

KHẢO SÁT SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA MÔ HÌNH NỀN KHI TÍNH TOÁN TÍNH TOÁN ĐƯỜNG HẦM LẮP GHÉP THI CÔNG THEO CÔNG NGHỆ TBM, TRƯỜNG HỢP TẠI TUYẾN METRO SỐ 3, NHỒN- GA HÀ NỘI

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF GROUND MODELS ON THE DESIGN OF SEGMENTAL TUNNELS CONSTRUCTED USING TBM TECHNOLOGY: A CASE STUDY ON METRO LINE 3, NHON – HANOI STATION

➤ TS. Cao Chu Quang - Viện KCTĐB, Học viện KTQS

➤ TS. Nguyễn Tiến Nam - Viện KCTĐB, Học viện KTQS

➤ ThS. Ngô Sỹ Sơn - Viện Kỹ thuật xây dựng quân đội, Cục Xăng dầu, Tổng cục Hậu cần- Kỹ thuật

➤ KS. Lâm Thế Cường - Học viên cao học K36, Học viện KTQS

➤ KS. Nguyễn Bá Nam - Học viên cao học K37, Học viện KTQS

Tóm tắt: Bài báo trình bày kết quả khảo sát sự ảnh hưởng của mô hình nền đến quá trình tính toán kết cấu vỏ hầm lắp ghép thi công bằng công nghệ TBM, áp dụng cho tuyến Metro số 3, đoạn Nhổn – Ga Hà Nội. Nghiên cứu so sánh nội lực cục đại (mô men, lực cắt, lực dọc) trong vỏ hầm khi sử dụng hai mô hình nền khác nhau: Hardening Soil (HS) và Mohr-Coulomb (MC), với cùng sơ đồ kết cấu và các phase tính toán tương ứng. Kết quả phân tích cho thấy, mô hình Mohr-Coulomb (MC) tạo ra giá trị nội lực cao hơn một cách đáng kể so với mô hình Hardening Soil (HS) trong toàn bộ các trường hợp khảo sát. Sự khác biệt này đặc biệt rõ rệt đối với các thành phần mô men uốn và lực cắt, trong khi đối với lực dọc trục mức độ chênh lệch ít hơn và có xu hướng ổn định hơn.

Ngoài ra, nghiên cứu cũng chỉ ra rằng giá trị nội lực cục đại thường xuất hiện tại giai đoạn thi công lấp vữa chèn khe, khi áp lực phun vữa được chất tải trực tiếp lên kết cấu vỏ hầm. Sau khi hoàn tất quá trình thi công và chuyển sang giai đoạn khai thác, các giá trị nội lực có xu hướng giảm đáng kể, phản ánh sự phân bố lại ứng suất và sự ổn định dần của hệ kết cấu trong điều kiện làm việc lâu dài.

Từ khóa: Kết cấu vỏ hầm lắp ghép, Liên kết nửa cứng, tuyến Metro số 3 Hà Nội, liên kết Janssen...

Abstract: This article presents the calculation method and results of internal force survey of segmental tunnel lining structures constructed using Tunneling Boring Machine (TBM) technology. The problem is solved according to the full interaction model between the structure and surrounding soil, accepting the Jassen model in describing the connection between the segments. The selected calculation method is the finite element method with Plaxis 2D software. The analysis results indicate that the Mohr-Coulomb (MC) model produces significantly higher internal force values compared to the Hardening Soil (HS) model across all investigated cases. This discrepancy is particularly pronounced in terms of bending moments and shear forces, whereas the difference in axial forces is relatively smaller and more stable.

Furthermore, the study reveals that the maximum internal forces typically occur during the construction phase of the grout backfilling, when the grouting pressure is directly applied to the tunnel lining. Once the construction process is completed and the system transitions into the operational phase, the internal forces decrease considerably, reflecting the redistribution of stresses and the gradual stabilization of the structural system under long-term working conditions.

Keywords: Segmental tunnel, semirigid connection, Hanoi green line No.03, Jassen connection...

1. Đặt vấn đề

Theo Quy hoạch chung xây dựng Thủ đô Hà Nội đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2050, hệ thống mạng lưới đường sắt đô thị sẽ được hình thành và phát triển với quy mô lớn, đóng vai trò là xương sống trong việc tổ chức giao thông công cộng của thành phố. Cụ thể, toàn bộ mạng lưới sẽ bao gồm 8 tuyến đường sắt đô thị chính, được bố trí kết nối các khu vực trung tâm với vùng ven và các đô thị vệ tinh, nhằm giảm tải cho hệ thống đường bộ vốn đang chịu áp lực rất lớn. Tổng chiều dài của toàn bộ các tuyến dự kiến đạt khoảng 300 km, trong đó có sự kết hợp giữa các đoạn đi trên cao, đi bằng cầu

cạn, và đặc biệt là nhiều đoạn hầm ngầm dưới lòng đất để đảm bảo tính liên tục, hạn chế ảnh hưởng đến không gian đô thị hiện hữu, cũng như giữ gìn cảnh quan kiến trúc của khu vực trung tâm. Đáng chú ý, các đoạn hầm này sẽ được thi công bằng công nghệ TBM (Tunnel Boring Machine) – một công nghệ hiện đại sử dụng máy khoan hầm khổng lồ có khả năng đào xuyên qua các lớp đất đá phức tạp, đồng thời lắp đặt các cấu kiện bê tông vỏ hầm ngay trong quá trình thi công. Việc áp dụng TBM không chỉ giúp nâng cao độ an toàn, giảm thiểu rủi ro sụt lún, mà còn hạn chế tối đa tác động đến đời sống sinh hoạt của người dân trên mặt đất trong suốt quá

trình xây dựng [1]. Do đó, việc tính toán, thiết kế công trình ngầm có ý nghĩa quan trọng.

Việc tính toán kết cấu công trình ngầm lắp ghép thi công bằng công nghệ TBM đã được nghiên cứu và áp dụng trong nhiều dự án. Các mô hình tính toán này giúp dự báo nội lực, biến dạng, đồng thời tối ưu thiết kế và đảm bảo an toàn cho công trình trong quá trình thi công cũng như khai thác [2][3][4][5]. Tuy nhiên, phần lớn các công trình trước đây chưa đi sâu vào việc so sánh ảnh hưởng của các mô hình nền khác nhau đối với kết quả nội lực xuất hiện trong vỏ hầm. Đặc biệt, sự khác biệt giữa mô hình Mohr–Coulomb (MC) và mô hình Hardening Soil (HS) trong việc dự báo các thành phần nội lực (mô men, lực cắt, lực dọc) vẫn chưa được phân tích một cách hệ thống và toàn diện.

Do đó, bài báo này hướng tới chính là việc làm rõ sự khác biệt trong kết quả nội lực của vỏ hầm khi sử dụng hai mô hình nền MC và HS, từ đó đánh giá mức độ phù hợp của từng mô hình trong điều kiện thực tế thi công và khai thác công trình ngầm bằng công nghệ TBM. Trong bài báo này, tác giả sẽ trình bày mô hình và phương pháp tính toán kết cấu vỏ hầm được thi công bằng công nghệ TBM, với quan điểm coi kết cấu vỏ hầm tương tác đồng thời với môi trường đất đá xung quanh và các liên kết giữa các miếng ghép tuân theo giả thiết liên kết nửa cứng Jassen [7].

2. Cơ sở lý thuyết xây dựng sơ đồ tính toán kết cấu vỏ hầm thi công theo công nghệ TBM với phần mềm Plaxis

Việc khảo sát sự làm việc của kết cấu vỏ hầm lắp ghép thi công bằng công nghệ TBM (Tunnel Boring Machine) được tiến hành thông qua phần mềm Plaxis V20, một công cụ phân tích số hiện đại trong cơ học đất và công trình ngầm. Trong quá trình tính toán, nghiên cứu thừa nhận một số giả thiết cơ bản như sau:

- Bài toán biến dạng phẳng (plane strain) được áp dụng, bởi chiều dài công trình hầm lớn hơn nhiều lần so với các kích thước khác, cho phép coi mặt cắt ngang là đại diện cho toàn bộ kết cấu.

- Vật liệu kết cấu vỏ hầm được giả định là đồng nhất và đẳng hướng, nhằm đơn giản hóa quá trình mô hình hóa và phân tích.

- Liên kết giữa các miếng ghép (segment) của vỏ hầm tuân theo giả thiết liên kết nửa cứng (LKNC) của Jassen, phản ánh đúng thực tế thi công và khả năng truyền lực giữa các phân tố.

Quá trình mô hình hóa được triển khai theo ba nhóm chính: mô hình kết cấu, mô hình môi trường đất đá, và mô hình tải trọng.

Mô hình kết cấu:

Các phân tố của vỏ hầm được liên kết tại các nút

và giả định làm việc theo mô hình liên kết nửa cứng của Jassen, như minh họa trong Hình 1. Trong mô hình này, Jassen đã mô tả liên kết giữa các phân tố bằng ba dạng liên kết đàn hồi:

- Liên kết đàn hồi kháng uốn với độ cứng C_r , đặc trưng cho khả năng truyền mô men từ một miếng ghép sang miếng ghép kế cận. Giá trị C_r được coi là thông số cơ bản và quan trọng nhất trong mô hình Jassen.

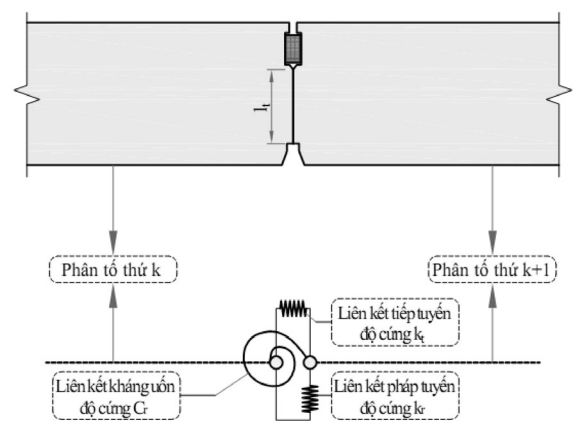
- Liên kết đàn hồi theo phương pháp tuyến với độ cứng k_r , phản ánh khả năng truyền lực theo phương pháp tuyến giữa các phân tố.

- Liên kết đàn hồi theo phương tiếp tuyến với độ cứng k_t , đặc trưng cho khả năng truyền lực theo phương tiếp tuyến.

Nhờ cách tiếp cận này, mô hình có thể mô tả chính xác hơn cơ chế làm việc thực tế của vỏ hầm lắp ghép TBM, đồng thời cho phép đánh giá ảnh hưởng của các thông số liên kết đến nội lực và biến dạng trong kết cấu. 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, liên kết Jassen được mô tả tương đương với khớp lý tưởng có liên kết kháng uốn với độ cứng C , giá trị được xác định theo công thức (1):

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

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, $b=1\text{m}$.



Hình 1. Mô hình hóa liên kết giữa các miếng ghép

Mô hình hóa môi trường: Trong bài báo này, tác giả sử dụng mô hình Hardening Soil (HS) để mô phỏng sự làm việc của khối đất đá bao quanh đường hầm trong quá trình thi công và khai thác. Trên cơ sở tham khảo nghiên cứu của Ahmad (2010), mô hình HS được lựa chọn nhằm mô tả chính xác hơn đặc trưng cơ học của các lớp đất khi tính toán bằng

phần mềm Plaxis.

Mô hình HS vốn được Shanz và cộng sự (1999) cải tiến và phát triển dựa trên nền tảng lý thuyết đàn hồi–dẻo cổ điển, với mục tiêu khắc phục những hạn chế của mô hình Mohr–Coulomb truyền thống. Cụ thể, HS cho phép mô phỏng đồng thời ứng xử đàn hồi và biến dạng dẻo của đất nền, phản ánh rõ hơn quá trình biến cứng (hardening) khi đất chịu tải lặp hoặc tải tăng dần.

Theo Brinkgreve và Broere (2006) [6], khi áp dụng mô hình HS trong Plaxis, cần khai báo một tập hợp các tham số đặc trưng của đất nền. Các tham số này bao gồm những yếu tố cơ bản về độ cứng, sức kháng cắt, và đặc tính biến dạng, đóng vai trò quyết định trong việc phản ánh đúng ứng xử thực tế của đất trong điều kiện tải trọng phức tạp. Các tham số cụ thể của mô hình gồm:

- Dung trọng tự nhiên của đất γ_{unsat} (kN/m³);
- Dung trọng bão hòa nước của đất γ_{sat} (kN/m³);
- Góc ma sát trong φ (độ);
- Cường độ lực dính c (kN/m²);
- Góc trương nở ψ (với đất cố kết nặng, đất sét có thể lấy $\psi \approx 0$; với đất cát có $\varphi > 30^\circ$ có $\psi \approx \varphi - 30^\circ$; với các loại đất có $\varphi < 30^\circ$ lấy $\psi = 0$ [6]).
- Tham số E_{50}^{ref} là mô-đun cắt tuyến ứng với 50%;
- Tham số E_{oed}^{ref} là mô-đun tiếp tuyến xác định từ thí nghiệm nén đơn trục không thoát nước;
- Tham số E_{ur}^{ref} là mô-đun biến dạng của đất khi dỡ và gia tải lại.

Tải trọng tính toán: Thực hiện tính toán kể tới tải trọng tòa nhà lân cận và áp lực vữa chèn.

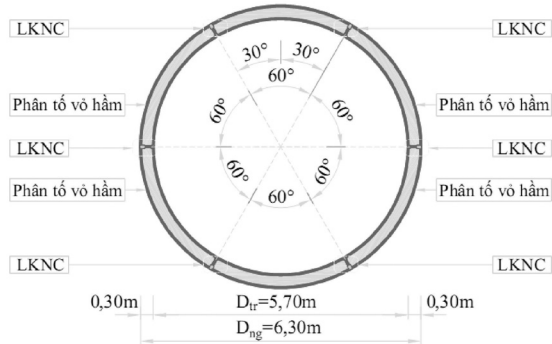
3. Thử nghiệm số tính toán kết cấu vỏ hầm thi công theo công nghệ TBM với phần mềm Plaxis

Đặt bài toán: Xác định nội lực cực đại xuất hiện trong vỏ hầm trong 2 trường hợp có kể đến LKNC và không kể đến liên kết nửa cứng. Đoạn hầm tính toán thuộc Tuyến đường sắt đô thị thí điểm Thành phố Hà Nội, đoạn Nhổn – Ga Hà Nội là một dự án quan trọng của Thành phố Hà Nội. Mặt cắt lựa chọn tính toán là S3 tại Km19+974.

- Thông số kết cấu vỏ hầm và các lớp địa chất:

Các thông số cơ bản của vỏ hầm và địa chất tại mặt

cắt tính toán (gồm 4 lớp theo thứ tự từ trên xuống L1-L4) được tham khảo từ Tài liệu thiết kế đoạn hầm Nhổn-Ga Hà Nội, tuyến số 3 [1] và thể hiện trong bảng 1.



Hình 3. Mặt cắt ngang vỏ hầm tính toán (khi kể đến LKNC)

Bảng 1. Bảng các tham số của kết cấu vỏ hầm

Tham số	Ký hiệu	Tròn	Đơn vị
Kích thước trong của vỏ hầm	D_{tr}	5,70	m
Kích thước ngoài của vỏ hầm	D_{ng}	6,30	m
Mô-đun đàn hồi của bê tông vỏ hầm	E_c	3,5.107	kN/m ²
Hệ số Poisson của bê tông	ν	0,2	
Bề dày của kết cấu vỏ hầm	t	0,30	m
Bề rộng dài kết cấu khảo sát	b	1,00	m
Độ cứng dọc trục	EA	10,50.106	kN/m
Độ cứng kháng uốn	EI	7,875.104	kNm ² /m
Trọng lượng đơn vị theo chiều dài	w	7,50	kN/m/m
Chiều cao làm việc của liên kết	l_t	0,185	m

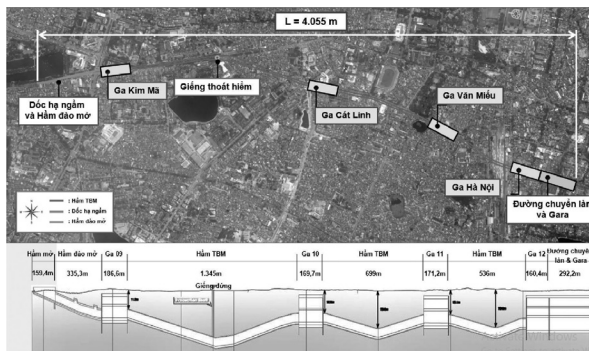
Bảng 2. Bảng các tham số của kết cấu vỏ hầm

Đặc tính của đất	Đơn vị	L1	L2	L3	L4
Dung trọng tự nhiên	kN/m ³	19	18	20	21
Dung trọng khô	kN/m ³	16	11	16	19
Lực dính khi cắt không thoát nước	kPa	50	40	NA	-
Góc ma sát	°	25	20	32	40
Lực dính có hiệu	kPa	15	10	0	0
Hệ số Poisson (thoát nước)	-	0.4	0.4	0.35	0.3
Mô đun đàn hồi gia tải tham chiếu	MPa	10	7	10	45
Mô đun đàn hồi lún tham chiếu	MPa	10	7	10	45
Mô đun đàn hồi dỡ tải/gia tải tham chiếu	MPa	30	20	50	135
Áp suất tham chiếu	kPa	100	100	100	400
Hệ số Poisson (dỡ tải-gia tải)	-	0.3	0.3	0.3	0.2

- Tải trọng tính toán:

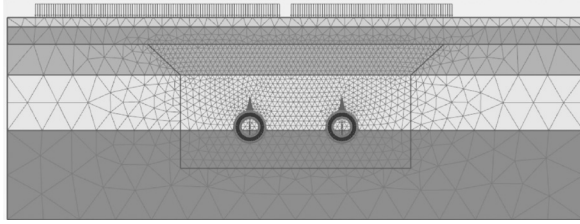
+ Tải trọng tòa nhà lân cận: kể tới tải trọng 02 tòa nhà 7 tầng trên tuyến (ứng với mặt cắt số 3 trong Hồ sơ thiết kế [1]), tải trọng phân bố đều với giá trị $p=141,75\text{kN/m}$.

+ Tải trọng do bơm vữa thứ cấp: Phân bố tải



Hình 2. Đoạn tuyến ngầm khảo sát

trọng thiết kế của bơm vữa xem xét một hệ thống các lực tác động lên từng vòng cung 60° tại vòm đỉnh hầm [2], giá trị áp lực vữa cực đại: 50 kPa tại đỉnh hầm.



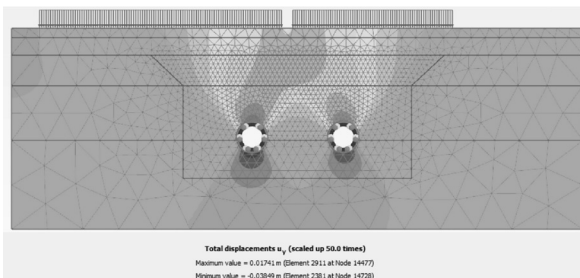
Hình 4. Mô hình lưới phần tử hữu hạn trong phần mềm Plaxis 2D

Tính toán các thành phần nội lực thông qua các giai đoạn (phase) sau:

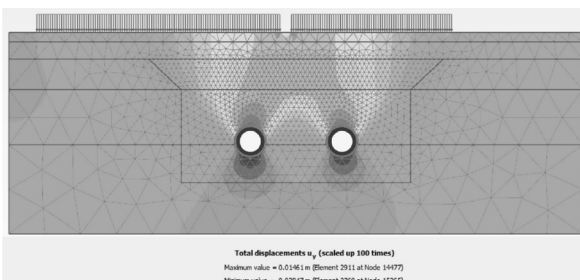
- Giai đoạn 0: Khởi tạo ứng suất ban đầu.
- Giai đoạn 1: Kích hoạt các tải trọng tòa nhà
- Giai đoạn 2: Đào hầm trái.
- Giai đoạn 3: Đào hầm phải, lắp đặt vỏ hầm phân đoạn bên phải.
- Giai đoạn 4: Kích hoạt áp lực vữa 50kPa.
- Giai đoạn 5: Giai đoạn khai thác, loại bỏ áp lực vữa.

4. Kết quả tính toán và nhận xét

Thực hiện kết quả tính toán cho 2 trường hợp, kết quả tính toán thể hiện trong hình 5, 6 và Bảng 3.



Hình 5. Kết quả chuyển vị với trường hợp 1



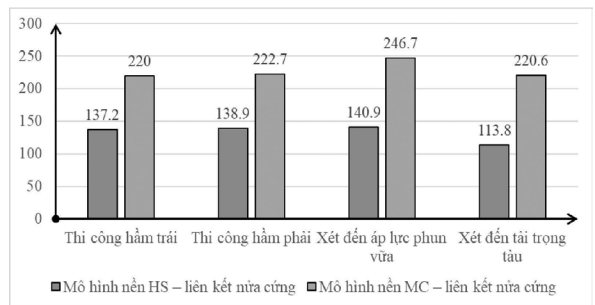
Hình 6. Kết quả chuyển vị với trường hợp 2

So sánh nội lực cực đại (mô men, lực cắt, lực dọc) xuất hiện trong vỏ hầm với cùng sơ đồ kết cấu và cùng phase tính toán khi sử dụng hai mô hình nền khác nhau (HS và MC) ta thu được các biểu đồ so sánh (hình 7, 8, 9). Có thể nhận thấy, với tất cả các trường hợp, nội lực tính toán với mô hình MC đều cho giá trị lớn hơn đáng kể so với nội lực tính

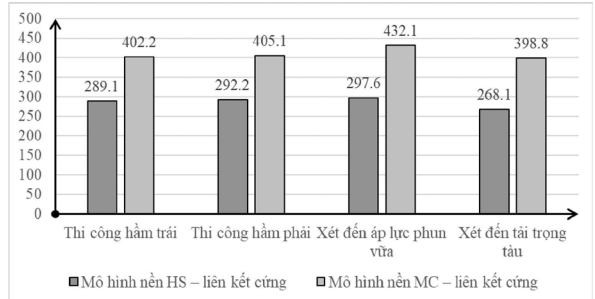
Bảng 3. Giá trị nội lực cực đại xuất hiện trong vỏ hầm

Giai đoạn tính toán	Mô men M – kNm/m		Lực cắt N – KN/m		Lực dọc N – KN/m	
	TH1	TH2	TH1	TH2	TH1	TH2
Thi công hầm trái	137,2	289,1	97,5	220,1	731,7	661,1
Thi công hầm phải	138,9	292,2	96,29	222,7	761,1	689,5
Xét đến áp lực phun vữa	140,9	297,6	96,78	226,2	770,6	697,3
Xét đến tải trọng tàu	113,8	268,1	90,29	222,1	762,9	690,4

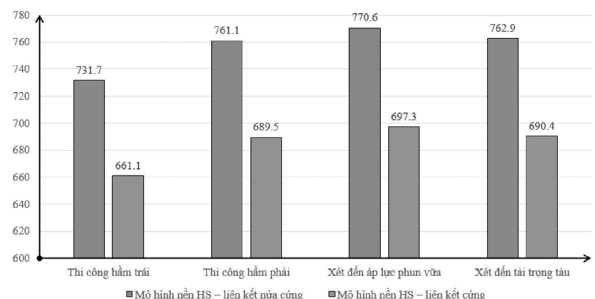
(TH1: Có xét đến LKNC, TH2: Không xét đến LKNC)



Hình 7. Momen cực đại xuất hiện trong vỏ hầm trường hợp xét tới LKNC với 2 mô hình nền MC và HS



Hình 8. Momen cực đại xuất hiện trong vỏ hầm trường hợp không xét tới LKNC với 2 mô hình nền MC và HS



Hình 9. So sánh giá trị Lực dọc cực đại xuất hiện trong vỏ hầm

toán khi sử dụng mô hình HS. Sự chênh lệch về kết quả này đặc biệt được thể hiện rõ khi xét đến giá trị mô men và lực cắt và ít hơn khi khảo sát lực dọc.

Bên cạnh đó, có thể thấy giá trị nội lực lớn nhất **Xem tiếp trang 45**

sát, đo đạc và phân tích, đánh giá hiệu quả thu nước. Kết hợp mô phỏng số để kiểm chứng mô hình. Bỏ vỉa thấm nước tăng hiệu quả thu nước, đặc biệt khi kết hợp cửa thu hiện hữu, xem xét phù hợp với một số khu vực ngập cục bộ.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2025-CT-037.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Kamarul Zaman, A. B., Z. Mustaffa, and L. D. L. Anak Giri (2019), Infiltration rate of pervious concrete on street curb application, *Int. J. Recent Technol. Eng.* 8 (2S2): 86–90. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B1016.0782S219>.
- [2] Nguyễn Thị Hồng (2014), Xây dựng những mảng xanh nhân tạo để đảm bảo thoát nước mặt bền vững, *Tạp chí Kiến trúc*, số 232, 58–61.
- [3] Gómez, M., and B. Russo (2010), Methodology to estimate hydraulic efficiency of drain inlets, *Proc. Inst. Civ. Eng. Water Manage.* 164 (2): 81–90. <https://doi.org/10.1680/wama.900070>.
- [4] Zhang, W., H. Li, Y. Zhang, (2018) Effect of porosity on frost resistance of Portland cement pervious concrete, *Adv. Concr. Constr.* 6 (4): 363–373. <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.4.363>.
- [5] Yang, J., G. Jiang (2003), Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials, *Cem. Concr. Res.* 33 (3): 381–386. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3).
- [6] Aoki, Y., R. Sri Ravindrarajah, H. Khabbaz (2012), Properties of pervious concrete containing fly ash, *Road Mater. Pavement Des.* 13 (1): 1–11. <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.651834>.
- [7] Joshi, T., and U. Dave (2016), Evaluation of strength, permeability and void ratio of Pervious concrete with changing W/C ratio and aggregate size, *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 7 (4): 276–284.
- [8] Mohammed, B. S., V. C. Khed, M. F. Nuruddin (2018), Rubbercrete mixture optimization using response surface methodology, *J. Cleaner Prod.* 171 (Jan): 1605–1621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.102>.
- [9] Harvey, J., D. R. Smith (2018), Permeable pavement road map workshop and proposed road map for permeable pavement, Davis, CA: National Center for Sustainable Transportation.
- [10] Tiêu chuẩn quốc gia, TCVN 13592:2022 (2022), Đường đô thị – Yêu cầu thiết kế.
- [11] Brown, S. A., J. D. Schall, J. L. Morris, C. L. Doherty, S. M. Stein, and J. C. Warner (2013), *Urban drainage design manual: Hydraulic engineering circular no. 22*. 3rd ed. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- [12] Liu, H., G. Luo, Y. Gong, H. Wei (2018), Mechanical properties, permeability, and freeze–thaw resistance of pervious concrete modified by waste crumb rubbers, *Appl. Sci.* 8 (10): 1843. <https://doi.org/10.3390/app8101843>.

KHẢO SÁT SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA MÔ HÌNH NỀN KHI TÍNH TOÁN TÍNH TOÁN ĐƯỜNG HẦM LẤP GHÉP...

Tiếp theo trang 38

trong các trường hợp đều thu được tại phase khi thi công lớp vỉa chèn khe (khi chất tải áp lực phun vỉa) và nhỏ hơn khi vào giai đoạn khai thác.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày và phân tích một số thí dụ tính toán kết cấu công trình ngầm dạng lấp ghép thi công bằng công nghệ TBM trên đoạn tuyến Nhổn – Ga Hà Nội. Thông qua việc so sánh hai mô hình nền khác nhau là Hardening Soil (HS) và Mohr-Coulomb (MC), kết quả cho thấy sự khác biệt rõ rệt về giá trị nội lực cực đại trong kết cấu vỏ hầm. Cụ thể, mô hình MC thường cho kết quả nội lực lớn hơn đáng kể so với mô hình HS, đặc biệt đối với mô men (dao động trung bình từ 38% đến 48%) và lực cắt (dao động trung bình từ 35% đến 43%), trong khi ảnh hưởng đến lực dọc là tương đối nhỏ (chỉ khoảng 8% đến 10%).

Ngoài ra, nghiên cứu cũng chỉ ra rằng nội lực lớn nhất thường xuất hiện tại giai đoạn thi công lớp vỉa chèn khe, khi áp lực phun vỉa được chất tải, và có xu hướng giảm đáng kể trong giai đoạn khai thác. Điều này cho thấy quá trình thi công có ảnh hưởng trực tiếp và mạnh mẽ đến trạng thái ứng xử của kết cấu vỏ hầm, trong khi giai đoạn vận hành

lâu dài lại ít gây ra biến động lớn.

Từ các kết quả trên, có thể khẳng định rằng việc lựa chọn mô hình nền trong quá trình tính toán có tác động đáng kể đến giá trị nội lực xuất hiện trong kết cấu hầm lấp ghép. Do đó, việc sử dụng mô hình nền phù hợp không chỉ giúp nâng cao độ chính xác của kết quả tính toán mà còn góp phần đảm bảo an toàn, tối ưu hóa thiết kế và giảm thiểu rủi ro trong thi công. Đây là vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu chuyên sâu hơn, đặc biệt trong bối cảnh các công trình ngầm đô thị ngày càng phát triển và yêu cầu cao về độ tin cậy trong thiết kế. □

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] ITA-Working Group 2 (2019), Guidelines for the Design of segmental tunnel linings.
- [3] Teodor Iftimie (1996), Contributions to the concept and structural analysis of precast circular linings for shield driven tunnels, Technical university of civil engineering Bucharest, Rumania.
- [4] Sotirios Vardakos (2003), Distinct element modeling of Shimizu tunnel No.3 in Japan, Virginia Polytechnic Institute, the USA.
- [5] H. Mashimo (2003), Evaluation of the load on shield tunnel lining in gravel, Railway technical research Institute, Tokyo, Japan.
- [6] Brinkgreve R.B.J. and Broere W. (2006), Plaxis manual version 8, Delft University of technology & Plaxis b.v., The Netherlands.
- [7] 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).
- [8] Xiaomin You (2007), An analytical solution of shield tunnel based