

Phân tích ứng xử của đường hầm song song trong nền sét có sức chống cắt tăng dần theo độ sâu bằng mô hình NGI-ADP

Ngô Hoàng Sơn^{1,2}, Hồ Hữu Thắng^{1,2}, Lê Hoàng Yến Nhi^{1,2}, Văn Quang Tùng^{1,2}, Lại Văn Quý^{1,2,*}

¹ Khoa Kỹ Thuật Xây Dựng, Trường Đại Học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh

² Đại Học Quốc Gia TP. Hồ Chí Minh

TỪ KHOÁ

Đường hầm song song
Nền sét không đồng nhất không đẳng hướng
Mô hình NGI-ADP

TÓM TẮT

Trong bối cảnh đô thị hóa và tăng trưởng dân số đặt ra thách thức cho không gian đô thị, việc phát triển hệ thống đường hầm song song đã trở nên cần thiết để cải thiện khả năng vận chuyển hành khách một cách hiệu quả. Các nghiên cứu gần đây không chỉ tập trung vào phân tích đường hầm đơn lẻ mà còn mở rộng để hiểu rõ hơn về tương tác giữa các đường hầm gần nhau bằng các phương pháp như mô hình hóa số và phần tử hữu hạn. Bài báo này khảo sát ổn định của đường hầm song song đặt trong điều kiện đất sét có sức chống cắt tăng dần theo độ sâu sử dụng mô hình vật liệu đất NGI-ADP thông qua phần mềm Plaxis 2D V20. Ngoài ra, cơ chế phá hoại của đường hầm song song trong nền sét có sức chống cắt tăng dần theo độ sâu cũng được thể hiện để đánh giá ảnh hưởng của tất cả các thông số khác (chiều sâu đặt L/D, khoảng cách giữa 2 đường hầm C/D). Kết quả nghiên cứu góp phần quan trọng trong việc thiết kế và xây dựng các đường hầm song song, đồng thời giúp tối ưu hóa giải pháp cho các điều kiện địa chất phức tạp.

KEYWORDS

Parallel tunnels
Anisotropic undrained clays
NGI-ADP model

ABSTRACT

In the context of urbanization and population growth posing challenges to urban space, the development of parallel tunnel systems has become necessary to improve the efficient transportation of passengers. Recent studies have not only focused on analyzing individual tunnels but have also expanded to understand the interaction between closely spaced tunnels using methods such as numerical modeling and finite element analysis. This paper examines the stability of parallel tunnels under increasing shear strength in cohesive soil conditions using the NGI-ADP soil model through Plaxis 2D V20 software. Additionally, the failure mechanism of parallel tunnels in cohesive soil with increasing shear strength is also demonstrated to assess the influence of all other parameters (depth-to-span ratio, distance between two tunnels). The research results contribute significantly to the design and construction of parallel tunnels while optimizing solutions for complex geological conditions.

1. Giới thiệu

Trong quá khứ, các đường hầm tròn đơn lẻ xuyên qua lòng đất đã được áp dụng rộng rãi để giải quyết các vấn đề giao thông tại các khu vực đô thị. Tuy nhiên, sự gia tăng dân số cùng với vấn đề chật hẹp về không gian đô thị đã dẫn đến nhu cầu ngày càng lớn về khả năng vận chuyển hành khách, cùng với yêu cầu sử dụng hiệu quả không gian. Điều này là tiền đề thúc đẩy sự phổ biến của các hệ thống đường hầm song song trong các dự án phát triển hạ tầng giao thông mới. Trước bối cảnh nhu cầu giao thông công cộng ngày càng gia tăng, đặc biệt tại các khu vực đô thị phát triển nhanh, việc xây dựng các hệ thống đường hầm song song đang trở thành một xu hướng phổ biến trên phạm vi toàn cầu.

Vào những năm gần đây, chủ đề về phương pháp thiết kế và tính toán tải trọng, cũng như xác định độ ổn định của nền đất xung quanh đường hầm song song, đã trở thành một trong những vấn đề được quan

tâm nhiều trong lĩnh vực kỹ thuật xây dựng và khai thác công trình ngầm. Các nghiên cứu mới nhấn mạnh rằng, việc chỉ tập trung vào các đường hầm đơn lẻ không còn là cách tiếp cận đầy đủ, mà cần phải xem xét đến khả năng tương tác giữa các đường hầm lân cận, đặc biệt là những đường hầm có khoảng cách gần nhau, có thể rất đáng kể và không thể bỏ qua.



Hình 1. Dự án kết nối khu vực của LA Metro.

*Liên hệ tác giả: lvqui@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 20/06/2024, sửa xong ngày 02/10/2024, chấp nhận đăng ngày 04/10/2024

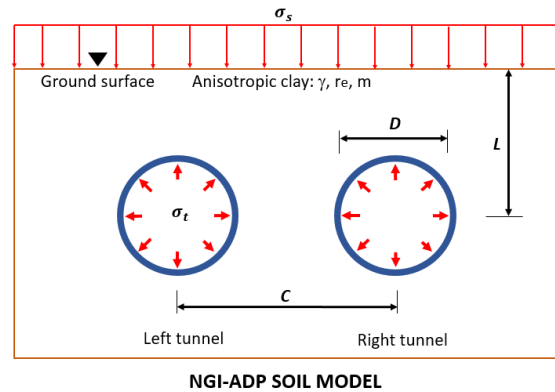
Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.06.2024.739>

Những tiến bộ trong lĩnh vực mô hình hóa số và phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn đã góp phần đáng kể trong việc nghiên cứu để đánh giá độ ổn định an toàn cho đường hầm song song và đưa ra những dự đoán, trong đó có thể kể đến như bài báo của nhóm tác giả Bin-Lin Chu và cộng sự năm 2007 [1] đã tiến hành các thử nghiệm mô hình đường hầm song song trong các loại địa tầng khác nhau. Kết quả mô phỏng số dựa trên phương pháp ứng suất giả định (FSM) cho thấy sự phù hợp tốt với dữ liệu thực nghiệm, chứng tỏ FSM là phương pháp phù hợp để mô tả trạng thái cơ học của đường hầm song song trong địa tầng phức tạp. Jagdish Prasad Sahoo và Jyant Kumar năm 2018 [2] đã áp dụng phần tử hữu hạn để đánh giá độ ổn định của đường hầm song song trong đất dính hoàn toàn và đất ma sát dính hay bài báo của Anna-Maria Zakhem được công bố năm 2019 [3] đã nghiên cứu về đường hầm song song ở Thượng Hải, dẫn động bằng lá chắn cân bằng áp suất đất (EPB) liên quan đến sự tương tác phức tạp giữa đất và cấu trúc của hầm. Sử dụng mô hình phần tử hữu hạn 3D về ứng xử của lớp lót đường hầm bê tông cốt thép được phát triển bằng cách sử dụng phần mềm Plaxis. Nhóm tác giả sử dụng 4 mô hình đất tiên tiến khác nhau (Mohr Coulomb, Hardening Soil, Soft Soil, Hardening Soil with small) được so sánh với kết quả thực địa để đánh giá tính hiệu quả và phù hợp của mô hình, cũng như ứng xử không thoát nước của đất sét pha yếu, mềm bão hòa tại vị trí đào hầm. Ngoài ra, Jim Shiau và Fadhil Al-Asadi năm 2020 [4] cũng đã xem xét độ ổn định của mặt hầm tròn dưới tác động tổng hợp của tải trọng phụ, trọng lượng bản thân của đất và hệ thống đỡ bên trong. Nghiên cứu này sử dụng số ổn định ban đầu của Broms và Bennermark [5], sử dụng phương pháp phân tích giới hạn phần tử hữu hạn 3D để so sánh với các thực nghiệm động học trước đó. Bên cạnh đó, nhóm tác giả Van Qui Lai và cộng sự 2022 [6] đã phân tích tính ổn định không thoát nước khi thi công của đường hầm đơn được chôn dưới lớp đất sét có tính dị hướng, nghiên cứu sử dụng phân tích giới hạn phần tử hữu hạn phân tích giới hạn 2D. Nghiên cứu này, đề ra đồ thị thiết kế bài toán ổn định không thoát nước khi hạ thủy của hầm có tường cứng trong đất sét. Từ đó, có thể nhận thấy nghiên cứu về sức chịu tải phân tích sức chịu tải đường hầm song song trong nền sét có sức chống cắt tăng dần theo độ sâu bằng mô hình vật liệu đất NGI – ADP vẫn còn hạn chế và chưa được mở rộng cho đến thời điểm hiện tại.

Trong phạm vi nghiên cứu của bài báo sẽ tiến hành phân tích sức chịu tải đường hầm song song trong nền sét có sức chống cắt tăng dần theo độ sâu bằng mô hình vật liệu đất NGI – ADP trong phần mềm Plaxis 2D V20 bao gồm thông số thể hiện sự tăng dần sức kháng cắt theo độ sâu m . Ngoài ra, thông số về chiều sâu chôn đường hầm L/D , khoảng cách giữa hai đường hầm C/D cũng được khảo sát. Nghiên cứu này phân tích ảnh hưởng của sự thay đổi các thông số đầu vào đến đầu ra là hệ số ổn định của nền đất xung quanh đường hầm song song, ký hiệu là N . Ngoài ra, bài còn phân tích sự ảnh hưởng của mặt trượt lên mái dốc ứng với sự thay đổi của thông số đầu vào.

2. Đặt vấn đề nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, định nghĩa của bài toán phân tích sự ổn định của nền đất xung quanh hệ kết cấu đường hầm song song trong nền đất sét có sức chống cắt tăng dần theo độ sâu được thể hiện ở Hình 2. Trong đó, giả định đường hầm thuộc loại cứng và chịu tải trọng phân bố đều trên nền đất. Các thông số hình học của mô hình bao gồm đường kính đường hầm được ký hiệu là D , chiều cao từ mặt đất đến tâm đường hầm là L , khoảng cách giữa hai tâm của hai đường hầm song song là C .



Hình 2. Mô hình đường hầm song song trong nền sét.

Mô hình vật liệu đất NGI – ADP được áp dụng để mô tả đặc trưng của đất nền. Mô hình NGI – ADP bao gồm các thông số cơ bản như S_u^P/S_u^A (thông số thể hiện sự không đẳng hướng của sức kháng cắt của đất sét), m (thể hiện sự tăng dần của sức kháng cắt theo độ sâu) như chú thích trong Hình 2. Giá trị S_u^P/S_u^A thay đổi từ 0.4-1 [7], trong đó, các giá trị S_u^P/S_u^A thể hệ cho sự không đồng hướng trong sức chống cắt của đất sét. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này với mục tiêu là xem xét ảnh hưởng của sự gia tăng sức chống cắt theo độ sâu đến sự ổn định của đường hầm song song, nên giá trị S_u^P/S_u^A được lựa chọn bằng 1. Bên cạnh đó, nhằm đơn giản kết quả tính toán sức chịu tải của đường hầm song song ảnh hưởng của mực nước ngầm được bỏ qua. Việc xem xét ảnh hưởng của sự không đẳng hướng về sức chống cắt được xem như hạn chế trong bài báo này, và sẽ được mở rộng phân tích trong các nghiên cứu tiếp theo.

Mục tiêu của bài toán phân tích sự ổn định của nền đất xung quanh hệ kết cấu đường hầm song song chịu sự ảnh hưởng của sức chống cắt tăng dần theo độ sâu, và cách đặc trưng hình học như tỷ lệ độ phủ của nền đất (L/D), khoảng cách của hai đường hầm (C/D). Cụ thể hơn, nghiên cứu này đi phân tích sự thay đổi của hệ số ổn định N , thể hiện trong công thức số 1, gây ra bởi sự thay đổi của các thông số L/D , C/D , và m . Trong đó, công thức xác định hệ số N được lấy theo các nghiên cứu trước đây [4, 5]. Các giá trị L/D , C/D và m được tham khảo trong nghiên cứu [4, 5] và thể hiện trong Bảng 1.

$$N = \frac{\sigma_s - \sigma_t}{S_u^A} = f\left(m, \frac{C}{D}, \frac{L}{D}\right) \quad (1)$$

Bảng 1. Giá trị khảo sát của các thông số.

Thông số khảo sát	Giá trị
m	0.0, 0.4, 1.0, 6.0
L/D	1, 2, 4, 6, 10
C/D	2, 4, 8, 14, 20

3. Giới thiệu về mô hình NGI – ADP

Bảng 2. Thông số đầu vào của mô hình đất NGI-ADP.

	Thông số	Đơn vị	Giá trị độ lớn
Độ cứng	G_{ur}/S_u^A	-	500,0
	γ_f^C	%	2,000
	γ_f^E	%	6,000
	γ_f^{DSS}	%	3,000
Độ bền	S_{uref}^A	kN/m ²	10,00
	$S_u^{C,TX}/S_u^A$	-	0,990
	γ_{ref}	m	0,000
	S_{uinc}^A	kN/m ² /m	10,00
	S_u^P/S_u^A	-	1,000
	τ_o/S_u^A	-	0,700
	S_u^{DSS}/S_u^A	-	1,000
Hệ số Poisson	$\nu_u(mu)$	-	0,495

Mô hình NGI-ADP được Grimstad và cộng sự [8] lần đầu tiên đề xuất vào năm 2012. Các thông số sức kháng cắt S_u khác nhau từ thí nghiệm cắt trực tiếp, thí nghiệm ba trục nén và kéo, có thể xác định được ứng xử không đẳng hướng của nền sét. Hiện nay, mô hình NG-ADP đã được áp dụng trong rất nhiều nghiên cứu [9-11]. Trong phần mềm phần tử hữu hạn Plaxis 2D V2020 đã cập nhật mô hình vật liệu NGI-ADP với các thông số sau:

G_{ur}/S_u^A là tỷ lệ mô đun cắt khi gia tải hoặc dỡ tải với sức chống cắt không thoát nước dạng chủ động. Tỷ lệ độ cứng cắt gia tải/ dỡ tải như một tỷ số của lực cắt chủ động biến dạng phẳng. Nếu cường độ cắt tăng theo chiều sâu thì tỷ số G_{ur}/S_u^A cho sức chống cắt tăng tuyến tính theo chiều sâu (nền không đồng nhất).

γ_f^C là biến dạng cắt khi bị phá hoại trong nén ba trục. Tham số γ_f^C (%) xác định biến dạng cắt mà tại đó sự phá hủy đạt được khi không thoát nước dưới tác dụng của tải trọng ở chế độ nén ba trục, tức là $\gamma_f^C = 1.5\epsilon_{c1}$ từ thí nghiệm ba trục.

γ_f^{DSS} là biến dạng cắt khi phá hoại khi cắt trực tiếp. Tham số γ_f^{DSS} (%) xác định biến dạng cắt mà tại đó sự phá hủy đạt được khi không thoát nước ở chế độ cắt trực tiếp (thiết bị DSS). Đối với đất sét cổ kết thường, biến dạng trong tải nén γ_f^C là thấp nhất và biến dạng khi tải phân mở rộng γ_f^E là cao nhất. Biến dạng do tải trọng cắt trực tiếp lấy giá trị trung gian, tức là $\gamma_f^C < \gamma_f^{DSS} < \gamma_f^E$.

Tham chiếu độ bền cắt chủ động S_{uref}^A . Độ bền cắt hoạt động tham chiếu là độ bền cắt thu được trong (biến dạng phẳng) đường dẫn ứng suất chủ động không thoát nước cho độ sâu tham chiếu γ_{ref} , được biểu thị bằng đơn vị ứng suất.

Tỷ lệ độ bền cắt nén ba trục trên lực cắt chủ động $S_u^{C,TX}/S_u^A$. Tỷ lệ này xác định độ bền cắt trong chế độ nén ba trục không thoát nước của tải trọng liên quan đến cường độ cắt trong chế độ chủ động không thoát nước trong biến dạng phẳng.

Độ sâu tham chiếu γ_{ref} . Ở độ sâu tham chiếu γ_{ref} tại đó cường độ cắt hoạt động tham chiếu S_{uref}^A xác định. Dưới độ sâu này, sức chống cắt và độ cứng có thể tăng tuyến tính theo chiều sâu. Trên độ sâu tham chiếu, độ bền cắt bằng S_{uref}^A .

Độ tăng của tăng cường độ cắt theo độ sâu S_{uinc}^A . Tham số này xác định mức tăng hoặc giảm của sức chống cắt không thoát nước chủ động theo độ sâu, được biểu thị bằng đơn vị ứng suất trên một đơn vị chiều sâu.

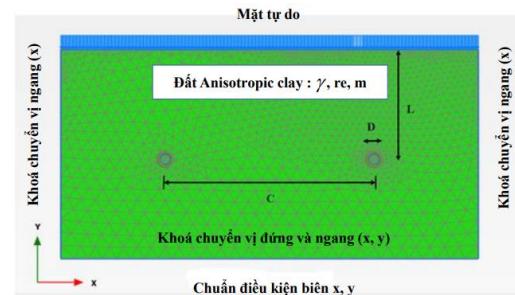
Tỷ lệ giữa độ bền cắt bị động so với độ bền cắt chủ động (S_u^P/S_u^A)

Tỷ lệ giữa độ bền cắt trực tiếp trên độ bền cắt chủ động (S_u^{DSS}/S_u^A)

Mức huy động ban đầu (τ_o/S_u^A) có thể được tính từ hệ số áp suất đất ở trạng thái nghỉ K_o .

Hệ số Poisson (ν). Tương tự như trong mô hình Mohr-Coulomb, tỷ lệ Poisson từ 0,3 đến 0,4. Khi tùy chọn thoát nước Undrained (C) được sử dụng, hệ số Poisson gần đến 0,5 nên được nhập bằng 0,495 làm mặc định.

4. Mô hình số của đường hầm



Hình 3. Mô hình phần tử hữu hạn Plaxis 2D cho đường hầm song song trong nền sét.

Nhằm mục đích đánh giá và tính toán sức chịu tải của đường hầm song song trong nền sét có sức chống cắt tăng dần theo độ sâu, phương pháp phần tử hữu hạn (FEA) và phần mềm Plaxis 2D V20 được áp dụng cùng với mô hình đất NGI-ADP để mô phỏng bài toán nghiên cứu ở Hình 4. Giả thiết đường hầm song song đàn hồi tuyến tính và trọng lượng riêng bằng 0, nghĩa là bỏ qua trọng lượng bản thân của đường hầm song song. Kích thước của mô hình được chọn kỹ lưỡng với thông số chiều dài theo phương x là 40 (m) và chiều sâu theo phương y là 20 (m) để đủ lớn sao cho không có sự giao cắt của các đới trượt với các ranh giới biên trái, phải và phía dưới vị trí đặt đường hầm song song. Cuối cùng, điều kiện biên trong mặt phẳng của mô hình được thiết lập theo các gối tựa di động ngăn cản chuyển vị mô hình theo các phương. Cụ thể, đối với biên trái và biên phải của mô hình được khóa chuyển vị theo phương ngang x. Riêng đối với đáy của mô hình thì được cố định hoàn toàn theo phương x và phương y, trong khi đường biên trên thì ngược lại được gán tự do theo cả 2 phương x và y.

Mô hình cũng được gán thêm tải trọng tác dụng lên mặt đất dạng tải phân bố đều. Ngoài ra, chú ý rằng sức chịu tải N được sử dụng trong bài báo là không có đơn vị trong các kết quả thể hiện ở các phần tiếp theo. Thông số đầu vào của mô hình đất NGI-ADP được thể hiện ở Hình 3. Các đại lượng kí hiệu trong mô hình cũng được thể hiện ở Hình 4. Tỷ lệ L/D và C/D được khảo sát lần lượt là 1, 2, 4, 6, 10 và 2, 4, 8, 14, 20 với C là khoảng cách từ tâm hầm thứ nhất đến tâm hầm thứ hai, L độ sâu từ mặt đất đến mép trên của đường hầm và D là đường kính của mỗi đường hầm có giá trị hằng số là 1 (m).

Lưu ý rằng toàn bộ tải trọng được áp dụng trong mô hình như đã đề cập ở trên là tải phân bố đều khi chạy phân tích trên mô hình Plaxis 2D, kết quả tăng từ 0 đến 100 % so với tải trọng gán ban đầu là 20.000 kN, sau đó kết quả trong mô hình Plaxis sẽ được biểu thị với hệ số nhân tổng (Mstage). Do đó, giá trị của Mstage sẽ nằm trong giới hạn khoảng từ 0 đến 1 và tải trọng cực đại ($q_u - \text{kN/m}^2$) của đường hầm song song trong nền sét với cặp thông số $re - m$ bất kì sẽ được tính bằng cách lấy tích giữa hệ số Mstage với tải trọng ban đầu là 20.000 kN. Cuối cùng, khả năng chịu tải cực hạn N được áp dụng tính toán theo phương trình (1).

5. Kết quả

5.1. Kiểm chứng kết quả từ nghiên cứu trước đó

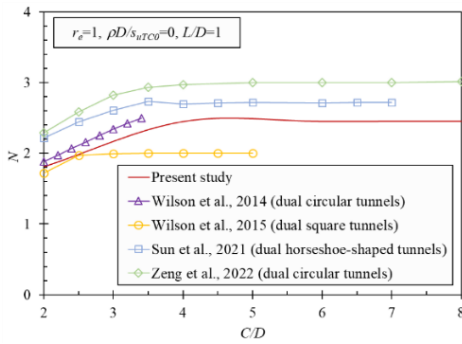
Các kết quả phân tích của 50 trường hợp ứng với các trường hợp

khảo sát ($m=0, 0.4, 1, 2, 6; L/D = 1, 2, 4, 6, 10; C/D = 2, 4, 8, 14, 20$) được thể hiện ở Bảng 3. Để kiểm tra tính phù hợp của kết quả phân tích từ mô hình số đã thực hiện, bài báo này thực hiện so sánh với các trường hợp phân tích cho bài toán đường hầm song song trong nền sét đồng nhất ($s_u^P/s_u^A = 1$) của các tác giả trước đây, cụ thể: Wilson et al., 2014 [12], Wilson et al., 2015 [13], Sun et al., 2021 [14], Zeng et al., 2022 [15]. Việc so sánh kết quả từ nghiên cứu này và kết quả của các nghiên cứu trước đây được thể hiện ở Hình 5.

Từ Hình 5, có thể nhận thấy rằng kết quả phân tích hệ số sức chịu tải N bằng mô hình NGI-ADP cho đường hầm song song trong nền sét có sức chống cắt tăng dần theo độ sâu là tương đồng với kết quả của Wilson et al., 2014 [12], Wilson et al., 2015 [13], Sun et al., 2021 [14], Zeng et al., 2022 [15]. Sự tương đồng này được giải thích là do mô hình NGI-ADP sẽ chuyển thành mô hình LB FELA – mô hình được sử dụng trong bài toán phân tích của Wilson et al., 2015 [13], Sun et al., 2021 [14], Zeng et al., 2022 [15] ứng với trường hợp $s_u^P/s_u^A = 1$. Lưu ý rằng, việc phân tích cho đường hầm song song trong nền sét không đẳng hướng bằng mô hình NGI-ADP chưa được thực hiện trước đây, nên tác giả không thể so sánh cho các trường hợp không đẳng hướng ứng với $m = 0.4, 0.6, 1.0$. Điều này cho thấy, kết quả phân tích là phù hợp với nghiên cứu trước đây và có thể mở rộng phân tích cho trường hợp đường hầm song song trong nền sét không đẳng hướng. Bên cạnh đó cũng cho thấy sự tối ưu của mô hình NGI-ADP bên cạnh việc phân tích cho nền sét đẳng hướng còn có thể phân tích cho nền sét không đẳng hướng.

Bảng 3. Kết quả phân tích các trường hợp, thể hiện hết kết quả của m .

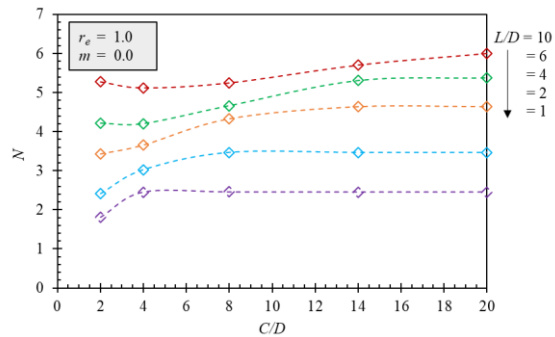
s_u^P/s_u^A	m	L/D	C/D				
			2	4	8	14	20
1	0	1	1,810	2,451	2,456	2,454	2,454
		2	2,416	3,028	3,470	3,469	3,470
		4	3,424	3,653	4,332	4,643	4,644
		6	4,211	4,200	4,662	5,308	5,376
		10	5,275	5,122	5,249	5,698	5,997
	0.4	1	2,602	3,256	3,262	3,259	3,260
		2	4,097	5,498	5,702	5,703	5,704
		4	7,631	8,887	10,607	10,600	10,601
		6	11,782	12,710	15,000	15,784	15,782
		10	21,247	21,510	23,754	26,606	26,985
	1	1	3,751	4,407	4,413	4,403	4,412
		2	6,585	8,911	8,916	8,911	8,920
		4	13,841	16,653	19,303	19,295	19,302
		6	22,915	25,377	30,271	31,083	31,079
		10	44,849	45,899	51,367	57,576	57,549
	6	1	13,077	13,600	13,633	13,621	13,613
		2	27,190	35,150	35,241	35,149	35,183
		4	65,370	81,128	91,053	91,055	91,097
		6	115,193	130,385	156,954	157,435	157,392
		10	241,181	248,855	281,125	311,548	311,563



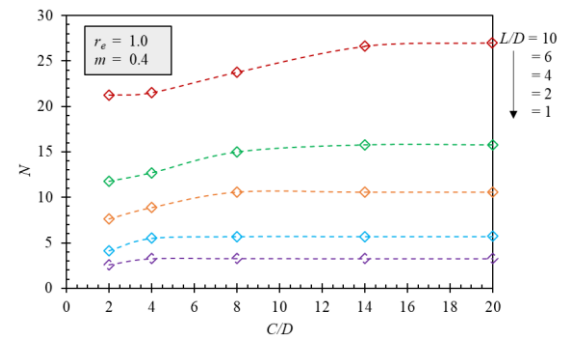
Hình 4. Kiểm chứng nghiên cứu hiện tại (Present study) với $L/D = 1$, $r_e = 1$ và $m = 0$.

5.2. Phân tích mở rộng kết quả từ mô hình Plaxis 2D

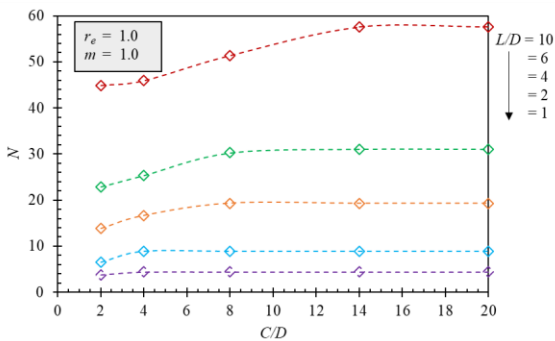
Đồ thị ở Hình 6. (a-d) thể hiện sự ảnh hưởng của khoảng cách giữa 2 đường hầm (C/D) đến hệ số độ ổn định N , có thể thấy rằng, giá trị hệ số ổn định N tăng lên khi C/D tăng. Từ đó chứng minh rằng, khi tỉ lệ C/D càng tăng, đồng nghĩa với việc vị trí đặt hai đường hầm song song càng xa, thì ổn định của nền đất xung quanh đường hầm song song cũng tăng. Tuy nhiên khi giá trị L/D càng tăng thì ảnh hưởng của C/D càng lớn thông qua việc hệ số ổn định N chỉ ổn định với giá trị C/D lớn hơn. Bên cạnh đó, khi m tăng lên Hình 6. (a-d), thì hệ số N cũng tăng lên.



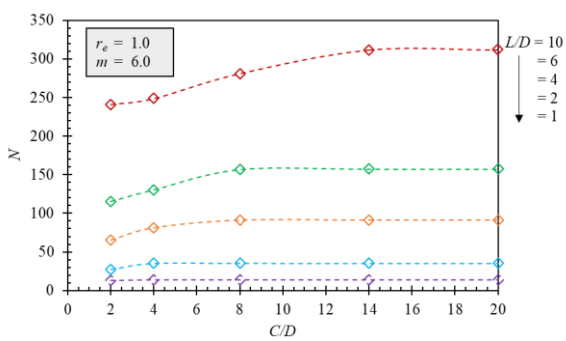
(a)



(b)

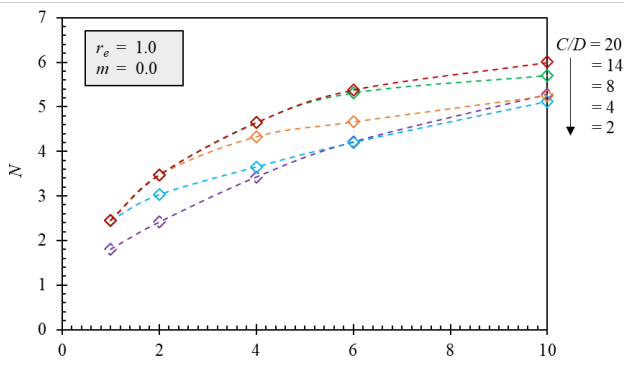


(c)

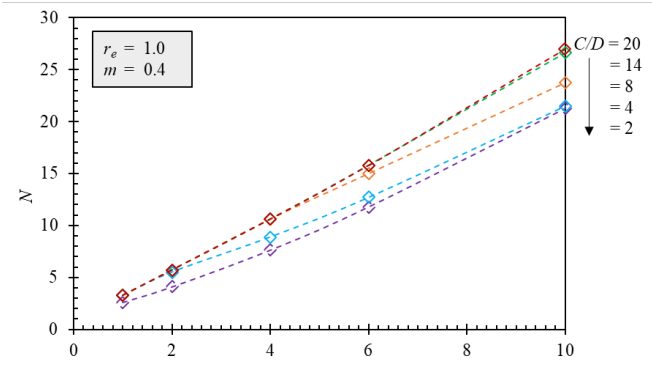


(d)

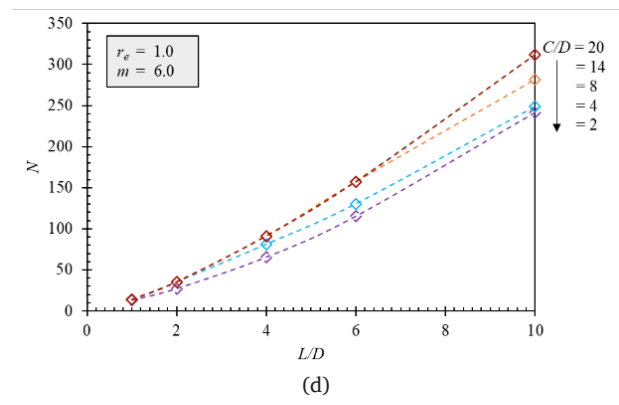
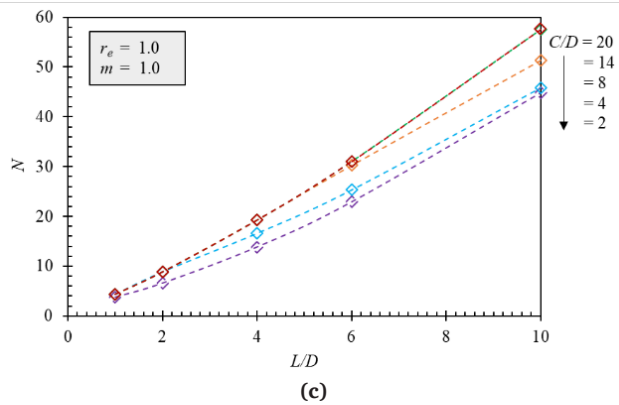
Hình 5. (a-d) Ảnh hưởng của tỷ lệ C/D đến sức chịu tải N của đường hầm với $C/D = 2, 4, 8, 14, 20$; $L/D = 1, 2, 4, 6, 10$; $m = 0; 0,4; 1,0; 6,0$ và $r_e = 1,0$.



(a)



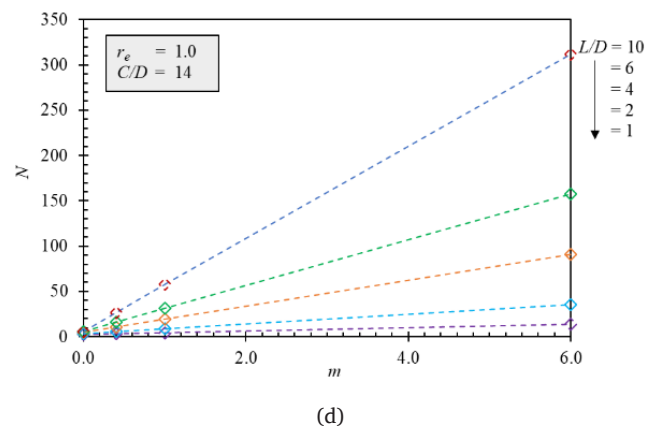
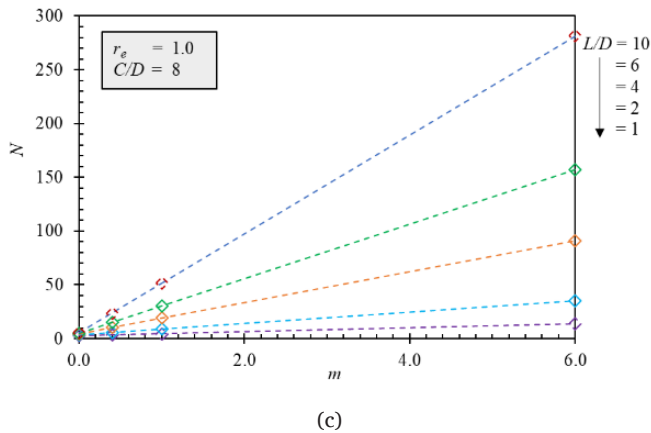
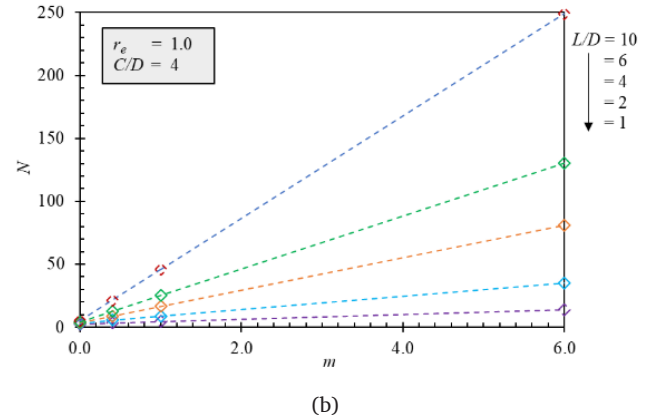
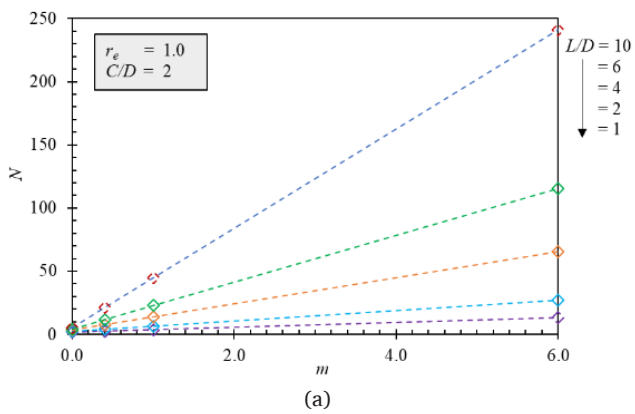
(b)

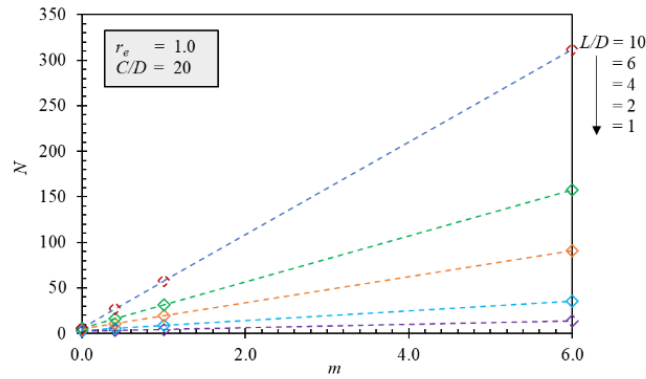


Hình 6. (a-d) Ảnh hưởng của tỷ lệ L/D đến sức chịu tải N của đường hầm với $C/D = 2, 4, 8, 14, 20$; $L/D = 1, 2, 4, 6, 10$; $m = 0; 0,4; 1,0; 6,0$ và $r_e = 1,0$.

Ở đây, để thuận tiện cho việc xét sự ảnh hưởng riêng của tỷ lệ L/D đến hệ số ổn định N , Hình 7. (a-d) thể hiện mối quan hệ giữa N và L/D . Từ kết quả ở Hình 7. (a-d) có thể thấy, khi giá trị L/D tăng lên, hệ số ổn định N cũng tăng lên. Điều này ứng với sự làm việc thực tế của nền đất xung quanh đường hầm. Đường hầm càng sâu, tải trọng phát sinh chuyển vị càng nhỏ so với trọng lượng bản thân đất nền, dẫn tới độ ổn định đất nền tăng lên.

Hình 8. (a-e) thể hiện ảnh hưởng của sự gia tăng sức chống cắt đến độ sâu ổn định đất nền xung quanh đường hầm song song. Cụ thể hơn, Hình 8. (a-e) thể hiện sự tương quan giữa hệ số ổn định N và m , trong các trường hợp $L/D = 1, 2, 4, 6, 10$ và $C/D = 2, 4, 8, 14, 20$. Có thể thấy rằng mối quan hệ giữa N và m là tuyến tính cho mọi trường hợp, trong đó m càng tăng thì giá trị N càng tăng. Điều đó thể hiện đúng bản chất của nền đất khi sức chống cắt của đất tăng dựa trên giá trị m thì nền đất xung quanh đường hầm song song cũng ổn định.





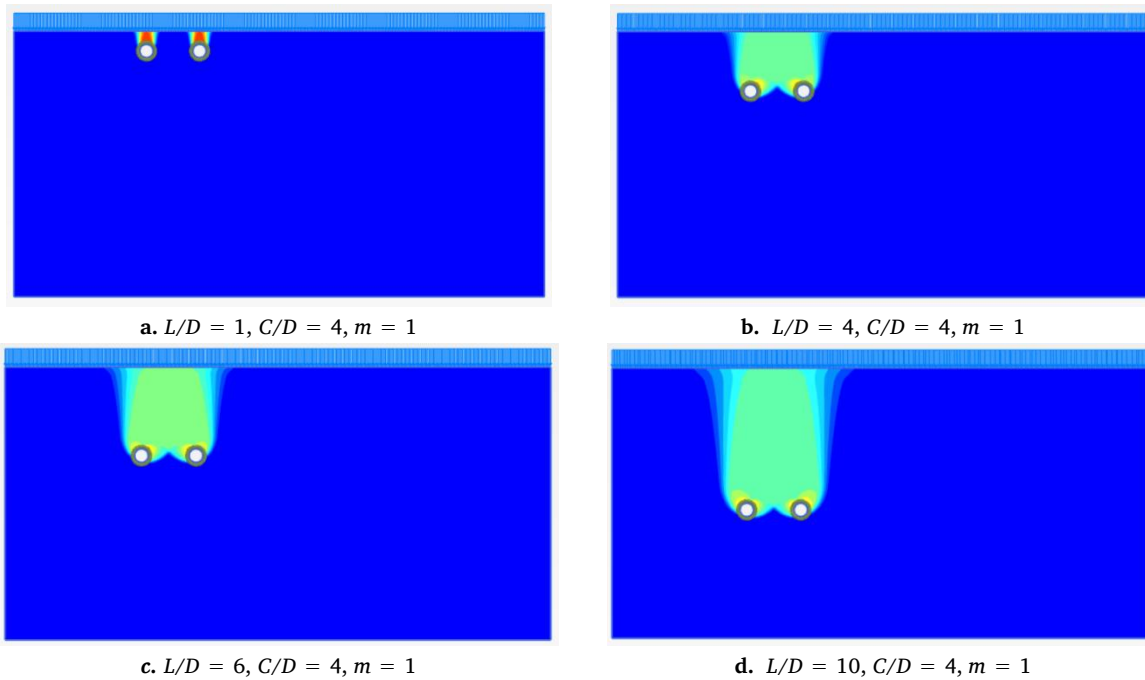
(e)

Hình 7. (a-e) Ảnh hưởng của m đến sức chịu tải N của đường hầm với $C/D = 2, 4, 8, 14, 20$; $L/D = 1, 2, 4, 6, 10$; $m = 0; 0,4; 1,0; 6,0$ và $r_e = 1,0$.

5.3. Cơ chế phá hoại của nền đất xung quanh đường hầm song song

Bên cạnh việc khảo sát tương quan giữa hệ số N và các biến khảo sát (L/D , C/D , m), nghiên cứu này còn khảo sát ảnh hưởng của các biến

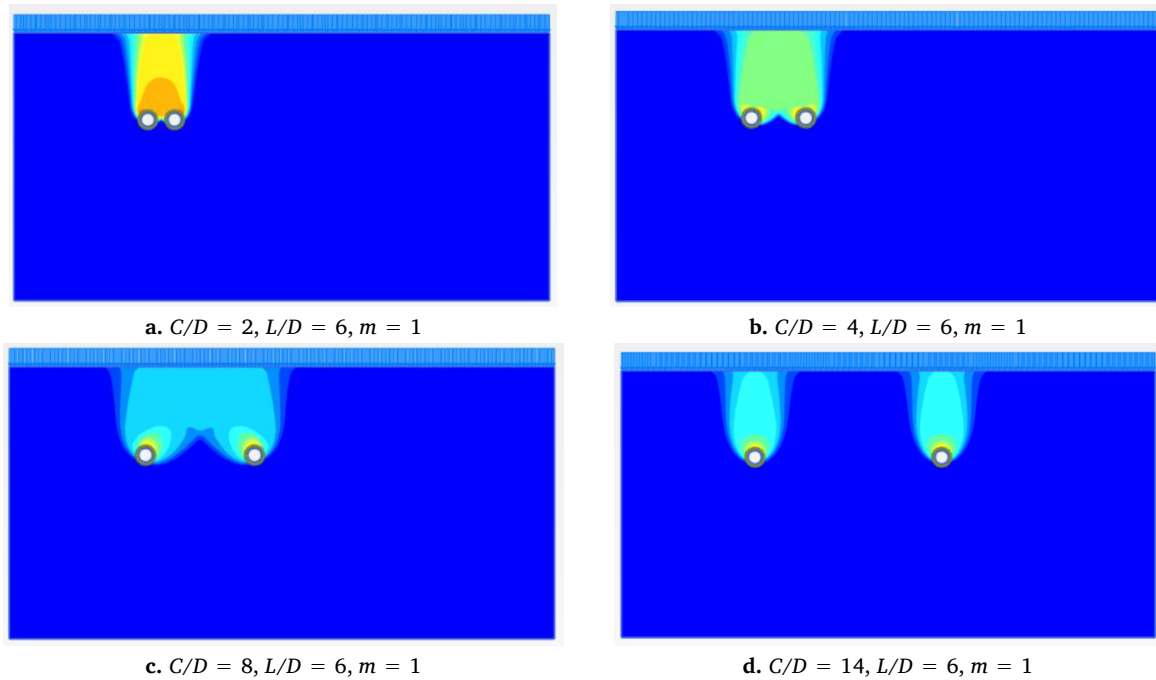
khảo sát đến cơ chế mất ổn định của nền đất xung quanh đường hầm song song. Cụ thể, Hình 9. (a-d) thể hiện sự thay đổi của cơ chế mất ổn định khi L/D thay đổi. Cụ thể, khi L/D tăng lên, vùng phá hoại (vùng mất ổn định) có xu hướng mở rộng hơn cho các trường hợp $C/D = 4$, $m = 1$.



Hình 9. (a-d) Ảnh hưởng của lớp phủ đến cơ chế phá hoại của nền đất xung quanh đường hầm song song.

Bên cạnh đó, Hình 10. (a-d) thể hiện ảnh hưởng của khoảng cách giữa hai đường hầm song song đến cơ chế mất ổn định của nền đất xung quanh đường hầm song song. Các trường hợp được phân tích bao gồm: C/D thay đổi từ 2 đến 14 và $C/D = 6$, $m = 1$. Theo kết quả được biểu thị ở Hình 10. (a-d) cho ta thấy khi tỷ lệ C/D tăng dần, cơ chế phá

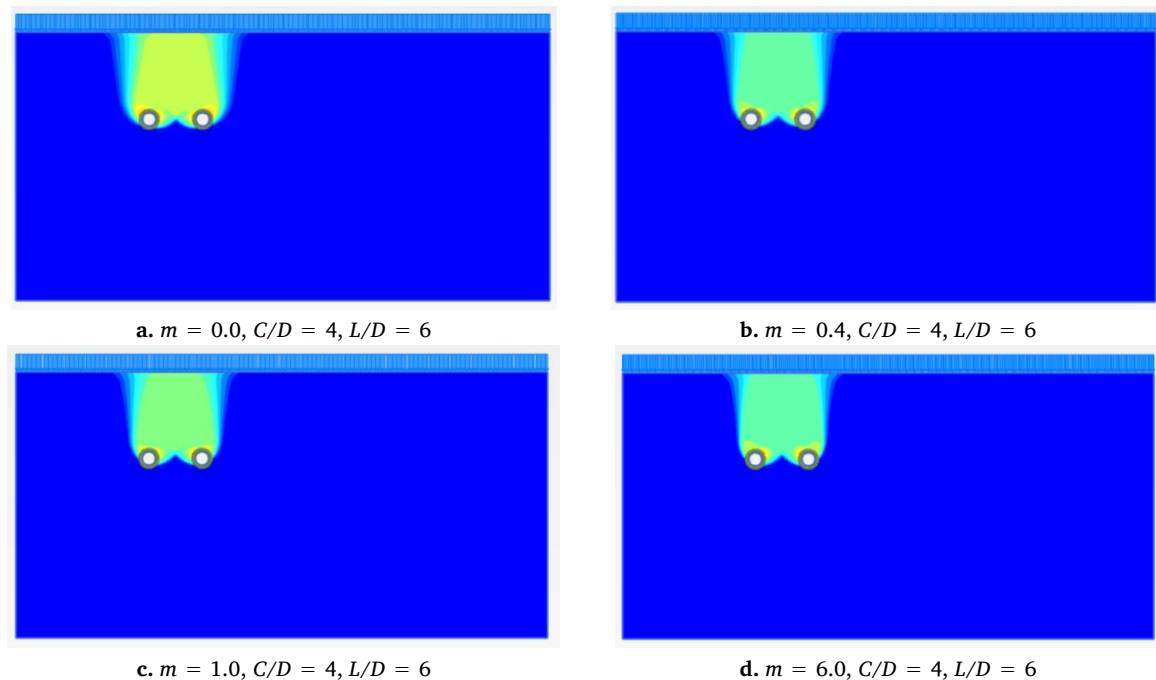
hoại của đất nền xung quanh đường hầm song song giảm đi và vùng ảnh hưởng cũng bắt đầu tách biệt. Tại tỉ lệ $C/D = 14$, vùng ảnh hưởng của đường hầm song song được coi là hoàn toàn tách rời, ứng xử như những đường hầm đơn lẻ, không bị ảnh hưởng bởi đường hầm lân cận.



Hình 10. (a-d) Ảnh hưởng của khoảng cách đến cơ chế phá hoại của nền đất xung quanh đường hầm song song.

Tương tự, để xét sự ảnh hưởng của m (sức chống cắt tăng dần theo độ sâu) đến cơ chế phá hoại của nền đất xung quanh đường hầm song song, các trường hợp được phân tích bao gồm $L/D = 6$, $C/D = 4$ và m thay đổi từ 0 đến 6. Từ kết quả được biểu thị ở Hình 11. (a-d), nghiên cứu đã giá được khi m tăng, cơ chế phá hoại đất nền xung quanh

của đường hầm song song cũng tăng theo. Cụ thể, trong khoảng m từ 0.0 đến 0.4 biến dạng nhỏ và đồng đều, chỉ ra rằng nền đất có khả năng chịu tải ổn định ở mức kháng cắt này. Khi giá trị m tăng từ 1.0 đến 6.0, biến dạng bắt đầu tăng lên đáng kể và tập trung giữa hai đường hầm.



Hình 11. (a-d) Ảnh hưởng của m (sức chống cắt tăng dần theo độ sâu) đến cơ chế phá hoại của nền đất xung quanh đường hầm song song.

6. Kết luận

Bài báo phân tích sức chịu tải của đường hầm song song trong nền sét có sức chống cắt tăng dần theo độ sâu bằng mô hình NGI – ADP với sự hỗ trợ của phần mềm Plaxis 2D V20. Một số kết luận được rút ra như sau:

Ảnh hưởng của khoảng cách C/D đến hệ số ổn định N và mặt trượt phá hoại. Cụ thể, khi C/D tăng, nghĩa là khoảng cách giữa hai đường hầm càng xa, hệ số ổn định N càng tăng và cơ chế phá hoại của đất nền xung quanh đường hầm song song giảm đi, vùng ảnh hưởng cũng bắt đầu tách biệt. Điều này chứng tỏ rằng, tương tác giữa hai đường hầm giảm khi khoảng cách tăng, dẫn đến độ ổn định của nền đất xung quanh tăng.

Ảnh hưởng của chiều sâu đặt L/D đến hệ số ổn định N và mặt trượt phá hoại. Cụ thể, khi L/D tăng, tức là chiều sâu đặt đường hầm tăng, hệ số ổn định N cũng tăng và vùng phá hoại (vùng mất ổn định) có xu hướng mở rộng. Điều này phù hợp với thực tế, khi đường hầm đặt càng sâu, tải trọng phát sinh chuyển vị càng nhỏ so với trọng lượng bản thân đất nền, dẫn đến độ ổn định tăng.

Ảnh hưởng của m (sức chống cắt tăng dần theo độ sâu) đến hệ số ổn định N và mặt trượt phá hoại. Cụ thể, hệ số ổn định N tăng tuyến tính và cơ chế phá hoại nên đất xung quanh của đường hầm song song cũng tăng theo, tập trung giữa hai đường hầm khi m tăng, cho thấy rằng khi sức chống cắt của đất tăng theo chiều sâu, độ ổn định của nền đất xung quanh đường hầm cũng tăng theo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM trong khuôn khổ đề tài mã số SVKSTN-2023-KTXD-35. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Bin-Lin Chu, Sung-Chi Hsu, Yi-Long Chang, Yeong-Shyang Lin. “Mechanical behavior of a twin-tunnel in multi-layered formations.” Tunnelling and

- Underground Space Technology 22 (2007): 351-362.
- [2]. Jagdish Prasad Sahoo, Jyant Kumar. “Required Lining Pressure for the Stability of Twin Circular Tunnels in Soils.” International Journal of Geomechanics, 18(7), 04018069.
- [3]. Anna-Maria Zakhem, Hany El Naggar. “Effect of the constitutive material model employed on predictions of the behaviour of earth pressure balance (EPB) shield-driven tunnels.” Transportation Geotechnics 21 (2019) 100264.
- [4]. Jim Shiau, Fadhil Al-Asadi. “Three-Dimensional Analysis of Circular Tunnel Headings Using Broms and Bennermark’s Original Stability Number.” International Journal of Geomechanics, 20(7), 06020015.
- [5]. Broms và Bennermark. “Stability of Clay at Vertical Opening.” Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Volume 93, Issue 1 (1967).
- [6]. Van Qui Lai, Reza Jamshidi Chenari, Rungkhun Banyong, Suraparb Keawsawasvong (2022). Undrained Stability of Opening in Underground Walls in Anisotropic Clays. ASCE.
- [7]. Suraparb Keawsawasvong, Boonchai Ukritchon. “Design equation for stability of a circular tunnel in anisotropic and heterogeneous clay.” Underground Space 7 (2022): 76-93.
- [8]. Grimstad, G., Andresen, L., & Jostad, H. P. NGI-ADP: Anisotropic shear strength model for clay. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 36(4), 483-497, 2012.
- [9]. Zhang, Wengang, Runhong Zhang, Chongzhi Wu, Anthony TC Goh, and Lin Wang. “Assessment of basal heave stability for braced excavations in anisotropic clay using extreme gradient boosting and random forest regression.” Underground Space (2020).
- [10]. Zhang, Runhong, Chongzhi Wu, Anthony TC Goh, Thomas Bohlke, and Wengang Zhang. “Estimation of diaphragm wall deflections for deep braced excavation in anisotropic clays using ensemble learning.” Geoscience Frontiers 12, no. 1 (2021): 365-373.
- [11]. Li, Yongqin, and Wengang Zhang. “Investigation on passive pile responses subject to adjacent tunnelling in anisotropic clay.” Computers and Geotechnics 127 (2020): 103782.
- [12]. Wilson, D.W., Abbo, A. J., Sloan, S. W. & Lyamin, A. V. (2014). “Undrained stability of dual circular tunnels. Int. J. Geomech. 14, No.1, 69 – 79.
- [13]. Daniel W. Wilson, Andrew J. Abbo, Scott W. Sloan, Andrei V. Lyamin. “Undrained stability of dual square tunnels.” Acta Geotechnica, Volume 10, pages 665-682, (2015).
- [14]. Rui Sun, Junsheng Yang, Shouhua Liu, Feng Yang. “Undrained stability analysis of dual unlined horseshoe-shaped tunnels in non-homogeneous clays using lower bound limit analysis method.” Computers and Geotechnics, Volume 133, May 2021, 104057.
- [15]. Yongge Zeng, Tianqin Zeng & Gaoqiao Wu. “Undrained stability of dual tunnels in layered soils with different strength.” Scientific Reports 12, Article number: 10801 (2022).