

Phân tích kết cấu chống hỗn hợp trong xây dựng hầm theo công nghệ NATM bằng phương pháp số

■ TS. NGUYỄN VĂN QUANG^(*); TS. PHÙNG BÁ THẮNG

Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

■ TS. VÕ NHẬT LUÂN

Trường Đại học Văn Hiến

Email: ^(*)quangnv@utt.edu.vn

TÓM TẮT: Trong phương pháp NATM, kết cấu chống trong quá trình đào thường được sử dụng kết hợp giữa neo đá, khung thép chống và bê tông phun. Các kết cấu chống này có vai trò tương trợ nhau, giúp ổn định hầm. Việc xác định sự tương tác giữa các thành phần của kết cấu chống hỗn hợp với nhau là quan trọng tránh dẫn tới việc có đưa ra các kết cấu chống dư thừa so với mức cần thiết gây lãng phí hoặc gây mất an toàn khi các kết cấu chống không đủ chịu lực. Bài báo đề xuất phương pháp số trong tính toán các kết cấu chống hỗn hợp, từ đó kiến nghị kết cấu chống tối ưu cho đường hầm cụ thể.

TỪ KHÓA: NATM, vi chống, bê tông phun, neo đá.

ABSTRACT: In the NATM method, the support structures during excavation typically combine rock bolts, steel frames and shotcrete. These support structures work together to stabilize the tunnel face. Determining the interaction between the components of these composite support structures is crucial to avoid either over-designing, which leads to unnecessary waste, or under-designing, which compromises safety. This paper proposes a numerical method for calculating composite support structures, thereby recommending the optimal support structure for specific tunnels.

KEYWORDS: NATM, steel frames, shotcrete, rock bolts.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Phương pháp xây dựng hầm NATM (New Austrian Tunnelling Method - Phương pháp xây dựng hầm mới của Áo) được hình thành trên cơ sở lý thuyết đúc kết từ thực tế xây dựng hầm trong thời gian dài, bao gồm các trình tự, biện pháp thi công và xử lý khối đất đá trên vòm hầm sao cho đất đá xung quanh hầm được liên kết thành kết cấu vòm chống đỡ. Do đó, tự bản thân khối đất đá xung quanh sẽ trở thành một phần kết cấu chống đỡ hầm. Phương

pháp NATM đã được nhiều nước tiên tiến trên thế giới công nhận là phương pháp xây dựng hầm hiện đại và có nhiều ưu điểm so với các phương pháp thông thường. Chính vì tính ưu việt của phương pháp NATM nên đã được nhiều nước đưa vào quy trình thi công hầm của mình như Đức, Áo, Nhật Bản... Tại Việt Nam, sau khi áp dụng công nghệ NATM đầu tiên trong thi công hầm đào Hải Vân, nước ta đã làm chủ được công nghệ và đã ứng dụng thành công trong thi công như hầm Đèo Ngang (dài 495 m), Đèo Cả (bao gồm tuyến hầm Đèo Cả dài 4.125 m, Cổ Mã dài 500 m; Cù Mông dài 2.600 m), Phước Tượng - Phú Gia (trong đó hầm Phước Tượng dài 375 m, hầm Phú Gia dài 447 m).

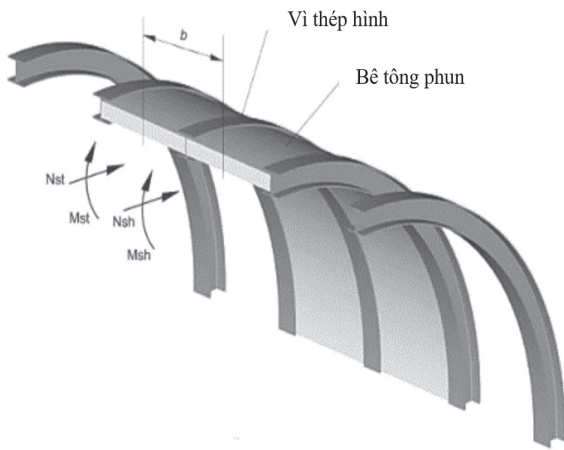
Cùng với sự phát triển của công nghệ NATM, đã có nhiều tác giả trong và ngoài nước nghiên cứu đến ổn định, kết cấu gia cố và chống đỡ đường hầm trong quá trình thi công. Karakus và Fowell [1] phân tích ảnh hưởng của hình dạng và kích thước đường hầm lên ổn định của hầm đào theo phương pháp NATM. Farias và cộng sự [2] nghiên cứu mô phỏng số 3D phi tuyến theo thời gian của quá trình thi công hầm theo NATM. Trong đó, các tác giả đề xuất phương pháp tính toán hiệu quả cho mô hình phần tử hữu hạn lớn, bao gồm: Thực hiện các bước đào và gia cố, tính toán song song và phương pháp giải hiệu quả cho hệ phương trình toàn cục. Gamnitzer và cộng sự [3] sử dụng mô phỏng số 3D để mô tả các tính toán chính cho việc thực hiện quá trình đào và gia cố theo chu kỳ bằng phần tử hữu hạn. Tại Việt Nam, lĩnh vực này cũng dành được sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu, trong đó có thể kể đến: Nguyễn Quang Phích và cộng sự [4], Nguyễn Huy Thiệp và Nguyễn Quý Đạt [5]

Trong phương pháp NATM, kết cấu chống trong quá trình đào thường được sử dụng kết hợp giữa neo đá, khung thép chống và bê tông phun. Các kết cấu chống này có vai trò tương trợ nhau, giúp ổn định hầm. Việc xác định sự tương tác giữa các thành phần của kết cấu chống hỗn hợp với nhau vẫn là bài toán chưa được nghiên cứu đầy đủ dẫn tới việc có thể đưa ra các kết cấu chống dư thừa so với mức cần thiết gây lãng phí hoặc gây mất an toàn khi các kết cấu chống không đủ chịu lực. Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu đề xuất phương pháp số trong tính toán các kết cấu chống hỗn hợp, từ đó kiến nghị kết cấu chống tối ưu cho đường hầm cụ thể.

2. PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH THÔNG SỐ CHO KẾT CẤU CHỐNG HỖN HỢP BÊ TÔNG PHUN VÀ VÌ THÉP HÌNH CHO MÔ HÌNH SỐ

2.1. Xác định thông số đầu vào của kết cấu chống hỗn hợp bê tông phun và vì thép hình cho mô hình số

Kết cấu chống của đường hầm trong các phần mềm theo phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) thường được mô phỏng bằng các phần tử tấm (plate) hoặc phần tử khối (solid). Việc mô phỏng bằng phần tử tấm giúp xác định được nội lực (M, N, Q) trong kết cấu, từ đó kiểm toán dễ dàng được khả năng chịu lực của kết cấu theo các tiêu chuẩn hiện hành. Trong bài toán này, kết cấu gồm có bê tông phun và khung chống thép tạo thành một kết cấu hỗn hợp có chiều dày và mô-đun đàn hồi mới. Hình 2.1 sơ họa kết cấu chống kết hợp của bê tông phun và khung chống thép.



Hình 2.1: Kết cấu chống kết hợp giữa bê tông phun và vì thép hình

Chiều dày và mô-đun đàn hồi của lớp kết cấu chống kết hợp tương đương được tính theo công thức sau [6]:

$$t_{eq} = \sqrt{\frac{12K_{eq}}{D_{eq}}} \quad (1)$$

$$E_{eq} = \sqrt{\frac{D_{eq}}{bt_{eq}}} \quad (2)$$

Trong đó: t_{eq} - Chiều dày của kết cấu chống kết hợp tương đương (m);

E_{eq} - Mô-đun đàn hồi của kết cấu chống kết hợp tương đương (MPa);

b - Chiều rộng xem xét của kết cấu chống (m);

K_{eq} và D_{eq} - Tương ứng là hệ số uốn và hệ số nén của kết cấu chống kết hợp tương đương, được tính theo công thức sau [6]:

$$D_{eq} = n \cdot (D_{st} + D_{sh}); K_{eq} = n \cdot (K_{st} + K_{sh}) \quad (3)$$

Trong đó: n - Số khung thép hình trong 1 m chiều dài kết cấu tính toán;

D_{st}, D_{sh} - Tương ứng là hệ số nén của thép và bê tông phun;

K_{st}, K_{sh} - Tương ứng là hệ số uốn của thép và bê tông phun;

Các hệ số nén và uốn của thép và bê tông phun được tính theo các công thức dưới đây [6]:

$$D_{st} = \frac{E_{st}A_{st}}{1-\nu_{st}^2}; K_{st} = \frac{E_{st}I_{st}}{1-\nu_{st}^2}; D_{sh} = \frac{E_{sh}A_{sh}}{1-\nu_{sh}^2}; K_{sh} = \frac{E_{sh}I_{sh}}{1-\nu_{sh}^2} \quad (4)$$

Trong đó: E_{st}, E_{sh} - Tương ứng là mô-đun đàn hồi của thép và bê tông phun (MPa);

A_{st}, A_{sh} - Tương ứng là diện tích mặt cắt ngang của khung chống thép và vỏ bê tông phun (m²);

ν_{st}, ν_{sh} - Tương ứng là hệ số Poisson của thép và bê tông phun;

I_{st} - Mô-men kháng uốn của thép hình làm khung chống (m⁴);

I_{sh} - Mô-men kháng uốn của tiết diện bê tông phun.

2.2. Xác định phân bố nội lực giữa khung thép chống và bê tông phun trong kết cấu chống hỗn hợp từ kết quả mô hình số

Sau khi có kết quả phân tích nội lực trong kết cấu hỗn hợp (vì thép và bê tông phun) từ mô hình PTHH, cần tính toán nội lực phân bố vào các thành phần kết cấu riêng để đánh giá khả năng chịu lực của các thành phần kết cấu này. Sự phân bố nội lực (M, N, Q) giữa các thành phần trong kết cấu chống hỗn hợp được tính theo công thức sau [6]:

Mô-men vào khung chống:

$$M_{st} = \frac{MK_{st}}{n(K_{st} + K_{sh})} \quad (5)$$

Mô-men vào lớp bê tông phun:

$$M_{sh} = \frac{MK_{sh}}{n(K_{st} + K_{sh})} \quad (6)$$

Lực dọc vào khung chống thép và bê tông phun được tính theo các công thức sau [6]:

$$N_{st} = \frac{ND_{st}}{n(D_{st} + D_{sh})} + \frac{M(D_{sh}K_{st} - D_{st}K_{sh})}{nR(D_{st} + D_{sh})(K_{st} + K_{sh})} \quad (7)$$

$$N_{sh} = \frac{ND_{sh}}{n(D_{st} + D_{sh})} - \frac{M(D_{sh}K_{st} - D_{st}K_{sh})}{nR(D_{st} + D_{sh})(K_{st} + K_{sh})} \quad (8)$$

Lực cắt vào khung chống thép và bê tông phun được tính theo các công thức sau [6]:

$$Q_{st} = \frac{QK_{st}}{n(K_{st} + K_{sh})} \quad (9)$$

$$Q_{sh} = \frac{QK_{sh}}{n(K_{st} + K_{sh})} \quad (10)$$

Trong các công thức trên, M, N, Q tương ứng là mô-men uốn, lực dọc và lực cắt từ kết quả tính toán của mô hình khi mô phỏng bằng kết cấu chống tương đương.

Ứng suất trong các cấu kiện (vì thép hình, bê tông phun) được xác định theo công thức sau:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \quad (11)$$

Trong đó: σ - Ứng suất trong cấu kiện;

N - Lực dọc trong cấu kiện;

A - Diện tích mặt cắt ngang của cấu kiện;

M - Mô-men uốn của cấu kiện;

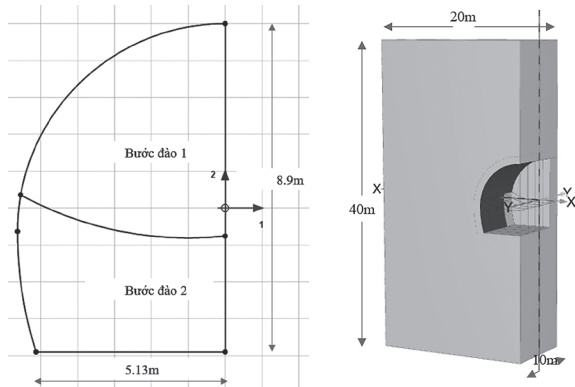
W - Mô-men kháng uốn của tiết diện.

3. ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP SỐ TRONG TÍNH TOÁN KẾT CẤU CHỐNG HỖN HỢP KHI XÂY DỰNG HẦM BẰNG CÔNG NGHỆ NATM

3.1. Thông số đầu vào và các bước phân tích

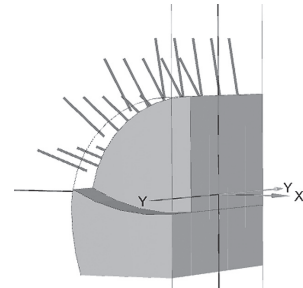
Xem xét một đường hầm với kích thước như *Hình 3.1* (vì tính đối xứng của đường hầm, trong mô phỏng số chỉ mô phỏng một nửa đường hầm). Đường hầm nằm ở độ sâu 300 m và nằm trong lớp cát kết với các thông số như sau: Dung trọng riêng γ : 21 (kN/m³); góc nội ma sát φ : 40(độ); lực dính C: 0,28(Mpa); mô-đun đàn hồi E: 180(Mpa). Đường hầm được chia làm hai gương đào với bước đào 2 m. Quy trình đào hầm được mô phỏng theo quy trình của phương pháp NATM gồm đào hầm bằng phương pháp khoan nổ và tiến hành phun bê tông và lắp dựng khung chống. Quá trình lắp đặt hệ kết cấu chống được tiến hành ngay sau khi đất đá đào của chu kỳ đào hầm được vận chuyển ra.

Kết cấu chống kết hợp được xem xét trong bài toán này là thép hình I120x64x4,8 và bê tông phun B30 chiều dày 15 cm. Với kết cấu chống kết hợp gồm thép hình I120x64x4,8, bước lắp đặt 1 m/ 1 khung chống và bê tông phun B30 chiều dày 15 cm tính theo các công thức (1) và (2) ta được một kết cấu chống tương đương với các thông số: chiều dày kết cấu: 15,4 cm; mô-đun đàn hồi E: 12.001 Mpa. Sự cần thiết phải dùng lưới thép kết hợp với bê tông phun hay không sẽ được quyết định sau khi tính toán.

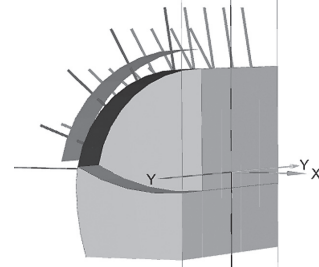


a) - Kích thước đường hầm nghiên cứu b) - Kích thước mô hình
Hình 3.1: Kích thước mô hình

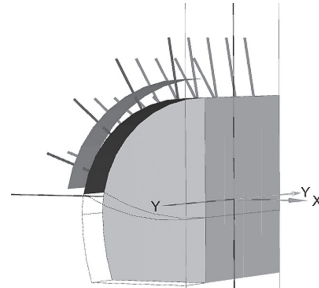
Mô hình và quá trình đào hầm được thể hiện ở *Hình 3.2*. Kích thước mô hình (40x20x10)m (cao x rộng x sâu). Đường hầm nằm ở độ sâu $h=300$ m nên được mô phỏng nằm trong trường ứng suất (stress field) với ứng suất đứng ban đầu được xác định theo công thức $\sigma_z = \gamma h$, $\sigma_x = \sigma_y = k \cdot \gamma \cdot h$ (γ - Trọng lượng trung bình các lớp đá phía trên đường hầm; h - Độ sâu đặt hầm; k - Hệ số áp lực ngang). Neo đá được mô phỏng bằng phần tử "rock bolts-embedded beam", đường kính D25, với chiều dài neo 3,0 m và khoảng cách neo theo 2 phương là 2,0 m. Do đường hầm nằm sâu 300 m dưới mặt đất nên các tải trọng phía trên không ảnh hưởng đến đường hầm. Điều kiện biên của mô hình được thiết lập như sau: Mặt đáy và biên bên trái mô hình khóa chuyển vị 3 hướng x, y, z; mặt trên chuyển vị tự do theo các phương, biên bên phải khóa chuyển vị theo phương x và y, phương z chuyển vị tự do. Quy trình đào - chống được thực hiện nối tiếp nhau với mỗi bước đào hầm (*Hình 3.2*).



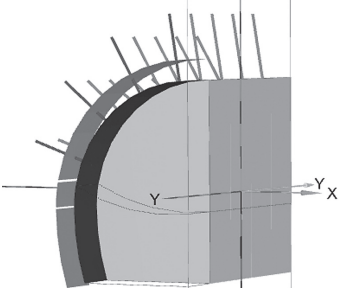
Bước 1: Đào phần vòm



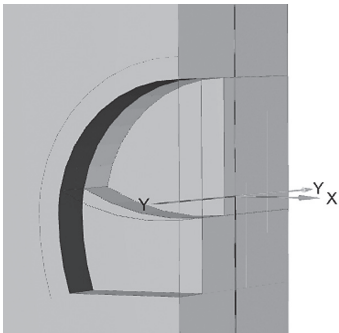
Bước 2: Gia cố phần vòm (neo đá, bê tông phun và vòm thép)



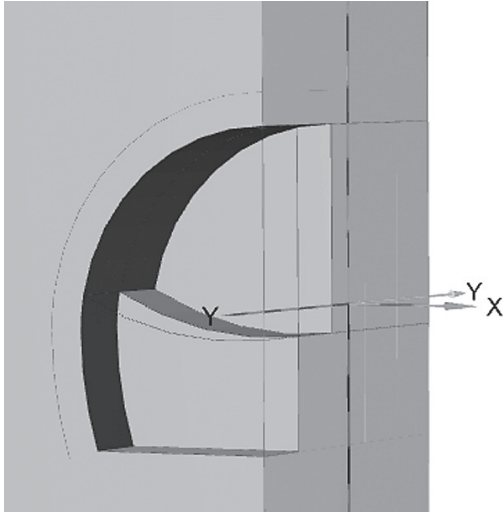
Bước 3: Đào phần dưới



Bước 4: Gia cố phần dưới (bê tông phun và vòm thép)



Bước 5: Đào phần trên gương hầm tiếp theo

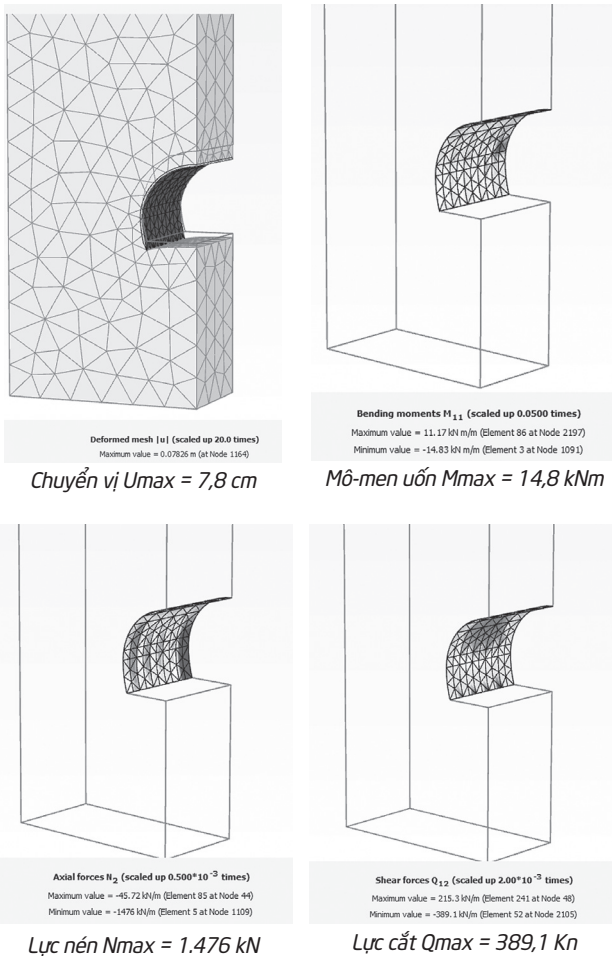


Bước 6: Chia cố phần trên

Hình 3.2: Các bước phân tích hầm thi công bằng công nghệ NATM

3.2. Kết quả và bình luận

Kết quả phân tích chuyển vị và nội lực (M, N, Q) của kết cấu chống được thể hiện tại Hình 3.3.



Hình 3.3: Kết quả phân tích chuyển vị và nội lực trong kết cấu chống hỗn hợp

Từ kết quả nội lực phân tích được cho kết cấu chống hỗn hợp từ phần mềm, áp dụng công thức (5) đến (10) để

tính toán phân bố nội lực lên các thành phần của kết cấu chống. Kết quả thu được như sau: Nội lực cho lớp bê tông phun $M=6,33$ kNm; $N=956,3$ kN; $Q=222,7$ kN; nội lực cho khung thép hình $M=8,47$ kNm; $N=519,3$ kN; $Q=166,26$ kN. Việc kiểm toán khả năng chịu lực của các thành phần trong kết cấu chống hỗn hợp được thực hiện qua các công thức (11). Ứng suất trong các thành phần được so sánh với sức kháng cho phép của vật liệu. Trong ví dụ này, ứng suất vào khung thép tính được là 129 MPa nhỏ hơn ứng suất cho phép của vật liệu thép làm khung chống là 235 MPa. Trong bê tông phun xuất hiện ứng suất nén 12,29 MPa, nhỏ hơn khả năng chịu nén thiết kế là 16,7 MPa, ngoài ra còn có ứng suất kéo 4,43 MPa, như vậy cần bổ sung lưới thép để kết hợp với bê tông phun.

4. KẾT LUẬN

Kết cấu chống hỗn hợp gồm neo đá, vì chống và bê tông phun thường được kết hợp khi thi công hầm bằng công nghệ NATM. Để tính toán loại kết cấu chống hỗn hợp này có thể quy về một loại kết cấu chống tương đương với chiều dày và mô-đun biến dạng tương ứng, khi đó sẽ xác định được sự phân bố nội lực trong các thành phần và kiểm tra được khả năng chịu lực của từng cấu kiện. Áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn trên mô hình 3D giúp xác định sự tương tác giữa các thành phần của kết cấu chống hỗn hợp với nhau, qua đó có thể đưa ra các kết cấu chống hợp lý hơn.

Tài liệu tham khảo

- [1]. M.Karakus and R.J.Fowell (2004), *An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM)*, in ROCKMEC'2004-VIIIth Regional Rock Mechanics Symposium.
- [2]. M. M. de Farias, Á. H. Moraes and A. P. de Assis (May, 2004), *Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations*, Tunnelling and Underground Space Technology, vol.19, no.3, pp.283-293, doi: 10.1016/J.TUST.2003.11.006.
- [3]. P. Gamnitzer et al. (Feb., 2024), *Key features of numerical models for the FE-simulation of deep tunnel advance by the NATM*, Underground Space, vol.14, pp.357-376, doi: 10.1016/J.UNDSP.2023.06.007.
- [4]. Nguyễn Quang Phích, Nguyễn Văn Mạnh và nnk (2023), *Phương pháp đào hầm mới của Áo và hiện trạng áp dụng ở Việt Nam*, Tạp chí Xây dựng, số 6.
- [5]. Nguyễn Huy Thiệp và Nguyễn Quý Đạt (2023), *Tự động tính toán hầm theo công nghệ NATM bằng mô hình 3D và khả năng áp dụng thiết kế công trình ngầm đô thị*, Tạp chí Xây dựng, tháng 6.
- [6]. Hoek Evert, Diederichs Mark, *Integration of Geotechnical and Structural Design in Tunnelling*.

Ngày nhận bài: 27/8/2024

Ngày nhận bài sửa: 14/9/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/9/2024