

Khảo sát hệ số mất mát thể tích trên cơ sở các số liệu quan trắc trong quá trình thi công hầm bằng TBM tại tuyến metro số 1 TP. Hồ Chí Minh

ThS. NGUYỄN THẠCH BÍCH; GS. TS. TRẦN ĐỨC NHIỆM; PGS. TS. NGUYỄN PHƯƠNG DUY
Trường Đại học Giao thông vận tải

TÓM TẮT: Hệ số mất mát thể tích (volume loss) trong thi công hầm bằng tổ hợp khiên đào TBM là một đại lượng quan trọng trong tính toán dự kiến lún gây ra trên mặt đất bằng phương pháp kinh nghiệm và kể cả bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Đại lượng này thường được giả thiết trong tính toán thiết kế như một hằng số định tính phụ thuộc vào kinh nghiệm của nhà thầu, công nghệ thi công. Tuy nhiên, các nghiên cứu thực nghiệm chỉ ra rằng đây là một đại lượng có mối quan hệ phức hợp với các đại lượng vận hành của tổ hợp TBM như tốc độ di chuyển, mô-men xoắn, áp lực gương đào và áp lực bơm vữa sau khiên. Từ các số liệu quan trắc lún trên mặt đất trong quá trình thi công đoạn tuyến hầm TBM kết nối ga Nhà hát Thành phố và ga Ba Son, tuyến metro số 1 TP. Hồ Chí Minh, bài báo trình bày các khảo sát đối với hệ số mất mát thể tích xác định được khi coi máng lún trên mặt đất có thể được biểu diễn bằng đường cong chuẩn Gauss của Peck [3]. Các số liệu khảo sát hệ số mất mát thể tích sau đó được biểu diễn trong tương quan với các đại lượng vận hành của tổ hợp TBM là áp lực gương đào và áp lực bơm vữa sau khiên. Kết quả khảo sát cũng được so sánh với kết quả tính toán với mô hình phần tử hữu hạn được áp dụng cho mặt cắt ngang điển hình của tuyến metro cho phép hiểu sâu hơn về sự tương tác phức tạp giữa hệ số mất mát thể tích và các đại lượng vận hành của tổ hợp khiên đào TBM.

TỪ KHÓA: Khiên đào TBM, mất thể tích, lún bề mặt, cân bằng áp lực đất, quan trắc lún.

ABSTRACT: The volume loss occurred during the TBM construction is one of the very important parameters for evaluating the surface settlement by using the empirical method and even with the numerical by finite element method. This parameter is normally considered as a constant qualitatively depends on contractor experiences, TBM technology. However, the experimental researches demonstrate that parameter is in the complex relation to the TBM operation parameters

such as the advancement velocity, torsion, face pressure and backfilling pressure. Based on the surface settlement monitoring data acquired during the TBM construction of the tunnel linked the Opera station and Ba Son station, Ho Chi Minh metro line 1, the paper presents an assessment of the volume losses determined in considering the settlement thought as the Gauss curve of Peck [3]. The volume losses are then presented in relative to the TBM operational parameters: the face pressure and the backfilling pressure for discussion. The assessment results are also compared to the numerical simulation results by the finite element method on a typical cross section of the tunnel metro line for a deeper understanding of the complex interaction between the volume losses and the TBM operational parameters.

KEYWORDS: TBM tunneling, volume loss, surface settlement, earth balanced pressure, settlement monitoring.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ
Tổ hợp thiết bị khiên đào TBM sử dụng công nghệ EPB (Earth Pressure Balanced) giữ ổn định mặt gương đào lần đầu tiên được áp dụng ở Việt Nam tại tuyến metro số 1 TP. Hồ Chí Minh, đoạn giữa nhà ga Ba Son và Nhà ga Nhà hát Thành phố. Cần phải lưu ý rằng, trong thập kỷ vừa qua đã ghi nhận những cải tiến đáng kể của công nghệ EPB và chứng minh được khả năng thích ứng trong các điều kiện địa chất mà trước đây được coi là hạn chế trong áp dụng [6]. Bên cạnh đó, trong quá trình thi công đào hầm, các đại lượng cơ bản ứng xử của nền đất và đặc biệt là biến dạng lún trên mặt đất đã được quan trắc và theo dõi. Các số liệu này cũng được so sánh với các số liệu tính toán lý thuyết trong giai đoạn thiết kế để làm cơ sở thiết lập các giới hạn cảnh báo ứng với các mức độ lún có nguy cơ gây ra các hư hỏng cho các công trình xây dựng trên mặt đất. Trên thực tế, thông số này là hệ quả của tương tác phức hợp giữa nhiều yếu tố khác nhau liên quan đến công nghệ, kỹ thuật thi công bên cạnh kinh nghiệm của nhà thầu và các yếu tố vận hành của tổ hợp TBM, đặc biệt là kỹ thuật và

áp lực bơm vừa sau khiên. Các nghiên cứu bằng phương pháp phần tử hữu hạn mô phỏng quá trình đào hầm metro số 1 tại TP. Hồ Chí Minh đã chỉ ra mối tương quan mật thiết giữa hệ số mất thể tích với áp lực bùn đất trong khoang đào, áp lực thành bên và áp lực bơm vừa sau khiên. Đây là mối quan hệ vô cùng phức tạp và không thể biểu diễn bằng một phương trình tuyến tính.

Trong bài báo này, chúng tôi sẽ trình bày các kết quả khảo sát hệ số mất thể tích thực tế trên cơ sở các kết quả quan trắc thu thập được trong quá trình thi công hầm đào bằng công nghệ TBM EPB trên đoạn tuyến giữa nhà ga Ba Son và ga Nhà Hát Lớn, tuyến metro số 1, TP. Hồ Chí Minh. Kết quả khảo sát cũng được so sánh với các đại lượng vận hành TBM như áp lực gương đào, áp lực bơm vừa sau khiên cũng như cao độ đặt hầm.

2. HỆ SỐ MẤT THỂ TÍCH TRONG THI CÔNG HẦM BẰNG TBM

Hệ số mất mát thể tích - volume loss V_L (%) được định nghĩa là tỷ lệ giữa chênh lệch thể tích đào và thể tích chiếm dụng bởi kết cấu vỏ hầm so với thể tích đào và được tính bằng đơn vị phần trăm (%). Đối với các mặt cắt hình tròn (như các hầm TBM), hệ số mất mát thể tích có thể được biểu diễn bằng công thức:

$$V_L = (D^2 - D_1^2)/D^2 \cdot 100\% \quad (1)$$

Trong đó: D - Đường kính lưới đào hay đơn giản là đường kính ngoài của lỗ khoan, D_1 - Đường kính của vỏ hầm vĩnh cửu. Đây chính là nguyên nhân gây ra hiện tượng giải phóng ứng suất hay dịch chuyển của đất đá xung quanh chu vi đào về phía khiên đào và gây ra hiện tượng lún bề mặt sinh ra trong quá trình đào hầm mà có thể dẫn đến các ảnh hưởng phá hoại đối với các công trình xây dựng hiện hữu trên mặt đất. Tuy vậy, để giảm thiểu ảnh hưởng tác động của hiện tượng mất thể tích đối với lún bề mặt, khoảng chênh lệch thể tích này sẽ phải được lấp kín nhất và nhanh nhất có thể bằng kỹ thuật bơm vữa sau khiên.

Bây giờ, nếu ta công nhận rằng đường cong phễu lún trên mặt đất gây ra trong quá trình thi công hầm TBM có thể được biểu diễn dưới dạng đường cong chuẩn Gauss của Peck (1969) và Schmidt (1974), độ lún trên mặt đất khi đó có thể được biểu diễn trong tương quan với x là khoảng cách đến trục tim hầm:

$$S = S_{max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (2)$$

Trong đó: S - Độ lún bề mặt tại điểm có khoảng cách bằng x so với trục tim hầm và S_{max} - Độ lún bề mặt lớn nhất tại vị trí trục tim hầm:

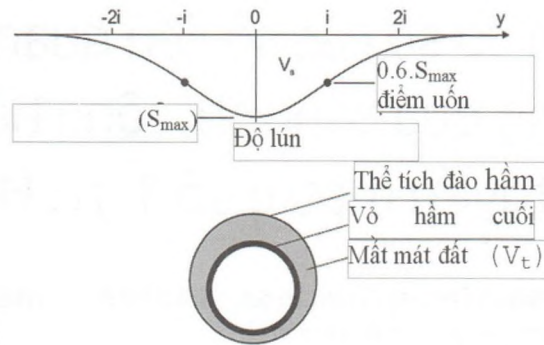
$$S_{max} = \frac{V_L \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2,5 \cdot i} \quad (3)$$

Từ (3), hệ số mất thể tích có thể được biểu diễn:

$$V_L = S_{max} \cdot 2,5 \cdot i / A_t \quad (4)$$

Như vậy, hệ số mất mát thể tích có thể được biểu diễn như hàm số của độ lún lớn nhất S_{max} , bề rộng máng lún $2,5i$ và diện tích lỗ khoan A_t . Trong đó, i được coi là độ lệch tiêu chuẩn của đường cong tính lún (khoảng cách từ điểm uốn của máng lún đến trục tim hầm):

$$\frac{i}{R} = \left(\frac{Z_0}{2R}\right)^n; n = 0,8 \pm 1,0$$



Hình 2.1: Đường cong Gauss đối với máng lún ngang và mặt đất V_t

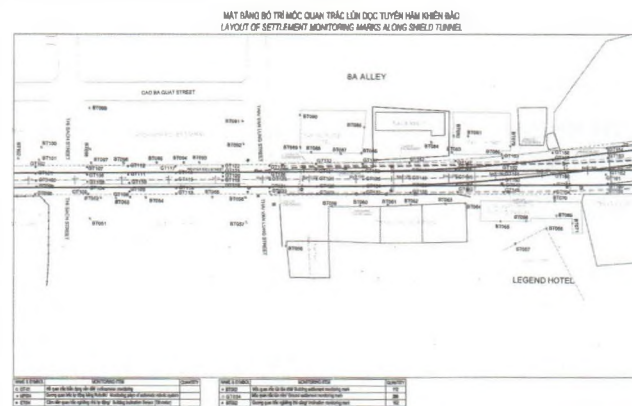
3. THỰC NGHIỆM QUAN TRẮC TRONG THI CÔNG HẦM TẠI ĐOẠN TUYẾN BA SON - NHÀ HÁT LỚN

Đoạn đi ngầm của tuyến metro số 1, TP. Hồ Chí Minh bao gồm đoạn từ Nhà ga Bến Thành đến Nhà hát Thành phố, thi công bằng công nghệ đào mở và đoạn giữa ga Nhà hát Thành phố đến ga Ba Son thi công bằng tổ hợp TBM. Đoạn kết nối giữa ga Nhà hát Thành phố và ga Ba Son có tạo gồm 2 hầm đơn, đường kính trong 6,05 m, đường kính ngoài 6,65 m. Tại ga Nhà hát Thành phố, hai ống hầm được bố trí đặt chồng lên nhau theo phương dọc và tại ga Ba Son, hai ống hầm được bố trí nằm song song theo phương ngang (Hình 3.1).



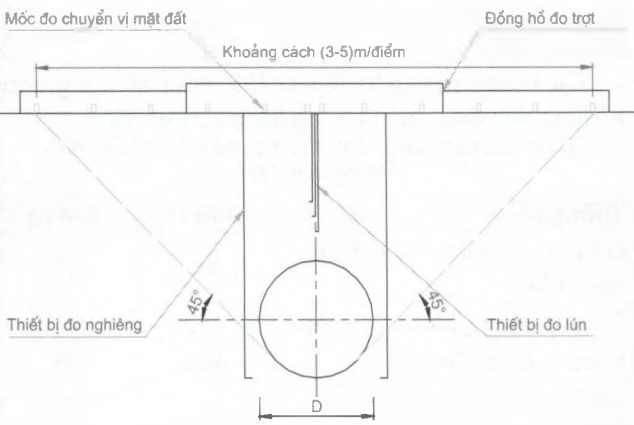
Hình 3.1: Đoạn tuyến metro đi ngầm từ ga Bến Thành - ga Ba Son

Trong quá trình thi công đoạn tuyến ngầm bằng TBM các đại lượng ứng xử của nền đất và các công trình hiện hữu được quan trắc, đặc biệt là biến dạng lún trên mặt đất. Ví dụ, sơ đồ bố trí quan trắc lún bề mặt dọc theo đường hầm thi công theo TBM từ lý trình km1+123 đến km1+300 được thể hiện trên Hình 3.2, 3.3.



Hình 3.2: Sơ đồ bố trí điểm đi quan trắc lún bề mặt đoạn thi công bằng TBM

Hình 3.3 thể hiện mặt cắt ngang điển hình của đường hầm và bố trí quan trắc lún trên bề mặt.



Hình 3.3: Sơ đồ bố trí thiết bị đo chuyển vị mặt đất theo phương ngang hầm

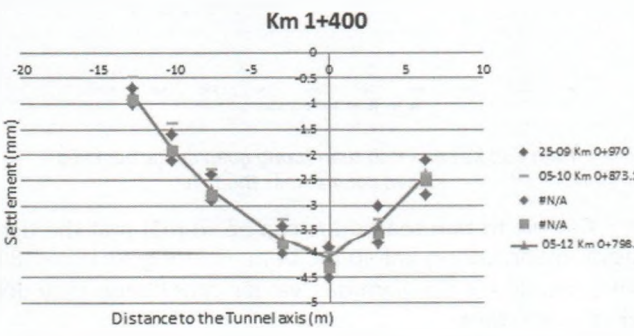
Bảng 3.1 thể hiện số liệu quan trắc lún bề mặt tại mặt cắt km1+400.

Bảng 3.1. Số liệu quan trắc lún bề mặt tại km1+400 [5]

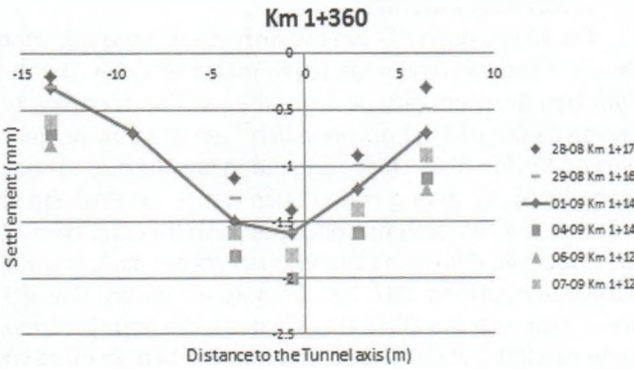
Điểm quan trắc	GT169	GT170	GT171	GT172	GT173	GT174	GT175
X(m)	6,3	3,1	-0,1	-3,1	-7,7	-10,21	-12,8
Đơn vị	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
25-09 km 0+970	-2,1	-3	-3,9	-3,4	-2,4	-1,6	-0,7
03-10 km 0+893,4	-2,5	-3,6	-4,3	-3,8	-2,8	-1,9	-0,9
05-10 km 0+873,1	-2,4	-3,3	-4	-3,3	-2,3	-1,4	-0,5
19-10 km 0+799,7	-2,8	-3,8	-4,5	-4	-2,9	-2,1	-1
05-12 km 0+798,5	-2,4	-3,4	-4,1	-3,7	-2,7	-1,9	-0,8

4. KHẢO SÁT HỆ SỐ MẤT THỂ TÍCH TRÊN CƠ SỞ SỐ LIỆU QUAN TRẮC THU ĐƯỢC

Các Hình 4.1, 4.2 thể hiện biểu đồ máng lún điển hình quan trắc được tại một số mặt cắt trên đoạn tuyến ngầm giữa nhà ga Nhà hát Thành phố và ga Ba Son bằng tổ hợp TBM EPB.



Hình 4.1: Biểu đồ máng lún quan trắc được tại mặt cắt km1+400

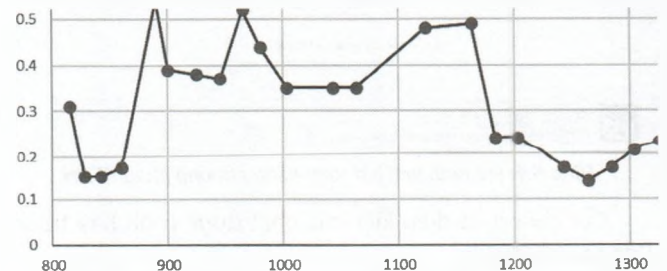


Hình 4.2: Biểu đồ máng lún quan trắc được tại mặt cắt km1+360

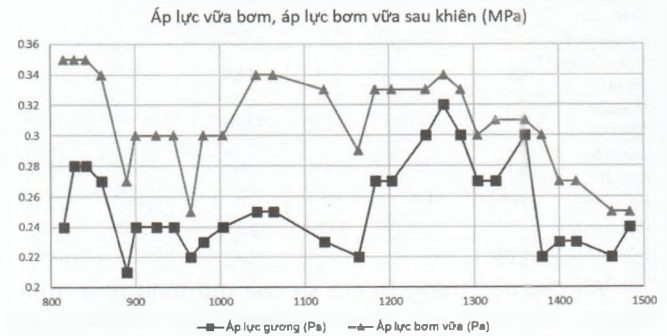
Trên cơ sở số liệu quan trắc độ lún lớn nhất và bề rộng máng lún, hệ số mất thể tích có thể tính toán được dựa trên cơ sở phương trình (4). Kết quả tính toán được thể hiện trong Bảng 4.1 trong tương quan với độ sâu hầm, áp lực gương đào và áp lực bơm vữa sau khiên.

Bảng 4.1. Kết quả khảo sát hệ số mất thể tích quan trắc được trên đoạn tuyến

Số hiệu mặt cắt	Độ sâu hầm Zo	Áp lực gương (Ps)	Áp lực bơm vữa (Pa)	Trọng lượng riêng (γ)	Góc nội ma sát (φ)	Mô-đun đàn hồi (E)	Hệ số mất thể tích (V _v)
Đơn vị	(m)	Mpa	Mpa	MN/m ³	độ	MPa	(%)
1483	-15,43	0,24	0,25	0,02	31	40	0,36
1462	-15,98	0,22	0,25	0,02	31	40	0,46
1420	-17,08	0,23	0,27	0,02	31	40	0,40
1400	-17,60	0,23	0,27	0,02	31	40	0,33
1380	-18,47	0,22	0,30	0,02	33	55	0,50
1360	-19,34	0,30	0,31	0,02	33	55	0,18
1325	-20,86	0,27	0,31	0,02	33	55	0,23
1304	-21,77	0,27	0,30	0,02	33	55	0,21
1284	-21,87	0,30	0,33	0,02	33	55	0,17
1264	-21,97	0,32	0,34	0,02	33	55	0,14
1243	-22,08	0,30	0,33	0,02	33	55	0,17
1203	-22,28	0,27	0,33	0,02	33	55	0,24
1183	-22,44	0,27	0,33	0,02	33	55	0,24
1163	-22,61	0,22	0,29	0,02	33	55	0,49
1123	-22,94	0,23	0,33	0,02	33	55	0,48
1063	-23,43	0,25	0,34	0,02	33	55	0,35
1043	-23,59	0,25	0,34	0,02	33	55	0,35
1003	-23,92	0,24	0,30	0,02	33	55	0,35
980	-24,23	0,23	0,30	0,02	33	55	0,44
965	-24,44	0,22	0,25	0,02	33	55	0,52
945	-24,71	0,24	0,30	0,02	33	55	0,37
925	-24,98	0,24	0,30	0,02	33	55	0,38
900	-25,32	0,24	0,30	0,02	33	55	0,39
890	-25,39	0,21	0,27	0,02	33	55	0,54
860	-25,60	0,27	0,34	0,02	33	55	0,17
842	-25,37	0,28	0,35	0,02	33	55	0,15
828	-25,19	0,28	0,35	0,02	33	55	0,15
815	-25,02	0,24	0,35	0,02	33	55	0,31



Hình 4.3: Hệ số mất thể tích quan trắc được trong quá trình thi công TBM



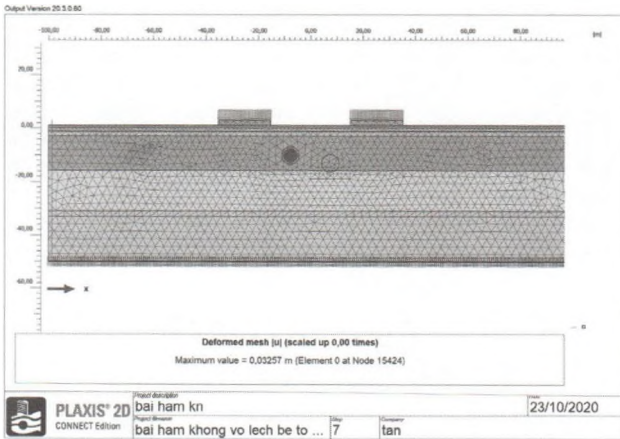
Hình 4.4: Áp lực gương (Ps) và áp lực bơm vữa sau khiên (Pa)

Hình 4.3 thể hiện các giá trị hệ số mất mát thể tích V_L (%) ứng với các mặt cắt quan trắc trong tương quan với áp lực gương (P_g) và áp lực bơm vữa sau khiên (P_o) trên Hình 4.4. Ta có thể thấy các thay đổi bất thường của hệ số mất thể tích luôn gắn liền với các thay đổi của áp lực gương đào và áp lực bơm vữa sau khiên. Áp lực tăng luôn dẫn đến làm giảm hệ số mất mát thể tích V_L (%). Điều này thể hiện rõ vai trò quan trọng của áp lực gương đào và áp lực vữa bơm trong khống chế biến dạng lún bề mặt trong quá trình thi công hầm đào bằng TBM.

5. MÔ HÌNH PHÂN TÍCH BẰNG PHƯƠNG PHÁP PTHH

Để nghiên cứu đánh giá mức độ mất mát thể tích có đạt được trong điều kiện cũng như ảnh hưởng của các đại lượng vận hành TBM, như áp lực gương, áp lực bơm vữa sau khiên, một mô hình PTHH trong không gian 2D đã được thực hiện.

Hình 5.1 giới thiệu mô hình bằng phương pháp PTHH mô phỏng mặt cắt ngang tại km1+500 (Hình 3.3) với hai ống hầm không cùng cao độ. Phân tích được thực hiện bằng phần mềm Plaxis-3D. Mô hình đất Mohr-Coulomb được sử dụng để mô phỏng đặc tính của đất nền. Việc đào hầm được mô phỏng theo hai bước chính: đào hang, tạo áp lực xung quanh chu vi đường hang với các giá trị áp lực khác nhau.



Hình 5.1: Mô hình lưới bài toán bằng phương pháp PTHH

Các thông số điều kiện địa chất được trình bày trong Bảng 5.1 dưới đây.

Bảng 5.1. Các thông số điều kiện đất sử dụng cho mô hình

Thông số địa kỹ thuật	Unit	Lớp thứ 1 (Backfill)	Lớp thứ 2 (Ac1)	Lớp thứ 3 (As1)	Lớp thứ 4 (As2)	Lớp thứ 5 (Dc)
Chiều dày lớp địa chất	(m)	1,1	1,7	14,0	17,0	16,0
Trong lượng riêng	(kN/m ³)	18,0	16,0	19,5	19,5	21,0
Mô-dun đàn hồi	(kPa)	1,8x10 ³	1,8x10 ³	4,2x10 ³	13,9x10 ³	20,5x10 ³
Góc nội ma sát	(°)	28	15	31	17	34
Lực dính	(kPa)	8,5	14	4	1,1	22
Hệ số poisson	-	0,35	0,48	0,33	0,33	0,35
Tính thấm	(m/day)	8,64x10 ⁻²	8,64x10 ⁻⁵	4,32	4,32	8,64x10 ⁻⁶

Với các đặc trưng thông số của mô hình như trong Bảng 5.1, các mô hình tính toán được thực hiện tương ứng với các áp lực khiên đào thay đổi từ 100 - 300 kPa, với chiều

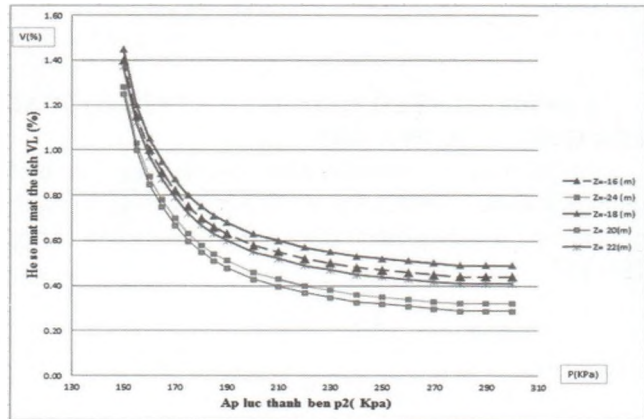
sâu đặt hầm tương ứng với 16 m, 18 m, 20 m, 22 m và 24 m dưới mặt đất.

Các thông số vận hành của TBM được sử dụng trong mô hình tính được mô tả trong Bảng 5.2 dưới đây:

Bảng 5.2. Các thông số kỹ thuật trong thi công ống hầm bằng máy TBM

Thông số	Đơn vị	Giá trị
Đường kính ngoài của khiên đào TBM	m	6,79
Đường kính ngoài của vỏ hầm	m	6,65
Khoảng cách tấm chắn	mm	45
Chiều dài TBM (không bao gồm đầu dao cắt)	m	7,6
Áp lực đất cân bằng (p1)	MPa	0,18-0,22
Áp suất bơm vữa (đường ống bơm và bộ phận lấp đầy)	MPa	0,23

Kết quả tính toán hệ số mất mát thể tích V_L (%) tại các chiều sâu đặt hầm khác nhau trong tương quan với áp lực bơm vữa sau khiên được thể hiện trong Hình 5.2. Ta thấy rằng với các giá trị áp lực bơm vữa sau khiên trong khoảng 200 MPa đến 170 MPa, giá trị của hệ số mất thể tích tính toán được và tương đối tương đồng với các giá trị quan trắc được



Hình 5.2: Kết quả tính toán tương quan áp lực bơm vữa sau vỏ với mất mát thể tích

Các giá trị tính toán được của hệ số mất mát thể tích giảm nhanh chóng khi áp lực bơm vữa tăng từ 150 - 180 MPa, sau đó tốc độ giảm dần và gần như không thay đổi khi $P_o > 300$ MPa.

6. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Các số liệu quan trắc lún thu nhận được trong quá trình thi công ống hầm thứ nhất, tuyến metro số 1, Bến Thành Suối Tiên đoạn nối giữa Nhà ga Nhà hát Thành phố và ga Ba Son đã được tổng hợp, phân tích. Trên cơ sở tương quan giữa độ lún lớn nhất, chiều rộng máng lún của đường cong máng lún dạng đường cong chuẩn Gauss của Peck, hệ số mất mát thể tích sinh ra trong quá trình thi công hầm có thể được biểu diễn trong tương quan với các đại lượng vận hành của hệ thống TBM, bao gồm áp lực gương đào (P_g), áp lực bơm vữa sau khiên (P_o). Kết quả tổng hợp chỉ rõ mối quan hệ chặt chẽ giữa hệ số mất mát thể tích đo được với áp lực gương đào và áp lực bơm vữa sau khiên. Tất cả các

liếm có mức độ thay đổi bất thường của hệ số mất mát thể tích đều gắn liền với sự thay đổi của các áp lực vận hành của ổ hợp khiên đào TBM.

Các kết quả nghiên cứu ban đầu bằng mô hình PTHH cũng chỉ ra rằng, ứng với các giá trị áp lực bơm vữa sau khiên trong khoảng 200 MPa đến 170 MPa, giá trị của hệ số mất mát thể tích tính toán được bằng mô hình PTHH là tương đối tương đồng với các giá trị quan trắc được.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Benmebarek, S., Kastner, R. and Ollier, C. (1998), *Auscultation et modélisation numérique du processus de creusement à l'aide d'un tunnelier*, In : *Geotechnique* 48 (6), pp.801-818.
- [2]. Panet, M. (1988), *Calcul de soutènement des tunnels à section circulaire par la méthode convergence-confinement*, *Tunnels et Ouvrages Souterrains* 77, pp.228-232, Ponts et Chaussées Press.
- [3]. Peck, R.B. (1969), *Deep excavation and tunnelling in soft ground*, In: *Proc. 7th Int. Conf. on Soils Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico city, State of the Art vol., pp.225-290.
- [4]. Shmz-Maeda J.O. (2019), *Ground and building monitoring report for shield tunnel (TBMS)*, UMRLT1-CP1b-TBMS-MON-RPT-00568-A. HCM city.
- [5]. Xie, X., Yang, Y. and Ji, M. (2016), *Analysis of surface settlement induced by the construction of a large-diameter shield-driven tunnel in Shanghai, China*, In: *Tunnelling and Underground Space Technology* (51), 120-132.
- [6]. Zhang, Z., Zhang, M., Jiang, Y., Bai, Q. and Zhao, Q. (2017), *Analytical prediction for ground movements and liner internal forces induced by shallow tunnels considering non-uniform convergence pattern and ground-liner interaction mechanism*, In: *Soils and Foundations* (57), 211-226.
- [7]. Bích N.T., Le L.T., Duy N.P. (2021), *Numerical Analysis of the Influence of Shield-gap Pressure on the Volume loss and surface settlement of the TBM tunnelling*, In: *Proceedings of the 3rd Conference on Sustainability in Civil Engineering*, Lecture Note of Civil Engineering series, Springer, pp.221-227.

Ngày nhận bài: 01/7/2022

Ngày chấp nhận đăng: 21/7/2022

**Người phản biện: PGS. TS. Trần Thế Truyền
TS. Nguyễn Văn Hậu**