

TÍNH TOÁN KIỂM ĐỊNH KẾT CẤU TƯỜNG BÊ TÔNG HÀM CHỨA NƯỚC TẠI CÔNG TY CỔ PHẦN THAN MÔNG DƯƠNG - VINACOMIN

Nguyễn Phi Hùng¹, Bùi Mạnh Tùng¹, Phạm Đức Hưng¹, Trần Trung Thái^{2*}

¹Trường Đại học Mỏ - Địa chất

²Công ty Cổ phần Than Cao Sơn - TKV

TÓM TẮT

Trong khai thác than hầm lò, hầm chứa nước là hạng mục rất quan trọng đóng góp vào phòng ngừa ngập mỏ và xử lý nước thải tại các mỏ than hầm lò. Do đặc thù làm việc trong môi trường chịu đồng thời áp lực đất đá xung quanh, áp lực nước thủy tĩnh phía trong và các phụ tải phát sinh trong quá trình khai thác, kết cấu tường bê tông cốt thép của hầm chứa nước cần được tính toán và kiểm định một cách chặt chẽ.

Nghiên cứu này trình bày phương pháp tính toán kiểm định khả năng chịu lực của tường bê tông hầm chứa nước tại mỏ than Mông Dương - Vinacomin dựa trên Lý thuyết áp lực đất Rankine, áp lực nước thủy tĩnh và mô hình phần tử hữu hạn (FEM) bằng phần mềm ETABS. Nội lực thu được từ mô phỏng số được kiểm tra theo các yêu cầu của TCVN 5574:2018, có xét đến điều kiện môi trường đặc thù của mỏ than hầm lò Việt Nam. Kết quả nghiên cứu cho thấy: (1) mô men uốn lớn nhất xuất hiện tại chân tường, đạt 12,86 T.m/m (ETABS), dao động từ 12,5 - 16,8 T.m/m tùy theo mực nước trong hầm, vị trí nguy hiểm nhất tập trung ở đoạn 0 - 0,3 m từ chân tường; (2) Hàm lượng cốt thép tính toán tại chân tường đạt $\mu=0,44\%$, nằm trong giới hạn cho phép theo TCVN 5574:2018 ($\mu_{\min}\approx 0,2\%$; $\mu_{\max}\approx 2,5\%$); (3) Phương án bố trí cốt thép chịu lực $\phi 16a100$ thỏa mãn yêu cầu chịu lực và cấu tạo; (4) Kết quả tính toán theo phương pháp FEM lớn hơn so với phương pháp giản lược công xôn khoảng 6% - 12%, xác nhận tính bảo thủ và an toàn của phương pháp số. Phương pháp nghiên cứu có thể áp dụng hiệu quả trong thiết kế và kiểm toán các hầm chứa nước trong thực tế sản xuất mỏ than hầm lò Việt Nam.

Từ khóa: hầm chứa nước; mỏ than hầm lò; tường bê tông cốt thép; áp lực; FEM

1. Đặt vấn đề

Trong khai thác than hầm lò, hầm chứa nước và các công trình ngầm tương tự giữ vai trò then chốt trong hệ thống phòng ngừa ngập mỏ và xử lý nước thải. Không giống các công trình chứa nước trên mặt đất, hầm chứa nước trong mỏ phải làm việc trong điều kiện chịu ảnh hưởng đồng thời của ứng suất nguyên sinh trong khối đất đá, áp lực nước ngầm và các tác động do hoạt động khai thác. Sự kết hợp của các yếu tố này tạo nên trạng thái ứng suất phức tạp trong kết cấu tường bê tông, đặc biệt tại khu vực chân tường và vùng tiếp giáp nền - tường.

Trong thực tiễn thiết kế, việc tính toán tường hầm chứa nước thường được giản lược theo mô hình công xôn một chiều, chưa phản ánh đầy đủ điều kiện biên và phân bố áp lực không đồng nhất theo chiều cao tường (Zhang, 1998; Palmström, 1998). Do đó, việc ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn để kiểm định chi tiết kết cấu tường bê tông hầm chứa nước là cần thiết nhằm nâng cao độ tin cậy của thiết kế và đảm bảo an toàn lâu dài cho công trình.

Hầm chứa nước và các công trình ngầm trong môi trường mỏ than hầm lò đã được nghiên cứu từ nhiều góc độ địa kỹ thuật, cơ học đá, kết cấu và an toàn. Các nghiên cứu kinh điển của Hoek và Brown (Hoek, 1980), Brady và Brown (Brady, 2006) đã đặt nền tảng cho phân tích cơ học đá trong các hệ thống khai thác ngầm, nhấn mạnh tầm quan trọng của ứng suất nguyên sinh, cấu trúc khối đá, điều kiện nứt

*Tác giả liên hệ

Email: trantrungthaics@gmail.com

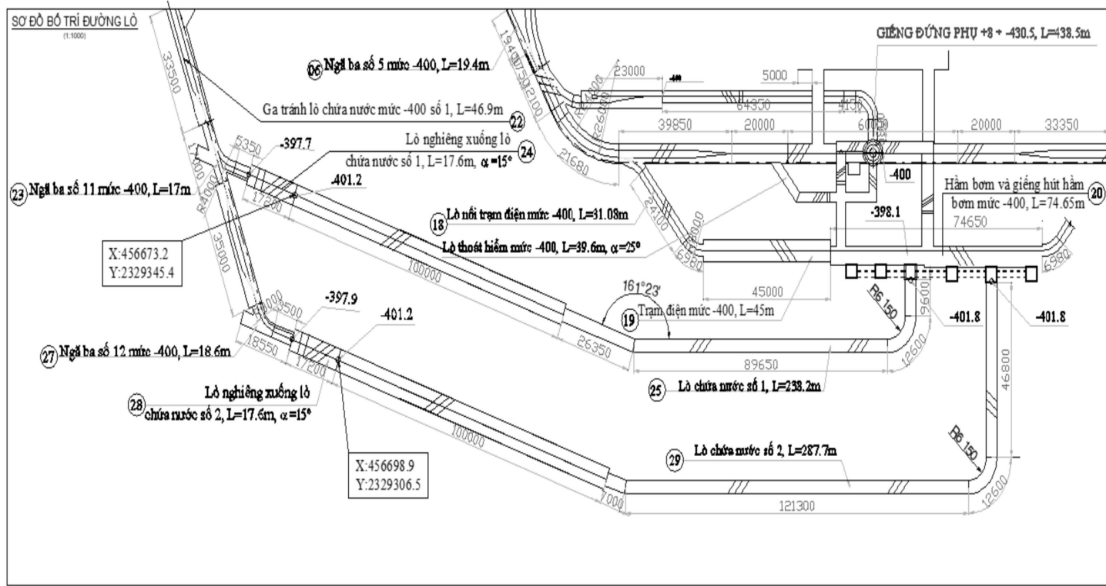
nê và ảnh hưởng của nước ngầm lên ổn định công trình. Các nghiên cứu về công trình ngầm trong điều kiện có nước đã cho thấy áp lực thủy tĩnh kết hợp với áp lực đất đá gây ra trường ứng suất phức tạp, có thể dẫn đến biến dạng lớn, nứt cục bộ hoặc phá hoại dạng kéo - uốn tại chân tường chỉ ra rằng, sự thay đổi chu kỳ mực nước có thể làm tăng biên độ ứng suất kéo trong tường bê tông, làm giảm đáng kể tuổi thọ cấu kiện (Anagnostou, 1996). Trong ngành mỏ Việt Nam, các quy chuẩn như QCVN 01:2011/BCT và các quy phạm kỹ thuật của TKV đã đưa ra các yêu cầu nghiêm ngặt về chống thấm, chống ăn mòn, cũng như ổn định công trình trong môi trường khí - nước phức tạp. Tuy nhiên, vẫn thiếu các nghiên cứu mô phỏng FEM cho tường hầm chứa nước, đặc biệt là trong điều kiện tải trọng không đồng nhất và địa cơ thay đổi theo từng khu vực mỏ (Zhang, Z, 2010; Zhang, Y, 2015). Một số nghiên cứu gần đây sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) đã chứng minh hiệu quả của mô hình phần tử vỏ (shell) trong phân tích tường bê tông chịu áp lực nước - đất đá (Zienkiewicz, 2013). ETABS là phần mềm phân tích - thiết kế kết cấu công trình dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), được sử dụng rất rộng rãi trong kỹ thuật xây dựng để mô hình hóa và tính toán nhà cao tầng, khung - vách - sàn bê tông cốt thép và thép, mặc dù không phải phần mềm địa kỹ thuật chuyên sâu như FLAC3D, nhưng đã được chứng minh phù hợp để mô phỏng tường bê - hầm khi mô hình hóa đúng điều kiện biên và tải trọng (Khan, 2014). Do đó, có thể thấy khoảng trống nghiên cứu nằm ở việc ứng dụng FEM để kiểm toán chi tiết tường hầm chứa nước trong điều kiện mỏ than hầm lò Việt Nam - lĩnh vực mà nghiên cứu này hướng đến.

2. Cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu

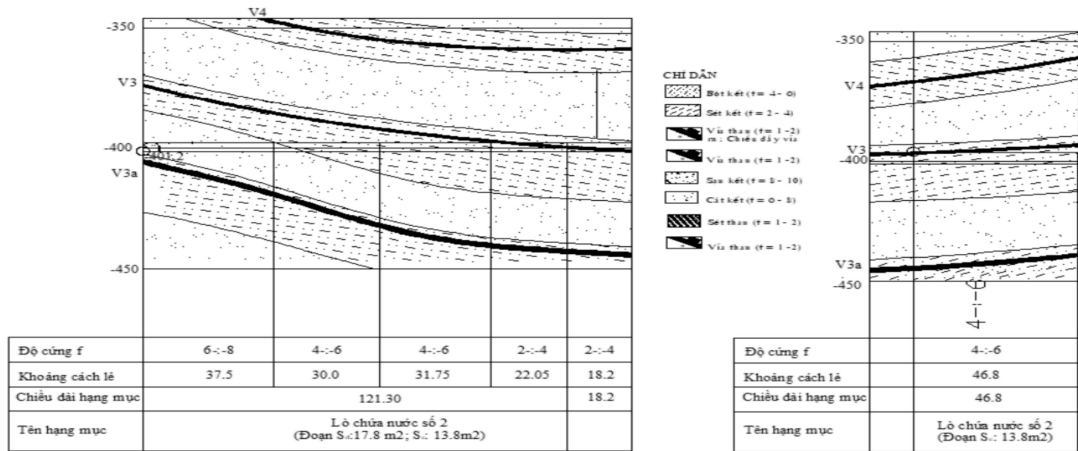
Tường bê tông của hầm chứa nước trong mỏ than hầm lò là kết cấu ngầm chịu tác động đồng thời của áp lực đất đá xung quanh, áp lực nước thủy tĩnh phía trong và các ảnh hưởng phụ do hoạt động khai thác. Sự kết hợp của các tải trọng này tạo nên trạng thái ứng suất - biến dạng phức tạp, trong đó mô men uốn lớn thường xuất hiện tại khu vực chân tường và vùng tiếp giáp với nền đá, làm gia tăng nguy cơ nứt kéo và suy giảm độ bền lâu dài của kết cấu (Hoek và Brown, 1980; Brady và Brown, 2006).

Áp lực đất tác dụng lên tường hầm được xác định theo lý thuyết áp lực đất Rankine, với giả thiết khối đất đá phía sau tường ở trạng thái giới hạn chủ động, cho phép mô tả phân bố áp lực theo chiều sâu và xét đến ảnh hưởng của các tải trọng khai thác mỏ (Rankine, 1857; Terzaghi, 1996). Áp lực nước tác dụng lên mặt trong của tường được xác định theo quy luật thủy tĩnh, phân bố tuyến tính theo chiều sâu cột nước. Nhiều nghiên cứu cho thấy tổ hợp áp lực đất đá và áp lực nước có thể làm gia tăng đáng kể momen uốn tại chân tường, đặc biệt khi mực nước biến đổi theo chu kỳ khai thác (Anagnostou, 1996; Zhang, 2010).

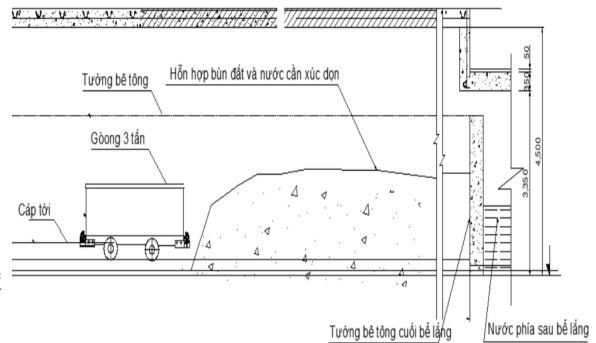
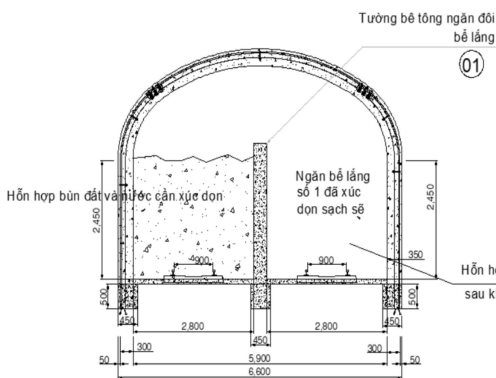
Để đánh giá chính xác trạng thái làm việc của tường hầm chứa nước, nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Tường bê tông được mô hình hóa bằng phần tử vỏ (shell), cho phép xét đồng thời khả năng chịu uốn và chịu lực màng của kết cấu. Phần mềm ETABS, dựa trên phương pháp FEM, được sử dụng để mô phỏng kết cấu và xác định nội lực, trong khi kết quả tính toán được kiểm tra theo các yêu cầu của TCVN 5574:2018. Cách tiếp cận này đã được chứng minh là phù hợp trong phân tích các kết cấu tường và công trình ngầm chịu tác động của áp lực đất - nước (Zienkiewicz, 2013; Khan, 2014).



a. Vị trí khu vực hầm chứa nước



b. Mặt cắt địa chất khu vực nghiên cứu



c. Mặt cắt ngang hầm chứa nước

d. Mặt cắt dọc hầm chứa nước

Hình 1. Sơ đồ vị trí đường lò nghiên cứu

3. Tính toán sức chịu tải của hầm chứa nước

Hầm chứa nước được thiết kế với thông số hình học và kỹ thuật sau:

Tường chắn sử dụng bê tông cấp B25 với cốt thép CB500V (chính) và CB300T (đai).

Thông số bê tông: Mác bê tông: B25; Cấp bền nén: $R_b = 145 \text{ daN/cm}^2 = 14,5 \text{ Mpa}$; Cường độ kéo: $R_{bt} = 10,5 \text{ daN/cm}^2$; Mô đun đàn hồi: $E_b = 300.000 \text{ daN/cm}^2$.

Thông số cốt thép: Cốt thép kéo: CB500V, $R_s = 4.350 \text{ daN/cm}^2$; Cốt đai: CB300T, $R_{sw} = 2.600 \text{ daN/cm}^2$; Lớp bảo vệ: 30 mm (chống ăn mòn, chống thấm); Mô đun đàn hồi: $E_s = 2.000.000 \text{ daN/cm}^2$.

Nước bên trong hầm: Độ sâu nước tính toán: $H_2 = 2,00\text{m}$; Trọng lượng riêng nước: $\gamma_w = 1,00 \text{ T/m}^3$; Áp lực hydrostatic cực đại: $\sigma_w = \gamma_w \times H_2 = 2,00 \text{ T/m}^2$.

Điều kiện môi trường hầm lò: Độ ẩm: RH = 95 - 100%; Nhiệt độ: 20 - 28°C; Khí methane: < 0,5% (thông thoáng tốt); Bụi: < giới hạn cho phép. Thông số cơ bản của đất đá vây quanh như sau:

Bảng 1. Thông số cơ bản tính chất cơ lý của đất đá xung quanh khu vực nghiên cứu

Giá trị (TB)	Cường độ kháng nén, σ_n (kG/cm ²)	Cường độ kháng kéo, σ_k kG/cm ²)	Khối lượng thể tích, γ (g/cm ³)	Khối lượng riêng, Δ (g/cm ³)	Lực dính kết, C (kG/cm ²)	Góc nội ma sát, φ (độ)
Sạn kết	1318,09	121,63	2,62	2,67	439,83	35°26'
Cát kết	1118,32	103,91	2,67	2,72	367,66	35°29'
Bột kết	491,49	55,38	2,68	2,75	139,59	33°25'

Dựa trên các thông số đầu vào là tính chất cơ lý của đất đá khu vực nghiên cứu, mô hình phần tử hữu hạn của tường hầm chứa nước được xây dựng trên phần mềm ETABS. Tiếp theo, tiến hành khai báo các loại tải trọng bao gồm: áp lực nước, áp lực đất đá và các tải trọng phụ do hoạt động khai thác mỏ gây ra. Mô hình được chạy mô phỏng để trích xuất nội lực (M, V, N). Kết quả tính toán được kiểm tra theo tiêu chuẩn TCVN 5574:2018. Trên cơ sở đó, tiến hành so sánh giữa kết quả mô phỏng và các công thức lý thuyết nhằm đánh giá mức độ phù hợp. Cuối cùng, kết quả được sử dụng để đánh giá mức độ an toàn và đề xuất giải pháp thiết kế phù hợp.

3.1. Áp lực đất theo Lý thuyết Rankine

$$\text{Áp lực chủ động từ các tập đất đá: } \sigma_a = K_a \times \gamma_d \times z + K_a \times p \quad (1)$$

Trong đó: σ_a là áp lực đất chủ động (T/m²); $K_a = 0,406$ (hệ số Rankine); $\gamma_d = 1,80 \text{ T/m}^3$ (trọng lượng riêng của than); z là độ sâu (m); $p = 0,38 \text{ T/m}^2$ (phụ tải từ cột than).

$$\text{Tại đỉnh tường (z = 0): } \sigma_{a,top} = K_a \times (p + \gamma_d \times h) = 0,406 \times (0,38 + 1,80 \times 0,21) = 0,156 \text{ T/m}^2;$$

$$\text{Tại chân tường (z = H}_1 = 2,80 \text{ m): } \sigma_{a,bottom} = 0,406 \times 1,80 \times 2,80 + 0,156 = 2,202 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Với hệ số động lực từ hoạt động khai thác: } \sigma_{a,design} = 4,202 \text{ T/m}^2$$

3.2. Áp lực hydrostatic từ nước

$$\text{Áp lực nước tác dụng lên tường phía trong: } \sigma_w = \gamma_w \times h_w \quad (2)$$

$$\text{Tại mực nước cao nhất (h}_w = H_2 = 2,00 \text{ m): } \sigma_{w,max} = 1,00 \times 2,00 = 2,00 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Áp lực nước phân bố tuyến tính từ mặt nước: Tại mặt nước: } \sigma_w = 0 \text{ T/m}^2; \text{ Tại đáy hầm: } \sigma_w = 2,00 \text{ T/m}^2$$

3.3. Áp lực tổng hợp

Tường chắn chịu áp lực từ cả hai phía:

Áp lực rỗng tác dụng:

Áp lực từ phía ngoài (đất, đá): từ 0,156 T/m² đến 4,202 T/m²;

Áp lực từ phía trong (nước): từ 0 T/m² đến 2,00 T/m²

$$\text{Áp lực rỗng kết hợp: } \sigma_{net} = \sigma_a - \sigma_w \quad (3)$$

$$\text{Tại chân tường: } \sigma_{net,max} = 4,202 - 2,00 = 2,202 \text{ T/m}^2 \text{ (phía ngoài lớn hơn).}$$

3.4. Mô men uốn tác dụng

$$\text{Từ áp lực đất đá: } M_a = \frac{1}{2} \times \sigma_{a,bottom} \times H_1^2 = \frac{1}{2} \times 4,202 \times (2,80)^2 = 15,54 T \cdot m/m \quad (4)$$

Từ áp lực nước: Áp lực nước tác dụng từ độ cao 0 đến 2,00m (tính từ đáy):

$$M_w = \frac{1}{2} \times \gamma_w \times H_2^2 = \frac{1}{2} \times 1,00 \times (2,00)^2 = 2,00 T \cdot m/m \quad (5)$$

$$\text{Mô men ròng tác dụng: } M_{net} = M_a - M_w = 15,54 - 2,00 = 13,54 T \cdot m/m \quad (6)$$

Giá trị này được xác nhận bằng mô phỏng ETABS với mô men thiết kế $M = 12,86 T \cdot m/m$ (bảo toàn an toàn).

3.5. Kiểm tra điều kiện tính toán theo mô hình ETABS

- **Phần tử sử dụng:** Phần tử Shell 4 node (độ cứng theo membrane + bending); Tường được mô phỏng cao 3 - 5m; Chiều dày bê tông tường 25 - 30 cm.

- **Điều kiện biên:** Chân tường: ngàm toàn phần (fix all); Liên kết với dầm/sàn xung quanh: liên kết tương thích khung-vỏ (frame-shell connectivity); Nền đá mô phỏng bằng lò xo nền (subgrade modulus).

- **Tổ hợp tải trọng theo TCVN:** Mô men thiết kế tại trạng thái giới hạn cuối được xác định theo tổ hợp tải trọng bất lợi nhất, bao gồm tải trọng thường xuyên, tải trọng đất đá và tải trọng nước ngàm. Khi đó, mô men thiết kế MEd được xác định theo biểu thức:

$$M_{\{Ed\}} = 1.2 \cdot DL + 1.4 \cdot HL + 1.4 \cdot W \quad (7)$$

Trong đó: MEd – mô men thiết kế tại trạng thái giới hạn cuối (kN·m); DL – mô men do tải trọng thường xuyên (tự trọng kết cấu, lớp chống, thiết bị gắn kèm); HL – mô men do tải trọng đất đá tác dụng lên kết cấu hầm; W – mô men do áp lực nước ngàm; các hệ số 1,2 và 1,4 là hệ số tổ hợp tải trọng theo trạng thái giới hạn cuối, đảm bảo mức độ an toàn cần thiết cho kết cấu.

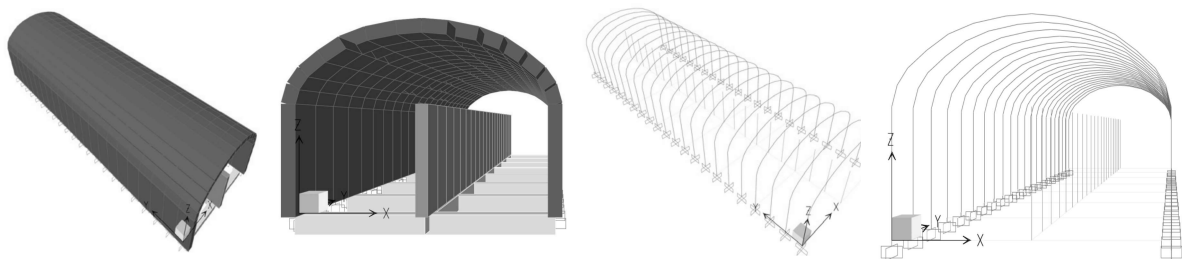
Chiều cao tường mô phỏng: 3 - 5m; Chiều dày bê tông tường: 25 - 30 cm; Loại phần tử: Shell 4 node (độ cứng màng + uốn); Điều kiện biên: Chân tường ngàm toàn phần (fix all); Liên kết với dầm/sàn xung quanh theo kết nối frame-shell; Nền đá mô phỏng bằng lò xo nền (subgrade modulus).

Tổ hợp tải trọng: MEd = 1,2·DL + 1,4·HL + 1,4·W theo TCVN

Công thức tổ hợp này được sử dụng để kiểm tra khả năng chịu uốn của kết cấu chống hầm lò trong điều kiện làm việc bất lợi nhất, làm cơ sở cho việc lựa chọn tiết diện và vật liệu chống phù hợp.

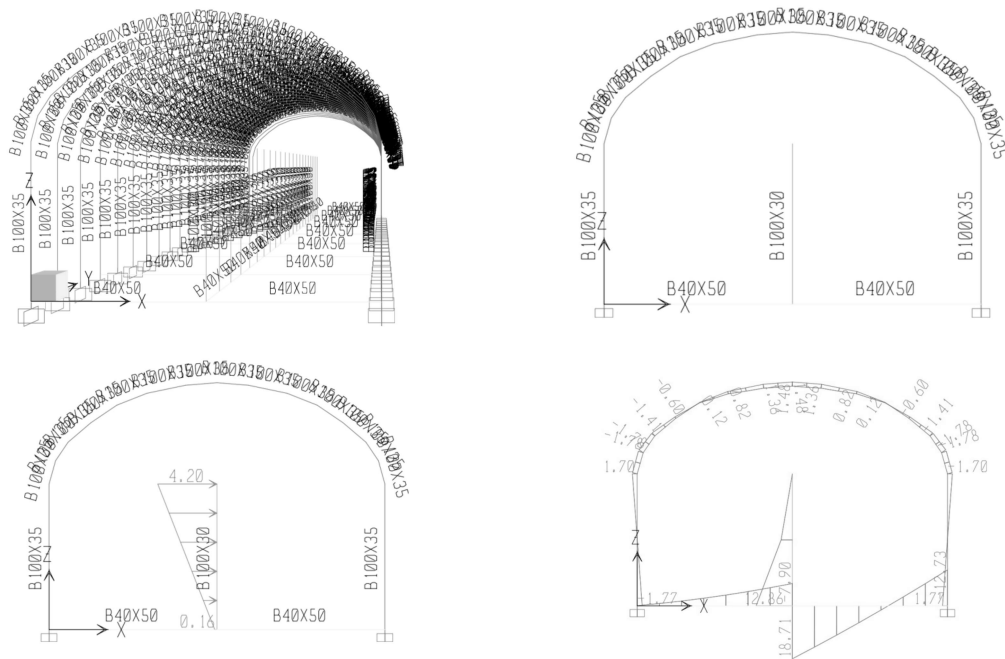
4. Kết quả và thảo luận

4.1. Biểu đồ mô men



Hình 1. Mô phỏng ban đầu của mô hình

Mmax tại chân tường đạt: 12.5 - 16.8 T·m tùy mức nước. Vị trí nguy hiểm: chân tường 0 - 0,3m.



Hình 2. Biểu đồ phân bố mô men trong hầm

4.2. Kiểm tra hàm lượng thép và điều kiện cấu tạo

Hàm lượng cốt thép tính toán tại chân tường là $\mu = 0,44\%$. Theo TCVN 5574:2018, đối với cấu kiện chịu uốn, hàm lượng cốt thép dọc phải thỏa mãn:

$$\mu_{\min} \leq \mu \leq \mu_{\max} \quad (8)$$

Trong đó, $\mu_{\min} \approx 0,2\%$ và $\mu_{\max} \approx 2,5\%$ tùy theo loại cấu kiện và điều kiện làm việc. Giá trị $\mu = 0,44\%$ nằm trong khoảng cho phép, do đó thỏa mãn yêu cầu về hàm lượng cốt thép.

Khoảng cách cốt thép bố trí $a = 100 \text{ mm}$ thỏa mãn yêu cầu cấu tạo ($a \leq \min\{200 \text{ mm}; 2h_0\}$), đồng thời đảm bảo điều kiện thi công và làm việc đồng đều của cốt thép.

4.3. Tính toán cốt thép tường chịu uốn

Áp lực tác dụng lên tường được xác định thông qua mô hình phân tích trong phần mềm ETABS. Kết quả phân tích cho thấy mô men uốn lớn nhất tại chân tường do tác dụng của áp lực đất đá và tải trọng liên quan có giá trị như sau:

$$M_{\{Ed\}} = 12.86 \text{ T}\cdot\text{m} \quad (9)$$

Tường được mô hình hóa trong phần mềm ETABS dưới dạng phần tử thanh (frame element), với một đầu ngàm cố định tại chân tường và một đầu tự do ở phía trên, phù hợp với điều kiện làm việc thực tế của kết cấu.

Thông số vật liệu: Bê tông sử dụng mác B30 (M300), cấp bền 22,5 MPa, với cường độ tính toán chịu nén $R_b = 13 \text{ MPa}$ và hệ số giới hạn vùng nén $\xi_R = 0,553$. Cốt thép sử dụng thép CB500, có cường độ tính toán $R_s = 435 \text{ MPa}$, lớp bê tông bảo vệ dày 30 mm.

Tính toán cốt thép chịu mô men tại chân tường: Các thông số hình học của tiết diện tường được lựa chọn như sau:

$$b = 1,0\text{m}; h = 30 \text{ cm}; h_0 = 27 \text{ cm}.$$

Hệ số mô men được xác định theo biểu thức:

$$\alpha_m = M_{\{Ed\}} / (R_b \cdot b \cdot h_0^2) = 0.1357 \quad (10)$$

Từ đó xác định hệ số cánh tay đòn tương đối của nội lực uốn:

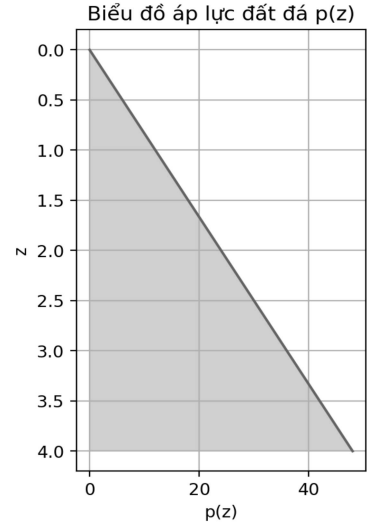
$$\zeta = 0.9268 \quad (11)$$

Diện tích cốt thép chịu kéo yêu cầu tại chân tường được xác định theo:

$$A_s = M_{Ed} / (R_s \cdot \zeta \cdot h_0) = 11.814 \text{ cm}^2 \quad (12)$$

Hàm lượng cốt thép tương ứng: $\mu = 0,44\%$.

Sơ đồ mô hình tường trong ETABS
(phần tử thanh - 1 đầu ngàm, 1 đầu tự do)



a. Sơ đồ mô hình hóa tường trong ETABS
(1 đầu ngàm - 1 đầu tự do)

b. Biểu đồ phân bố áp lực đất đá $p(z)$
tác dụng lên tường

Hình 3. Sơ đồ mô hình hóa tường trong ETABS (1 đầu ngàm - 1 đầu tự do)

Kết quả phân tích FEM cho thấy mô men uốn lớn nhất xuất hiện tại chân tường, với giá trị dao động trong khoảng 12,5 - 16,8 T·m/m tùy theo mực nước trong hầm. So sánh với phương pháp tính toán giản lược theo mô hình công xôn cho thấy kết quả FEM lớn hơn khoảng 6% - 12%, phản ánh xu hướng bảo toàn an toàn của phương pháp số.

Hàm lượng cốt thép tính toán tại chân tường đạt khoảng 0,44%, nằm trong giới hạn cho phép theo TCVN 5574:2018. Phương án bố trí cốt thép đề xuất thỏa mãn yêu cầu chịu lực, cấu tạo và phù hợp với điều kiện thi công trong môi trường mỏ. Chọn cốt thép chịu lực có đường kính $\phi 16$ mm. Khoảng cách bố trí cốt thép tương ứng $a = 170,19$ mm. Do đó, phương án bố trí cốt thép tại chân tường được chọn là $\phi 16a100$, đảm bảo diện tích cốt thép thực tế lớn hơn diện tích yêu cầu tính toán.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã trình bày phương pháp tính toán và kiểm định kết cấu tường bê tông hầm chứa nước trong mỏ than hầm lò bằng cách kết hợp lý thuyết áp lực đất, áp lực nước và mô hình phần tử hữu hạn. Kết quả nghiên cứu cho thấy mô hình FEM bằng ETABS phản ánh hợp lý trạng thái làm việc của kết cấu và các cấu kiện thỏa mãn yêu cầu chịu lực theo TCVN 5574:2018. Phương pháp đề xuất có thể áp dụng hiệu quả trong thiết kế và kiểm toán các hầm chứa nước trong hệ thống mỏ than Việt Nam.

Mô men uốn lớn nhất tại chân tường đạt 12,86 T·m/m (ETABS), dao động 12,5 - 16,8 T·m/m theo mực nước; vị trí nguy hiểm nhất tập trung ở đoạn 0 - 0,3m từ chân tường. Hàm lượng cốt thép tính toán $\mu = 0,44\%$, phương án bố trí $\phi 16a100$ thỏa mãn yêu cầu chịu lực và cấu tạo theo TCVN 5574:2018.

Kết quả FEM lớn hơn phương pháp giản lược công xôn khoảng 6% - 12%, xác nhận phương pháp giản lược công xôn (conservative) và an toàn của phương pháp số. Phương pháp đề xuất có thể áp dụng hiệu quả trong thiết kế và kiểm toán các hầm chứa nước trong hệ thống mỏ than hầm lò Việt Nam.

Lời cảm ơn

Các tác giả xin chân thành cảm ơn Công ty Cổ phần Than Mông Dương, các cộng sự, đồng nghiệp Trường Đại học Mỏ - Địa chất đã hỗ trợ và cung cấp tài liệu phục vụ cho việc thực hiện nghiên cứu này.