

НАПРЕГНАТО СЪСТОЯНИЕ НА НАПЛАСТЕН СКАЛЕН МАСИВ В ОКОЛНОСТТА НА ВЕРТИКАЛНА КРЪГОВА ШАХТА

Виолета Трифонова-Генова

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ: Разглежда се вертикална кръгова шахта прокарана в масив, състоящ се от краен брой хоризонтални пласта. Всеки от тях е изотропен или трансверзално-изотропен с равнина на изотропия успоредна на равнината на напластяването. При нелинейно изменение на вертикалния натиск е определено напрегнатото състояние в отделните пластовете при незакрепена и закрепена с абсолютно твърд крепеж шахта.

STRESS CONDITION OF LAIRED ROCK MASSIF AROUND A VERTICAL CIRCULAR SHAFT

Violeta Trifonova – Genova

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700, Sofia

ABSTRACT: A vertical circular shaft which is sunk in the massif consisting of terminal number of horizontal layers is considered. Each of them is isotropic or transversal-isotropic with isotropic plane parallel to the plane of stratification. By assuming nonlinear changes in the vertical pressure the stress conditions in the different layers in two cases (unsupported shaft and fixed with absolute fixing hard shaft) are defined.

Напрегнатото състояние на скалния масив в околността на подземна изработка в най-общия случай е пространствен проблем, който е доста труден за решаване. Поради това се разглежда равнинната задача като се прави сечение нормално на оста на изработката с дължина единица.

Равнинната задача на теория на еластичността за едносвързана област е удобно да се реши чрез методите на теория на функцията на комплексна променлива с използване на комплексния потенциал на напреженията на Колосов-Мусхелишвили и конформното изображение [Айталиев.Ш.М., 2004]. При тези методи скалния масив е представен като еластична среда. Влиянието на наклона на равнината на напластяване на скалния масив върху напрегнатото състояние на вертикална шахта е аналитично изследван в [Д. Гузъ, 2007]. При това изследване се предполага, че вертикалния натиск е линейна функция на дълбочината.

За изследване на напрегнатото състояние на вертикални изработки е необходимо да се знае напрегнатото състояние на скалния масив до прокаране на изработката. Масива се моделира като еластична среда с равнина на изотропия перпендикулярна на оста на изработката. Началното напрегнато състояние, което се предизвиква от собственото тегло и силите на вътрешното триене [Минчев Ив., 2006, Трифонова – Генова В., 1991] се характеризира с напреженията в цилиндрични координати /1/

$$\begin{aligned}\sigma_r^0 &= \lambda \sigma_{33}^0 & \sigma_\theta^0 &= \lambda \sigma_{33}^0 \\ \sigma_{r\theta}^0 &= \sigma_{r3}^0 = \sigma_{\theta 3}^0 = 0 \\ \sigma_{33}^0 &= \frac{\gamma}{k_0} (1 - e^{-k_0 x_3})\end{aligned} \quad /1/$$

където $k_0 = \lambda f_0$

f_0 - коефициент на вътрешното триене

λ - коефициент на страничен натиск

γ - обемно тегло

x_3 - дълбочина

Ако скалния масив се приеме за трансверзално-изотропна среда то

$$\lambda = \frac{-a_{13}}{a_{11} + a_{12}} \quad /2/$$

$$a_{11} = \frac{1}{E_1} \quad a_{12} = -\frac{1}{E_1} \quad a_{13} = -\frac{\nu_2}{E_2}$$

а ако масива е изотропна среда то

$$\nu_1 = \nu_2 = \nu, \quad E_1 = E_2 = E, \quad \lambda = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad /3/$$

Тук ν_1 е коефициентът на Поасон в равнината на изотропия

ν_2 е коефициентът на Поасон по направление перпендикулярно на равнината на изотропия

ν е коефициентът на Поасон в изотропна среда
 E_1 е модул на линейната деформация в равнината на изотропия
 E_2 е модул на линейната деформация по направление перпендикулярно на равнината на изотропия
 E е модул на линейната деформация в изотропна среда .

Напрегнатото състояние около изработка предполагайки, че тя е незакрепена е разлика между основното обусловено от напреженията в ненарушения масив и допълнителното възникващо след прокарване на отвора. Да отделим харизонтален слой от масива с малка дебелина на дълбочина x_3 . Този слой е натоварен с напреженията на безкрайността които се определят от /1/. При решаването на задачата за разпределението на напреженията в еластична равнина с кръгов отвор се използва метода на конформното изобразяване [Айтиалиев.Ш.М, 2004] Компонентите на тензора на напреженията в точка от околността на вертикална шахта имат вида [Минчев Ив., 2006]:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\gamma}{2f_0} \left(1 - e^{2f_0 \frac{a_{13}}{a_{11}+a_{12}} x_3} \right) \left(1 - \frac{R_0^2}{r^2} \right) \\ \sigma_\theta &= \frac{\gamma}{2f_0} \left(1 - e^{2f_0 \frac{a_{13}}{a_{11}+a_{12}} x_3} \right) \left(1 + \frac{R_0^2}{r^2} \right) \\ \sigma_{33} &= -\frac{\gamma}{2f_0} \frac{a_{11} + a_{12}}{a_{13}} \left(1 - e^{2f_0 \frac{a_{13}}{a_{11}+a_{12}} x_3} \right)\end{aligned} \quad /4/$$

където R_0 е радиуса на шахтата.

На контура на незакрепена шахта при $r = R_0$ компонентите на напреженията са :

$$\begin{aligned}\sigma_\theta &= \frac{\gamma}{f_0} \left(1 - e^{2f_0 \frac{a_{13}}{a_{11}+a_{12}} x_3} \right) \\ \sigma_{33} &= -\frac{\gamma}{2f_0} \frac{a_{11} + a_{12}}{a_{13}} \left(1 - e^{2f_0 \frac{a_{13}}{a_{11}+a_{12}} x_3} \right) \\ \sigma_r &= 0 \quad \sigma_{r3} = 0\end{aligned} \quad /5/$$

Ако крепежа е абсолютно твърд то контактните напрежения в скалния масив са :

$$\sigma_r = -\frac{\gamma}{f_0} \left(1 - e^{2f_0 \frac{a_{13}}{a_{11}+a_{12}} x_3} \right)$$

$$\begin{aligned}\sigma_\theta &= -\frac{\gamma}{2f_0} \left(1 - e^{2f_0 \frac{a_{13}}{a_{11}+a_{12}} x_3} \right) \\ \sigma_{33} &= -\frac{\gamma}{2f_0} \frac{a_{11} + a_{12}}{a_{13}} \left(1 - e^{2f_0 \frac{a_{13}}{a_{11}+a_{12}} x_3} \right)\end{aligned} \quad /6/$$

Това са екстремните стойности на скалния натиск върху монолитния крепеж на вертикална шахта.

Разглеждаме вертикална шахта прокарана в масив състоящ се от n успоредни пласта, всеки от които е трансверзално изотропен. Напреженията за всеки пласт се определят от условията за равновесие на усилията изразени чрез компонентите на обобщените напрежения

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n \sigma_r^{(i)} t_i &= \sigma_r \sum_{i=1}^n t_i \\ \sum_{i=1}^n \sigma_\theta^{(i)} t_i &= \sigma_\theta \sum_{i=1}^n t_i \quad \sigma_z^{(i)} = \sigma_z\end{aligned} \quad /7/$$

Съществуващото плъзгане между отделните пластове е малко. Тогава на контакта относителните деформации са

$$\begin{aligned}a_{11}^{(i+1)} \sigma_r^{(i+1)} - a_{11}^i \sigma_r^i + a_{12}^{(i+1)} \sigma_\theta^{(i+1)} - a_{12}^i \sigma_\theta^i &= \\ = (a_{13}^{(i)} - a_{13}^{(i+1)}) \sigma_z \\ a_{12}^{(i+1)} \sigma_r^{(i+1)} - a_{12}^i \sigma_r^i + a_{11}^{(i+1)} \sigma_\theta^{(i+1)} - a_{11}^i \sigma_\theta^i &= \\ = (a_{13}^{(i)} - a_{13}^{(i+1)}) \sigma_z \\ a_{11}^{(i)} = \frac{1}{E_1^{(i)}} \quad a_{12}^i = -\frac{\nu_1^{(i)}}{E_1^{(i)}} \quad a_{13}^{(i)} = -\frac{\nu_2^{(i)}}{E_2^{(i)}}\end{aligned} \quad /8/$$

Уравнения /7/ и /8/ образуват система от $2n$ уравнения с $2n$ неизвестни и това са напреженията в отделните пластове. Решението на системата е

$$\sigma_\theta^{(i)} = \frac{D_2^{(i)}}{D} \quad \sigma_\theta^{(i)} = \frac{D_2^{(i)}}{D} \quad \sigma_z^{(i)} = \sigma_z \quad /9/$$

Тук $D_1^{(i)}$ и $D_2^{(i)}$ са числителните детерминанти, а D е знаменателната детерминанта на системата от уравнения /7/ и /8/.

При неголеми тангенциални напрежения по външния контур на крепежа нормалните напрежения са пропорционални на радиалните [Айтиалиев.Ш.М, 2004]. Тогава уравнения /7/ и /8/ образуват система от n уравнения с неизвестни радиалните напрежения за всеки пласт.

Ако предположим че шахтата пресича само два пласта, то радиалните и нормални напрежения за всеки пласт са:

$$\sigma_r^{(1)} = \frac{a_2(t_1 + t_2)\sigma_r}{a_2t_1 + a_1t_2}$$

$$\sigma_\theta^{(1)} = \frac{a_2(t_1 + t_2)\sigma_\theta}{a_2t_1 + a_1t_2}$$

$$\sigma_r^{(2)} = \frac{a_1(t_1 + t_2)\sigma_r}{a_2t_1 + a_1t_2}$$

$$\sigma_\theta^{(2)} = \frac{a_1(t_1 + t_2)\sigma_\theta}{a_2t_1 + a_1t_2}$$

$$a_i = a_{11}^{(i)} - a_{12}^{(i)} \quad i = 1, 2 \quad /10/$$

В случаите, когато шахтата пресича само три пласта, то напреженията в отделните пластове са :

$$\sigma_r^{(1)} = \frac{a_2a_3(t_1 + t_2 + t_3)\sigma_r}{a_2a_3t_1 + a_3a_1t_2 + a_1a_2t_3}$$

$$\sigma_\theta^{(1)} = \frac{a_2a_3(t_1 + t_2 + t_3)\sigma_\theta}{a_2a_3t_1 + a_3a_1t_2 + a_1a_2t_3}$$

$$\sigma_r^{(2)} = \frac{a_1a_3(t_1 + t_2 + t_3)\sigma_r}{a_2a_3t_1 + a_3a_1t_2 + a_1a_2t_3}$$

$$\sigma_\theta^{(2)} = \frac{a_1a_3(t_1 + t_2 + t_3)\sigma_\theta}{a_2a_3t_1 + a_3a_1t_2 + a_1a_2t_3}$$

$$\sigma_r^{(3)} = \frac{a_1a_2(t_1 + t_2 + t_3)\sigma_r}{a_2a_3t_1 + a_3a_1t_2 + a_1a_2t_3}$$

$$\sigma_\theta^{(3)} = \frac{a_1a_2(t_1 + t_2 + t_3)\sigma_\theta}{a_2a_3t_1 + a_3a_1t_2 + a_1a_2t_3}$$

$$a_i = a_{11}^{(i)} - a_{12}^{(i)} \quad i = 1, 2, 3 \quad /11/$$

Обобщените напрежения във формули /10/ и /11/ се определят от /6/. Тук обобщеното обемно тегло и обобщения коефициент на вътрешно триене се получава от

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad f_0 = \frac{\sum_{i=1}^n f_{0,i} t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad /12/$$

Обобщените технически константи за напластения масив, които участват в /6/ се изразяват чрез

техническите константи за отделните пластове и тяхната дебелина [3].

Ако пренебрегнем влиянието на компонентите на нормалното напрежение върху радиалните напрежения, ще се получат изразите дадени в [Минчев Ив., 2006, Трифонова – Генова В, 1991].

От изразите за напреженията в отделните пластове /10 / и /11/ се вижда, че те се разпределят пропорционално на якостните им свойства. Напреженията се концентрират в пластове с по-големи якости.

Пример 1

Дадени са физико-механичните характеристики за два изотропни пласта, т.е.модулите на линейната деформация $E^{(1)} = 0,148 \cdot 10^3 \text{ MPa}$

и $E^{(2)} = 0,595 \cdot 10^3 \text{ MPa}$; коефициентите на Поасон

$\nu^{(1)} = 0,15$ и $\nu^{(2)} = 0,237$; коефициентите на

вътрешно триене $f_1 = 20^0$ и $f_2 = 28^0$; обемните

тегла $\gamma_1 = 0,28 \cdot 10^{-2} \text{ MN} / \text{m}^2$

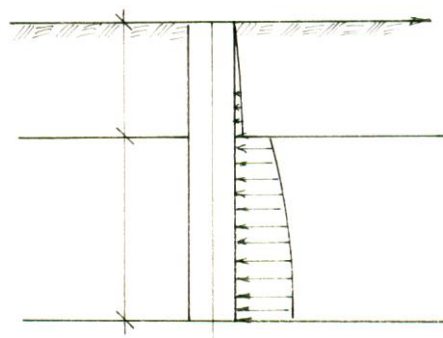
и $\gamma_2 = 0,25 \cdot 10^{-2} \text{ MN} / \text{m}^2$; и дебелините

$t_1 = 3\text{m}$ и $t_2 = 5\text{m}$.

Изчислени са обобщените напрежения съгласно / 6 / и са заместени в / 10 /. Радиалните напрежения $\sigma_r^{(1)}$ и $\sigma_r^{(2)}$ за двата пласта са дадени в таблица 1.

Таблица 1

1	2	3
X_3	$\sigma_r^{(1)}$	$\sigma_r^{(2)}$
М	MPa	MPa
1	0,895	0
2	0,159	0
3	0,2169	0,811
4	0	0,9761
5	0	1,1167
6	0	1,221
7	0	1,31
8	0	1,3765



С увеличаване на дълбочината X_3 тези напрежения намаляват по експоненциален закон /фиг.1/. Диаграмата на фиг.1 е прекъсната линия със скокове в местата

където се изменят физикомеханичните свойства на масива.

Пример 2

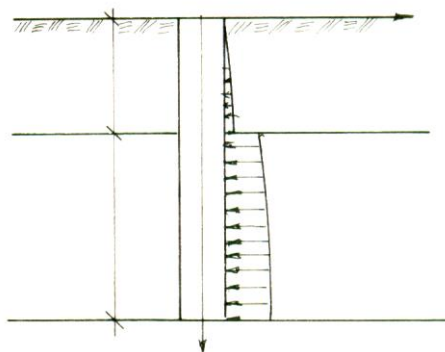
Дадени са физико-механичните характеристики за два трансверзално - изотропни пласта, т.е. модулите на линейната деформация в равнината на изотропия $E_1^{(1)} = 0,152 \cdot 10^3 \text{ MPa}$ и $E_1^{(2)} = 0,73 \cdot 10^3 \text{ MPa}$ и перпендикулярно на нея $E_2^{(1)} = 0,096 \cdot 10^3 \text{ MPa}$ и $E_2^{(2)} = 0,58 \cdot 10^3 \text{ MPa}$; коефициентите на Поасон в равнината на изотропия $\nu_1^{(1)} = 0,21$ и $\nu_1^{(2)} = 0,015$ и перпендикулярно на нея $\nu_2^{(1)} = 0,28$ и $\nu_2^{(2)} = 0,251$; коефициентите на вътрешно триене $f_{01} = 20^\circ$ и $f_{02} = 28^\circ$; обемните тегла $\gamma_1 = 0,28 \cdot 10^{-2} \text{ MN / m}^3$ и $\gamma_2 = 0,25 \cdot 10^{-2} \text{ MN / m}^3$; дебелините $t_1 = 3 \text{ m}$ и $t_2 = 5 \text{ m}$.

Тези стойности замества в / 6 / и получаваме обобщените напрежения. Разпределението на радиалните напрежения за двата пласта се определят съгласно / 10 / и е дадено в таблица 2.

Таблица 2

1	2	3
X_3	$\sigma_r^{(1)}$	$\sigma_r^{(2)}$
М	MPa	MPa
1	0,242	0
2	0,4711	0
3	0,6447	0,9336
4	0	1,1331
5	0	1,2967
6	0	1,4323
7	0	1,5361
8	0	1,6219

Препоръчана за публикуване от Катедра "Техническа механика", МТФ



С увеличаване на дълбочината X_3 тези напрежения намаляват по експоненциален закон /фиг.2/. Диаграмата на радиалните напрежения е скокообразна със скокове в точките на контакта между пластове. Колкото по-голяма е разликата между техническите константи на еластичността за материала на отделните пластове, толкова по-големи са скоковете в диаграмата на напреженията

За разлика от съществуващите решения, диаграмата на напреженията е нелинейна експоненциална функция в границите на един пласт. Тази функция намалява с увеличаване на дълбочината X_3 в земния масив, което се потвърждава от практиката.

ЛИТЕРАТУРА

- Айтиалиев.Ш.М. Развитие механики подземных и специальных сооружений в Казахстане за последние 40-лет, Прикладная механика том 40 кн. 10, 2004.
- Д. Гузъ, Я.Я. Рушицкий, 0 монографическом наследии Г.С.Савина, Прикладная механика, том 43 кн. 1, 2007.
- Минчев Ив., Трифонова В., Определяне на напреженията и деформациите в напластен скален масив в околността на вертикална кръгова шахта при нелинейно изменение на вертикалния натиск, Годишник на МГУ, 1981, том 28, св.III.
- Минчев Ив., Основи на геоядрената термодинамика, С., 2006
- Трифенова – Генова В., Изчисляване на многослоен крепеж на вертикална шахта в напластен масив чрез МКЕ, Годишник на МГУ, 1991, том 37, св.II.