

DẦU KHÍ (trang 1÷12)

NGHIÊN CỨU LỰA CHỌN TÍNH CHẤT CỦA ĐÁ XI MĂNG ĐẢM BẢO ĐỘ ỔN ĐỊNH CỦA THÀNH GIẾNG KHOAN

VŨ MẠNH HUYỀN, Vietnam CurisTec
NGUYỄN VĂN KHUÔNG, Tập đoàn Dầu khí Quốc gia Việt Nam
TRIỆU HÙNG TRƯỜNG, Trường Đại học Mỏ - Địa chất

Tóm tắt: Khi tất cả các tính chất cơ học của vành đá xi măng trám giếng khoan được xác định, chúng ta có thể sử dụng phương pháp phân tích ổn định giếng để lựa chọn vật liệu xi măng cho phù hợp với điều kiện áp suất, ứng suất, nhiệt độ hay độ sâu của vành xuyên đá xi măng.

Phương pháp giải tích được sử dụng bởi tính đơn giản và dễ sử dụng. Mô hình tính toán giới thiệu dưới đây dựa trên bài toán về phát triển vùng đàn dẻo xung quanh một tunnel được giải quyết bởi Panet (1976). Đá xi măng được coi như một vật liệu đàn hồi trong khi đó lớp đất đá xung quanh được coi như vật liệu đàn dẻo. Sau khi đất đá bị phá hủy, một vùng biến dạng dẻo được hình thành xung quanh vành xuyên đá xi măng với bán kính R_p . Bán kính này cần được xác định bởi vì một khi được hình thành, nó sẽ tạo nên một vùng mà khí có thể xâm thực và đi lên trên theo những vết nứt được tạo ra trong lớp đất đá xung quanh xi măng.

Trên biểu đồ hệ đường cong ứng xử SRC, đường cong ứng suất-chuyển vị của cả đất đá và vành đá xi măng ở một thời điểm bất kỳ được so sánh. Giao điểm của hai đường cong này chính là điểm ổn định của bề mặt tiếp xúc vành đá xi măng-đất đá. Nếu điểm ổn định nằm trong vùng biến dạng dẻo của đất đá thì một vùng dẻo đã xuất hiện trong đất đá và có thể gây ra hiện tượng khí xâm thực. Mô hình tính toán giới thiệu ở đây cho phép xác định được tính chất cơ học tối ưu của đá xi măng ở một thời điểm nhất định để tránh gây ra phá hủy đá xi măng và lớp đất đá xung quanh nó.

1. Các tiêu chuẩn và phương trình cơ bản nhằm xác định trạng thái ứng suất và biến dạng trong lớp đất đá xung quanh vành xuyên đá xi măng

Trạng thái ứng suất và biến dạng trong lớp đất đá xung quanh vành xuyên đá xi măng được xác định dựa trên các phương trình của tiêu chuẩn dẻo, luật chảy dẻo, phương trình cân bằng, phương trình tương thích biến dạng và các điều kiện biên.

1.1. Tiêu chuẩn dẻo và luật chảy dẻo

Để tính toán trạng thái ứng suất và biến dạng trong lớp đất đá xung quanh chúng ta xét giếng khoan có mặt cắt hình tròn, bán kính R . Ứng suất hiện trường được coi là đẳng hướng và bằng σ_0 . Tiêu chuẩn đàn hồi dẻo lý tưởng của Mohr-Coulomb được sử dụng như sau:

$$\sigma_r - p_f = k_p (\sigma_\theta - p_f) + \sigma_c \quad , \quad (1)$$

trong đó, tham số k_p được tính toán theo góc ma sát φ bởi quan hệ sau:

$$k_p = \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad . \quad (2)$$

Các kí hiệu σ_r và σ_θ là ứng suất hướng tâm và ứng suất tiếp tuyến; p_f là áp suất nước lỗ rỗng trong đất đá; σ_c là độ bền chịu nén của đất đá.

Giả thuyết biến dạng phẳng được sử dụng và luật chảy dẻo được thể hiện bằng phương trình sau:

$$\beta \Delta \varepsilon_r^p + \Delta \varepsilon_\theta^p = 0 \quad , \quad (3)$$

trong đó ε_r^p và ε_θ^p là biến dạng dẻo hướng tâm và biến dạng dẻo tiếp tuyến; β là hệ số giãn nở và là tham số không đổi, được liên hệ với góc giãn nở ψ qua công thức:

$$\beta = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (4)$$

1.2. Phương trình cân bằng

Phương trình cân bằng được thể hiện bằng biểu thức sau:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (5)$$

trong đó r là bán kính và thỏa mãn $r \geq R$.

1.3. Phương trình tương thích biến dạng

Phương trình tương thích biến dạng được viết như sau:

$$\frac{d\varepsilon_\theta}{dr} = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_\theta}{r} \quad (6)$$

1.4. Điều kiện giới hạn

Ứng suất hướng tâm σ_r thỏa mãn điều kiện giới hạn sau:

$$\sigma_r|_{r=R} - p_f = (1 - \lambda)(\sigma_0 - p_f) \quad (7)$$

$$\sigma_r|_{r=R_p} - p_f = (1 - \lambda_e)(\sigma_0 - p_f) \quad (8)$$

trong đó:

- λ là một tham số cho biết tỉ lệ giữa ứng suất hướng tâm σ_r tại thành giếng khoan và ứng suất hiện trường σ_0 ;

- λ_e là một trường hợp của λ mà ở đó ứng suất hướng tâm σ_r lớn đến mức bắt đầu gây ra biến dạng dẻo, λ_e là hằng số phụ thuộc vào bản chất của đất đá và ứng suất hiện trường, được tính bằng công thức (16).

2. Xác định trạng thái ứng suất và biến dạng trong lớp đất đá xung quanh vành xuyên đá xi măng

Dựa vào các phương trình của tiêu chuẩn dẻo, luật chảy dẻo, phương trình cân bằng, phương trình tương thích biến dạng và các điều kiện giới hạn, trạng thái ứng suất và biến dạng lớp đất đá xung quanh vành xuyên đá xi măng được xác định cho 3 trường hợp:

Trường hợp 1: Khi $\lambda < \lambda_e$, lớp đất đá ứng xử theo luật đàn hồi và tuân theo các phương trình sau:

$$\sigma_r - p_f = (\sigma^0 - p_f) \left(1 - \lambda \frac{R^2}{r^2}\right) \quad (9)$$

$$\sigma_\theta - p_f = (\sigma^0 - p_f) \left(1 + \lambda \frac{R^2}{r^2}\right) \quad (10)$$

$$u_r = \frac{1}{2G} \lambda (\sigma^0 - p_f) \frac{R^2}{r} \quad (11)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{1}{2G} \lambda (\sigma^0 - p_f) \frac{R^2}{r^2} \quad (12)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{2G} \lambda (\sigma^0 - p_f) \frac{R^2}{r^2} \quad (13)$$

Trường hợp 2: Khi $\lambda = \lambda_e$, tiêu chuẩn phá hủy đạt được ở thành giếng khoan và trường ứng suất biến dạng sẽ có dạng:

$$\sigma_r|_{r=R} = (\sigma_0 - p_f)(1 - \lambda_e) + p_f \quad (14)$$

$$\sigma_\theta|_{r=R} = (\sigma_0 - p_f)(1 + \lambda_e) + p_f \quad (15)$$

$$\lambda_e = \frac{1}{k_p + 1} \left(k_p - 1 + \frac{\sigma_c}{\sigma_0 - p_f} \right) \quad (16)$$

$$u_{re} = \frac{1}{2G} \lambda_e (\sigma_0 - p_f) \frac{R^2}{r} \quad (17)$$

Trường hợp 3: Khi $\lambda > \lambda_e$, lớp đất đá ứng xử theo luật đàn dẻo và một lớp đất đá bị phá hủy với chiều dày d . Như vậy bán kính ngoài của lớp đất đá phá hủy sẽ là:

$$R_p = R + d \quad (18)$$

- Với $r > R_p$, lớp đất đá nằm trong miền đàn hồi, trạng thái ứng suất và biến dạng được tính theo các công thức (9) - (13).

- Trong vùng biến dạng dẻo, trạng thái ứng suất được viết như sau:

$$\sigma_r|_{r \leq R_d} - p_f = \frac{\sigma_c}{k_p - 1} \left[\left(\frac{r}{R} \right)^{k_p - 1} - 1 \right] + \quad (19)$$

$$+ (1 - \lambda)(\sigma_0 - p_f) \left(\frac{r}{R} \right)^{k_p - 1}$$

$$\sigma_\theta|_{r \leq R_d} - p_f = \frac{\sigma_c}{k_p - 1} \left[k_p \left(\frac{r}{R} \right)^{k_p - 1} - 1 \right] + \quad (20)$$

$$+ k_p (1 - \lambda)(\sigma_0 - p_f) \left(\frac{r}{R} \right)^{k_p - 1}$$

$$R_p = R \left[\frac{2 (k_p - 1)(\sigma_0 - p_f) + \sigma_c}{k_p + 1 (1 - \lambda)(k_p - 1)(\sigma_0 - p_f) + \sigma_c} \right]^{\frac{1}{k_p - 1}} \quad (21)$$

$$u_r = \frac{\lambda_e (\sigma^0 - p_f)}{2(\beta + 1)G} \left[2 \left(\frac{R_p}{r} \right)^{\beta + 1} + \beta - 1 \right] \quad (22)$$

3. Phân tích ổn định của đá xi măng và lớp đất đá xung quanh bằng hệ đường cong ứng xử SRC (System response curves) tại bề mặt xi măng/đất đá

Chuyển vị hướng tâm tại bề mặt ngoài của vành xuyên đá xi măng dưới tác dụng của sự thay đổi áp suất nước lỗ rỗng, áp suất tác dụng lên thành bên trong và thành bên ngoài của vành xuyên đá xi măng được đưa ra bởi Bois và đồng nghiệp (2011) như sau:

$$\Delta u_r|_{r=R} = \frac{1-2\nu_x}{2G_x} \cdot \frac{R^2 \Delta \sigma_r|_{r=R} - R_i^2 \Delta p_i}{R^2 - R_i^2} R + \frac{1}{2G_x} \cdot \frac{R R_i^2 (\Delta \sigma_r|_{r=R} - \Delta p_i)}{R^2 - R_i^2} - \frac{1-2\nu_x}{2G_x} b_x R \Delta p_p \quad (23)$$

trong đó :

- G_x và ν_x là mô đun chịu cắt và hệ số nở hông của đá xi măng;
- R_i là bán kính trong của vành xuyên đá xi măng;
- $\sigma_r|_{r=R}$ là ứng suất mà thành đá xi măng tác dụng lên lớp đất đá phía ngoài;
- p_i là áp suất chịu bởi thành trong của vành xuyên đá xi măng;
- b_x là hệ số Biot của đá xi măng;
- p_p là áp suất nước lỗ rỗng trong đá xi măng.

Công thức của ứng suất tại bề mặt tiếp xúc đá xi măng-đất đá được đưa ra như sau:

$$\Delta \sigma_r|_{r=R} = \frac{2G_x (R^2 - R_i^2)}{(1-2\nu_x)R^2 + R_i^2} \frac{\Delta u_r|_{r=R}}{R} + \frac{2\nu_x R_i^2 \Delta p_i + (R^2 - R_i^2)(1-2\nu_x) b_x \Delta p_p}{(1-2\nu_x)R^2 + R_i^2} \quad (24)$$

Đường cong ứng suất hướng tâm-chuyển vị của vành đá xi măng được xác định bằng công thức (24). Đường cong này được so sánh với đường cong tương ứng của lớp đất đá xung quanh như giới thiệu trong phần trên.

Một ví dụ được đưa ra trong *Bảng 1*, *Bảng 2* và *Hình 1*. Quan sát trên *Hình 1* chúng ta thấy hai đường cong gặp nhau tại điểm ổn định, nằm trong vùng có biến dạng dẻo ($u_r > u_{re}$). Nghĩa là trong trường hợp này, một lớp biến dạng dẻo đã xuất hiện ở trong lớp đất đá xung quanh vành

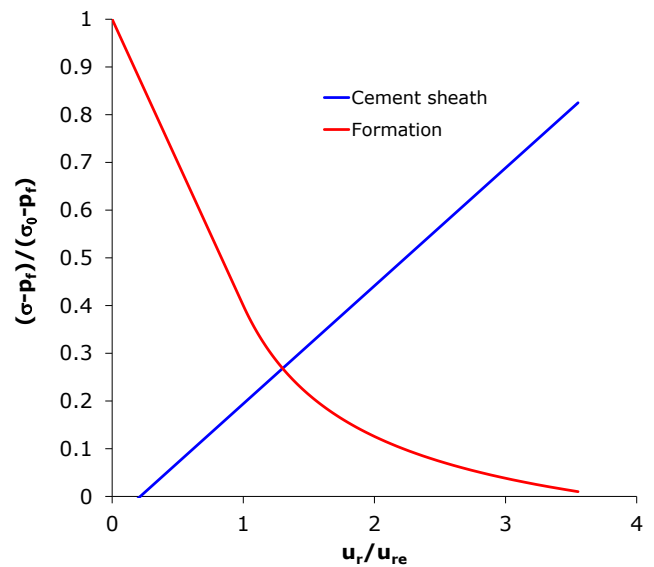
xuyên đá xi măng. Để cho lớp biến dạng dẻo này không xuất hiện, các tính chất cơ học của đá xi măng phải nằm trong vùng đàn hồi của đá xi măng và đất đá (*Hình 2*). Giới hạn trên của vùng đàn hồi này ứng với độ bền chịu nén của đá xi măng. Đường cong ứng xử của đá xi măng không được đi qua đường giới hạn này.

Bảng 1. Tính chất cơ học của lớp đất đá xung quanh vành xuyên đá xi măng

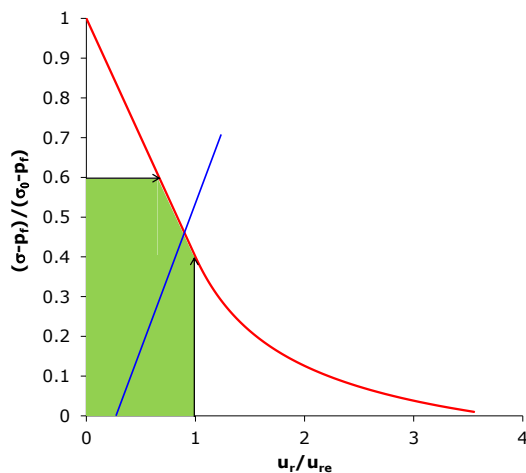
Tham số	Giá trị	Đơn vị
p_f	10	MPa
k_p	3	-
R	4	in
σ_0	35	MPa
β	2	-
G	2000	MPa
σ_c	10	MPa

Bảng 2. Tính chất cơ học của vành xuyên đá xi măng

Tham số	Giá trị	Đơn vị
R_i	3	in
ν_x	0	Vành đá xi măng
G_x	20	Đất đá xung quanh Pa
E_x	6000	MPa
Δp_p	0	MPa
Δp_i	-5	MPa
b_x	0.6	-



Hình 1. Phân tích ổn định của vành đá xi măng và lớp đất đá xung quanh bằng phương pháp hệ đường cong ứng xử



Hình 2. Vùng đàn hồi của đá xi măng và đất đá

4. Kết luận

Phương pháp hệ đường cong ứng xử được áp dụng để nghiên cứu phân tích sự ổn định của vành xuyên đá xi măng và lớp đất đá xung quanh, giúp cho chúng ta tìm thấy được vùng đàn hồi, vùng dẻo của lớp đất đá. Qua đó, xác định được loại xi măng có tính chất cơ học thích hợp giữ ổn định thành giếng dầu trong quá trình xây dựng, thực hiện các thí nghiệm hiện trường cũng như trong quá trình khai thác và đóng giếng. Đặc biệt, đối với các giếng có đường kính nhỏ, thời gian trám cũng như các bước xây dựng, khai thác sẽ được tính toán chính xác, giảm thiểu một cách tối đa những sự cố gặp phải trong quá trình sử dụng giếng.

ABSTRACT

How to choose the pertinent mechanical properties of well cement

Vu Manh Huyen, Vietnam CurisTec

Nguyen Van Khuong, Petro Vietnam

Trieu Hung Truong, Hanoi University of Mining and Geology

When the mechanical properties of oilwell cement are evaluated, one can analyze the cement-sheath integrity and choose the best cement depending on the pressure and temperature conditions.

The analytical method is used because of its simplification and easy to use. The present model is linked to the development of a plastic zone around a tunnel realized by Panet (1976). Cement is considered as an elastic material whereas the geological formation behaves like an elasto-plastic material. After the elastic limit, a plastic zone of the formation is formed around the cement-sheath with a radius R_p . This radius is needed to evaluate because the plastic zone favors gas migration.

In the SRC, the stress vs. displacement curves of the formation and cement sheath at a given moment are plotted. The intersection of two curves defines the stable state of interface cement sheath-formation. If this stable point is in the plastic zone of the formation, a plastic zone is formed and gas migration occurs. The model allows evaluating the pertinent mechanical properties of cement at a given period to avoid damage cement sheath and the formation.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Avrami M., 1939. Kinetics of phase change I, J. Chem. Phys., 1103-1112.
- [2]. Bois A.-P., Garnier A., Galdiolo G., Laudet J-B., 2010. Use of a mechanistic model to forecast cement-sheath intergrity for CO2 storage, SPE 139668.
- [3]. Cahn J.W., 1956. The kinetics of grain boundary nucleated reactions, Acta Metall 4, 449-459.
- [4]. Christian J.W., 1975. The Theory of Transformations in Metals and Alloys, Part 1, 2nd edition Pergamon Press, Oxford.
- [5]. Kondo R., Kodama M., 1967. On the hydration kinetics of cement, Semento Gijutsu, Nenpo 21, 77-828 (in Japanese).
- [6]. Scherer G.W., Funkhouser G.P., Peethamparan S., 2010. Effect of pressure on early hydration of H and white cement, Cement and Concrete Research 40, 845-850.
- [7]. Thomas J.J., 2007. A new approach to modeling the nucleation and growth kinetics of Tricalcium Silicate hydration, J. Am. Ceram. Soc 90 (10) 3282- 3288.
- [8]. Vu M.H, 2012. Effet des contraintes et de la température sur l'intégrité des ciments des puits pétroliers, thesis of TOTAL/ Université Paris Est/ ENPC.

DANH MỤC CÁC KÍ HIỆU

TT	Kí hiệu	Tên gọi
1.	R	Bán kính giếng khoan
2.	σ_0	Ứng suất hiện trường đẳng hướng
3.	σ_r	Ứng suất hướng tâm
4.	σ_θ	Ứng suất tiếp tuyến
5.	p_f	Áp suất nước lỗ rỗng trong đất đá
6.	σ_c	Độ bền chịu kéo của đất đá
7.	φ	Góc ma sát
8.	ε_r^p	Biến dạng dẻo hướng tâm
9.	ε_θ^p	Biến dạng dẻo tiếp tuyến
10.	β	Hệ số giãn nở của đất đá
11.	ψ	Góc giãn nở của đất đá
12.	ε_r	Biến dạng hướng tâm
13.	ε_θ	Biến dạng tiếp tuyến
14.	λ	Tỉ lệ giữa ứng suất hướng tâm σ_r tại thành của hố khoan và ứng suất hiện trường σ_0
15.	λ_e	Hằng số phụ thuộc vào bản chất của đất đá và ứng suất hiện trường
16.	u_r	Chuyển vị hướng tâm
17.	u_{re}	Chuyển vị hướng tâm khi tiêu chuẩn dẻo đạt được ở thành hố khoan
18.	d	Chiều dày lớp đất đá bị phá hủy
19.	R_p	Bán kính lớp đất đá bị phá hủy
20.	G_x	Mô đun chịu cắt của đá xi măng
21.	ν_x	Hệ số nở hông của đá xi măng
22.	R_i	Bán kính trong của vành xuyên đá xi măng
23.	p_i	Áp suất chịu bởi thành trong của vành xuyên đá xi măng
24.	b_x	Hệ số Biot của đá xi măng
25.	p_p	Áp suất nước lỗ rỗng trong đá xi măng