KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG MÔ HÌNH NỀN ĐẤT VÀ BỀ RỘNG MÔ HÌNH TÍNH TOÁN ĐẾN ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU CÔNG TRÌNH NGẦM CHỊU TÁC DỤNG CỦA ĐỘNG ĐẤT, TRƯỜNG HỢP NGHIÊN CỨU TẠI ĐOẠN ĐI NGẦM THUỘC TUYẾN ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THI SỐ 3, NHỔN - GA HÀ NỘI

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF SOIL MODELS AND COMPUTATIONAL MODEL WIDTH ON THE BEHAVIOR OF UNDERGROUND STRUCTURES UNDER EARTHQUAKE EFFECTS: A CASE STUDY OF THE UNDERGROUND SECTION OF URBAN RAILWAY LINE NO. 3, NHON - HANOI STATION

TS. Vũ Ngọc Anh - *Viện KTCTĐB, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Email: ngocanh.vu@lqdtu.edu.vn*
KS. Nguyễn Xuân Hai - *Học viên cao học K35, Học viện KTQS*
TS. Đinh Viết Thanh - *Viện KTCTĐB, Học viện KTQS*
TS. Nguyễn Tiến Nam - *Viện KTCTĐB, Học viện KTQS*

Tóm tắt: Việc tính toán công trình ngầm chịu động đất là một vấn đề quan trọng, đặc biệt tại các khu vực đô thị đông đúc như Hà Nội. Nghiên cứu này trước hết khảo sát ảnh hưởng của chiều rộng mô hình tính toán trong Plaxis, cho thấy khi bề rộng mô hình tính tăng, chuyển vị tại đỉnh hầm trái giảm dần ổn định khi khoảng cách từ biên nghiên cứu cách đường hầm khoảng cách bằng chín lần đường kính hầm. Điều này giúp kết quả hội tụ và tối ưu hóa tài nguyên tính toán. Đồng thời, nghiên cứu đánh giá mô hình môi trường đất, trong đó mô hình HS Small vượt trội so với HS nhờ khả năng mô phỏng ứng xử của đất trong điều kiện biến dạng nhỏ, giảm thiểu sai số và cung cấp kết quả chính xác hơn. Nghiên cứu được thực hiện tại tuyến Metro số 3 (Nhổn – Ga Hà Nội), nhằm so sánh và lựa chọn mô hình tính toán hiệu quả nhất, hướng tới thiết kế công trình ngầm an toàn và bền vững tại các khu vực có nguy cơ địa chấn.
Từ khóa: Công trình ngầm lắp ghép, Plaxis 2D, mô hình HS Small, động đất, ...

Abstract: The analysis of underground structures subjected to seismic loading is a critical concern, particularly in densely populated urban areas like Hanoi. This research explores the influence of model width in Plaxis simulations, demonstrating that increasing the calculation model's width results in stabilized displacement at the crown of the left tunnel when the boundary distance is nine times the tunnel diameter. This ensures computational efficiency and convergence of results. Furthermore, the study assesses geotechnical models, with the HS Small model outperforming the HS model due to its superior capability to simulate soil behavior under small-strain conditions, reducing inaccuracies and delivering enhanced precision. The research, conducted on Hanoi Metro Line 3 (Nhổn – Hanoi Station), aims to identify and implement the most effective numerical modeling approach to ensure safe and sustainable underground construction in seismically active regions.
Keywords: Segmental tunnel, HS Small model, Plaxis 2D, earthquake, ...

1. MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh đô thị hóa ngày càng gia tăng, các công trình ngầm như đường hầm trở thành giải pháp quan trọng nhằm tối ưu hóa không gian và giảm tải giao thông. Tuy nhiên, việc thiết kế và xây dựng các công trình ngầm này đặt ra những thách thức lớn, đặc biệt là trong các khu vực có nguy cơ động đất cao như Hà Nội. Một trong những vấn đề cốt lõi là đánh giá chính xác tác động của động đất đến nội lực và chuyển vị trong kết cấu, từ đó đảm bảo an toàn và hiệu quả cho công trình.

Phần mềm phân tích địa kỹ thuật như Plaxis đã chứng minh tính hữu ích trong việc mô phỏng ứng xử của đất và công trình dưới tác động của tải trọng động đất [1][8][10]. Tuy nhiên, việc lựa chọn mô hình môi trường đất và xác định chiều rộng mô hình tính toán vẫn là những yếu tố quan trọng quyết định độ chính xác của kết quả, đặc biệt là khi sử dụng phương pháp phân tích động lực học. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tập trung khảo sát và so sánh hai mô hình môi trường đất (HS và HS Small) cũng như ảnh hưởng của chiều rộng mô hình nghiên cứu đến các thông số động học và tĩnh học của đường hầm metro.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Cơ sở lý thuyết trong mô hình hóa kết cấu vỏ hầm thi công theo công nghệ TBM

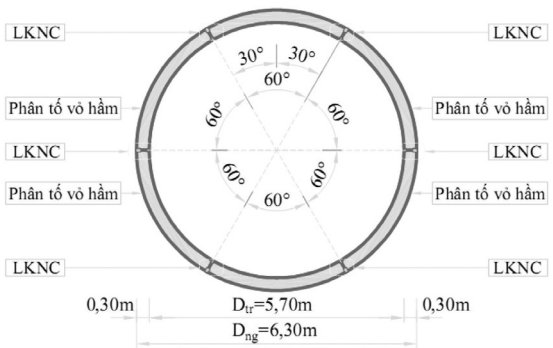
Việc mô hình hóa kết cấu vỏ hầm dạng lắp ghép thi công theo công nghệ TBM có thể tiếp cận theo 2 phương pháp: Mô hình hóa kết cấu ở dạng một vòng tròn liên tục hoặc mô hình hóa kết cấu thành các phân tố vỏ hầm, các phân tố này liên kết với nhau qua các liên kết nửa cứng. Trong đó, việc sử dụng mô hình hóa kết cấu thành các phân tố vỏ hầm cho kết quả thể hiện đầy đủ hơn.

Các phân tố của vỏ hầm được liên kết tại các nút và được giả thiết làm việc theo mô hình dạng liên kết nửa cứng của Jassen [9] thể hiện như trong hình dưới đây. Jassen đã mô hình hóa liên kết giữa các

phân tố bằng ba liên kết đàn hồi:

- Liên kết đàn hồi kháng uốn với độ cứng C_r, liên kết này đặc trưng cho khả năng truyền mô men từ miếng ghép này sang miếng ghép kia. Giá trị C_r cũng là thông số cơ bản trong mô hình Jassen.
- Liên kết đàn hồi theo phương pháp tuyến với độ cứng k_r.
- Liên kết đàn hồi theo phương tiếp tuyến với độ cứng k_t.

Trong thực tiễn tính toán, giá trị liên kết đàn hồi theo phương pháp tuyến (k_r) và tiếp tuyến (k_t) thường được giả thiết là rất lớn. Khi tính toán theo phần mềm Plaxis 2D, liên kết Janssen được mô tả tương đương với khớp lý tưởng có liên kết kháng uốn với độ cứng C_r.

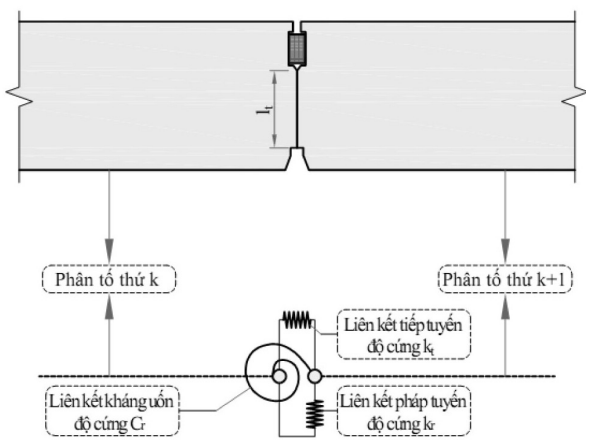


Hình 1. Sơ đồ kết cấu vỏ hầm dạng lắp ghép tính toán

Giá trị độ cứng kháng uốn Cr của liên kết (giả thiết trong giai đoạn liên kết đóng kín) được xác định theo công thức (1).

$$C_r = \frac{b.l_t^2.E_c}{12} \quad (1)$$

Trong đó: l_t là chiều cao làm việc của liên kết;
E_c là mô đun đàn hồi của bê tông;
b là chiều dài đoạn hầm.



Hình 2. Mô hình liên kết theo Jassen [9]

2.2. Mô hình hóa đất đá xung quanh khoang hầm với mô hình HSS

a. Mô hình HS Small

Mô hình đất với độ cứng biến dạng nhỏ (HSsmall) là sự phát triển của mô hình đất (HS), do Schanz và cộng sự đề xuất [3], được mở rộng bởi mô hình chồng biến dạng nhỏ đàn hồi, do Benz và cộng sự phát triển [4, 5]. Mô hình HSsmall cho phép mô tả hành vi para-đàn hồi trễ của đất ở các biến dạng rất nhỏ, bằng cách đưa vào mô đun độ cứng cắt ban đầu G_0 và sự phát triển của tỷ lệ độ cứng cắt G_s/G_0 với biến dạng cắt γ. Đường cong suy giảm mô đun được triển khai như một phiên bản sửa đổi của định luật Hyperbolic đơn giản do Hardin và Drnevich đề xuất [6]:

$$\frac{G_S}{G_0} = \frac{1}{1+0.385\dfrac{\gamma}{\gamma_{0.7}}} \quad (2)$$

Trong đó $\gamma_{0.7}$ là độ biến dạng mà tại đó mô đun cắt cắt giảm xuống còn khoảng 70% G_0.

Bất kỳ sự thay đổi nào trong hướng gia tăng biến dạng đều được tính đến bằng giá trị γ_{Hist} phụ thuộc vào lịch sử biến dạng vô hướng, ghi nhớ lịch sử biến dạng lệch của vật liệu. Thông qua giá trị biến dạng γ_{Hist}, một giá trị duy nhất của độ cứng tiếp tuyến được xác định bởi (công thức 2), mô tả mối quan hệ ứng suất-biến dạng dọc theo mọi hướng tải trọng điều kiện tải đa trục.

$$\frac{G_t}{G_0} = \frac{G_0}{\left(1+0.385\dfrac{\gamma}{\gamma_{0.7}}\right)^2} \quad (3)$$

Mô đun độ cứng cắt tiếp tuyến G_t công thức (2) bị giới hạn bởi giá trị cắt thấp hơn G_{ur}. Khi mức độ biến dạng đạt đến ngưỡng cắt giới hạn γ công thức (2) mô đun độ cứng cắt tiếp tuyến G_t trở nên không đổi và bằng mô đun độ cứng cắt dỡ tải - tải lại

$G_{ur} = \dfrac{E_{ur}}{1+2\nu_{ur}}$. Kết quả là:

$$\gamma_{cut-off} = \frac{\gamma_{0.7}}{0.385}\left(\sqrt{\frac{G_0^{ref}}{G_{ur}^{ref}}}-1\right) \quad (4)$$

Giá trị giới hạn dưới tương tự G_{ur}, được đạt tới một cách tiệm cận bởi G_s trong điều kiện tuần hoàn, hành vi trễ trong quá trình dỡ tải được xây dựng theo các quy tắc Masing đã sửa đổi, mô tả các vòng trễ cung cấp thước đo về sự tiêu tán năng lượng.

Một đặc điểm cơ bản của mô hình là sự phụ thuộc của độ cứng của đất vào mức ứng suất, được thực hiện như một hàm của các tham số ứng suất và cường độ hiệu dụng c' và φ':

$$G_0 = G_0^{ref} \frac{\left(c'\cos\varphi' + \sigma_3' \sin\varphi'\right)^m}{c'\cos\varphi' + p^{ref} \sin\varphi'} \quad (5)$$

Trong đó G_0^{ref} là mô đun cắt ban đầu tham chiếu tương ứng với áp suất giới hạn tham chiếu p^{ref} (giả sử bằng 100 kPa), m là hằng số phụ thuộc vào loại đất và σ_3' là ứng suất hiệu dụng chính nhỏ. Các biểu thức tương tự như công thức (4) được đưa vào mô hình để định nghĩa sự phụ thuộc vào trạng thái ứng suất của mô đun không tải-tải lại E_{ur}, độ cứng cắt trong thử nghiệm ba trục thoát nước tiêu chuẩn E_{50}và độ cứng tiếp tuyến cho tải trọng E_{eod}.

Mô hình HSsmall là mô hình đàn hồi dẻo cứng đẳng hướng, đặc trưng bởi hai bề mặt giới hạn chảy: bề mặt giới hạn chảy cứng cắt, giống với định luật Hypebolic, có thể mở rộng tới tiêu chuẩn phá hủy Mohr Coulomb theo hàm của biến dạng dẻo lệch; bề mặt giới hạn chảy giới hạn, được đưa vào để phân định vùng đàn hồi cho các đường ứng suất nén, được điều chỉnh bởi biến dạng thể tích dẻo.

b. Tham số động mô hình HS Small

Tiến hành định nghĩa tham số theo dữ liệu có sẵn, theo quy trình hiệu chuẩn phù hợp. Mô đun độ cứng cắt ban đầu tham chiếu G_0^{ref} và tham số m được chọn để có được sự phù hợp tốt nhất với hồ sơ vận tốc sóng cắt do thử nghiệm lỗ chéo cung cấp. Mức biến dạng cắt $\gamma_{0.7}$ được hiệu chuẩn bằng cách sử dụng đường cong suy giảm của mô đun cắt và tỷ lệ giảm chấn cho chế độ phản ứng para-đàn hồi. Mức biến dạng cắt $\gamma_{0.7}$ bằng 0,0001 đến 0,0002 đối với đất cát và 0,00005 đến 0,0001 đối với đất sét [7]. Tỷ lệ G_0^{ref} / G_{ur}^{ref} được xác định sao cho được giữ ở mức 4 đối với lớp cát bùn và ở mức 2,5 đối với các lớp đất khác [8], dẫn đến giá trị $\gamma_{cut\text{-}off}$ phù hợp. Cần lưu ý rằng vượt quá biến dạng cắt cắt, tỷ lệ giảm chấn giảm dần về 0. Trên thực tế, vượt quá ngưỡng giới hạn này, mô đun độ cứng tiếp tuyến trở nên không đổi, nhưng vòng trễ trở nên hẹp hơn khi mức biến dạng tăng.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Xây dựng mô hình bài toán trên phần mềm Plaxis khảo sát kết cấu công trình ngầm Metro Nhổn – Ga Hà Nội dưới tác dụng của động đất

Báo cáo lựa chọn mặt cắt điển hình tại lý trình Km19+974 trong tuyến Metro Nhổn - Ga Hà Nội để khảo sát, tính toán. Việc tính toán nội lực xuất hiện kết cấu lớp vỏ hầm đã được thực hiện với phần mềm Plaxis Tunnel 2D CE V20.

a. Các thông số cơ bản

Theo hồ sơ thiết kế của tuyến Metro số 03 mỗi đốt hầm bao gồm 6 phân tố (segment), trong đó, phân tố khóa (key segment) có kích thước nhỏ hơn các phân tố còn lại. Mô hình vật liệu kết cấu hầm giả thiết là đồng nhất và làm việc theo mô hình đàn hồi tuyến tính, các đặc trưng tiết diện kết cấu và vật liệu vỏ hầm được giả thiết như trong bảng 1.

Bảng 1. Các tham số của kết cấu vỏ hầm khai báo trong Plaxis 2D

TT	Tham số	Ký hiệu	Tròn	Đơn vị
1	Kích thước trong của vỏ hầm	D_{tr}	5,70	m
2	Kích thước ngoài của vỏ hầm	D_{ng}	6,30	m
3	Mô-đun đàn hồi của bê tông vỏ hầm	E_c	$3,5x10^7$	kN/m^2
4	Hệ số Poisson của bê tông	ν	0,2	
5	Bề dày của kết cấu vỏ hầm	t	0,30	m
6	Bề rộng dải kết cấu khảo sát	b	1,5	m
7	Độ cứng dọc trục	EA	$10,50x10^6$	kN/m
8	Độ cứng kháng uốn	EI	$7,875x10^4$	kNm^2/m
9	Trọng lượng đơn vị theo chiều dài	w	7,50	kN/m/m

b. Các tham số của đất đá

Sử dụng mô hình HS, HS Small để mô hình hóa môi trường đất nền, các tham số cần khai báo mô hình này trong Plaxis.

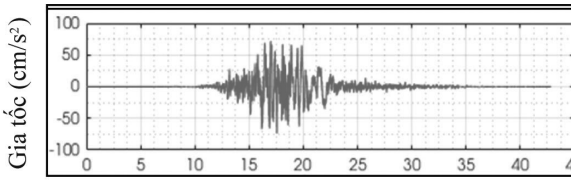
Các tham số của đất nền được tham khảo từ tài liệu khảo sát địa chất thuộc dự án tàu điện đô thị số 03 [1] và được thể hiện như trong bảng 2 dưới đây.

Tham số cản Rayleigh [10] cho từng lớp như kết quả thể hiện trong bảng 3 dưới đây.

c. Thiết lập dữ liệu giản đồ gia tốc tính toán

Giản đồ gia tốc tính toán được tham khảo theo nghiên cứu tại [10] là giản đồ gia tốc nhân tạo được lắp đặt trên nền đá gốc, được tạo ngẫu nhiên bởi chương trình PG02, có phổ phản đáp ứng theo TCVN 9386-2012 [2]. Các tham số đầu vào để tạo biểu đồ gia tốc nhân tạo được xác định dựa trên điều kiện tại quận Ba Đình, thành phố Hà Nội như sau:

- Lớp đất: Loại A;
- Vận tốc trung bình của sóng cắt, vs = 800m/s;
- Gia tốc đỉnh tham chiếu, agR = 0.0976g;
- Đứt gãy nằm trong vùng động đất Sông Hồng - Sông Chảy, bao gồm: độ lớn động đất Mw = 6.5; độ sâu chấn tiêu Rhyp = 17 km; khoảng cách từ điểm khảo sát đến tâm chấn Rrup = 50 km.



Hình 3. Giản đồ gia tốc bd01_03a

Bảng 2. Bảng các tham số của các lớp đất đá theo mô hình HSS

TT	THÔNG SỐ	KÝ HIỆU	TÊN LỚP				
			L1	L2	L3	L4	L5
1	Bề dày lớp địa chất (m)		2	5	6,7	15,0	11,8
2	Loại đất		Đất đắp	GU3&4	GU1-S	GU5a	GU7&8
3	Mô hình vật liệu		HS,HSS	HS,HSS	HS,HSS	HS,HSS	HS,HSS
4	Dung trọng bão hòa nước (kN/m^3)	γ_{sat}	19	18	20	21	21
5	Dung trọng tự nhiên (kN/m^3)	γ_{unsat}	19	18	20	21	21
6	Mô đun biến dạng đơn trục (MN/m^2)	E_{oed}^{ref}	7	7	10	10	45
7	Mô đun biến dạng cát tuyến (MN/m^2)	E_{50}^{ref}	7	7	10	10	45
8	Mô đun biến dạng chất-dỡ tải (MN/m^2)	E_{ur}^{ref}	20	20	30	50	135
9	Hệ số Poisson		0.3	0.4	0.35	0.3	0.3
10	Lực dính c (kN/m2)	c	25	10	0	0	0
11	Góc ma sát trong φ (độ)	φ	25	20	32	33	40
12	Hệ số Rinter	Rinter	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7
13	Mức biến dạng cắt	$\gamma_{0.7(\%)}$	5E-05	5E-05	5E-05	1E-04	1E-04
14	Mô đun độ cứng cắt ban đầu(MN/m^2)	G_0^{ref}	33,33	33,33	50,00	52,08	140,63

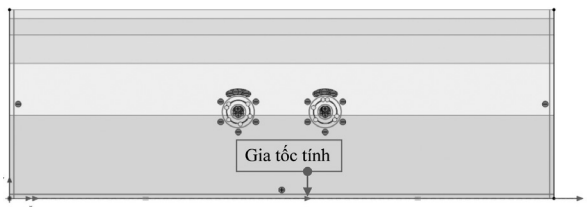
Bảng 3. Bảng tham số tỷ số cản của các lớp đất

TT	Lớp đất	H(m)	N_{SPT}	V_s(m/s)	ξ	ω_1	ω_2	α_R	β_R x10^{-3}
L1	Đất đắp	2,27	7	175,32	0,05	137,63	412,89	10,32	0,18
L2	Lớp sét dẻo	4,19	21	253,88	0,05	79,72	239,16	5,98	0,31
L3	Lớp sét ít dẻo	7,42	41	318,09	0,05	74,54	223,61	5,59	0,34
L4	Lớp cát bụi và cát sét sỏi	13,36	50	340,09	0,05	35,60	106,79	2,67	0,70
L5	Lớp sỏi và cát thô lẫn sỏi	21,55	100	429,58	0,05	57,16	171,47	4,29	0,44

d. Kết quả xây dựng mô hình bài toán trên phần mềm Plaxis 2D

Trên cơ sở số liệu kết cấu và địa chất công trình, tiến hành mô hình hóa bằng phần mềm Plaxis:

- Mô hình hóa kết cấu: sử dụng phần tử dạng dầm 5 nút, mô hình vật liệu đàn hồi tuyến tính;
- Mô hình hóa môi trường: lựa chọn phần tử dạng tam giác 15 nút để mô hình hóa môi trường đất xung quanh khoang hầm, mô hình vật liệu HS và HSS (cho hai trường hợp tính toán);
- Điều kiện biên và kích thước miền nghiên cứu: Sử dụng điều kiện biên tiêu chuẩn.
- Mô hình bài toán và sơ đồ chia lưới được thể hiện lần lượt trong hình 4 dưới đây.

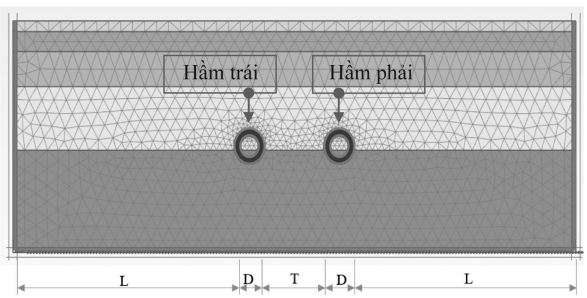


Hình 4. Mô hình bài toán được xây dựng trên phần mềm Plaxis 2D

3.2. Khảo sát ảnh hưởng của kích thước mô hình tính toán đến chuyển vị xuất hiện trong kết cấu vỏ hầm

Trong bài toán mô phỏng ứng xử của kết cấu hầm chịu tác động của động đất, phạm vi môi trường xung quanh được đưa vào mô hình tính toán có ảnh hưởng đáng kể đến kết quả chuyển vị trong kết cấu. Nếu miền khảo sát quá hẹp, có thể xảy ra phản xạ sóng không thực tế, dẫn đến sai lệch kết quả. Ngược lại, nếu miền quá rộng, sẽ làm tăng đáng kể khối lượng tính toán mà không cải thiện đáng kể độ chính xác.

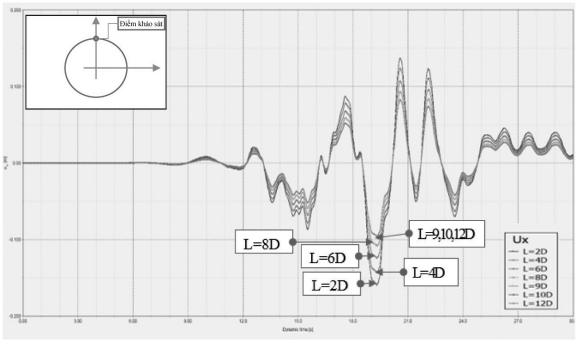
Do đó, việc xác định bề rộng tối ưu của môi trường xung quanh đường hầm là một vấn đề quan trọng, giúp đảm bảo mô phỏng chính xác mà vẫn tối ưu hóa tính toán. Trong nghiên cứu này, tác giả tiến hành khảo sát ảnh hưởng của bề rộng miền tính toán đến chuyển vị trong kết cấu hầm thông qua phương pháp mô phỏng số, từ đó đề xuất một phạm vi hợp lý để áp dụng trong thực tiễn.



Hình 5. Kích thước và sơ đồ lưới phần tử của bài toán

Sử dụng phần mềm Plaxis 2D, mô hình đất nền HS, tiến hành khảo sát với bề rộng môi trường có là L= 2D, 4D, 6D, 8D, 9D, 10D, 12D. Kết quả chuyển vị cực đại tại đỉnh hầm (lấy chuyển vị đại diện tại đỉnh chính giữa phía trên đường hầm bên trái trái) thể hiện trên hình 6 dưới đây.

Kết quả chuyển vị có thể thấy, sự khác biệt về chuyển vị chủ yếu thể hiện khi bề rộng L (khoảng

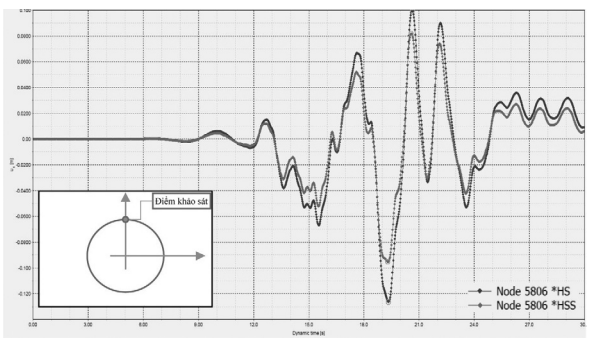


Hình 6. Chuyển vị ngang cực đại của vỏ hầm tại vị trí chính giữa phía trên hầm bên trái

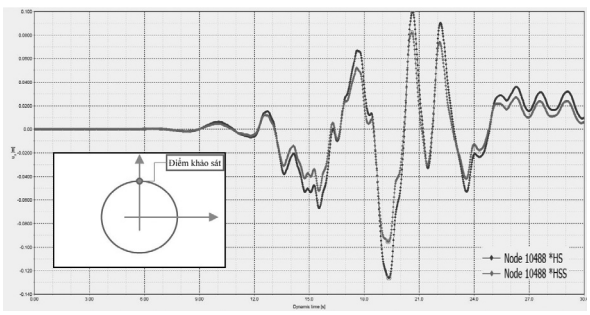
cách từ mép biên đến mép kết cấu) trong khoảng 2D-8D, khi biên đạt bề rộng 9D-12D kết quả khác biệt là không đáng kể, khi này các đường đồ thị biểu diễn chuyển vị động tại đỉnh đường hầm gần như trùng khớp. Điều này cũng được thể hiện rõ rệt khi đánh giá thông qua giá trị chuyển vị cực đại dưới đây.

Bảng 4. Bảng giá trị chuyển vị ngang cực đại đỉnh hầm trái

Khoảng cách từ mép kết cấu đến biên mô hình (L)	L= 2D	L= 4D	L= 6D	L= 8D	L= 9D	L= 10D	L= 12D
Chuyển vị ngang cực đại đỉnh hầm trái (cm)	15,8	14,2	12,4	10,8	9,6	9,5	9,5



Hình 7. Chuyển vị theo phương ngang của đỉnh hầm trái



Hình 8. Chuyển vị theo phương ngang của đỉnh hầm phải

Bảng 5. Bảng tổng hợp chuyển vị max đỉnh hầm trái và đỉnh hầm phải

Điểm	Mô hình HS	Mô hình HSS	Giảm
Node 9386 (cm)	12,6	9,5	24,6%
Node 10488 (cm)	12,4	9,5	23,4%

3.3. Khảo sát chuyển vị, nội lực xuất hiện trong vỏ hầm khi sử dụng hai mô hình nền HS và HS small

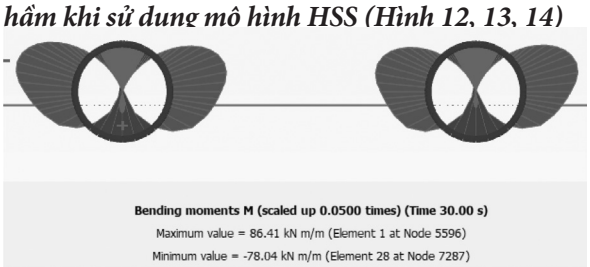
a. Kết quả chuyển vị xuất hiện trong kết cấu lớp vỏ hầm

Chuyển vị đỉnh hầm bên trái (Node 5806: x=58,7m; y=25,4m) và chuyển vị đỉnh hầm bên phải (Node 10488: x=81,0m; y=25,4m) lần lượt được thể hiện như trong các hình 7 và 8.

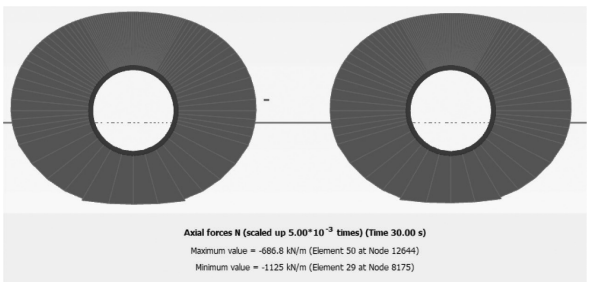
Kết quả khảo sát cho thấy, khi sử dụng mô hình HSS, kết quả chuyển vị cho cả hai bên vỏ hầm giảm đáng kể (trên 20%), điều đó cho thấy việc sử dụng mô hình HSS trong tính toán thiết kế công trình ngầm đô thi chịu động đất sẽ giúp tiết kiệm chi phí xây dựng công trình.

b. Kết quả nội lực xuất hiện trong kết cấu lớp vỏ hầm khi sử dụng mô hình HS (Hình 9, 10, 11)

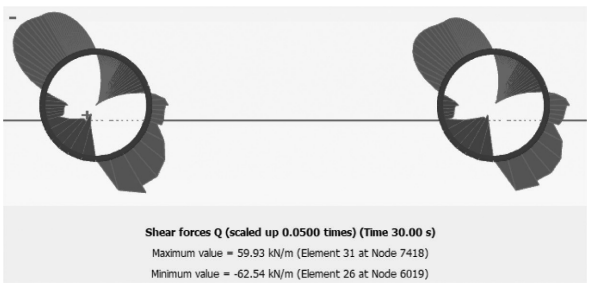
c. Kết quả nội lực xuất hiện trong kết cấu lớp vỏ hầm khi sử dụng mô hình HSS (Hình 12, 13, 14)



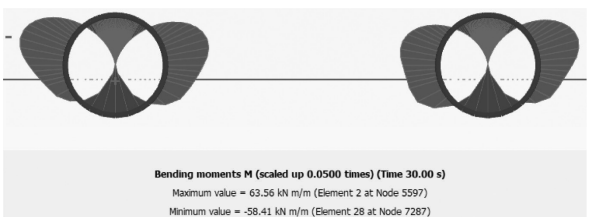
Hình 9. Momem cực đại xuất hiện trong kết cấu với mô hình HS



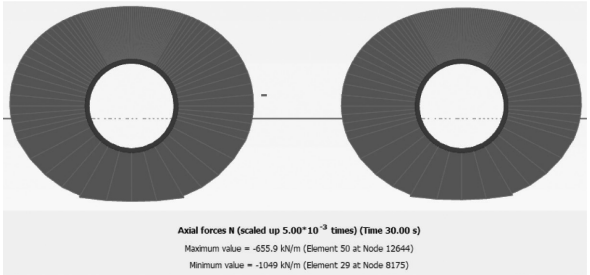
Hình 10. Lực dọc cực đại xuất hiện trong kết cấu với mô hình HS



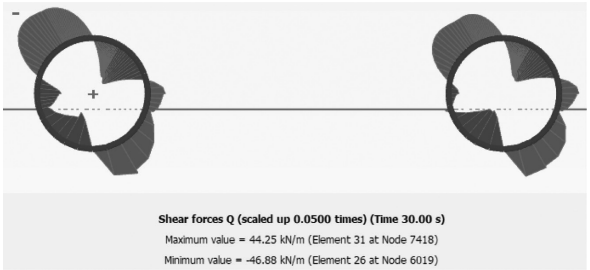
Hình 11. Lực cắt cực đại xuất hiện trong kết cấu với mô hình HS



Hình 12. Momem cực đại xuất hiện trong kết cấu với mô hình HSS



Hình 13. Lực dọc cực đại xuất hiện trong kết cấu với mô hình HSS



Hình 14. Lực cắt cực đại xuất hiện trong kết cấu với mô hình HSS

Bảng 6. Bảng tổng hợp nội lực max vỏ hầm theo các phương án tính toán

Nội lực	Mô hình HS	Mô hình HSS	Giảm
Momem (kNm/m)	86,41	63,56	26,44%
Lực dọc (kN/m)	1125	1049	6,7%
Lực cắt (kN/m)	62,54	46,88	25,03%

4. KẾT LUẬN

Từ những phân tích trên, có thể thấy rằng mô hình Hardening Soil (HS) và Hardening Soil Small-strain (HS Small hay HSS) mang lại kết quả khác nhau khi đánh giá ứng xử của công trình ngầm chịu tác động động đất. Mô hình HS có xu hướng dự đoán chuyển vị và nội lực lớn hơn thực tế do không phản ánh chính xác sự thay đổi độ cứng của đất ở mức biến dạng nhỏ. Điều này dẫn đến việc đánh giá cao khả năng dịch chuyển của kết cấu, đặc biệt trong giai đoạn đầu của tải trọng động. Ngược lại, mô hình HS Small thể hiện sự ưu việt hơn nhờ khả năng mô phỏng tốt đặc tính đất và tương tác đất-công trình. Nhờ đó, kết quả chuyển vị, biến dạng và nội lực của công trình ngầm trong điều kiện động đất trở nên chính xác hơn. Do đó, việc lựa chọn mô hình tính toán phù hợp là yếu tố quan trọng trong thiết kế và đánh giá công trình ngầm chịu tải trọng động đất. Mô hình HS Small không chỉ giúp kiểm soát tốt hơn độ dịch chuyển mà còn góp phần tối ưu hóa thiết kế, nâng cao độ tin cậy trong dự báo và đảm bảo an toàn công trình. Việc ứng dụng mô hình HS Small sẽ giúp giảm thiểu rủi ro và tối ưu hóa giải pháp thiết kế tại các khu vực có nguy cơ động đất cao.

Bên cạnh đó, kết quả khảo sát bề rộng biên tính toán cho thấy khi chiều dài mô hình (L) tăng, chuyển vị tại đỉnh hầm trái giảm dần và đạt độ ổn định ở mức L ≈ 9D. Điều này giúp kết quả hội tụ và tối ưu hóa tài nguyên tính toán. ❑

Tài liệu tham khảo:

[1] Hồ sơ Thiết kế sơ bộ tuyến Metro số 03, Ban Quản lý Đường sắt đô thị Hà Nội, https://mrb.hanoi.gov.vn/
[2] Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 9386:2012 - Thiết kế công trình chịu động đất.
[3] Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G.: The hardening soil model: formulation and verification. Beyond 2000 in Computational Geotech nics, 1999, pp. 281–296.
[4] Benz T., Small-Strain Stiffness of Soils and its numerical consequences. PhD. Thesis, University of Stuttgart, Germany, 2006.
[5] Benz T., Vermeer P.A., Schwab R.: A small-strain overlay model. In ternational Journal for Numerical and Analytical Methods in Geome chanics, Vol. 33, 2009 pp. 25–44.
[6] Hardin B.O., Drnevich V.P.: Shear Modulus and Damping in Soils. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 98, 1972, pp. 667–92.
[7] Hardening Soil model with small strain stiffness, Andrzej Truty ZACE Services, 1.09.2008.
[8] Three-dimensional advanced numerical approaches to the seismic soil and structural response analyses, Angelo Amorosi1, Daniela Boldini2, Annamaria di Lernia3, Fabio Rollo1.
[9] Janssen, P., 1983. Tragverhalten von Tunnelausbauten mit Gelenktübbings, Load carrying behavior of segmented tunnel linings, (Ph.D. thesis). Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, (in German).
[10] Vu, N. A., & Cao, C. Q. (2020). Calculation of tunnel linings under seismic loads of the earthquakes by generated the artificial acceleration applied in the Ha Noi area. Journal of Science and Technique-Section on Special Construction Engineering.