đặc điểm địa chất phức tạp của khu vực trung tâm TP. Hồ Chí Minh. Các đặc trưng cơ lý của từng lớp đất được tổng hợp trong Bảng 5. Các giá trị này được hiệu chỉnh theo số liệu thực nghiệm và các nghiên cứu địa chất khu vực TP. Hồ Chí Minh [1], [2], [3].

Hệ thống hầm đôi được bố trí theo dạng song song, với đường kính $D = 6,65\text{m}$ cho cả hai hầm. Hầm hướng Tây có cao độ tâm $-12,4\text{m}$ và hệ số hội tụ $\beta = 0,91$; Hầm hướng Đông nằm ở cao độ tâm $-24,1\text{m}$ với $\beta = 0,62$. Giá trị β được xác định theo mô hình kiểm soát chuyển vị đề cập trong nghiên cứu [10], trong đó β phụ thuộc vào tỷ lệ độ sâu chôn hầm trên đường kính hầm (C/D). Tham số này phản ánh sự khác biệt về vị trí hội tụ biến dạng và mức độ giải phóng ứng suất quanh biên hầm tại các độ sâu khác nhau.



Hình 7. Mô hình phần tử hữu hạn tại Km 0+980.

Hình 8 thể hiện đường cong lún bề mặt thu được từ mô phỏng và so sánh với dữ liệu đo đạc thực tế tại hiện trường [1]. Kết quả mô phỏng cho thấy độ lún cực đại tại tâm hầm đạt 14,16 mm, sai khác 0,9% so với số liệu quan trắc thực tế (13,24 mm) và 0,3% so với giá trị thực nghiệm (14,12 mm). Sai khác nhỏ hơn 1% cho thấy mô hình kiểm soát chuyển vị kết hợp mô hình vật liệu rỗng đàn hồi có khả năng tái hiện hợp lý độ lớn lún đặc trưng, qua đó có thể được sử dụng như một công cụ tham khảo trong việc đánh giá xu hướng độ lún bề mặt và phạm vi vùng biến dạng quanh hầm trong điều kiện đất yếu. Phạm vi áp dụng của mô hình phù hợp với $VL \leq 1,5\%$, $D \leq 8$ m và nền đất yếu bão hòa có ứng xử đàn hồi – rỗng. Các kết quả phản ánh ứng xử ngắn hạn của nền đất trong giai đoạn thi công ban đầu, trong phạm vi biến dạng đàn hồi – rỗng. Việc so sánh này nhằm đánh giá tính nhất quán của xu hướng biến dạng và độ lớn lún, chứ không nhằm đạt được sự trùng khớp theo từng giai đoạn thi công với số liệu quan trắc hiện trường.



Hình 8. Kết quả độ lún tại mặt nền. So sánh trong hình tập trung vào giá trị độ lún cực đại và xu hướng máng lún tổng thể sau khi hoàn thành thi công, không nhằm so khớp diễn biến lún theo thời gian TBM.

Đường cong lún trong Hình 8 có dạng máng đối xứng điển hình, với vùng ảnh hưởng khoảng 25-30m tính từ tâm hầm. Dạng cong và biên độ lún thu được phù hợp với các kết quả đo đạc và phân tích thực nghiệm đã được công bố trong các nghiên cứu [5], [8], [9], đồng thời tương đồng với các mô phỏng số sử dụng mô hình kiểm soát chuyển vị trong các nghiên cứu nền tảng và các nghiên cứu gần đây [10], [12], [13]. Dạng biến dạng này là đặc trưng thường được ghi nhận đối với các bài toán hầm khiên đào trong môi trường đất sét mềm, phản ánh xu hướng phân bố không đồng đều của trường chuyển vị và sự tập trung biến dạng quanh khu vực hầm.

Sự tương đồng giữa kết quả mô phỏng và dữ liệu thực tế cho thấy mô hình kiểm soát chuyển vị kết hợp với mô hình vật liệu rỗng đàn hồi có khả năng tái hiện hợp lý độ lớn, hình dạng và phạm vi vùng biến dạng, đặc biệt trong điều kiện đất sét bão hòa. Việc xét đến ảnh hưởng của độ rỗng và áp lực lỗ rỗng ban đầu cho phép mô hình vật liệu rỗng đàn hồi phản ánh được xu hướng giảm thể tích hiệu dụng trong giai đoạn ứng xử đàn hồi - rỗng của đất trong quá trình đào hầm, phù hợp với các quan sát thực nghiệm và phân tích cơ học đã được ghi nhận trong các nghiên cứu [2], [9].

Về mặt cơ học đất, độ dốc hai bên của đường cong lún phản ánh mức độ lan truyền và tái phân bố ứng suất cũng như sự gia tăng biến dạng trong lớp đất phía trên hầm. Sự hội tụ biến dạng mạnh nhất xảy ra tại khu vực đáy hầm, nơi quá trình giải phóng ứng suất bao quanh dẫn đến chuyển vị hướng tâm lớn nhất. Kết quả này phù hợp với xu hướng biến dạng không đồng đều của nền đất được ghi nhận trong các mô hình kiểm soát chuyển vị [10].

Kết quả mô phỏng cho thấy mức độ phù hợp tốt với số liệu đo đạc hiện trường và các kết quả phân tích đã được công bố trước đây [1]. Sự tương đồng này cho thấy mô hình có khả năng tái hiện hợp lý xu hướng biến dạng nền đất, qua đó có thể được sử dụng như một công cụ tham khảo trong việc đánh giá xu hướng biến dạng và dự báo độ lún bề mặt cho các công trình hầm trong điều kiện đất yếu tương tự.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã áp dụng mô hình kiểm soát chuyển vị (DCM) trong khuôn khổ phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), kết hợp với mô hình vật liệu rỗng đàn hồi (PEM), để phân tích xu hướng biến dạng nền đất khi đào hầm trong điều kiện đất yếu bão hòa. Cách tiếp cận này cho phép tái hiện hợp lý sự phân bố chuyển vị và xu hướng hội tụ biến dạng quanh biên hầm trong phạm vi biến dạng đàn hồi.

Kết quả phân tích cho thấy biến dạng nền đất chịu ảnh hưởng đồng thời của các tham số hình học và các tham số mô phỏng quá trình đào hầm, trong đó đường kính hầm, độ sâu chôn hầm và tỷ lệ thất thoát thể tích đóng vai trò chi phối đối với xu hướng lún mặt đất và phạm vi vùng biến dạng. Mô hình kiểm soát chuyển vị thể hiện khả năng mô tả phù hợp mối quan hệ phi tuyến giữa các tham số này và đáp ứng biến dạng của nền đất, phù hợp với các xu hướng đã được ghi nhận trong các nghiên cứu quan trắc và mô phỏng trước đây.

Thông qua nghiên cứu điển hình tuyến Metro số 1 Thành phố Hồ Chí Minh (đoạn Bến Thành - Suối Tiên), mô hình cho thấy khả năng tái hiện và dự báo xu hướng biến dạng nền đất trong phạm vi nghiên cứu, với sai lệch nhỏ so với số liệu quan trắc hiện trường. Kết quả nghiên cứu có thể được sử dụng như một công cụ tham khảo trong việc đánh giá xu hướng biến dạng và dự báo độ lún mặt đất cho các công trình hầm trong điều kiện địa chất tương tự.

Cần lưu ý rằng nghiên cứu này không nhằm mô phỏng quá trình phá hoại hay ứng xử dẻo theo thời gian của đất, mà tập trung phân tích xu hướng biến dạng trong phạm vi đàn hồi thông qua mô hình kiểm soát chuyển vị.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. C. Q. Vo, H. V. Nguyen, T. T. T. Nguyen, T. N. Huynh, B. T. Le, Components of volume loss induced by EPB TBM tunnelling in sandy soils - A case study in Ho Chi Minh City, Vietnam, *Journal of Transportation Science and Technology*, 40-41 (2021).
- [2]. B. T. Le, M. Kuriki, Q. Phan, N. Taylor, An empirical analysis on measured ground surface settlement induced by TBM tunnelling in Ho Chi Minh City, *Lecture Notes in Civil Engineering*, 62 (2020). https://doi.org/10.1007/978-981-15-2184-3_38.
- [3]. N. T. Hieu, P. H. Giao, N. Phien-wej, Tunnelling-induced ground settlements in the first metro line of Ho Chi Minh City, Vietnam, *Lecture Notes in Civil Engineering*, 62 (2020). https://doi.org/10.1007/978-981-15-2184-3_37.
- [4]. R. J. Mair, M. J. Gunn, M. P. O'Reilly, Ground movements around shallow tunnels in soft clay, *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Balkema, Rotterdam, 1981, pp. 323-328

- [5]. R. B. Peck, Deep excavations and tunnelling in soft ground, Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art Volume, Mexico City, 1969, pp. 225-290.
- [6]. J. Ameratunga, N. Sivakugan, B. M. Das, Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering, Elsevier, Developments in Geotechnical Engineering Series, 2016.
- [7]. N. Loganathan, H. G. Poulos, Analytical prediction for tunnelling-induced ground movements in clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124 (1998) 846-856. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:9\(846\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:9(846))
- [8]. D. K. W. Tang, K. M. Lee, C. W. W. Ng, Stress paths around a 3-D numerically simulated NATM tunnel in stiff clay, in: Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Kusakabe, Fujita, Miyazaki (Eds.), Balkema, Rotterdam, 1996.
- [9]. N. Loganathan, H. G. Poulos, D. P. Stewart, Centrifuge model testing of tunnelling-induced ground and pile deformations, Geotechnique, 50 (2000) 283-294. <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.3.283>
- [10]. N. C. Y. Cheng, G. R. Dasari, Y. K. Chow, C. F. Leung, Finite element analysis of tunnel-soil-pile interaction using displacement-controlled model, Tunnelling and Underground Space Technology, 22 (2007) 450-466. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.08.002>
- [11]. T. Yang, D. Zhang, C. Y. Cheng, C. W. W. Ng, Development and application of the bi-elliptical displacement-controlled method for improving TBM tunnelling simulations, Tunnelling and Underground Space Technology, 148 (2025) 105574. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105574>
- [12]. D. Boldini, A. Amorosi, M. Fraldi, S. Picone, Finite element modelling of tunnelling-induced displacements on framed structures, Tunnelling and Underground Space Technology, 80 (2018) 222-236. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.021>
- [13]. T. Yang, D. Zhang, C. Y. Cheng, C. W. W. Ng, Numerical prediction of tunnelling-induced displacement field in large and very shallow tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, 143 (2024) 105448. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105448>
- [14]. Nguyễn Văn Hùng, Nguyễn Thị Hương, Trần Xuân Thành, Ảnh hưởng của việc lựa chọn mô hình đất đến kết quả dự báo lún bề mặt khi thi công đường hầm khiên đào tại Hà Nội, Journal of Construction Science, 03 (2025). <https://doi.org/10.64588/jc.03.12.2025>
- [15]. Nguyễn Văn Hùng, Trần Xuân Thành, Nguyễn Thị Hương, Mô phỏng số đánh giá ảnh hưởng của các tham số hình học tới độ lún bề mặt khi thi công hai đường hầm khiên đào song song tại Hà Nội, Tạp chí Khoa học Công nghệ Giao thông Vận tải, 14 (2025) 71-80. <https://doi.org/10.55228/JTST140607>
- [16]. ABAQUS Inc. (2019). ABAQUS/CAE User Manuals. Dassault Systèmes Simulia Corp., USA.
- [17]. T. I. Addenbrooke, D. M. Potts, A. M. Puzrin, The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction, Geotechnique, 47 (1997) 693-712. <https://doi.org/10.1680/geot.1997.47.3.693>
- [18]. A. P. Deane, R. H. Bassett, The Heathrow Express Trial Tunnel, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 113 (1995) 144-156.
- [19]. M. Karakuş, R. J. Fowell, Effects of different tunnel face advance excavation on the settlement by PTHH, Tunnelling and Underground Space Technology, 18 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(03\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00068-3)
- [20]. T. Yang, D. Zhang, C. Y. Cheng, C. W. W. Ng, Practical implementation of bi-elliptical displacement-controlled method in analysing shallow and large tunnel excavation impact, Tunnelling and Underground Space Technology, 149 (2025) 105608. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105608>