

ẢNH HƯỞNG CỦA TÍNH KHÔNG ĐẲNG HƯỚNG VÀ KHÔNG ĐỒNG NHẤT CỦA NỀN ĐẤT SÉT TỰ NHIÊN ĐẾN CHUYỂN VỊ NGANG CỦA TƯỜNG VÂY HỒ ĐÀO SÂU

ThS. ĐÀO NGUYỄN HUY TÔNG

Khoa Công trình, Phân Hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh,

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: tongdnh_ph@utc.edu.vn *ĐT: 0914462020

Phản biện: TS. Trần Duy Tân

TS. Nguyễn Nhật Minh Trị

TÓM TẮT

Nghiên cứu này phân tích ảnh hưởng của đặc tính không đẳng hướng và không đồng nhất về mặt cường độ của nền đất sét tự nhiên đến chuyển vị ngang hố đào, thông qua mô hình phần tử hữu hạn (PTHH). Mô hình được kiểm chứng bằng số liệu quan trắc từ công trình thực tế tại Thành phố Hồ Chí Minh. Các tham số được khảo sát bao gồm tỷ số không đẳng hướng (s_{up}/s_{ua}), hệ số không đồng nhất ($s_{ua,inc}$) và chiều sâu hố đào (H). Kết quả cho thấy H và $s_{ua,inc}$ là hai thông số ảnh hưởng lớn đến chuyển vị tường vây, s_{up}/s_{ua} có tác động rõ hơn ở trường hợp hố đào nông. Trên cơ sở đó, nghiên cứu góp phần làm rõ vai trò tương đối của các tham số đặc trưng cho nền sét không đẳng hướng, không đồng nhất trong phân tích chuyển vị ngang tường vây hố đào sâu.

Từ khóa: Hố đào sâu, không đẳng hướng, không đồng nhất, nền sét tự nhiên;

ABSTRACT

This study investigates the effects of anisotropic and heterogeneous strength characteristics of natural clay on the lateral displacement of deep excavation walls using the finite element method. The numerical model was validated against field monitoring data obtained from a real project in Ho Chi Minh City. The investigated parameters include the anisotropy ratio (s_{up}/s_{ua}), the heterogeneity parameter ($s_{ua,inc}$), and the excavation depth (H). The results indicate that H and $s_{ua,inc}$ are the two most influential factors governing wall displacement, while the effect of s_{up}/s_{ua} becomes more pronounced in shallow excavation cases. Overall, the study clarifies the relative roles of these key parameters in the lateral displacement response of deep excavation walls in anisotropic and heterogeneous clay.

Keywords: Deep excavations, anisotropic, heterogeneous, natural clay;

1. GIỚI THIỆU

Trong các đô thị lớn, hố đào sâu phục vụ xây dựng tầng hầm và công trình ngầm ngày càng phổ biến. Quá trình thi công đào đất làm thay đổi trạng thái ứng suất ban đầu của nền đất, dẫn đến chuyển vị ngang của tường vây và biến dạng của nền đất xung quanh. Vì vậy, việc dự báo chính xác chuyển

vị ngang của tường vây trong suốt trình tự thi công, đặc biệt thông qua mô phỏng số, có ý nghĩa quan trọng trong bảo đảm an toàn, kiểm soát biến dạng và nâng cao độ tin cậy của thiết kế hố đào sâu.

Đã có những nghiên cứu nhằm đánh giá mức độ chính xác trong mô phỏng qua trình thi công hố đào sâu trong cả nền đất cát lẫn

sét. Năm 2008, Hsiung và cộng sự [1] dùng PTHH với mô hình Mohr-Coulomb để phân tích hố đào trong cát đẳng hướng và chỉ ra vai trò quan trọng của thông số độ cứng đất. Năm 2013, Likitlersuang và cộng sự [2] so sánh bốn mô hình đất gồm MC, Soft Soil, HS và HSsmall cho đất sét Bangkok, cho thấy mô hình càng chi tiết thì dự báo chuyển vị tường vây và lún bề mặt càng chính xác. Năm 2016, Choo và Oh [3] tiếp tục khẳng định thông số độ cứng là yếu tố chi phối trong phân tích hố đào bằng MC và HS. Năm 2016, Hsiung và cộng sự [4] sử dụng mô hình PTHH 3D để đánh giá hiệu ứng không gian trong nền cát rời đến chặt vừa và cho thấy mô hình MC với tham số xác định từ thí nghiệm hiện trường vẫn có thể cho dự báo hợp lý.

Tại Việt Nam cũng đã có những nghiên cứu về ứng xử hố đào sâu trong nền đất sét không thoát nước. Năm 2019, Trần và cộng sự [5] sử dụng mô hình HS trong PLAXIS 2D và chỉ ra rằng thông số chi phối mạnh đến kết quả chuyển vị tường vây. Năm 2021 Lại và cộng sự [6] so sánh mô hình MC và HS cho nền bùn sét bão hòa nước tại TP.HCM, trong đó HS với Undrained B và MC với Undrained C cho kết quả phù hợp hơn với quan trắc. Ngoài ra, Nguyễn Ngọc Thắng và cộng sự năm 2023 [7] tiếp tục đánh giá mô hình đất và xây dựng các tương quan thực nghiệm nhằm nâng cao độ chính xác dự báo chuyển vị tường vây.

Có thể thấy rằng chuyển vị ngang tường vây trong hố đào sâu đã được phân tích khá phổ biến bằng

phương pháp PTHH với nhiều mô hình vật liệu khác nhau. Tuy nhiên, các nghiên cứu trước chủ yếu tập trung vào độ cứng đất, điều kiện thoát nước, chiều sâu hố đào và độ cứng tường vây, trong khi ảnh hưởng của tính không đẳng hướng và không đồng nhất cường độ của đất sét tự nhiên vẫn chưa được xem xét đầy đủ. Điều này cho thấy vẫn tồn tại khoảng trống nghiên cứu trong việc đánh giá ảnh hưởng của đặc tính cường độ của nền đất sét bão hòa đến ứng xử biến dạng của hố đào sâu. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này tập trung làm rõ ảnh hưởng của tỷ số không đẳng hướng s_{up}/s_{ua} (đại diện cho đặc tính không đẳng hướng), hệ số không đồng nhất $s_{ua,inc}$ (đại diện cho đặc tính không đồng nhất) và chiều sâu hố đào H , đến chuyển vị ngang của tường vây trong hố đào sâu thông qua mô hình vật liệu NGI-ADP/PLAXIS.

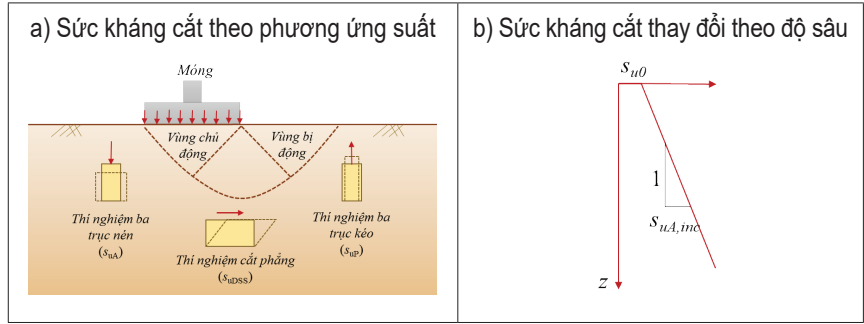
2. ĐẶC TÍNH CỦA NỀN ĐẤT SÉT TỰ NHIÊN

2.1. Đặc tính không đẳng hướng, không đồng nhất

Ứng xử không thoát nước của đất sét mềm thường có đặc tính không đẳng hướng, nghĩa là cường độ kháng cắt phụ thuộc vào hướng ứng suất chính so với phương trầm tích, đặc tính này được mô tả trong Hình 1a. Trong các trạng thái ứng suất khác nhau, cường độ đất có thể được đặc trưng bởi s_{ua} từ thí nghiệm ba trục nén, s_{up} từ thí nghiệm ba trục kéo và s_{uDSS} từ thí nghiệm cắt phẳng, với quan hệ điển hình $s_{up} < s_{uDSS} < s_{ua}$. Vì vậy, việc sử dụng mô hình như NGI-ADP là cần thiết để phản ánh tính không đẳng hướng của đất, thay vì giả thiết một giá trị s_u duy nhất cho toàn bộ nền đất.

Đặc tính không đồng nhất về mặt cường độ hay sức kháng cắt s_u thay đổi theo độ sâu, đã được nghiên cứu bởi các tác giả khác nhau. Một nghiên cứu của Bishop năm 1966 [8] cho thấy sức kháng cắt không thoát nước thay đổi theo độ sâu ở nền đất sét cổ kết thường.

Hình 1. Đặc tính không đẳng hướng, không đồng nhất của nền đất sét



Sức kháng cắt ở độ sâu nhất định được các định bằng công thức $s_u = s_{u0} + s_{uA,inc}z$, trong đó z là chiều sâu đang xét; s_{u0} là sức kháng cắt không thoát nước tại mặt lớp đất; $s_{uA,inc}$ là độ gia tăng sức kháng cắt hay hệ số không đồng nhất. Hình 1b mô tả đặc tính này của nền đất sét.

2.2 Mô hình vật liệu NGI-ADP

Mô hình NGI-ADP được giới thiệu bởi Grimstad năm 2012 [9], là mô hình vật liệu dùng để mô phỏng ứng xử của đất sét trong điều kiện không thoát nước, đặc biệt phù hợp cho các bài toán sức chịu tải, biến dạng và tương tác đất-kết cấu. Mô hình NGI-ADP có những thông số đặc trưng như trong bảng sau:

Bảng 1. Các thông số điển hình của mô hình NGI-ADP

Ký hiệu	Đơn vị	Mô tả
$s_{ua,ref}$	kN/m^2	Sức kháng cắt không thoát nước chủ động tham chiếu;
$s_{ua,inc}$	$kN/m^2/m$	Độ tăng cường độ kháng cắt theo chiều sâu (hệ số không đồng nhất);
s_{up}/s_{ua}	-	Tỷ số sức kháng cắt không thoát nước bị động và chủ động (tỷ số không đẳng hướng);
s_{uDSS}/s_{ua}	-	Tỷ số sức kháng cắt không thoát nước cắt phẳng và chủ động;
ν_u	-	Hệ số Poisson không thoát nước, $\nu_u = 0,495$.

Trong đó, tỷ số không đẳng hướng s_{up}/s_{ua} : biểu thị quan hệ giữa sức kháng cắt không thoát nước ở trạng thái bị động và chủ động. Đối với đất sét cổ kết thường, giá trị điển hình của tỷ số này thường nằm trong khoảng 0,2-0,5. Tỷ số càng nhỏ ($s_{up}/s_{ua} \rightarrow 0$) thì đất càng không đẳng hướng; tỷ số tiến dần tới 1 ($s_{up}/s_{ua} \rightarrow 1,0$) cho thấy ứng xử càng gần đẳng hướng. Đây là thông số quan trọng vì ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng huy động sức kháng và chuyển vị tường vây.

Tỷ số s_{uDSS}/s_{ua} : phản ánh quan hệ giữa sức kháng cắt phẳng và sức kháng chủ động, thường thỏa mãn $s_{up} < s_{uDSS} < s_{ua}$, với giá trị điển hình 0,3-0,8.

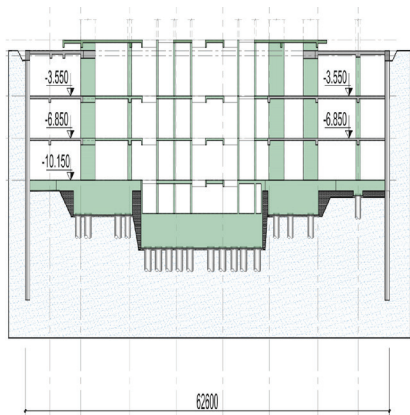
Hệ số không đồng nhất $s_{ua,inc}$: biểu thị mức độ thay đổi của sức kháng cắt chủ động s_{ua} theo chiều sâu. Khi $s_{ua,inc} > 0$, cường độ đất tăng dần theo chiều sâu; ngược lại, $s_{ua,inc} < 0$ cho thấy đất yếu dần theo chiều sâu. Trong PLAXIS, dưới độ sâu tham chiếu, s_{ua} được xác định theo: $s_{ua}(y) = s_{ua,ref} + (y_{ref} - y) s_{ua,inc}$

3. MÔ PHỎNG VÀ KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH

3.1 Thông tin công trình

Khu Phức Hợp Căn Hộ, Thương Mại & Văn Phòng (The Park Avenue) tọa lạc tại phường Phú Thọ, Tp.Hồ Chí Minh. Công trình có quy mô 3 tầng hầm với diện tích xây dựng khoảng 7450 m². Móng đại trà có cao độ trung bình từ -12,950 m. Kích thước mặt cắt ngang hố đào được thể hiện ở Hình 3. Công trình sử dụng tường vây liên tục dày 0,8 m, sâu 28 m để chắn giữ thành hố đào. Các

thông tin về biện pháp thi công, địa chất công trình được tham khảo từ hồ sơ thiết kế của Hoa Binh Construction Group [10].



Hình 2. Mặt cắt ngang hố đào

3.2. Phương án và trình tự thi công hố đào

Hố đào có chiều sâu trung bình 12 m tính từ mặt đất tự nhiên. Biện pháp thi công đào đất là semi top-down. Trình tự thi công hố đào được trình bày trong bảng sau.

Bảng 2. Trình tự thi công hố đào

Bước 1	-	Thi công tường vây, cọc nhồi và hạ kingpost;
Bước 2	-	Đào đất đến cao độ -3,87 m;
Bước 3	-	Thi công sàn hầm 1 tại cao độ -3,55 m và sàn tầng 1 tại cao độ -0,4 m.
Bước 4	-	Hạ MNN đến cao độ -8,150 m và đào đất đến cao độ -7,150 m.
Bước 5	-	Thi công sàn hầm 2 tại cao độ -6,85 m;
Bước 6	-	Hạ MNN xuống cao độ -13,85 m và đào đất xuống cao độ -12,85 m;
Bước 7	-	Thi công móng và sàn hầm 3 tại cao độ -10,150 m.

3.3. Thông số vật liệu và mô hình bài toán trong phần mềm Plaxis

Mô hình NGI-ADP được sử dụng cho lớp sét 2b, trong khi các lớp đất còn lại được mô phỏng bằng mô hình Hardening Soil. Bộ thông số NGI-ADP được xác định từ kết quả thí nghiệm CU của mẫu đại diện lớp 2b, vị trí lớp đất trong mô hình và các khuyến nghị của mô

hình. Trong đó, $s_{uA,ref}$ được chọn khoảng 90 kPa, $s_{up}/s_{uA} = 0,4$, $s_{uDSS}/s_{uA} = 0,7$ và giai đoạn đầu giả thiết nền đồng nhất về cường độ ($s_{uA,inc} = 0 \text{ kN/m}^2/\text{m}$). Thông số lớp 2b, các lớp đất còn lại và tường vây được trình bày lần lượt trong Bảng 3, Bảng 4 và Bảng 5.

Bảng 3. Thông số mô phỏng nền đất đề xuất cho lớp 2b

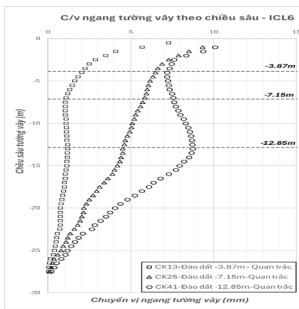
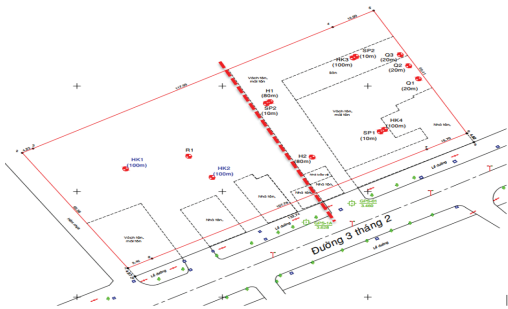
Lớp đất	G_{ur}/s_{uA}			$s_{uA,inc}$ (kN/m ² /m)	γ_f^C (%)	γ_f^E (%)	γ_f^{DSS} (%)	y_{ref} (m)	v_u
2b. Sét pha cát, nâu đỏ-xám trắng, dẻo mềm-dẻo cứng	200	0,4	0,7	0	5	12	8	-5	0,495

Bảng 4. Thông số mô phỏng nền đất đề xuất cho các lớp đất còn lại

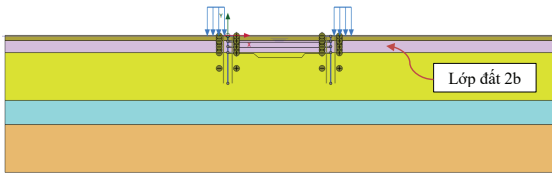
Lớp đất	g_{unsat} (kN/m ³)	E_{ref}^{50} (kN/m ²)	E_{ref}^{oed} (kN/m ²)	$E_{ur,ref}$ (kN/m ²)	c (kN/m ²)	j (^o)	R_{inter}	Cao độ đỉnh lớp (m)
1. Đất san lấp, gạch cát đá	18,0	18.000	18.000	54.000	0,0	30,0	0,80	0,0
2b. Sét pha cát, nâu đỏ-xám trắng, dẻo mềm-dẻo cứng	18,9	(xem Bảng 3)						-1,1
3. Cát pha bụi sét, xám vàng-xám trắng, chặt vừa	19,0	25.692	25.692	77.077	6,4	25,3	0,70	-12,5
4. Sét, xám xanh-nâu đỏ, nửa cứng-cứng	19,9	41.429	41.429	124.286	32,5	28,6	0,80	-38,0
5. Cát pha bụi sét, xám xanh-xám vàng, chặt	20,0	63.143	63.143	189.429	6,1	30,6	0,80	-51,9

Bảng 5. Thông số mô phỏng tường vây

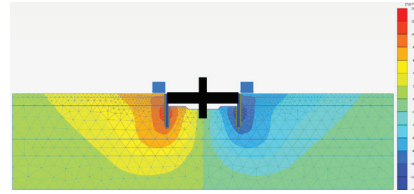
Thông số	Ký hiệu	Gía trị	Đơn vị
Chiều dày tường	b	800	mm
Độ cứng kháng uốn	EJ	1,47E+06	kNm ² /m
Độ cứng kháng nén	EA	2,76E+07	kN/m



Hình 4. Vị trí và kết quả quan trắc



Hình 5. Mô hình hố đào trong Plaxis 2D

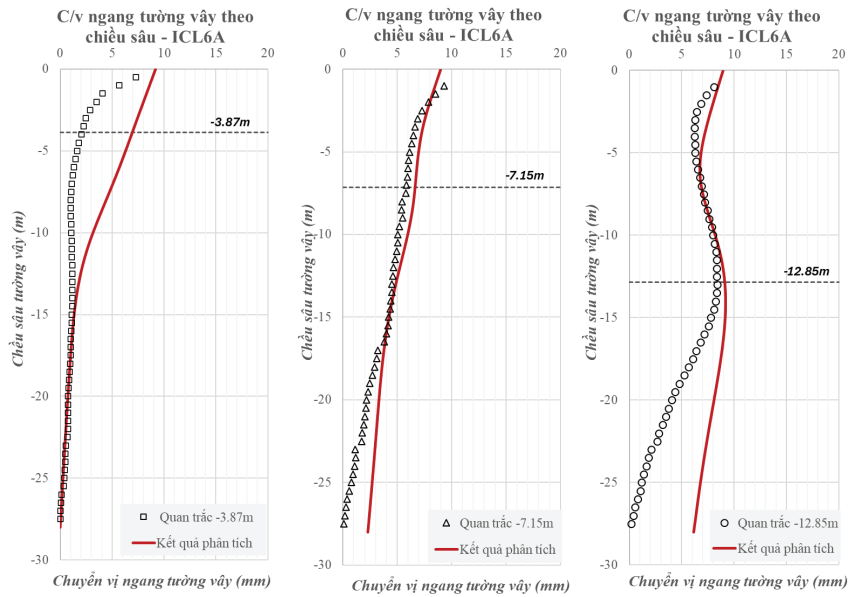


Hình 6. Chuyển vị ngang hố đào ở bước 6

3.5. Mô phỏng hố đào trong Plaxis 2D

Mô hình bài toán trong phần mềm Plaxis 2D. Trình tự đào đất và thi công sàn được thiết lập theo giai đoạn (construction stages). Sơ đồ mô hình trình bày ở Hình 5, và kết quả chuyển vị ngang tường vây được tổng hợp ở Hình 6.

Kết quả mô phỏng được so sánh với số liệu quan trắc ở Hình 7 và cho thấy sự phù hợp tốt về xu hướng chuyển vị qua các giai đoạn thi công. Sai khác về giá trị, đặc biệt ở giai đoạn đào sâu, có thể do điều kiện hiện trường và độ cứng thực tế của hệ kết cấu. Vì vậy, bộ thông số mô hình được xem là phù hợp cho các phân tích tiếp theo.



Hình 7. So sánh kết quả phân tích chuyển vị ngang tường vây và quan trắc tương ứng với từng giai đoạn thi công

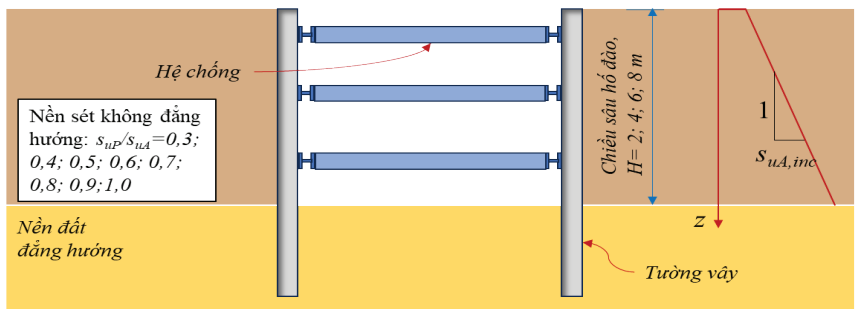
4. GIỚI THIỆU BÀI TOÁN VÀ KẾT QUẢ PHÂN TÍCH

4.1. Giới thiệu bài toán

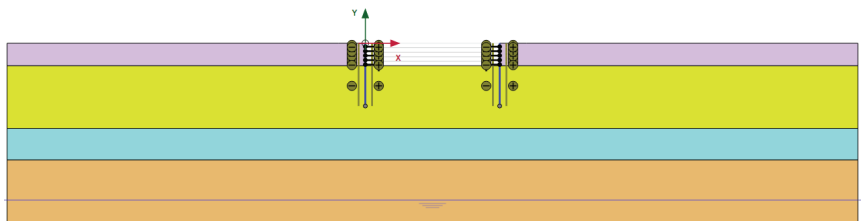
Trong nghiên cứu này, bài toán hố đào sâu trong nền đất sét không đẳng hướng được mô tả trong Hình 8. Trong đó, những thông số: chiều sâu hố đào (H), tỷ số không đẳng hướng (s_{up}/s_{uA}) và hệ số không đồng nhất ($s_{uA,inc}$) được khảo sát. Hố đào nằm trong lớp đất 2b, chân tường nằm trong lớp đất cát số 3. Các thông số khảo sát được tổng hợp trong Bảng 6.

Bảng 6. Các thông số khảo sát

Thông số	Giá trị khảo sát
Tỷ số không đẳng hướng (s_{up}/s_{uA})	0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0.
Hệ số không đồng nhất ($s_{uA,inc}$)	2; 4; 6 kN/m ² /m
Chiều sâu hố đào (H)	2; 4; 6; 8 m



Hình 8. Mô tả bài toán nghiên cứu



Hình 9. Mô hình khảo sát

Trong đó, tỷ số s_{up}/s_{uA} và hệ số $s_{uA,inc}$ được thăm khảo từ các nghiên cứu có xét đến đặc tính không đẳng hướng, không đồng nhất của nền sét trước đây [11].

Ngoài ra, nghiên cứu này không xét đến mực nước ngầm và ảnh hưởng do thi công tường vây và cọc bên trong hố đào.

4.2. Mô hình bài toán và kết quả phân tích

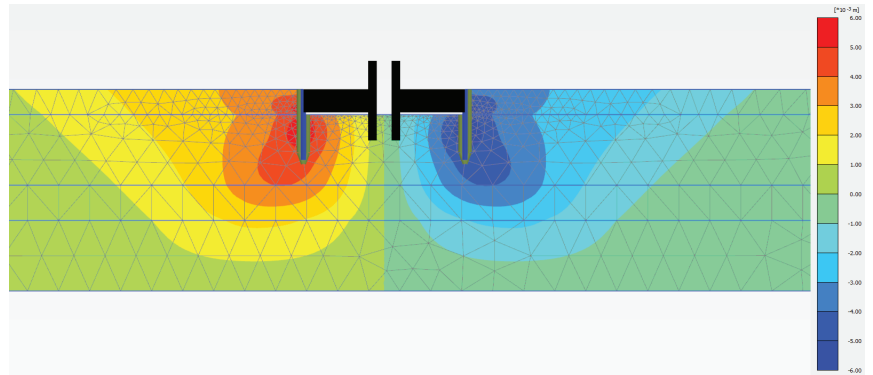
Bài toán được mô phỏng bằng phần mềm PTHH Plaxis 2D, được thể hiện trong Hình 9. Kết quả tính toán chuyển vị ngang ở giai đoạn đào đến -8 m như mô tả trong Hình 10 cho thấy tường vây xuất hiện chuyển vị ngang rõ rệt, với vùng biến dạng lớn tập trung chủ yếu ở khu vực gần hố đào và phía sau tường.

4.3. Ảnh hưởng của tỷ số không đẳng hướng (s_{up}/s_{uA})

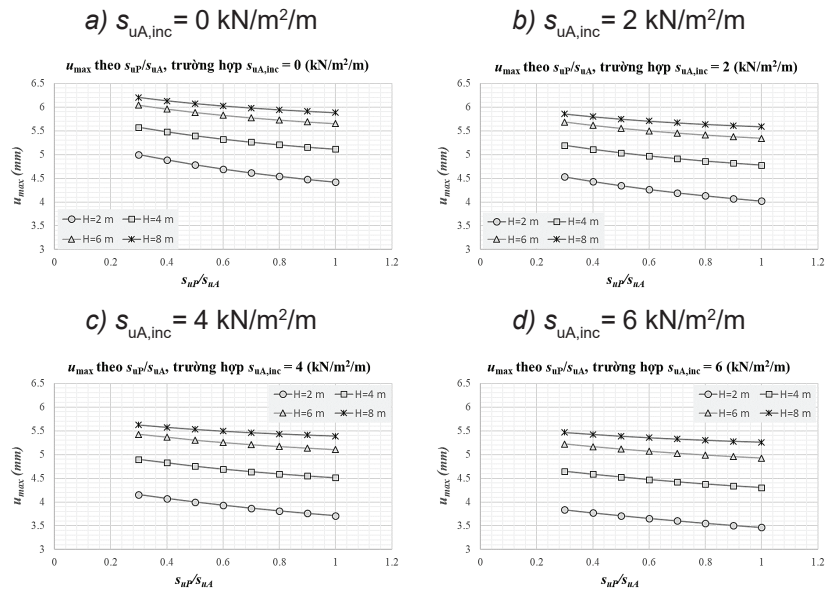
Hình 11 trình bày quan hệ giữa chuyển vị ngang lớn nhất u_{max} theo tỷ số không đẳng hướng s_{up}/s_{uA} , trường hợp $s_{uA,inc} = 0; 2; 4; 6$ kN/m²/m và chiều sâu đào $H = 2; 4; 6; 8$ m. Kết quả cho thấy u_{max} giảm khi s_{up}/s_{uA} gia tăng trong toàn bộ phạm vi khảo sát, có nghĩa là nền đất càng đẳng hướng ($s_{up}/s_{uA} \rightarrow 1,0$) càng làm giảm chuyển vị ngang của tường vây. Mức giảm này thể hiện rõ hơn ở chiều sâu đào $H = 2; 4$ m và giảm dần khi H gia tăng. Cụ thể, khi s_{up}/s_{uA} tăng từ 0,3 đến 1,0 thì u_{max} giảm khoảng 10 đến 12 % đối với $H = 2$ m nhưng chỉ còn khoảng 4 đến 5 % đối với $H = 8$ m. Nhìn chung, chiều sâu hố đào H có ảnh hưởng đến mức chuyển vị tuyệt đối, trong khi tỷ số s_{up}/s_{uA} chi phối xu hướng biến thiên của u_{max} .

4.4. Ảnh hưởng của độ gia tăng sức kháng cắt chủ động theo chiều sâu ($s_{uA,inc}$)

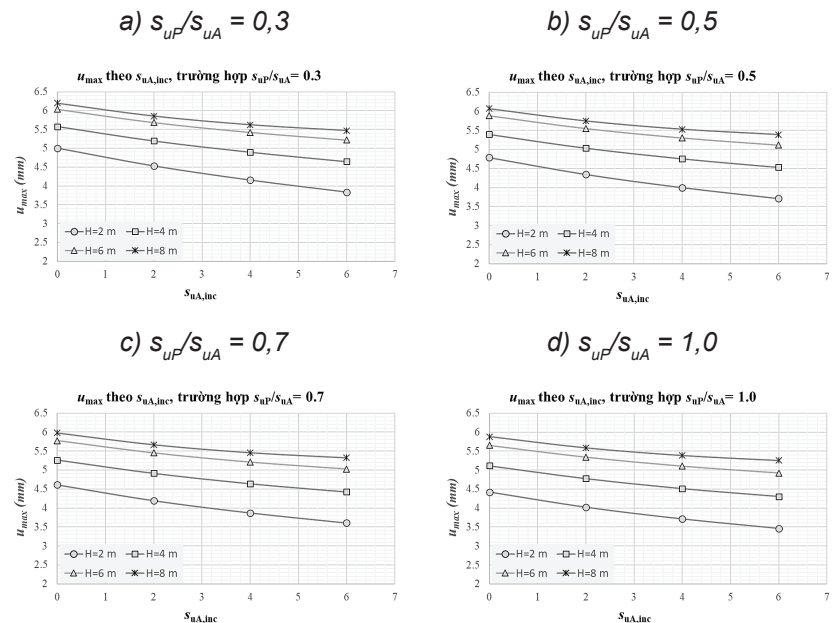
Hình 12 thể hiện quan hệ chuyển vị ngang lớn nhất u_{max} theo tỷ số $s_{uA,inc}$ trường hợp $s_{up}/s_{uA} = 0,3$ đến 1,0 và $H = 2; 4; 6; 8$ m. Kết quả cho thấy u_{max} giảm gần như tuyến tính khi $s_{uA,inc}$ tăng trong toàn bộ phạm vi khảo sát, nghĩa là sự gia tăng cường độ kháng cắt theo chiều sâu có ảnh hưởng rõ rệt trong việc hạn chế chuyển vị ngang của hố đào. Cụ thể, $s_{uA,inc}$ tăng từ 0 lên 6 kN/m²/m, u_{max} giảm khoảng 20 đến 24% đối với $H = 2$ m hay 7- đến 13% đối với $H = 8$ m. Đồng thời, tương tự như kết quả phân tích ở Hình 11 khi s_{up}/s_{uA} tăng từ 0,3 đến 1,0 thì u_{max} cũng giảm dần, một lần nữa cho thấy nền đất càng gần đẳng hướng thì chuyển vị tường vây càng nhỏ.



Hình 10. Chuyển vị ngang điển hình cho các trường hợp khảo sát



Hình 11. Chuyển vị ngang lớn nhất u_{max} theo tỷ số không đẳng hướng s_{up}/s_{uA} (trường hợp $s_{uA,inc} = 0; 2; 4; 6$ kN/m²/m và chiều sâu đào H)



Hình 12. Chuyển vị ngang lớn nhất u_{max} theo tỷ số $s_{uA,inc}$ (trường hợp $H = 2; 4; 6; 8$ m và s_{up}/s_{uA})

4.5. Ảnh hưởng của chiều sâu hố đào (H)

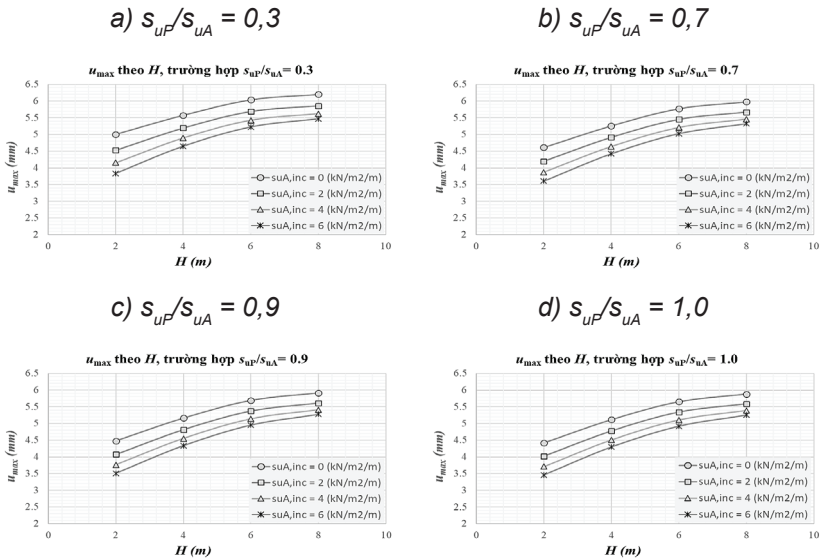
Hình 13 thể hiện quan hệ chuyển vị ngang lớn nhất u_{max} theo chiều sâu hố đào H trường hợp $s_{UP}/s_{UA} = 0,3$ đến 1,0 và $s_{UA,inc}$. Kết quả cho thấy chuyển vị ngang lớn nhất u_{max} tăng rõ rệt khi chiều sâu hố đào H tăng trong toàn bộ phạm vi khảo sát, mức tăng này rõ nhất trong giai đoạn hố đào sâu từ H= 2 m đến H= 6 m, sau đó xu hướng tăng chậm lại khi H từ 6 m đến H= 8 m. Điều này khẳng định rằng chiều sâu đào là tham số chi phối mức chuyển vị tuyệt đối của tường vây. Ngoài ra, u_{max} giảm khi $s_{UA,inc}$ gia tăng, cho thấy sức kháng cắt theo gia tăng chiều sâu giúp cải thiện rõ rệt biến dạng của nền đất và làm giảm chuyển vị ngang của tường vây.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã phân tích ảnh hưởng của các đặc tính của nền đất sét tự nhiên như tính không đẳng hướng thông qua tỷ số không đẳng hướng s_{UP}/s_{UA} ; tính không đồng nhất về mặt cường độ thông qua độ gia tăng cường độ kháng cắt $s_{UA,inc}$ và chiều sâu hố đào (H) đến chuyển vị ngang tường vây. Kết quả cho thấy H và $s_{UA,inc}$ là hai thông số ảnh hưởng lớn đến chuyển vị tường vây.

Khi s_{UP}/s_{UA} tăng, u_{max} có xu hướng giảm, đặc biệt ở các hố đào nông ($H \leq 4$ m) Tương tự, u_{max} giảm gần tuyến tính khi $s_{UA,inc}$ tăng, cho thấy sự gia tăng cường độ theo chiều sâu giúp hạn chế chuyển vị ngang. Ngược lại, u_{max} tăng rõ rệt theo chiều sâu hố đào, chứng tỏ H là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến chuyển vị tuyệt đối của tường vây.

Đối với phân tích hố đào sâu trong nền sét tự nhiên, cần ưu tiên mô tả hợp lý sự gia tăng cường độ kháng cắt theo chiều sâu và mức độ không đẳng hướng của đất thay vì giả thiết nền đồng nhất, đẳng hướng về cường độ. Các nghiên cứu tiếp theo nên mở rộng đánh giá thêm ảnh hưởng của mực nước ngầm, nội lực phát sinh trong tường vây, độ cứng của tường, hệ chống và nội lực trong hệ chống để nâng cao độ tin cậy của mô hình.■



Hình 13. Chuyển vị ngang lớn nhất u_{max} theo tỷ số H (trường hợp $s_{UP}/s_{UA} = 0,3$ đến 1,0 và $s_{UA,inc}$)

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. B.-C. B. Hsiung, “A case study on the behaviour of a deep excavation in sand,” *Computers and Geotechnics*, vol. 36, no. 4, pp. 665-675, 2009.
- [2]. S. Likitlersuang, C. Surarak, D. Wanatowskic, E. Ohd and A. Balasubramaniam, “Finite element analysis of a deep excavation: A case study from the Bangkok MRT,” *Soils and foundations*, vol. 53, no. 5, pp. 756-773, 2013.
- [3]. C. C. Yong and E. Oh, “Modelling ground response for deep excavation in soft ground,” *International Journal of GEOMATE*, vol. 11, no. 26, pp. 2633-2642, 2016.
- [4]. B.-C. B. Hsiung, K.-H. Yang, W. Aila and C. Hung, “Three-dimensional effects of a deep excavation on wall deflections in loose to medium dense sands,” *Computers and Geotechnics* , vol. 80, pp. 138-151, 2016.
- [5]. Trần Trung Hiếu and T. T. Danh, “Nghiên cứu thông số độ cứng đất nền trong mô hình hardening soil cho bài toán mô phỏng chuyển vị tường vây hố đào,” *Tạp chí Bộ xây dựng*, vol. 6, pp. 138-142, 2019.
- [6]. L. V. Quý, H. Q. Thiện, T. H. Thời and T. D. Tân, “Phân tích ứng xử hố đào sâu trong nền sét bão hòa nước bằng phương pháp FEM,” *Tạp chí Địa Kỹ Thuật Xây Dựng*, vol. 3, 2021.
- [7]. Nguyễn Ngọc Thắng and T. V. Thanh, “Ứng dụng mô hình nền Hardening Soil và Mohr Coulomb trong Plaxis 3D mô phỏng tính toán chuyển vị tường vây,” *Tạp chí KHCN Xây dựng*, vol. 2, pp. 56-63, 2023.
- [8]. A.W.Bishop, “The strength of soils as engineering materials,” *Geotechnique*, pp. 91-130, 1966.
- [9]. G. Grimstad, L. Andresen and H. P. Jostad, “NGI-ADP: Anisotropic shear strength model for clay,” *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, vol. 36, no. 4, pp. 483-497, 2012.
- [10]. H. B. C. Group, “Tổ hợp cao ốc thương mại, dịch vụ, văn phòng và căn hộ,” 2016.
- [11]. V. N. Khatri and J. Kumar, “Vertical uplift resistance of circular plate anchors in clays under undrained condition,” *Computers and Geotechnics*, vol. 36, no. 8, pp. 1352-1359, 2009.

Ngày nhận bài: 16/03/2026;
Ngày chấp nhận đăng: 28/5/2026