

Н.С. БУЛЫЧЕВ

И.И. САВИН

Тульский политехнический институт, Тула, СССР

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА МНОГОСЛОЙНОЙ КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

**Резюме.** Изложен экспериментально-аналитический метод расчета многослойной крепи выработок круглого сечения на основе обратного анализа по результатам натуральных измерений. Результатом расчета является не только полная картина напряженного состояния крепи, но и расчетные характеристики начального поля напряжений; соотношение между главными начальными напряжениями в массиве, направление главных начальных напряжений, величина множителя  $\alpha^*$ , учитывающего отставание возведения крепи от обнажения пород.

Указанные характеристики не зависят от конструкции крепи, на которой производились измерения, что позволяет использовать результаты натуральных измерений для расчета других конструкций крепи в аналогичных условиях.

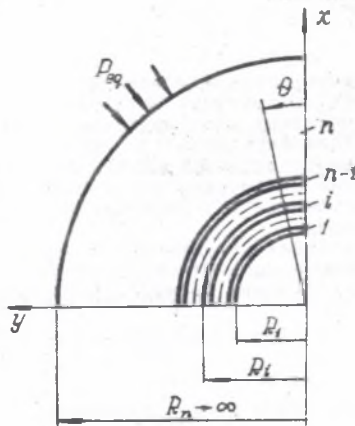
Одной из важных задач, связанных с подземным строительством, является проектирование и расчет крепи капитальных горных выработок по результатам натуральных измерений напряжений, деформаций или перемещений (конвергенции), в крепи выработок, пройденных в аналогичных горно-геологических условиях или же в крепи экспериментальной выработки, пройденной специально в рассматриваемых условиях с целью распространения результатов измерений на весь комплекс строящихся выработок.

Сложность разработки экспериментально-аналитических методов расчета заключается в том, что одной из составных частей таких методов является натуральный эксперимент, который требует дополнительных затрат труда. Кроме того, натурные измерения зачастую бывают разрозненными и разнородными по составу, получаемая информация, как правило, осложнена влиянием случайных помех в виде дефектов массива, крепи, отклонений от проектной геометрии и др.

В основу изложенного ниже метода расчета многослойной крепи положен принцип взаимодействия крепи с окружающим массивом пород, согласно которому крепь и массив являются элементами единой деформируемой системы "крепь-массив".

Учитывая малость совместных деформаций крепи и массива после возведения крепи и ввода ее в контакт с породными стенками массива моделируется линейно деформируемой средой.

Идея экспериментально-аналитического метода расчета крепи заключается в том, что в результате расчета крепи с использованием данных натурных наблюдений получается не только полная картина напряженно-деформированного состояния крепи, но и определяются исходные данные (расчетные характеристики начального поля напряжений в массиве), не зависящие от конструкции крепи, на которой производились измерения, и могущие быть использованы при расчете крепи другой конструкции в аналогичных условиях [3, 4, 5].



Фиг. 1

В основу экспериментально-аналитического метода расчета многослойной крепи выработок круглого сечения положена математическая модель многослойного кругового кольца [1] (фиг. 1), внешний бесконечный слой которого, моделирующий массив пород, нагружен (на бесконечности) напряжениями  $P_{eq}$ , эквивалентными действию начальных напряжений в массиве (гравитационных или тектонических)

$$P_{eq} = P_{1eq} + P_{2eq} \cos 2\theta, \quad (1)$$

где

$$P_{1eq} = \sigma_1^{(0)} \frac{1+\xi}{2} \frac{2}{2c_0+1};$$

$$P_{2eq} = \sigma_2^{(0)} \frac{1-\xi}{2} \frac{2c_0}{2c_0+1};$$

$$\xi = \frac{\sigma_2^{(0)}}{\sigma_1^{(0)}};$$

$\sigma_1^{(0)}$ ,  $\sigma_2^{(0)}$  - главные начальные напряжения в массиве;  
 $\alpha_0$  - коэффициент вида напряженного состояния

$$\alpha_0 = 3 - 4 \nu_0 ;$$

$\nu_0$  - коэффициент Пуассона пород в массиве.

Исходными предпосылками расчета являются следующие: 1) крепь рассматривается как многослойное кольцо, подкрепляющее вырез в линейно деформируемой среде, имеющей начальные напряжения  $\sigma_1^{(0)}$  и  $\sigma_2^{(0)}$  ( $\sigma_1^{(0)} > \sigma_2^{(0)}$ ); 2) крепь и массив работают в условиях полного контакта; 3) отставание крепи от забоя выработки, возможное неупругое деформирование пород до возведения крепи учитывается введением корректирующего множителя  $\alpha^*$ , подлежащего определению из натуральных измерений.

В процессе расчета необходимо воспроизвести аналог начального поля напряжений в массиве пород до проведения в нем выработки, характеристиками которого являются отношение главных начальных напряжений  $\xi$ , корректирующий множитель  $\alpha^*$  и угол  $\tilde{\alpha}$ , характеризующий направление действия главных напряжений.

Расчетные характеристики начального поля напряжений в массиве определяются по формулам:

- для горизонтальных выработок в гравитационном поле начальных напряжений:

$$\xi = \lambda = \frac{P_{0eq} \alpha_0 - 2P_{2eq}}{P_{0eq} \alpha_0 + 2P_{2eq}} ; \quad (2)$$

$$\alpha^* = \frac{P_{0eq} (\alpha_0 + 1)}{\gamma H (1 + \lambda)} , \quad (3)$$

где  $\lambda$  - коэффициент бокового давления в массиве;

- для вертикальных выработок:

$$\alpha^* = \frac{P_{0eq} (\alpha_0 + 1)}{\lambda \gamma H (1 + \xi)} ; \quad (4)$$

- для вертикальных выработок в тектоническом поле начальных напряжений:

$$\sigma_1^{(0)} \alpha^* = \frac{P_{0eq} (\alpha_0 + 1)}{1 + \xi} . \quad (5)$$

Наиболее распространенным является измерение нагрузок на крепь (нормальных напряжений на контакте крепи с массивом). С одной стороны, эти напряжения согласно математической модели [1] имеют вид

$$P_{(n-1)} = P_{0(n-1)} + P_{2(n-1)} \cos 2\theta, \quad (6)$$

а с другой стороны, в результате измерений получено  $k$  значений нагрузок  $P_j^*$  в точках, характеризующихся углами  $\theta_j$  ( $j = 1, 2, \dots, k$ ).

Условие равенства расчетных и измеренных нагрузок представляет собой переопределенную систему уравнений относительно неизвестных величин  $\tilde{\alpha}$ ,  $P_{0eq}$  и  $P_{2eq}$ :

$$P_{0eq} k_{0(n)} + P_{2eq} k_{2(n)} \cos 2(\theta_j - \tilde{\alpha}) = P_j^* \quad (j = 1, 2, \dots, k), \quad (7)$$

где  $k_{0(n)}$ ,  $k_{2(n)}$  — коэффициенты передачи внешних нагрузок через слой, моделирующий массив пород (в соответствии с принятой математической моделью).

Полученная система уравнений решается методом наименьших квадратов. Затем, по формулам (2)...(5) определяются характеристики начального поля напряжений.

На фиг. 2 приведены результаты обработки данных натуральных измерений на обделку тоннеля метрополитена в условиях г. Ленинграда (1 — эпюра измеренных нагрузок, 2 — эпюра расчетных нагрузок). В результате расчета получены величины:  $\alpha^* = 0,09^\circ$ ;  $\lambda = 0,487$ ;  $\tilde{\alpha} = 9^\circ$ .

Если напряжения  $P_j^*$  измеряются на произвольном  $i$ -том контакте слоев многослойной крепи, то условие равенства расчетных и измеренных нагрузок имеет вид

$$P_{0eq} W_{0(i+1)} + P_{2eq} W_{2(i+1)} \cos 2(\theta_j - \tilde{\alpha}) = P_j^* \quad (j = 1, 2, \dots, k), \quad (8)$$

где величины  $W_{0(i+1)}$  и  $W_{2(i+1)}$  определяются через коэффициенты передачи нагрузок по формуле

$$\{W_i\} = \{W_{i+1}\} [K_i], \quad (9)$$

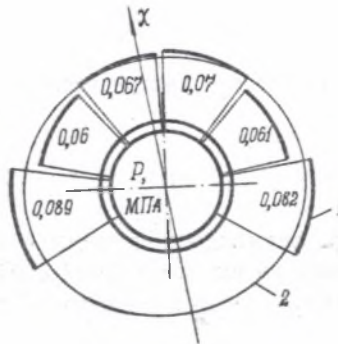


Рис. 2

где

$$\{W_j\} = \begin{Bmatrix} W_{0(i)} \\ W_{2(i)} \\ Z_{2(i)} \end{Bmatrix}; \quad [K_j] = \begin{bmatrix} J_{0,2(i)} & 0 & 0 \\ 0 & k_{11(i)} & k_{12(i)} \\ 0 & k_{21(i)} & k_{22(i)} \end{bmatrix};$$

$$W_{0(n)} = k_{0(n)}; \quad W_{2(n)} = k_{11(n)}; \quad Z_{2(n)} = k_{21(n)}.$$

Далее полученная система уравнений решается методом наименьших квадратов относительно  $P_{0eq}$ ,  $P_{2eq}$  и  $\tilde{\alpha}$  определяются характеристики начального поля напряжений по формулам (2)...(5).

Аналогичным образом производится обработка результатов натурных измерений нормальных тангенциальных напряжений (деформаций) и перемещений.

В том случае, если измерены нормальные тангенциальные напряжения  $\sigma_{\theta_j}^*$  на внутреннем контуре произвольного  $i$ -того слоя многослойной крепи, переопределенная система уравнений имеет вид

$$P_{0eq}(W_{0(i+1)} m_1 - W_{0(i)} m_2) - P_{2eq}(W_{2(i+1)} n_1 - Z_{2(i+1)} n_2 - W_{2(i)} n_3 + Z_{2(i)} n_4) \cos 2(\theta_j - \tilde{\alpha}) = \sigma_{\theta_j}^* \quad (j=1, 2, \dots, k), \quad (10)$$

где коэффициенты  $m_1, m_2, n_1, n_2, n_3, n_4$  определяются через геометрические и деформационные характеристики крепи [2].

На фиг. 3 приведены результаты обработки результатов измерений нормальных тангенциальных напряжений на внутреннем контуре бетонной крепи клетового ствола шахты "Центральная", пройденного в условиях тектонического поля напряжений Кимперсайского месторождения хромитовых руд Донского ГОКа (1 - эпюра измеренных напряжений, 2 - эпюра расчетных напряжений). В результате расчета получены величины:  $\alpha^* \sigma_i^{(0)} = 2,204$  МПа;  $\xi = 0,688$ ;  $\tilde{\alpha} = 84^\circ$ .

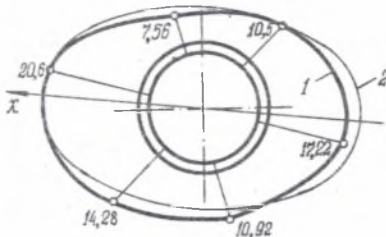


Рис. 3



Для случая измерения нормальных тангенциальных напряжений в кольцевой арматуре приведенная система принимает вид

$$\bar{\sigma}_{\theta_j}^* \frac{E_i^{(a)}}{2E_i} \left\{ P_{0eq} [W_{0(i+1)}(m_1 + m_1') - W_{0(i)}(m_2 + m_2')] - P_{2eq} [W_{2(i+1)}(n_1 - n_1') - \right. \\ \left. - \xi_{2(i+1)}(n_2 - n_2') - W_{2(i)}(n_3 - n_3') + \xi_{2(i)}(n_4 - n_4')] \cos 2(\theta_j - \bar{\alpha}) \right\} = \bar{\sigma}_{\theta_j}^* \quad (j=1, 2, \dots, k), \quad (II)$$

где  $E_i^{(a)}$  - модуль деформации материала арматуры;

$E_i$  - приведенный модуль деформации армированного слоя крепи;

$m_1', m_2', n_1', n_2', n_3', n_4'$  - коэффициенты, определяемые через геометрические и деформационные характеристики крепи.

При измерении относительных тангенциальных деформаций  $\epsilon_{\theta_j}^*$  переопределенная система уравнений имеет следующий вид

$$\frac{P_{0eq}}{2G_i} \{ W_{0(i+1)} m_1 (1 - \nu_i) - W_{0(i)} [m_2 (1 - \nu_i) + \nu_i] \} + \frac{P_{2eq}}{2G_i} \{ [W_{2(i+1)} n_1 - \\ - \xi_{2(i+1)} n_2 (1 - \nu_i) - W_{2(i)} [n_3 (1 - \nu_i) - \nu_i] + \xi_{2(i)} n_4 (1 - \nu_i)] \cos 2(\theta_j - \bar{\alpha}) \} = \\ = \epsilon_{\theta_j}^* \quad (j=1, 2, \dots, k), \quad (I2)$$

где  $G_i$  - модуль сдвига материала  $i$ -того слоя крепи;

$$G_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)};$$

$\nu_i$  - коэффициент Пуассона материала  $i$ -того слоя крепи.

Аналогично составляется система уравнений и по результатам измерения радиальных перемещений (конвергенции) точек внутреннего контура произвольного слоя крепи  $u_i^*$ :

$$P_{0eq} \frac{r_i}{4G_i(c_i^2 - 1)} (W_{0(i+1)} a_i - W_{0(i)} a_i') + P_{2eq} \frac{r_i}{12G_i D_i} [W_{2(i+1)} (a_{4(i)} + 3a_{4(i)}') - \\ - \xi_{2(i+1)} (a_{3(i)} + 3a_{3(i)}') - W_{2(i)} (a_{3(i)} + 3a_{3(i)}') + \xi_{2(i)} (a_{4(i)} + 3a_{4(i)}')] \cos 2(\theta_j - \bar{\alpha}) = \\ = u_i^* \quad (j=1, 2, \dots, k), \quad (I3)$$

где

$$c_i = \frac{r_i}{r_{i-1}};$$

$D_i, a_{4(i)}, \dots, a_{4(i)}'$  - определяются через геометрические и деформационные характеристики крепи.

Из решения приведенных выше систем уравнений определяются расчетные характеристики начального поля напряжений и направление главных начальных напряжений в массиве, не зависящие от конструкции крепи, на которой производились измерения. Это расширяет возможность предлагаемого метода расчета и позволяет использовать результаты натуральных измерений для расчета других конструкций крепи в выработках других размеров в аналогичных условиях.

В результате расчета по данным натуральных измерений каких-либо из рассмотренных выше величин получается полная картина напряженно-деформированного состояния крепи.

## ЛИТЕРАТУРА

## Л и т е р а т у р а

1. Бульчев Н.С. Механика подземных сооружений. - Москва, Недра, 1982. - 272 с.
2. Савин И.И. Экспериментально-аналитический метод расчета крепи по результатам измерений нормальных тангенциальных напряжений // Исслед. пробл. мех. подзем. сооруж.: Сб. науч. трудов. - Тула: ТулПИ, 1987. - С. 31-34.
3. Фотиева Н.Н., Бульчев Н.С. Косвенный способ определения напряжений в массиве пород на основе измерений давлений на крепь горных выработок. - Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1980, № 5, с. III-II6.
4. N.S. Bulychev & I.I.Savin. Technique of field measurement interpretation in erecting underground openings of round section // Proceedings of the 2-nd international symposium on field measurements in geomechanics. - Kobe, 1987. - P.1225-1230.
5. Fotieva N.N., Bulychev N.S. Indirect method of measuring initial stresses in solid rocks for construction of tunnels and mines. - Proc. of the Conference on Construction Practices and Instrumentation in Geotechnical Engineering. Surat /India/ 20-23 Dec. 1982, p.183-187

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Mirosław Chudek

METODA DOŚWIADCZALNO-ANALITYCZNA OBLICZANIA OBUDOWY  
WIELOWARSTWOWEJ WYROBISK GÓRNICZYCH O PRZEKROJU OKRĄGŁYM

S t r e s z c z e n i e

Представлено doświadczalno-analityczną metodę obliczania wielowarstwowej obudowy wyrobisk o okrągłym przekroju, opartą na odwrotnej analizie wyników pomiarów przeprowadzanych w warunkach naturalnych. Wynik obliczeń stanowi nie tylko pełny obraz stanu naprężenia obudowy, ale i charakterystyki obliczeniowe początkowego pola naprężeń; stosunek między głównymi początkowymi naprężeniami w górotworze, kierunek głównych początkowych naprężeń, wielkość współczynnika  $\alpha^*$ , uwzględniającego opóźnienia wznoszenia obudowy w stosunku do odsłonięcia skał.

Wskazane charakterystyki nie zależą od konstrukcji obudowy, na której przeprowadzono pomiary, co pozwala wykorzystać wyniki pomiarów przeprowadzanych w warunkach naturalnych dla obliczania innych konstrukcji obudów w analogicznych warunkach.

AN EXPERIMENTAL-ANALYTIC METHOD OF CALCULATING A MULTI-LAYER LINING FOR EXCAVATIONS WITH A CIRCULAR CROSS-SECTION

S u m m a r y

The paper deals with an experimental-analytic method of calculating multi-layer linings for excavations with a circular cross-section, basing on a reciprocal analysis of the results of measurements taken in natural conditions. The results of such calculations provide not only a full representation of the state of stresses in the lining, but also calculating characteristics of the initial stress field; the proportion existing between the major initial stresses in the rock mass, the direction of these stresses, the value of the coefficient which takes into account the time lag between the exposure of the rock and the setting up of the lining.

The indicated characteristics do not depend on the kind of lining on which measurements were taken, so that the obtained results of measurements taken in natural conditions may be utilised also in the construction of other kinds of lining in similar conditions.