

KỶ YẾU HỘI NGHỊ KHOA HỌC TOÀN QUỐC VIETGEO 2023
THỪA THIÊN HUẾ, NGÀY 28 & 29 THÁNG 9 NĂM 2023

ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH - ĐỊA KỸ THUẬT VÀ MÔI TRƯỜNG PHỤC VỤ PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

HỘI NGHỊ KHOA HỌC TOÀN QUỐC VIETGEO 2023

BAN TỔ CHỨC:

PGS.TS Võ Thanh Tùng	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Đồng Trưởng ban
PGS.TS Tạ Đức Thịnh	Hội Địa chất công trình và Môi trường Việt Nam	Đồng Trưởng ban
GS.TS Trần Thanh Hải	Trường Đại học Mở - Địa chất	Phó Trưởng ban
PGS.TS Nguyễn Xuân Thảo	Hội Công nghệ Khoan - Khai thác Việt Nam	Phó Trưởng ban
PGS.TS Nguyễn Văn Lâm	Hội Địa chất thủy văn Việt Nam	Phó Trưởng ban
TS Phan Tuấn Anh	Trường Đại học khoa học - Đại học Huế	Ủy viên
PGS.TS Lê Văn Thăng	Trường Đại học Bách khoa - ĐHQG TP HCM	Ủy viên
PGS.TS Lê Hoài Đức	Trường Đại học Giao thông vận tải	Ủy viên
PGS.TS Đỗ Quang Thiên	Trường Đại học khoa học - Đại học Huế	Ủy viên
PGS.TS Bùi Trường Sơn	Trường Đại học Mở - Địa chất	Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Trường Thọ	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Ủy viên
ThS Nguyễn Thanh Bình	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Ủy viên
TS Nguyễn Thị Thanh Huyền	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Ủy viên

BAN KHOA HỌC:

PGS.TS Bùi Trường Sơn	Trường Đại học Mở - Địa chất	Trưởng ban
PGS.TS Trần Thanh Nhân	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Phó Trưởng ban
GS.TS Đỗ Minh Đức	Trường Đại học Khoa học tự nhiên - ĐHQGHN	Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Thị Nụ	Trường Đại học Mở - Địa chất	Ủy viên
PGS.TS Đậu Văn Ngọ	Trường Đại học Bách khoa - ĐHQG TP HCM	Ủy viên
PGS.TS Phạm Quý Nhân	Hội Địa chất thủy văn Việt Nam	Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Đức Mạnh	Trường Đại học Giao thông vận tải	Ủy viên
PGS.TS Nguyễn Quang Tuấn	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Ủy viên
TS Nguyễn Bách Thảo	Trường Đại học Mở - Địa chất	Ủy viên
TS Nguyễn Tiến Hùng	Hội Công nghệ Khoan - Khai thác Việt Nam	Ủy viên
TS Lê Quang Duyệt	Hội Công nghệ Khoan - Khai thác Việt Nam	Ủy viên
TS Nguyễn Văn Phóng	Trường Đại học Mở - Địa chất	Ủy viên
TS Nguyễn Thành Dương	Trường Đại học Mở - Địa chất	Ủy viên
TS Phạm Đức Thọ	Trường Đại học Mở - Địa chất	Ủy viên
TS Bùi Trọng Vinh	Trường Đại học Bách khoa - ĐHQG TP HCM	Ủy viên
TS Đào Hồng Hải	Trường Đại học Bách khoa - ĐHQG TP HCM	Ủy viên
TS Nguyễn Công Định	Trường Đại học Giao thông vận tải	Ủy viên
TS Nguyễn Thị Thanh Nhân	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Ủy viên
TS Trần Thị Phương An	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Ủy viên
TS Trần Hữu Tuyên	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Ủy viên
TS Nguyễn Thị Thủy	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Ủy viên
TS Hoàng Ngô Tự Do	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Ủy viên
TS Bùi Thị Thu	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Ủy viên
TS Đỗ Thị Việt Hương	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Ủy viên

BAN THƯ KÝ:

TS Nguyễn Thành Dương	Trường Đại học Mở - Địa chất	Trưởng ban
PGS.TS Trần Thanh Nhân	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Phó Trưởng ban
TS Nguyễn Thị Thủy	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Ủy viên
ThS Phạm Thị Ngọc Hà	Trường Đại học Mở - Địa chất	Ủy viên
ThS Nguyễn Văn Hùng	Trường Đại học Mở - Địa chất	Ủy viên
TS Nguyễn Thị Thanh Nhân	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Ủy viên
TS Trần Thị Phương An	Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế	Ủy viên

- GIẢI PHÁP TỐI ƯU XỬ LÝ NỀN ĐƯỜNG ĐẤT YẾU ĐOẠN KM 6+500 ĐẾN KM 8+00 ĐƯỜNG
NỘI VỎ CHỈ CÔNG ĐI KHU CÔNG NGHIỆP ĐÔNG QUÊ SƠN VÀ QUỐC LỘ H
*Nguyễn Thanh Hải, Nguyễn Thị Ngọc Yến, Trần Khắc Vĩ.....*224
- HIỆN TRẠNG, THÁCH THỨC VÀ ĐỀ XUẤT KHUNG ĐÁNH GIÁ AN NINH NGUỒN NƯỚC LƯU
VỰC SÔNG THAO
*Nguyễn Tiến Vinh, Phạm Quý Nhân*233
- VẤN ĐỀ XÁC ĐỊNH SỨC CHỐNG CẮT CỦA ĐẤT LOẠI SÉT LẤN DẦM SẠM TRONG THIẾT KẾ
NỀN ĐƯỜNG ĐÀO
*Cao Trọng Công, Nguyễn Đức Mạnh, Nguyễn Châu Lâm*240
- MỘT SỐ YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG TỚI SỰ LÀM VIỆC CỦA TRỤ VẬT LIỆU HẠT RỜI TRONG CẢI
TẠO NỀN ĐẤT YẾU
*Nguyễn Hải Hà, Nguyễn Đức Mạnh, Nguyễn Thái Linh, Đặng Hồng Lam, Vũ Bách Tuấn*249
- CẤU TRÚC ĐỊA CHẤT THỦY VĂN TẠI VÙNG CỬA SÔNG HẬU,
KHU VỰC TÂY NAM BỘ, VIỆT NAM
*Trần Vũ Long, Nguyễn Hữu Mạnh, Hoàng Đại Phúc, Vũ Thu Hiền.....*257

Chủ đề II. KỸ THUẬT XÂY DỰNG VÀ VẬT LIỆU MỚI

- PHƯƠNG PHÁP THI CÔNG ĐƯỜNG HÀM TÀU ĐIỆN NGẦM TRONG ĐÔ THỊ BẰNG MÁY ĐÀO
HÀM CƠ GIỚI
*Đỗ Ngọc Thái.....*266
- PHÂN TÍCH ỨNG SUẤT BIẾN DẠNG CỦA ĐẤT ĐÁ XUNG QUANH HAI ĐƯỜNG HÀM KHI CÓ
SỰ THAY ĐỔI ĐIỀU KIỆN BỀ MẶT ĐẤT
*Trần Tuấn Minh, Đặng Trung Thành, Nguyễn Duyên Phong, Đỗ Quang Tuấn.....*277
- NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA PUZOLAN TỰ NHIÊN ĐẾN CHẤT LƯỢNG HỖN HỢP ĐẤT
GIA CỐ DỪNG TRONG CÔNG TRÌNH GIAO THÔNG
*Bùi Trường Sơn, Vũ Bá Thao, Nguyễn Huy Vượng, Phạm Minh Tân.....*286
- TỔNG QUAN VỀ SỬ DỤNG CỌC BÊ TÔNG CỐT THÉP ĐƯỜNG KÍNH NHỎ ĐỂ GIA CƯỜNG
NỀN MÓNG CÔNG TRÌNH LỊCH SỬ - VĂN HÓA
*Nguyễn Văn Mạnh, Bùi Văn Đức*294
- NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA THAM SỐ HÌNH HỌC ĐẾN BIỂU HIỆN CỦA KẾT CẤU
CHỐNG ĐƯỜNG HÀM HÌNH MÓNG NGỰA
*Nguyễn Tài Tiến, Đỗ Ngọc Anh*305
- NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG LÝ THUYẾT DÂY MỀM TRONG TÍNH TOÁN KẾT CẤU LƯỚI THÉP
SỬ DỤNG TRONG KHAI THÁC HÀM LÒ TẠI CÁC MỎ THAN QUẢNG NINH
*Nguyễn Phi Hùng, Vũ Minh Ngạn.....*315
- NGHIÊN CỨU CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG TỚI HỆ SỐ THỪA TIẾT DIỆN KHI THI CÔNG CÁC
ĐƯỜNG LÒ BẰNG PHƯƠNG PHÁP KHOAN NỔ MÍN TRONG CÁC MỎ THAN HÀM LÒ VÙNG
QUẢNG NINH
*Đặng Văn Kiên, Đỗ Ngọc Anh, Trương Văn Hà.....*322
- NGHIÊN CỨU LỰA CHỌN BƯỚC CHỐNG VÌ THÉP CHO ĐƯỜNG LÒ MỨC -50 ÷ -00 NẪM
DƯỚI BÃI THẢI ĐIỀU KIỆN MỎ THAN MÔNG DƯƠNG
*Nguyễn Hữu Sà, Đào Viết Đoàn, Đặng Văn Kiên.....*332
- NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ CỦA KẾT CẤU CHỐNG GIỮ KHO CHỨA KHÍ NGẦM LPG CỦA HSVC
TẠI CÁI MẾP, VÙNG TÀU BẰNG PHƯƠNG PHÁP SỐ
*Vũ Tiến Dũng, Đặng Văn Kiên, Joséphine DONNARD*341

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA THAM SỐ HÌNH HỌC ĐẾN BIỂU HIỆN CỦA KẾT CẤU CHỐNG ĐƯỜNG HÀM HÌNH MÓNG NGỰA

Nguyễn Tài Tiên^{1,*}, Đỗ Ngọc Anh¹

¹Trường Đại học Mở - Địa chất

*Tác giả chịu trách nhiệm: nguyentaitien@humg.edu.vn

Tóm tắt

Các đường hầm không tròn được xây dựng bằng máy khoan hầm (TBM) ngày càng phổ biến, như đường hầm móng ngựa, do diện tích sử dụng lớn trên mặt cắt ngang, mức độ cơ giới hóa cao của TBM và công nghệ vật liệu phát triển ở trình độ cao. Tuy nhiên, các nghiên cứu về ứng xử vỏ chống khi đào hầm bằng khiên đào hình móng ngựa còn hạn chế. Trong bài báo này, từ khổ tĩnh không của hầm đường sắt hai làn xe làm ví dụ, tác giả đã đề xuất quy trình xác định mặt cắt ngang hợp lý của hầm móng ngựa. Một loạt các mặt cắt ngang hình móng ngựa đã được nghiên cứu bằng cách sử dụng Phương pháp lực kháng đàn hồi (HRM) để xác định ứng xử của vỏ chống đường hầm và thiết lập mặt cắt tối ưu về mặt nội lực. Kết quả cho thấy, ứng xử vỏ hầm móng ngựa bị ảnh hưởng đáng kể bởi bán kính cong của các phần (nóc, hông, nền) trên biên đường hầm, đặc biệt là mômen uốn lớn nhất.

Từ khóa: hình dạng đường hầm; hình móng ngựa; ứng xử kết cấu; kết cấu chống.

1. Đặt vấn đề

Đường hầm có mặt cắt ngang hình thường được sử dụng cho hệ thống đường sắt đô thị do tính ổn định về kết cấu và hiệu suất của máy khoan hầm (TBM). Tuy nhiên, nhược điểm chính của đường hầm có mặt cắt ngang tròn là tỷ lệ sử dụng không gian nhỏ. Ngày nay, các máy TBM có thể đào các hình dạng hầm khác nhau, chẳng hạn như móng ngựa, hình elip, v.v... tùy theo mục đích kỹ thuật. Đường hầm hình móng ngựa có tỷ lệ sử dụng không gian cao hơn và do đó yêu cầu khối lượng đất đào nhỏ hơn so với đường hầm có dạng hình tròn (Li, 2017). Đường hầm có mặt cắt ngang hình móng ngựa thường được đào bằng phương pháp thông thường, tuy nhiên gần đây có thể thi công bằng phương pháp TBMs do sự phát triển của ngành chế tạo máy. Máy đào hầm hình móng ngựa đầu tiên trên thế giới được sản xuất tại Trung Quốc và được sử dụng cho đường hầm Baicheng trong tuyến đường sắt Menghua.

Ứng xử của các đường hầm hình móng ngựa đã được nghiên cứu bằng phương pháp giải tích (Sammal et al., 2004; Lu et al., 2014; Protosenya et al., 2016; Shi và Bai, 2017; Gospodarikov và Zatsepin, 2019; Zhang et al., 2020) phương pháp số (Ravandi and Rahmannejad, 2013; Abdellah et al., 2018; Zhang et al., 2018; Du et al., 2018a; Du et al., 2020a; Nguyen và Gospodarikov, 2020; Obaidur Rahaman, 2020; Tien et al., 2020; Zhang et al., 2020) hoặc bằng phương pháp thực nghiệm (Besrodny & Lebedev, 2017; Wang, et al., 2019; He, et al., 2020). Tất cả các nghiên cứu kể trên đều chưa đề cập đến ảnh hưởng của các thông số hình học của mặt cắt ngang hình móng ngựa đến ứng xử của kết cấu vỏ hầm. Mặt cắt ngang hình móng ngựa trong nghiên cứu này bao gồm một số vòm với các tâm khác nhau. Kiểu mặt cắt này đã được đề cập trong nghiên cứu của Shi và Bai (2017), He et al. (2020). Trong thực tế, có thể xây dựng nhiều mặt cắt ngang hình móng ngựa với các tham số hình học khác nhau để thỏa mãn một hoặc một số chức năng cụ thể của đường hầm. Tuy nhiên, ứng xử cơ học của vỏ hầm ở mỗi mặt cắt ngang khác nhau tùy thuộc vào các thông số hình học của nó. Vì vậy, nghiên cứu này trình bày thuật toán xác định mặt cắt ngang hầm móng ngựa dựa trên khổ tĩnh không thi công đường đôi (TCVN, 1988). Kết cấu chống đường hầm hình móng ngựa sẽ bao phủ khổ tĩnh không này. Đường hầm mặt cắt ngang hình móng ngựa được xác định có dạng tron nhẵn ở vòm ngược và vách hầm để tránh tập trung ứng suất ở các góc. Bằng cách sử dụng một quy trình kết hợp dựa trên phương pháp lực kháng đàn hồi (HRM - Hyperstatic reaction method) và thuật toán xác định mặt cắt

ngang hầm móng ngựa, ứng xử của vỏ chống hầm móng ngựa về biến dạng và lực kết cấu sinh ra trong vỏ hầm khi thay đổi tham số hình học của mặt cắt ngang có thể được xác định.

2. Phương pháp lực kháng đàn hồi

Phương pháp lực kháng đàn hồi (HRM) (Oreste, 2007; Do, et al., 2014a) phù hợp để xác định nội lực kết cấu và biến dạng gây ra trong vỏ chống đường hầm. Phương pháp này được phát triển bởi Oreste (2007) và Do et al. (2014a) dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn. Kết cấu chống được chia thành các phần tử thanh một chiều. Kết cấu vỏ chống tương tác với đất đá xung quanh thông qua các lò xo pháp tuyến và tiếp tuyến được liên kết với các nút trên kết cấu và thông qua các tải trọng bên ngoài tác dụng lên kết cấu.

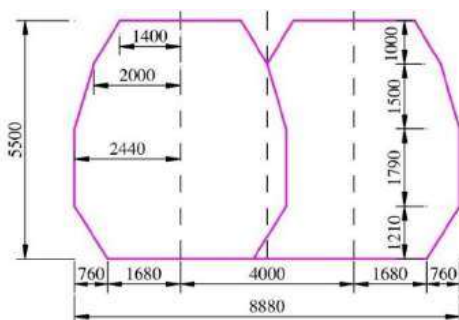
Phương pháp này đã được áp dụng trong các hình dạng đường hầm, chẳng hạn như hình tròn (Do, et al., 2014a; Do, et al., 2014b;), hình chữ U (có hoặc không có phần vòm ngược) (Du, et al. 2018, 2020a, 2020b) và các đường hầm phụ hình chữ nhật (Do, et al., 2020; Du, et al., 2020c) để nghiên cứu ứng xử của vỏ chống. Không giống như trong Du et al. (2018, 2020b) sử dụng đường hầm hình chữ U với tường thẳng đứng, trong nghiên cứu này sử dụng tường cong. Các chi tiết của phương pháp HRM đã được trình bày trong các nghiên cứu (Oreste, 2007; Do, et al., 2014a) và do đó chúng không được trình bày chi tiết trong nghiên cứu này. Người đọc có thể tham khảo các bài báo của Do et al. (2014a, 2020), Oreste (2007), Du et al. (2018, 2020b, 2020c).

3. Quy trình xác định hình dạng

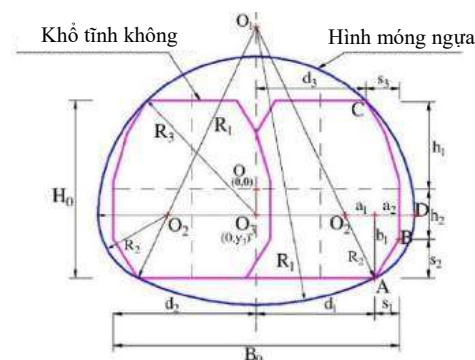
Trong nghiên cứu này, khổ tính không cho đường hầm tàu điện ngầm nêu trong tiêu chuẩn kỹ thuật Việt Nam (TCVN, 1988), được lấy làm trường hợp tham khảo (Hình 1). Mặt cắt ngang bên trong của hầm hình móng ngựa được xác định theo nguyên tắc tối thiểu phải bao phủ được diện tích khổ tính không (Hình 2). Trên thực tế, có rất nhiều mặt cắt ngang hầm thỏa mãn tiêu chí này. Sự thay đổi các thông số hình học của mặt cắt hình móng ngựa dẫn đến sự thay đổi tải trọng tác dụng lên vỏ hầm cũng như ứng xử của nó. Đề xuất quy trình xác định mặt cắt hầm móng ngựa gắn với nghiên cứu ứng xử vỏ hầm khi thay đổi mặt cắt hầm bằng phương pháp HRM làm cơ sở lựa chọn mặt cắt tối ưu.

Trong Hình 2, đường màu tím và đường màu xanh lam tương ứng thể hiện khổ tính không của đường hầm hai làn xe và mặt cắt ngang bên trong hầm. Để có được mặt cắt trong đường hầm với lực kết cấu nhỏ nhất gây ra trong vỏ hầm, một thuật toán cho phép xác định lực kết cấu vỏ hầm tùy thuộc vào sự thay đổi mặt cắt ngang của đường hầm đã được xây dựng.

Cần lưu ý rằng hình móng ngựa đối xứng qua trục thẳng đứng của đường hầm, do đó một nửa hình móng ngựa được xem xét trong thuật toán. Sau khi xác định được một nửa đường hầm hình móng ngựa, toàn bộ ranh giới đường hầm có thể được xác định (Hình 2). Phần nóc của hình móng ngựa tương ứng với nửa trên của hình tròn.



Hình 1. Khổ tính không đường hầm hai đường xe (mm).



Hình 2. Sơ đồ xác định mặt cắt ngang đường hầm hình móng ngựa.

$$(d_2 = B_0/2 = h_1 + s_1 = h_3 + s_3; h_1 = H_0/2 = h_2 + s_2)$$

Tâm $O_1(0, y_1)$ của phần vòm ngược và tâm $O_3(0, y_3)$ của phần nóc nằm trên trục thẳng đứng đối xứng của mặt cắt khổ tĩnh không; tâm $O_2(x_2, y_2)$ của phần bên hông là giao điểm của đường thẳng, với phương trình $y = y_3$, và đường thẳng O_1A . Thuật toán xác định mặt cắt ngang hình móng ngựa của đường hầm bao gồm các bước sau:

- 1) Lựa chọn vị trí tâm O_3 và tính toán bán kính R_3 .
- 2) Xác định vị trí tâm O_2 .
- 3) Xác định vị trí tâm O_1 .

Bước 1: Giả định giá trị y_3 của tâm O_3 đã biết (trên trục thẳng đứng, $-h_2 < y_3 < 0$). Bán kính R_3 được xác định bởi tâm đường tròn O_3 đi qua điểm C (d_3, h_1), sử dụng công thức sau:

$$R_3 = \sqrt{d_3^2 - (h_1 - y_3)^2} \quad (1)$$

R_3 phải thỏa mãn điều kiện: $R_3 > O_3B$;

Bước 2: Vị trí của tâm O_2 là chưa biết. Đường tròn tâm O_2 đi qua hai điểm A($d_1, -h_1$) và D(R_3, y_3). Điểm D là giao điểm của đường thẳng $y = y_3$ và đường tròn tâm O_3 với bán kính R_3 ở phần bên phải. Do đó, vị trí của tâm O_2 thỏa mãn điều kiện:

$$O_2A = O_2D.$$

Độ dài đoạn O_2A được xác định theo công thức (2):

$$O_2A = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = \sqrt{a_1^2 + (h_1 + y_3)^2}, \quad (2)$$

ở đây $b_1^2 = h_1 + y_3$.

Độ dài đoạn O_2D được xác định theo công thức:

$$O_2D = a_1 + a_2, \text{ ở đây } a_2 = R_3 - d_1 \quad (3)$$

Trong cả hai công thức (2) và (3), giá trị a_1 là chưa biết. Dựa trên điều kiện $O_2A = O_2D$, có thể biểu diễn như sau:

$$a_1^2 + b_1^2 = (a_1 + a_2)^2 \rightarrow a_1 = \frac{b_1^2 - a_2^2}{2a_2} \quad (4)$$

Từ các tính toán trên, có thể nhận được giá trị x_2 của tâm O_2

$$x_2 = d_1 - a_1 \quad (5)$$

$$y_2 = y_3$$

Bán kính R_2 được xác định thông qua đường tròn có tâm O_2 đi qua điểm A($d_1, -h_1$), theo công thức sau:

$$R_2 = \sqrt{(x_2 - d_1)^2 - (y_2 + h_1)^2} \quad (6)$$

Hoặc $R_2 = R_3 - x_2$

R_2 phải thỏa mãn điều kiện: $R_2 > O_2B$.

Bước 3: Khi đó vị trí tâm O_1 được xác định. Tọa độ y_1 của tâm O_1 là giao điểm của trục thẳng đứng với đường thẳng O_2A .

Phương trình đường thẳng O_2A : $y = ax + b$

$$a = \frac{y_2 + h_1}{x_2 - d_1} - \text{Hệ số góc}; \quad (7)$$

$b = -h_1 - a \cdot d_1$ - Tung độ góc.

Khi đường thẳng O_2A giao với trục thẳng đứng ($x = 0$), tọa độ y_1 của tâm O_1 : $y_1 = b$. Khi đó bán kính R_1 có thể được xác định theo công thức sau:

$$R_1 = \sqrt{d_1^2 - (-h_1 - y_1)^2} \quad (8)$$

Khi giá trị y_3 đã biết, các giá trị chưa biết như x_2 , y_2 và y_1 sẽ được xác định. Tương ứng với mỗi giá trị của y_3 là một giá trị duy nhất của tọa độ tâm O_1 và O_2 được xác định. Gọi θ_1 là góc của $O_3O_1O_2$; θ_2 là góc của AO_2D và θ_3 là góc của DO_3O_1 , khi đó các công thức sau có thể được xác định:

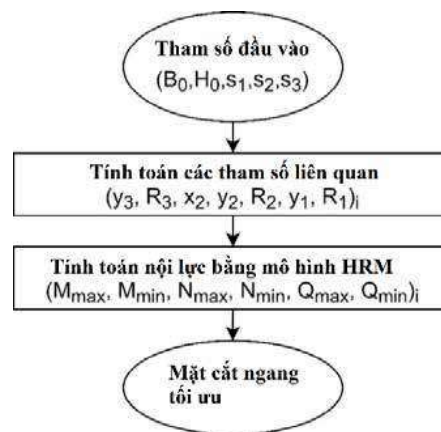
$$\theta_1 = \arctan \frac{x_2}{y_1} = \arctan \frac{d_1 - a_1}{-h_1 - a.d_1} \quad (9)$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{b_1}{a_1}$$

Diện tích trong của mặt cắt ngang đường hầm hình móng ngựa (đường màu xanh) Hình 3, A_{hors} được xác định bằng công thức sau:

$$\begin{aligned} A_{\text{hors}} &= 2 \cdot \left[\pi \frac{R_3^2}{4} + \frac{R_1^2}{2} \cdot \theta_1 + \frac{R_2^2}{2} \cdot \theta_2 - \frac{1}{2} \cdot x_2 \cdot (y_1 - y_3) \right] \\ &= \pi \frac{R_3^2}{2} + R_1^2 \cdot \theta_1 + R_2^2 \cdot \theta_2 - x_2 \cdot (y_1 - y_3) \end{aligned} \quad (10)$$

Hình 3 trình bày quy trình xác định mặt cắt ngang hầm móng ngựa và lực kết cấu sinh ra trong vỏ hầm dựa trên mô hình HRM. Trong quy trình này, ứng xử của vỏ hầm móng ngựa xét về nội lực và chuyển vị được suy ra bằng cách thay đổi các thông số hình học của hình dạng hầm với tham số xác định của đất. Từ các kết quả thu được trong mô hình HRM, có thể chọn mặt cắt bên trong tối ưu của đường hầm hình móng ngựa xét về mômen uốn.



Hình 3. Quy trình tối ưu hóa đường hầm móng ngựa.

4. Kiểm chứng mô hình HRM bằng mô hình số

Để kiểm chứng phương pháp HRM và để làm nổi bật ảnh hưởng hình dạng đường hầm đối ứng xử của kết cấu chống đường hầm, một đường hầm hình móng ngựa và một đường hầm hình tròn có cùng khổ tĩnh không được nghiên cứu. Căn cứ vào khổ không thi công hầm (TCVN, 1988) xác định mặt cắt ngang hầm hình tròn tối thiểu (Hình 4b và Bảng 1). Xét $y_3 = -0,8$, theo thuật toán đã trình bày ở phần trên xác định được mặt cắt ngang và hình dạng hầm móng ngựa (Hình 4a và Bảng 1).

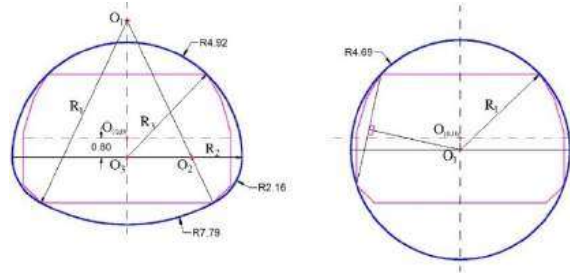
Cả đường hầm hình tròn và hình móng ngựa đều được mô hình hóa bằng HRM và mô hình phần tử hữu hạn 2D. Đối với mô hình thứ hai, phần mềm Plaxis2D (Brinkgreve, 2002) (được sử dụng để phát triển mô hình biến dạng phẳng). Bảng 2 và Bảng 3 cho thấy các tham số của đất và vỏ chống đường hầm.

So sánh các lực sinh trong kết cấu được thể hiện trong Bảng 4 và Hình 7. Các lực kết cấu xác định từ mô hình HRM được so sánh với các kết quả thu được từ các kết quả số 2D. Dựa trên các quan sát, một sự phù hợp cao giữa mô hình HRM và Plaxis 2D, cả về dạng và độ lớn của các lực kết cấu.

Hình 7 trình bày so sánh giữa nội lực sinh ra trong kết cấu với vỏ hầm hình tròn và móng ngựa. Chênh lệch mômen uốn tối đa giữa mô hình số HRM và 2D trong đường hầm hình móng ngựa và đường hầm tròn lần lượt là 7,33% và 1,81%. Mômen uốn tối thiểu sinh ra trong đường hầm hình móng ngựa và đường hầm hình tròn thu được từ mô hình HRM cao hơn tương ứng là

5,08% và 0,77% so với mômen thu được từ mô hình số 2D. Dạng giống nhau và một sự khác biệt nhỏ có thể được quan sát thấy đối với độ lớn của các giá trị. Điều thú vị là mômen uốn ở phần đáy và thành bên của vỏ chống đường hầm hình móng ngựa cao hơn mômen uốn ở phần nóc, khác biệt so với nội lực sinh ra trong hầm hình tròn.

Lực dọc tối đa gây ra trong các đường hầm hình móng ngựa và hình tròn được xác định trong mô hình HRM thấp hơn tương ứng là 4,97% và 5,46% so với các giá trị thu được bằng mô phỏng số 2D. Lực dọc tối thiểu gây ra trong đường hầm hình móng ngựa và đường hầm hình tròn thu được từ mô hình HRM lần lượt là 1,77% và 6,31%, lớn hơn lực dọc được quan sát trong mô hình số 2D.



Hình 4. Tham số hình học của đường hầm hình móng ngựa và hình tròn.

Bảng 1. Thông số hình học của các trường hợp hình dạng đường hầm

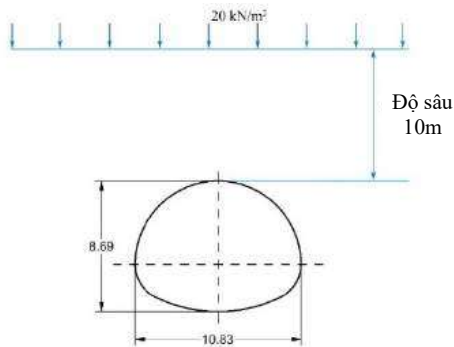
Trường hợp	Chiều rộng (B) (m)	Chiều cao (H) (m)	R ₁ (m)	R ₂ (m)	R ₃ (m)	Area (m ²)	Dạng mặt cắt ngang
1	9,38	9,38	4,69	-	-	69,1	Hình tròn
2	9,83	7,69	7,79	2,16	4,92	60,3	Hình móng ngựa

Bảng 2. Tham số địa kỹ thuật của đất

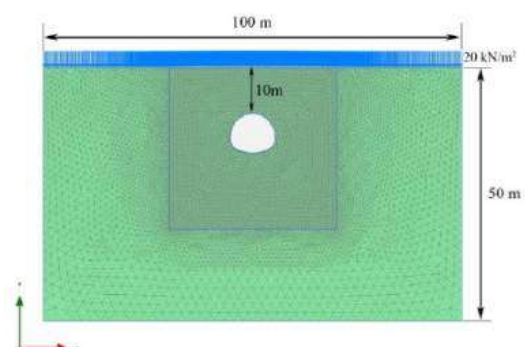
Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Trọng lượng thể tích	γ_s	18	kN/m ³
Môđun Young	E_s	3,6	MPa
Hệ số Poisson	ν_s	0,495	-
Góc ma sát trong	φ	16,5	Độ
Lực dính kết	c	25,6	kPa
Hệ số áp lực theo phương ngang	K_0	0,6	-
Độ sâu đặt hầm	H	10	m

Bảng 3. Tham số về vỏ chống

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Loại vật liệu		Đàn hồi; đẳng hướng	
Môđun Young	E	35	GPa
Hệ số Poisson	ν	0,15	-
Chiều dày vỏ chống	m	0,5	m



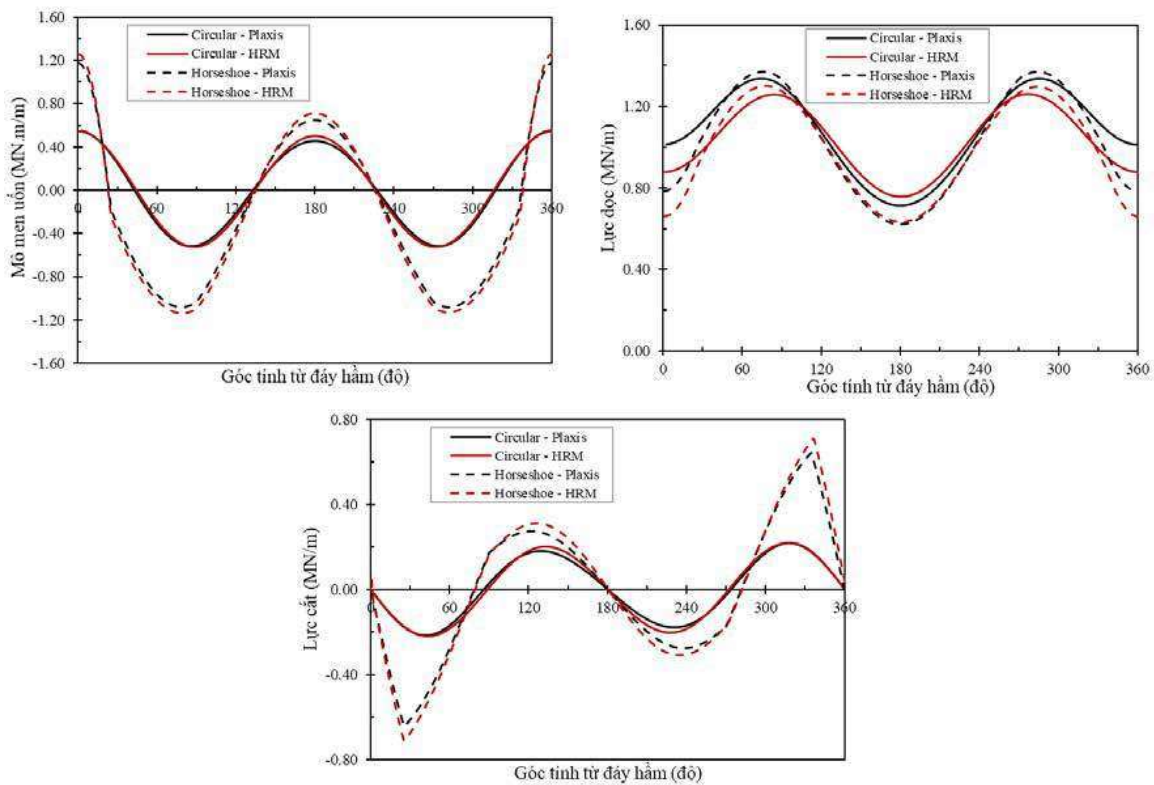
Hình 5. Vị trí đặt hầm.



Hình 6. Kích thước và lưới phần tử hữu hạn.

Bảng 4. So sánh nội lực sinh ra trong kết cấu chống bằng mô hình HRM và mô hình số 2D

Trường hợp	Mô hình	Hình tròn	Hình móng ngựa
Mômen uốn lớn nhất (MN.m/m)	HRM	0,543	1,260
	Mô hình số 2D	0,553	1,174
Chênh lệch (%)		-1,81	7,33
Mômen uốn nhỏ nhất (MN.m/m)	HRM	-0,524	-1,138
	Mô hình số 2D	-0,520	-1,083
Chênh lệch (%)		0,77	5,08
Lực dọc lớn nhất (MN /m)	HRM	1,263	1,301
	Mô hình số 2D	1,336	1,369
Chênh lệch (%)		-5,46	-4,97
Lực dọc nhỏ nhất (MN /m)	HRM	0,758	0,632
	Mô hình số 2D	0,713	0,621
Chênh lệch (%)		6,31	1,77
Lực cắt lớn nhất (MN /m)	HRM	0,221	0,710
	Mô hình số 2D	0,218	0,646
Chênh lệch (%)		1,38	9,91
Lực cắt nhỏ nhất (MN /m)	HRM	-0,220	-0,711
	Mô hình số 2D	-0,218	-0,646
Chênh lệch (%)		0,92	10,06



Hình 7. Nội lực sinh ra trong kết cấu chống hầm.

Sự chênh lệch giữa giá trị lực cắt tối thiểu và tối đa sinh ra trong đường hầm tròn được xác định bởi mô hình số HRM và 2D là không đáng kể (dưới 1,38%). Tuy nhiên, chênh lệch giữa lực cắt tối đa và tối thiểu sinh ra trong đường hầm móng ngựa thu được bằng hai phương pháp này lớn hơn, chênh lệch lần lượt là 9,91% và 10,06%.

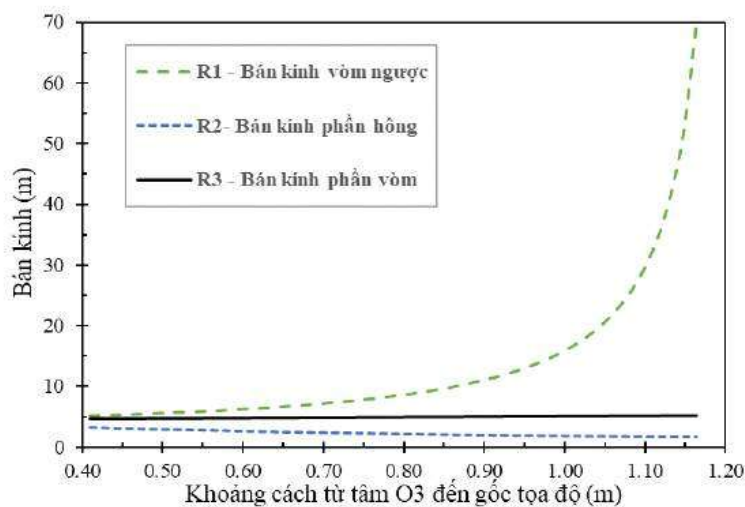
Trong cả hai mô hình số HRM và 2D, mômen uốn cực đại trong vỏ hầm hình móng ngựa cao gấp 2 lần so với vỏ hầm tròn. Lực cắt lớn nhất sinh ra trong hầm mặt cắt ngang móng ngựa cao gấp 3 lần so với hầm mặt cắt ngang tròn. Có sự chênh lệch nhỏ giữa lực dọc cực đại sinh ra trong kết cấu chống đường hầm tròn và đường hầm hình móng ngựa. Mặc dù lực kết cấu sinh ra trong vỏ hầm tròn nhỏ hơn vỏ hầm móng ngựa nhưng diện tích bên trong mặt cắt ngang móng

ngựa nhỏ hơn 0,87 lần so với đường hầm hình tròn, tương ứng là 60,3 m² và 69,1 m².

Từ những phân tích trên, có thể thấy rằng sự chênh lệch về kết quả giữa HRM và mô hình số 2D là nhỏ (thấp hơn 10%). Một sự tương đồng giữa mô hình HRM và mô hình số 2D, khi phân tích nội lực sinh ra trong kết cấu đường hầm hình tròn và móng ngựa cả về dạng và độ lớn. Sự tương đồng này, cho thấy rằng mô hình HRM được trình bày ở trên là đủ tin cậy để đánh giá ứng xử của kết cấu của đường hầm móng ngựa.

5. Ảnh hưởng của hình dạng hầm

Trong phần này, các đường hầm mặt cắt ngang hình móng ngựa với các kích thước khác nhau được nghiên cứu để xác định ảnh hưởng của các kích thước hình học khác nhau đối với ứng xử của vỏ chống đường hầm. Bước lặp -0,01 m được sử dụng khi thay đổi khoảng cách giữa tâm O₃(0,y₃) và tọa độ gốc O(0,0). Sự thay đổi vị trí tâm O₃ dẫn đến sự thay đổi bán kính R₃ và các bán kính khác R₂, R₁.

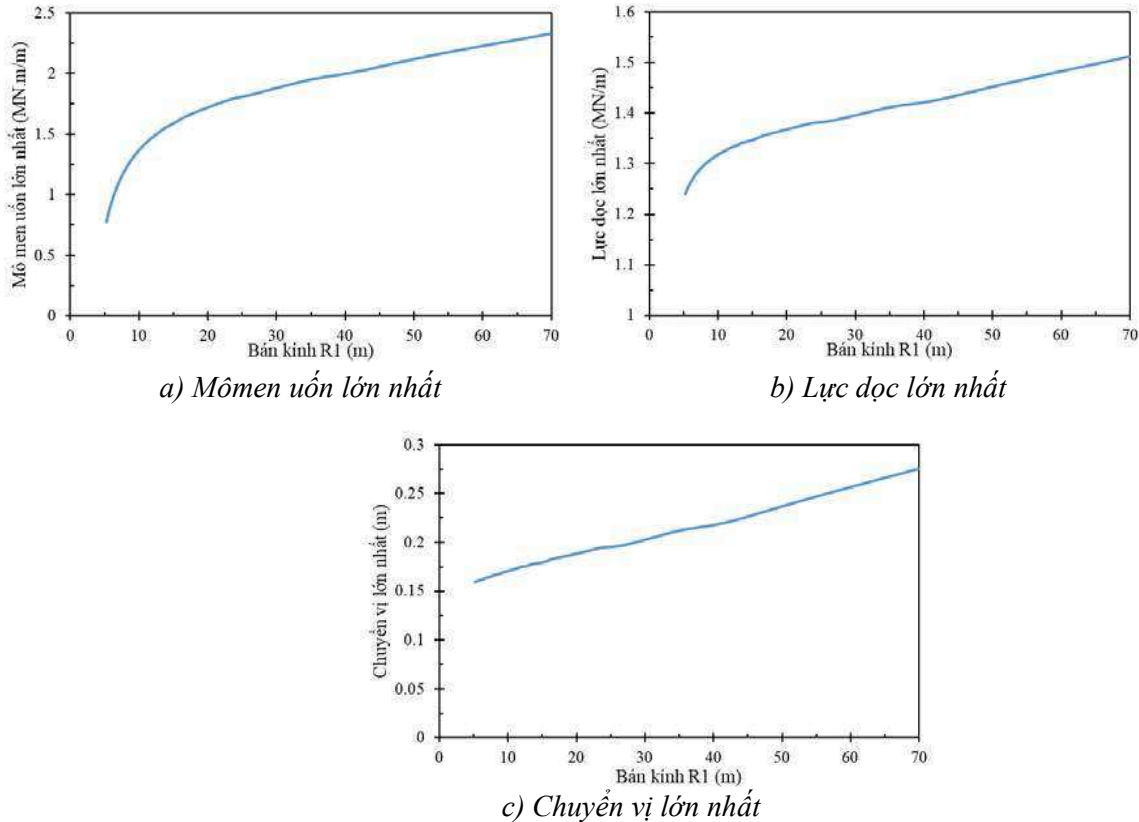


Hình 8. Sự phụ thuộc của các bán kính R₁, R₂, R₃ vào tọa độ tâm O₃.

Hình 8 thể hiện sự thay đổi bán kính của các phần khác nhau trong mặt cắt ngang hình móng ngựa khi thay đổi vị trí của tâm O₃. Với mỗi tọa độ y₃ xác định được kích thước mặt cắt hình móng ngựa tương ứng với các bán kính R₁, R₂, R₃. Theo quy trình xác định mặt cắt đã trình bày ở phần 3, tọa độ y₃ của tâm O₃ thay đổi trong khoảng từ -0,41 m đến -1,17 m. Tọa độ y₃ càng nhỏ thì bán kính R₁ và R₃ (phần vòm ngược và phần vòm) càng lớn, bán kính phần bên hông R₂ càng nhỏ. Tuy nhiên, có thể thấy rằng sự thay đổi tọa độ y₃ có ảnh hưởng đáng kể đến bán kính R₁ hơn là bán kính R₃.

Các tham số về đất và kết cấu chống đường hầm được lấy từ Bảng 2 và Bảng 3. Hình 9 biểu diễn các kết quả thu được khi sử dụng mô hình HRM. Momen uốn lớn nhất (M_{max}) luôn quan sát được tại phần vòm ngược của hình móng ngựa (R₁) cho tất cả các trường hợp nghiên cứu. Do đó, mối quan hệ giữa nội lực, chuyển vị kết cấu và bán kính phần vòm ngược của đường hầm được xem xét (Hình 9).

Việc tăng bán kính vòm ngược R₁ làm tăng các mômen uốn cực đại, các lực dọc và các chuyển vị. Ảnh hưởng khi thay đổi bán kính R₁ đối với các mômen uốn cực đại lớn. Sự thay đổi độ cong (1/R) hoặc độ phẳng của các đoạn cong trong kết cấu hầm gây ra sự thay đổi phản lực tác dụng lên vỏ hầm từ đất đá xung quanh. Độ cong càng nhỏ thì tải trọng pháp tuyến hướng lên (P_{un}) tác dụng lên kết cấu đường hầm càng lớn nhưng tải trọng tiếp tuyến hướng lên (P_{us}) càng nhỏ. Tải trọng hướng lên thông thường tác động lên phần vòm ngược cao hơn tải trọng thẳng đứng tác động lên phần vòm. Momen uốn lớn nhất luôn lớn hơn giá trị tuyệt đối của momen uốn nhỏ nhất và giá trị mômen uốn lớn nhất luôn quan sát thấy tại đáy vòm ngược. Mặt khác, giá trị bán kính R₁ tăng (R₃ - bán kính vòm tăng, xem Hình 8) làm tăng chiều rộng đường hầm. Do đó, tổng tải trọng thẳng đứng và tải trọng hướng lên tác dụng lên đường hầm sẽ tăng lên.



Hình 9. Ảnh hưởng của bán kính R_1 và môđun biến dạng của đất (E_s) đến nội lực kết cấu vỏ hầm và chuyển vị.

Bên cạnh đó, độ cong của từng phần trên biên hầm thay đổi, cơ cấu truyền tải trọng dọc trục trong vỏ hầm cũng sẽ thay đổi. Vì vậy, hình dạng đường hầm có ảnh hưởng đáng kể đến nội lực sinh ra trong kết cấu vỏ chống đường hầm. Việc tăng bán kính R_1 sẽ dẫn đến giảm ổn định kết cấu vỏ hầm.

6. Kết luận

Mặt cắt ngang đường hầm hình móng ngựa thường được sử dụng do hệ số sử dụng diện tích lớn của chúng. Tuy nhiên, các nghiên cứu liên quan đến thiết kế hầm móng ngựa còn hạn chế. Trong bài báo này, sự kết hợp dựa trên mô hình HRM và quy trình xác định mặt cắt ngang của hầm móng ngựa đã được phát triển để ước tính nội lực sinh ra trong kết cấu của vỏ hầm. Quy trình kết hợp này đã được xác thực bằng cách so sánh với tính toán phần tử hữu hạn, Plaxis 2D. Các kết quả thu được từ thuật toán được phát triển dựa trên mô hình HRM có sự phù hợp tốt cả về dạng và độ lớn so với kết quả từ mô hình số 2D. Dựa trên quy trình xác định mặt cắt ngang hình móng ngựa, một loạt tính toán dựa trên phương pháp HRM đã được thực hiện để ước tính nội lực trong kết cấu và biến dạng trong vỏ hầm. Kết quả cho thấy, bán kính phần vòm ngược R_1 càng nhỏ thì nội lực sinh ra trong kết cấu chống đường hầm càng nhỏ. Nói cách khác, tọa độ y_3 càng gần gốc tọa độ thì tiết diện hình móng ngựa càng ổn định về mặt nội lực. Hình dạng đường hầm có ảnh hưởng đáng kể đến các lực kết cấu gây ra trong vỏ chống, đặc biệt là mômen uốn cục đại.

Sử dụng mặt cắt ngang hình móng ngựa trong đường hầm hai làn cho phép giảm khối lượng đất đào so với mặt cắt tròn. Tuy nhiên, nội lực sinh ra trong kết cấu chống đường hầm móng ngựa cao hơn trong đường hầm hình tròn. Không nên sử dụng bán kính lớn cho phần vòm ngược của mặt cắt ngang móng ngựa. Tâm O_3 (tọa độ y_3) nên được bố trí càng gần gốc tọa độ càng tốt để nội lực sinh ra trong vỏ hầm móng ngựa là nhỏ nhất. Tuy nhiên, khoảng cách giữa tâm O_3 và gốc tọa độ càng gần thì mặt cắt móng ngựa càng lớn khi áp dụng quy trình xác định mặt cắt trong bài báo này.

Tài liệu tham khảo

- Abdellah, W. R., Ali, M. A. & Yang, H.-S., 2018. Studying the effect of some parameters on the stability of shallow tunnels. *Journal of Sustainable Mining*, 17(1), pp. 20-33.
- Besrodny, K. P. & Lebedev, M. O., 2017. About rock pressure loads on tunnel linings constructed using trenchless method. *Journal of Mining Institute*, Volume 228, pp. 649-654.
- Brinkgreve, R., 2002. *Plaxis: finite element code for soil and rock analyses*. Delft, Netherlands: s.n.
- Do, N. A., Dias, D., Oreste, P. & Maigrea., I. D., 2014a. The behaviour of the segmental tunnel lining studied by the hyperstatic reaction method. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(4), pp. 489-510.
- Do, N. A., Dias, D. & Oreste, P., 2014b. 2D seismic numerical analysis of segmental tunnel lining behaviour. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 47(3), pp. 1-11.
- Do, N. A. et al., 2020. Study on the behavior of squared and sub-rectangular tunnels using the Hyperstatic Reaction Method. *Transportation Geotechnics*, Volume 22.
- Du, D., Dias, D., Do, N. A. & Oreste, P. P., 2018. Hyperstatic reaction method for the design of U-shaped tunnel supports. *International Journal of Geomechanics*, 18(6).
- Du, D., Dias, D. & Do, N., 2020a. Effect of surcharge loading on horseshoe-shaped tunnels excavated in saturated soft rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(6), pp. 1339-1346.
- Du, D., Dias, D., Do, N. & Vo, T., 2020b. U-shaped tunnel lining design using the Hyperstatic Reaction Method - Influence of the invert. *Soils and Foundations*, 60(3), pp. 592-607.
- Du, D., Dias, D. & Do, N., 2020c. Lining performance optimization of sub-rectangular tunnels using the Hyperstatic Reaction Method. *Computers and Geotechnics*, Volume 117.
- Gospodarikov, P. & Zatsëpin, M., 2019. Mathematical modeling of boundary problems in geomechanics. *Gornyi Zhurnal*, Volume 12.
- He, B.-G., Li, H.-P. & Zhang, Z.-Q., 2020. The effect of earth pressure on the failure mode of high-speed railway tunnel linings. *Engineering Failure Analysis*, Volume 110.
- Li, J., 2017. Key Technologies and Applications of the Design and Manufacturing of Non-Circular TBMs. *Engineering Volume 3, Issue 6*, 3(6), pp. 905-914.
- Lu, A.-z., Zhang, N. & Kuang, L., 2014. Analytic solutions of stress and displacement for a non-circular tunnel Analytic solutions of stress and displacement for a non-circular tunnel. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 70, p. 69-81.
- Miliziano, S. & Lillis, A. d., 2019. Predicted and observed settlements induced by the mechanized tunnel excavation of metro line C near S. Giovanni station in Rome. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 86, pp. 236-246.
- Nguyen, C. & Gospodarikov, A. P., 2020. Hyperstatic reaction method for calculations of tunnels with horseshoe-shaped cross-section under the impact of earthquakes. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Volume 19, pp. 179 - 188.
- Oreste, P., 2007. A numerical approach to the hyperstatic reaction method for the dimensioning of tunnel supports.. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(2), pp. 185-205.
- Protosenya, A. G., Karasev, M. A. & Belyakov, N. A., 2016. Elastoplastic Problem for Noncircular Openings under Coulomb's Criterion. *Journal of Mining Science*, 52(1), pp. 53-61.
- Rahaman, O. & Kumar, J., 2020. Stability analysis of twin horse-shoe shaped tunnels in rock mass. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 98, pp. 1-18.
- Ravandi, E. G. & Rahmancejad, R., 2013. Wall displacement prediction of circular, D shaped and modified horseshoe tunnels in non-hydrostatic stress fields. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 34, pp. 54-60.
- Sammal, A., Fotieva, N., Bulychev, N. & Khrenov, S., 2004. Design of tunnel lining with variable thickness located new ground surface (in Russian). *Journal of Mining Institute.*, Volume 156, pp. 24-26.
- Shi, H. & Bai, M., 2017. Plastic Zone Analysis of Deep-Buried, Noncircular Tunnel and Application on the High-Speed Railway in the Karst Area. *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-10.

- TCVN, 1988. *Hầm đường sắt và hầm đường ô tô - Tiêu chuẩn thiết kế. 4527-1988*, s.l.: s.n.
- Tien, N. T. et al., 2020. Influence of tunnel shape on tunnel lining behaviour. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers -Geotechnical Engineering*, pp. 1-17.
- Wang, S. et al., 2019. Instability Process of Crack Propagation and Tunnel Failure Affected by Cross-Sectional Geometry of an Underground Tunnel. *Advances in Civil Engineering*, p. 17.
- Zhang, J. et al., 2018. Upper-bound stability analysis of dual unlined horseshoe-shaped tunnels subjected to gravity. *Computers and Geotechnics*, Volume 97, pp. 103-110.
- Zhang, C., Li, W., Zhu, W. & Tan, Z., 2020. Face stability analysis of a shallow horseshoe-shaped shield tunnel in clay with a linearly increasing shear strength with depth. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 97.

Influence of geometric parameters of horseshoe-shaped cross-sectional tunnel on its lining behavior

Nguyen Tai Tien^{1,*}, Do Ngoc Anh¹,

¹Hanoi University of Mining and Geology

*Corresponding author: nguyentaitien@humg.edu.vn

Abstract

Non-circular tunnels constructed by tunnel boring machines (TBMs) are increasingly popular, for example, horseshoe tunnels, due to the large utilization area in cross-section, the high mechanization degree of TBMs and high-level developed material technology. Studies on the tunnel lining behavior excavated by horseshoe-shaped shield are however still limited. In this paper, taking a construction clearance of a double-track railway tunnel as an example, a procedure for determining the appropriate cross-section of horseshoe tunnel is presented. A series of horseshoe cross-sections were investigated by using Hyperstatic Reaction Method (HRM) to estimate the tunnel lining behavior and to establish the optimal cross-section in terms of internal forces. The results showed that the horseshoe tunnel lining behavior is significantly affected by the radii of parts along the tunnel boundary, especially the maximum bending moment.

Keywords: tunnel shape, horseshoe tunnels, structural behavior, structural resistance.