

ỨNG SUẤT QUANH CÔNG TRÌNH NGẦM XÂY DỰNG TRONG ĐẤT ĐÁ BIẾN DẠNG PHI TUYẾN

Nguyễn Xuân Mãn⁽¹⁾, Phạm Thanh Tiên⁽¹⁾
Nguyễn Minh Tuấn⁽²⁾, Nguyễn Xuân Tùng⁽³⁾

(1) Viện cơ học ứng dụng, (2) Viện cơ học, (3) Đại học Mỏ - địa chất
(Bài nhận ngày 31 tháng 10 năm 2005, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 20 tháng 02 năm 2006)

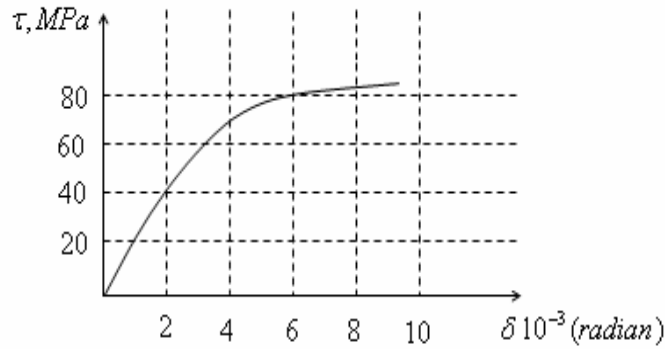
TÓM TẮT: Xây dựng công trình ngầm đòi hỏi phải có sự tính toán vỏ chống một cách chính xác. Nếu thiên về an toàn sẽ dẫn đến lãng phí vật liệu. Trong bài viết đề cập đến tính toán ứng suất trên biên công trình ngầm trong hai trường hợp: (1) - đất đá quanh hầm xem là mô hình nền biến dạng đàn hồi; (2) - đất đá quanh hầm xem là mô hình nền biến dạng phi tuyến. Sử dụng phương pháp thống số nhỏ cho phép tuyến tính hoá lời giải cho biên hầm không tròn. Kết quả cho thấy mô hình biến dạng phi tuyến làm giảm ứng suất trên biên công trình so với mô hình đàn hồi. Tính toán minh hoạ số cho biên dạng vòm chỉ ra: ứng suất trên biên công trình khi xét đến tính biến dạng phi tuyến giảm 25,73% so với khi chỉ xem đất đá biến dạng đàn hồi.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khi tính toán kết cấu chống giữ hoặc đưa ra các giải pháp đảm bảo ổn định và bền vững các công trình ngầm thường quan tâm đến giá trị ứng suất cực đại trên biên công trình, nói một cách khác là hệ số tập trung ứng suất được xem xét và có vai trò quan trọng trong đánh giá ổn định công trình. Trong các nghiên cứu đã đề cập đến việc xác định hệ số tập trung ứng suất trên biên công trình ngầm xây dựng trong đất đá có biến dạng tuyến tính (biến dạng đàn hồi). Việc xem xét biến dạng phi tuyến của đất đá sẽ cho phép khai thác khả năng mang tải của khối đá quanh công trình ngầm và do đó làm giảm các chi phí nhằm đảm bảo ổn định và bền vững cho công trình. Dưới đây xem xét việc xác định hệ số tập trung ứng suất trên biên công trình ngầm dạng vòm trong đất đá biến dạng phi tuyến.

2. ĐẶT BÀI TOÁN

Trên cơ sở nghiên cứu thực nghiệm [1] đã chỉ ra rằng quan hệ ứng suất tiếp τ với chuyển vị góc δ tuân theo biểu đồ như hình vẽ 1, với quy luật được xấp xỉ $\delta = 2B\tau^{m+1}$. Trong đó: B, m- các hằng số thực nghiệm. Trong thực tế, các hằng số B và m là các hàm của thời gian. Tuy nhiên khi nghiên cứu, tính toán cho một thời điểm xác định, có thể coi B và m là không đổi tại thời điểm xác định đó. Việc xác định B và m cho một loại đá nhất định tiến hành bằng thực nghiệm và khá tốn kém. Khi tính toán cho công trình cụ thể cần tiến hành thực nghiệm để xác định các chỉ tiêu này. Trong bài viết sử dụng kết quả theo tài liệu [1].



Hình 1: quan hệ giữa τ và δ

Để nghiên cứu trạng thái ứng suất - biến dạng của khối đá quanh công trình ngầm trong bài viết này sử dụng các giả thiết sau đây:

- Công trình ngầm được coi như một lỗ khoét trong môi trường biến dạng phi tuyến – đẳng hướng với ứng suất ban đầu tác dụng đều mọi phía như nhau và xa tâm lỗ khoét một khoảng cách đủ lớn (trong tÝnh to,n thường lÊy xấp xỉ 10 lần bán kính lỗ) là γH (γ - dung trọng của đất đá, H – chiều cao cét ®, t ®, pho thuộc vµo chiều sâu đặt công trình). Có thể viết :

$$\delta = 2\tau B \tau^m = 2\psi \tau \quad (1)$$

ở đây: $\psi = B \tau^m$ - hàm vô hướng.

- Xem đất đá là môi trường không nén ép, khi đó thỏa mãn điều kiện:

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta = 0 \text{ hay } \frac{du}{dr} + u/r = 0 \quad (2)$$

trong đó: $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ - các thành phần biến dạng trong hệ tọa độ cực (r, θ)

r - tọa độ theo phương bán kính của điểm cần xem xét.

- §ắt đá vùng ngoài giới hạn đàn hồi tuân theo lý thuyết biến dạng dẻo, tức là:

$$(\varepsilon_\theta - \varepsilon_r) = \psi(\sigma_\theta - \sigma_r) \quad (3)$$

với ψ - hàm vô hướng như trong định nghĩa trong (1).

2.1. Giải bài toán biên tròn

Bài toán đi đến việc giải hệ phương trình:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 & (4) \\ (\varepsilon_\theta - \varepsilon_r) = \psi(\sigma_\theta - \sigma_r) & (5) \\ \varepsilon_\theta + \varepsilon_r = \frac{du}{dr} + \frac{u}{r} = 0 & (6) \end{cases}$$

Từ (6) dễ dàng cho ta $u = C_1 / r$, với C_1 là hằng số tích phân.

Biến đổi (5) có để ý đến (3) và thay $\tau = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2}$., cho ta:

$$(\varepsilon_\theta - \varepsilon_r) = 2^{-m} B (\sigma_\theta - \sigma_r)^{m+1} \quad (7)$$

Từ (2) và (7) đến đến:

$$(\sigma_\theta - \sigma_r) = 2B^{-1/(1+m)} \left(\frac{C_1}{r^2} \right)^{1/(1+m)} \quad (8)$$

Kết hợp (8) với (4) nhỂn ®-îc:

$$\sigma_r = C_2 - (1+m) \left(\frac{C_1}{B} \right)^{1/(1+m)} r^{-2/(1+m)} \quad (9)$$

Trong đó : C_2 - hằng số tích phân (xác định sau).

Từ các điều kiện biên:

$$\begin{cases} \sigma_r = p & \text{khi } r = 1 \text{ (trên biên công trình)} \\ \sigma_r \rightarrow \gamma H & \text{khi } r \rightarrow \infty \text{ (r } \approx 10 \text{ bán kính)} \end{cases}$$

ở đây: p - phản lực vỏ chống; khi không chống : $p = 0$.

Thay các điều kiện biên này vào (9), ta có nghiệm:

$$\sigma_r = \gamma H - (\gamma H - p) r^{-2/(1+m)} \quad (10)$$

$$\text{và} \quad \sigma_\theta = \gamma H + \left(\frac{1-m}{1+m} \right) (\gamma H - p) r^{-2/(1+m)} \quad (11)$$

Như vậy hệ số tập trung ứng suất trên biên công trình sẽ là:

$$K_\theta^0 = \frac{\gamma H + \left(\frac{1-m}{1+m} \right) (\gamma H - p)}{\gamma H} = \frac{2}{1+m} - \frac{(1-m)}{(1+m)} \frac{p}{\gamma H} \quad (12)$$

Từ (12) nhận thấy hệ số tập trung ứng suất là hàm nghịch biến của thông số m . khi không có vỏ chống ($p=0$), $K_\theta^0 = \frac{2}{(1+m)} < 2$ với mọi $m > 0$.

Khi đất đá biến dạng tuyến tính ($m=0$) hệ số tập trung ứng suất $K_\theta^0 = 2$.

Như vậy, trong trường hợp biên tròn hệ số tập trung ứng suất trên biên công trình xây dựng trong đất đá biến dạng phi tuyến nhỏ hơn khi xây dựng trong đất đá có biến dạng tuyến tính (đàn hồi).

2.2. Giải bài toán biên không tròn

Khi công trình có biên không tròn thì tọa độ không thứ nguyên của biên công trình được xấp xỉ theo biểu thức [2]:

$$r_0 = 1 + h \cos n\theta, \text{ trong hệ tọa độ cực } (r, \theta) \quad (13)$$

Trong đó: - $r_0 = (\rho / R_0) \left(1 / \sqrt{1 + C_1^2} \right)$; $h = \frac{C_1}{1 + C_1^2}$; h - tham số nhỏ.

- R_0 bán kính trong biên công trình

- ρ tọa độ theo phương bán kính của biên công trình

C_1 và n xác định phụ thuộc hình dạng của biên công trình, lấy theo bảng 1:

Bảng 1

Giá trị	Biên tròn	Elíp	Vòm	Hình vuông cong
C_1	0	$0 < C_1 < 1$	0,1	$1/9 \div 1/10$
n	0	2	3	4

Tồn tại thông số nhỏ h cho phép tuyến tính hóa bài toán và nghiệm của bài toán trong trường hợp này được tìm ở dạng:

$$\varphi(r, \theta) = \varphi_0(r, \theta) + h \varphi_1(r, \theta) \quad (16)$$

Trong đó: $\varphi(r, \theta), \varphi_0(r, \theta)$ - lần lượt là hàm ứng suất cần tìm với biên không tròn và hàm ứng suất đối với trường hợp biên tròn.

Các thành phần ứng suất và biến dạng theo (16) được viết dưới dạng:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \sigma_r^0 + \hbar \sigma_r^1; & \varepsilon_r &= \varepsilon_r^0 + \hbar \varepsilon_r^1 \\ \sigma_\theta &= \sigma_\theta^0 + \hbar \sigma_\theta^1; & \varepsilon_\theta &= \varepsilon_\theta^0 + \hbar \varepsilon_\theta^1 \\ \tau_{r\theta} &= \tau_{r\theta}^0; & \gamma_{r\theta} &= \gamma_{r\theta}^1\end{aligned}\quad (17)$$

Chỉ số “0” ứng với lời giải khi biên công trình là tròn.

Chỉ số “1” ứng với thành phần ứng suất bổ sung thêm cần xác định khi biên công trình không tròn.

Sử dụng (6), (9) và (17), và phân tích các biến cần tìm theo tham số nhỏ $\hbar$, nhận được:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r^1 &= kr^{-2m/(1+m)} (\sigma_\theta^1 - \sigma_r^1); & (18\ a) \\ \varepsilon_\theta^1 &= -kr^{-2m/(1+m)} (\sigma_\theta^1 - \sigma_r^1); & (18\ b) \\ \gamma_{r\theta}^1 &= -4kr^{-2m/(1+m)} \tau_{r\theta}^1; & (18\ c)\end{aligned}\quad (18)$$

Trong đó: $k = \frac{(m+1)}{2} \cdot B \cdot \left(\frac{A}{B}\right)^{m/(1+m)}$

A – hằng số tùy ý cần xác định.

Các ứng suất bổ sung liên hệ với hàm ứng suất bổ sung φ_1 ở (16) như sau:

$$\begin{aligned}\sigma_r^1 &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} & (19a) \\ \sigma_\theta^1 &= \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial r^2} & (19b) \\ \tau_{r\theta}^1 &= -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_1}{\partial \theta} \right) & (19c)\end{aligned}\quad (19)$$

Thay các biến ở (18) và (19) vào điều kiện liên tục (20):

$$r^2 \frac{\partial^2 \varepsilon_\theta^1}{\partial r^2} + 2r \frac{\partial \varepsilon_\theta^1}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varepsilon_r^1}{\partial \theta^2} - r \frac{\partial \varepsilon_r^1}{\partial r} = \frac{\partial^2 (r \gamma_{r\theta}^1)}{\partial r \partial \theta} \quad (20)$$

và biến đổi, ta nhận được phương trình vi phân cấp 4:

$$\begin{aligned}A_0 \frac{\partial^4 \varphi_1}{\partial r^4} + A_1 \frac{\partial^4 \varphi_1}{\partial \theta^4} + A_2 \frac{\partial^4 \varphi_1}{\partial \theta^2 \partial r^2} + A_3 \frac{\partial^3 \varphi_1}{\partial \theta^2 \partial r} + A_4 \frac{\partial^3 \varphi_1}{\partial r^3} + \\ + A_5 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial r^2} + A_6 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \theta^2} + A_7 \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} = 0\end{aligned}\quad (21)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned}A_0 &= -r^2; A_1 = -\frac{1}{r^2}; A_2 = -2; A_3 = -3 \frac{(1+2m)}{(1+m)} r \\ A_4 &= -4 \frac{(2+3m)}{(1+m)} \frac{1}{r}; A_5 = -\frac{(1+3m^2)}{(1+m)^2}; A_6 = 4 \frac{(1+5m+5m^2)}{(1+m)^2} \frac{1}{r^2}; \\ A_7 &= \frac{(3m^2 - 2m - 1)}{(1+m)^2} \frac{1}{r}\end{aligned}$$

Tìm nghiệm của (21) ở dạng sau [3]:

$$\varphi_1(r, \theta) = X(r) \cos(n\theta) \quad (22)$$

Trong đó: X(r) là hàm của biến r cần xác định.

n - thông số xác định theo bảng 1.

Thế (22) vào (21) và biến đổi đi đến phương trình vi phân cấp 4 về hàm X(r) như sau:

$$a_4 r^4 \frac{dX^4}{dr^4} + a_3 r^3 \frac{dX^3}{dr^3} + a_2 r^2 \frac{dX^2}{dr^2} + a_1 r \frac{dX}{dr} + a_0 X = 0 \quad (23)$$

với :

$$a_0 = n^2 \frac{(3+10m+3m^2)}{(1+m)^2}; a_1 = \frac{3m-1-2(1+3m)n^2}{(1+m)} - \frac{4m}{(1+m)^2}$$

$$a_2 = 2n^2 + \frac{(1+2m-3m^2)}{(1+m)^2}; a_3 = \frac{2(m-1)}{(m+1)}; a_4 = -1.$$

Phương trình đặc trưng của (23) có dạng:

$$a_4 k(k-1)(k-2)(k-3) + a_3 k(k-1)(k-2) + a_2 k(k-1) + a_1 k + a_0 = 0$$

Nghiệm cần tìm (19) thỏa mãn các điều kiện biên sau đây:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \sigma_r^1 \rightarrow 0 \text{ khi } r \rightarrow \infty & (\text{xấp xỉ 10 lần bán kính công trình}) \\ \tau_{r\theta}^1 \rightarrow 0 \text{ khi } r \rightarrow \infty & \\ \sigma_r^1 = -\frac{2(\gamma H - p) \cos n\theta}{(1+m)}; \text{ khi } r=1 & \text{trên biên công trình} \\ \tau_{r\theta}^1 = -\frac{2(\gamma H - p)n \sin n\theta}{(1+m)}; \text{ khi } r=1 & \text{trên biên công trình} \end{array} \right. \quad (25)$$

2.3. Áp dụng cho biên dạng vòm

Giả thiết công trình xây dựng trong đất đá có thông số biến dạng phi tuyến $m=0,6$, biên công trình có dạng vòm, ứng với $n=3$ (xem bảng 1)

Khi đó nghiệm phương trình đặc trưng (24) lần lượt là:

$$k_1 = 5,89; k_2 = -3,13; k_3 = 1,38 + 0,277i; k_4 = 1,38 - 0,277i$$

$$X(r) = B_1 r^{k_1} + B_2 r^{k_2} + B_3 r^{Rk_3} \cos((Mk_3) \ln r) + B_4 r^{Rk_4} \cos((Mk_4) \ln r)$$

Khi đó : $\varphi_1(r, \theta) = X(r) \cos 3\theta$; B_1, B_2, B_3, B_4 - xác định từ các điều kiện biên.

Nghiệm riêng :

$$\varphi_1(r, \theta) = [0,244\gamma H r^{-3,13} - 0,244\gamma H r^{1,38} \cos(0,277 \ln r) - 0,555\gamma H \sin(0,277 \ln r)] \cos 3\theta; \quad (26)$$

Khi đất đá biến dạng **tuyến tính** (với $m=0$), biên dạng vòm ($n=3$) ta có: nghiệm đặc trưng của (24) là : $k_1 = 3,34; k_2 = -1,09; k_3 = 4,48; k_4 = -2,73$.

$$X(r) = D_1 r^{k_1} + D_2 r^{k_2} + D_3 r^{k_3} + D_4 r^{k_4}$$

Các hệ số D_1, D_2, D_3, D_4 tìm từ điều kiện biên, giả, trÞ nh- d-íi ®©y:

$$D_1 = D_3 = 0; D_2 = -1,220\gamma H; D_4 = 1,221\gamma H$$

$$\text{Khi đó: } \varphi_1(r, \theta) = [-1,220\gamma H r^{3,34} + 1,221\gamma H r^{4,48}] \cos 3\theta; \quad (27)$$

Khi biết $\varphi_1(r, \theta)$ cho trường hợp biến dạng phi tuyến và $\varphi_1(r, \theta)$ cho trường hợp biến dạng tuyến tính, ta xác định được các $\sigma_r^1, \sigma_\theta^1$ và $\tau_{r\theta}^1$ theo (19)

Để xác định $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ theo (17) ta xác định $\hbar$. Với biên là hình vòm thì $C_1 = 0,1$, vậy

$$\hbar = \frac{C_1}{1 + C_1^2} = \frac{0,1}{1 + 0,1^2} = 0,099.$$

Từ đó :

$$\begin{cases} \sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}^0 + 0,099 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial r^2} \\ \sigma_r = \sigma_r^0 + 0,099 \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} \right] \\ \tau_{r\theta} = \tau_{r\theta}^0 + 0,099 \left[-\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_1}{\partial \theta} \right) \right] \end{cases}$$

Với $\varphi_1(r, \theta)$ lấy theo (26) khi đất đá biến dạng phi tuyến và theo (27) khi đất đá biến dạng tuyến tính.

Kết quả tính toán số σ_{θ} tại một số điểm trong (cho công trình dạng vòm :n= 3, $C_1 = 0,1, p=0, \gamma = 2T / m^3, H = 10m, r = 5m$) cho trong bảng 2.

Bảng 2

Tọa độ θ , radian	$\cos 3\theta$	$\sigma_{\theta}(K\sigma_{\theta})$		$K_{\sigma_{\theta}}^{phl} / K_{\sigma_{\theta}}^u$
		Đất đá biến dạng tuyến tính m=0	Đất đá biến dạng phi tuyến m=0,6	
		$\sigma_{\sigma_{\theta}}^u$	$\sigma_{\sigma_{\theta}}^{phl}$	
0	1	26.74785	19.86858	0.7427
$\frac{\pi}{8}$	0.38268	10.23595	7.602779	0.7427
$\frac{\pi}{6}$	0	0	0	
$\frac{\pi}{4}$	-0.707106	-18.9137	-14.0488	0.7427
$\frac{\pi}{3}$	-1	-26.7489	-19.8685	0.7427
$\frac{\pi}{2}$	0	0	0	

3. KẾT LUẬN

[1]. Sử dụng thông số bé cho phép tuyến tính hoá bài toán xác định ứng suất quanh công trình ngầm có biên không tròn xây dựng trong đất đá có biến dạng phi tuyến nhờ vậy có thể tìm nghiệm giải tích của bài toán như trình bày trên đây.

[2]. Người ta khai thác biến dạng phi tuyến của đất đá trong xây dựng công trình ngầm bằng việc tạo cho đất đá xung quanh được biến dạng vượt giới hạn đàn hồi bằng các giải pháp kỹ thuật và công nghệ trong xây dựng ngầm như: phương pháp đào nhiều giai đoạn; sử dụng phương pháp đào hầm mới của áo; bằng cách đặt vỏ chống sau một thời gian để lựu không hay chống tạm; bằng cách sử dụng vỏ chống linh hoạt về kích thước;..Những giải pháp này được ứng dụng rộng rãi trong ngành xây dựng ngầm.

[3]. Khi kể đến biến dạng phi tuyến (ví dụ dạng $\delta = 2B\tau^{m+1}$ trong bài viết này) ứng suất trên biên công trình sẽ nhỏ hơn so với trường hợp biến dạng đàn hồi (như tính toán minh hoạ trong bài viết này thì $K_{\sigma_{\theta}}^{phl} / K_{\sigma_{\theta}}^u = 0.7427$; giảm 25,73%). Tức khi khai thác tính biến dạng phi tuyến(đàn-dẻo chẳng hạn) ta sẽ tiết kiệm được vật liệu làm vỏ chống công trình so với trường hợp chỉ xem xét biến dạng đàn hồi.

[4]. Tuy nhiên do yếu tố kỹ thuật-công nghệ của công trình trong khai thác và sử dụng thì ta chỉ khai thác một phần biến dạng phi tuyến của đất đá đến một giới hạn nào đó. Giá trị giới hạn đó cần được nghiên cứu trong một công trình độc lập khác.

THE STRESS AROUND UNDERGROUND STRUCTURE CONSTRUCTIONS IN NONLINEARLY DEFORMED SOIL

Nguyen Xuan Man ⁽¹⁾, Pham Thanh Tien ⁽¹⁾

Nguyen Minh Tuan ⁽²⁾, Nguyen Xuan Tung ⁽³⁾

(1) Institute of Applied Mechanics, (2) Institute of Mechanics;

(3) Hanoi University of Mining and Geology

ABSTRACT: *The calculation of the supporting shells for underground constructions must be exact. The over safe calculation will lead to the waste of materials. This paper computes the stress on the boundary of underground structures in two cases : (1) the soil around the vault is considered with elastic deformation model; (2) the soil around the vault is considered with nonlinear deformation model. The use of parameterize method allows to linearization to the boundary of no round vaults. The results showed the nonlinear deformation model has helped to decrease stress around the boundary of the constructions in comparison with the elastic deformation model. The numerical calculations for the boundary of the vault structures show that the stress on the boundary structure in the nonlinear deformation model decrease 25,73% compared to the results from the elastic deformation model..*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Phúc Nhân, *Nghiên cứu các tính chất cơ lý của đá trong xây dựng công trình ngầm và mỏ*, Đề tài khoa học cấp bộ, Trường ĐH Mỏ – Địa chất. Hà Nội, 1998.
- [2]. Xavin G.N, *Phân bố ứng suất quanh lỗ khoét*, NXB “Naukova dumka”. Kiev, 1968.
- [3]. J.C. Erjanov, *Ổn định các lò bằng trong khối đá phân lớp*, NXB “khoa học”. Alma-Ata, 1971.