

АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КРЕПЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Хасанов Н.М. – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Подземные сооружения, основания и фундаменты» Таджикского технического университета им. М.С.Осими. khasanov.murali@mail.ru.

Ятимов А.Ч. – старший преподаватель кафедры «Подземные сооружения, основания и фундаменты» Таджикского технического университета им. М.С.Осими

Якубов А.О. – ассистент кафедры «Промышленные гражданское строительство» Таджикского технического университета им. М.С.Осими

Аннотация

В данной статье изложены результаты инженерного решения которое показывает, что в скальных породах, при больших длинах волн с преобладающим периодом колебаний форма импульса не оказывает значительного влияние на напряжённое состояние крепи.

Изложены общие принципы расчета крепи выработок на сейсмические воздействия в виде кольца заданной толщины и конфигурации в условиях полного контакта с массивом горных пород моделируемым линейно-деформируемой средой.

Приводится расчёт крепи круглого сечения при сейсмическом воздействии методом многослойных конструкций радиуса внешнего слоя, стремящегося к бесконечности.

В качестве примера определены напряжения в монолитной бетонной крепи на одном из участков турбинного водовода 5-в агрегата Рогунской ГЭС

Ключевые слова: горные породы, крепь, горные выработки, землетрясения, круглого сечения, сейсмических волн, продольные и поперечные волны, скорость продольных волн.

ANALYSIS OF SEISMIC IMPACT ON THE THE LINING WORKINGS OF CIRCULAR CROSS SECTION

Hasanov N.M. - candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of "Underground structures, bases and foundations" of Tajik Technical University named after M.S.Osimi. khasanov.murali@mail.ru

Yatimov A. C. - Senior Lecturer of the Department of "Underground structures, bases and foundations" of Tajik Technical University named after M.S. Osimi.

Yakubov A.O. - assistant to the department "Underground structures, foundations and Foundations" of the Tajik Technical University. M.S. Osimi.

Abstract

This article describes the results of engineering decisions, which shows that the rocks, at the big lengths of waves with a predominant period of oscillations, pulse shape had a significant effect on the stress state of the lining.

General principles of calculating support of excavations for the seismic effects in the form of a ring of given thickness and configuration in full contact with the rock mass modeled linearly deformable medium.

The calculation of the lining of circular cross section with seismic effects method, multilayer structures of the radius of the outer layer tends to infinity.

As an example, defined by stresses in a monolithic concrete lining in one of the sections penstock is a 5-in unit of the Rogun hydropower plant.

Key words: rocks, support, mining, earthquakes, circular section, seismic waves, longitudinal and transverse waves, longitudinal wave velocity

Основной задачей расчёта обделок на сейсмические воздействия является проверка прочности конструкций с целью предупреждения её обрушения, при этом сейсмические воздействия учитываются при особых сочетаниях нагрузок.

Следует отметить, что в расчётах гидротехнических подземных сооружений на сейсмические воздействия допускается возникновение сейсмических остаточных деформаций (трещин, сколов, смещений), не приводящих к обрушению и вывалу элементов обделки.

Расчет производится на сейсмические воздействия, направленные перпендикулярно к продольной оси тоннеля. Воздействие сейсмических сил, направленных вдоль продольной оси тоннеля, смягчается в результате конструктивных мероприятий (устройства сейсмических деформационных швов по длине тоннеля) и поэтому в расчёте не учитываются.

Опасность землетрясений для подземных сооружений длительное время недооценивалась. Имеющиеся в настоящее время сведения о влиянии землетрясений на горные выработки и подземные сооружения свидетельствуют о том, что практически при каждом сильном землетрясении подземные сооружения получали различного рода повреждения и разрушения. Например, в г. Исфаре Республики Таджикистан 31.01.1977 г. при магнитуде 6,5 получили повреждения вертикальные и наклонные стволы, горизонтальные выработки и камеры шахт 1-2 и №8 в Шурабе. Также некоторые тоннели подземного комплекса в Рогунской ГЭС тоже получили повреждения.

В сейсмоопасных зонах на основании статического анализа интенсивности и повторяемости землетрясений, а также анализа геологических и геофизических данных осуществляется сейсмическое районирование, в которой отмечены места возможных землетрясений и указана их балльность. Карта сейсмического районирования является официальным документом, который необходимо принимать во внимание при проектировании и расчёте различных сооружений. Очаги землетрясений обычно приурочены к районам неотектонических движений земной коры. Районы, подверженные землетрясениям в 6 и более баллов, составляют значительную часть территории Центральной Азии: площади районов имеющих сейсмичность в баллах соответственно 6-297, 7-242, 8-222; 9-242 тыс.км².

Скорости распространения продольных и поперечных сейсмических волн отличаются друг от друга и составляют:

$$C_p = \sqrt{\frac{Eq}{\gamma} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}; \quad (1) \quad C_s = \sqrt{\frac{Eq}{2\gamma(1+\mu)}}; \quad (2)$$

где: E – модуль деформации, МПа;

γ – вес пород, МН/м²;

μ – коэффициент Пуассона;

q – ускорение свободного падения тела;

Для плоских гармонических волн в упругой среде экстремальные значения нормальных и касательных напряжений определяются выражениями:

$$\sigma_{\min}^{max} = \pm P = \pm \frac{1}{2\pi} \cdot k_c \cdot \gamma \cdot c_p \cdot T_0; \quad (3)$$

$$\tau_{\min}^{max} = \pm Q = \pm \frac{1}{2\pi} \cdot k_c \cdot \gamma \cdot c_s \cdot T_0; \quad (4)$$

где: k_c – коэффициент сейсмичности, соответствующий баллу землетрясения;

T_0 – преобладающий период сейсмических колебаний частиц породы, определяемый по данным инженерно-сейсмической службы, а при отсутствии этих данных принимаемый равным 0,5 с;

k_c - принимается в зависимости от расчётной сейсмичности землетрясения в баллах:

| | | | |
|------------------------|-------|-----|-----|
| Расчетная сейсмичность | 7 | 8 | 9 |
| Значения, k_c | 0,025 | 0,5 | 0,1 |

Ориентировочные значения скоростей продольных сейсмических волн и нормальных напряжений в массиве пород при землетрясениях 9 баллов приведены в таблице 2.

Таблица 2

| Породы | γ $1 \cdot 10^{-2}$ МН/м ² | c_p $1 \cdot 10^{-2}$ м/с | P $1 \cdot 10^2$ МПа |
|---------------------------------|---|--------------------------------|-------------------------|
| Скальные | 2,5 | 35-40 | 70-100 |
| Мергель, мел, плотные глины | 2,2 | 10-35 | 18-60 |
| Грунты (песка, глина, суглинки) | 1,8-2,2 | 2-10 | 3-16 |

При воздействии упругих волн на подземное сооружение в нем возникает изменяющееся во времени напряженное состояние, которое может быть исследовано с помощью решений динамических задач теории упругости. Величина напряжений зависит от соотношения поперечных размеров подземных горных выработок и длины сейсмических волн.

Общие принципы расчета крепи выработок (обделок подземных сооружений) на сейсмические воздействия при землетрясениях разработаны д.т.н. Н.Н. Фотиевой [2]. Крепь рассматривается как кольцо заданной толщины и конфигурации в условиях полного контакта с массивом.

Сейсмические волны предполагаются упругими, гармоническими с плоским фронтом либо нестационарными, но с незначительным отличием реального импульса по форме от синусоидального. Надо отметить, что в скальных породах при больших длинах волн с преобладающим периодом колебаний форма импульса оказывает незначительное влияние на напряжённое состояние крепи.

Массив горных пород моделируется линейно-деформируемой средой, механические свойства которой характеризуются средними значениями модули деформации E и коэффициента Пуассона μ .

Для расчета крепи выработки круглого сечения, подвергающейся сейсмическому воздействию используем метод расчета многослойных конструкций. Рассмотрим многослойное упругое кольцо (рис 1), внешней n – ый слой которого моделирует массив пород а внутренний слой -крепь.

Особенность расчётной схемы заключается в том, что радиус внешнего слоя

$$R_n \rightarrow \infty.$$

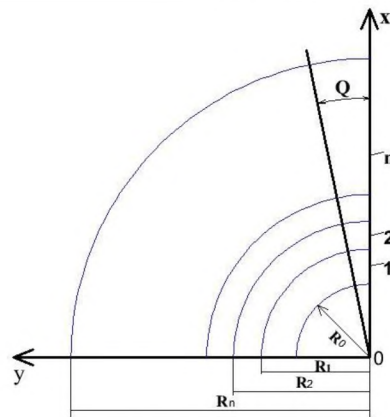


Рис 1. Расчётная схема крепи выработки круглого сечения в виде многослойного кольца

В частном случае монолитной бетонной крепи эта схема может быть сведена к двухслойному кольцу (крепь-порода). Кроме того в качестве слоев могут быть выделены области в массиве пород вокруг выработки с отличающимися деформационными характеристиками (E и μ) вследствие упрочнения пород в результате тампонажа либо вследствие разупрочнения пород под влиянием взрывных работ или деформаций за пределом прочности.

Определим расчётную квазистатическую нагрузку, приложенную к внешнему контуру $r = R_n$ многослойного кольца. Наиболее неблагоприятный случай, когда сейсмические продольные и поперечные волны достигают выработки одновременно, тогда при направлении действия волн вдоль оси X^1 напряжённое состояние массива эквивалентно действию на бесконечности напряжений (рис 2).

$$\sigma_{x^1}^{(\infty)} = \pm P; \sigma_{y^1}^{(\infty)} = \pm \lambda P; \tau_{x^1 y^1}^{(\infty)} = Q \quad (5)$$

где значение Q, P по формуле (3 и 4) и $\lambda = \frac{\mu}{1-\mu}$;

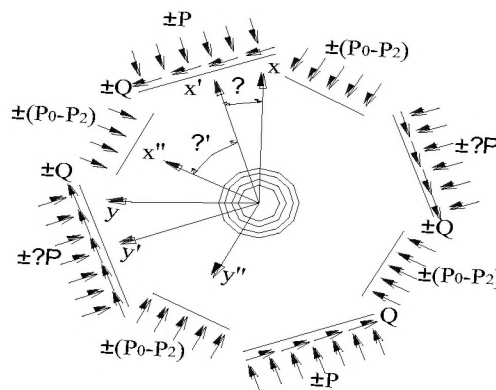


Рис 2. Расчётная схема сейсмических воздействий на крепь выработки круглого сечения

Учитывая равнозначность радиальных направлений для выработки с круглым сечением, определяют главные напряжения в массиве пород на бесконечности, пользуясь формулой:

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{matrix} \right\} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (6)$$

Подставляя в формулу (6) значения формулы (5) получим:

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1^{(\infty)} \\ \sigma_3^{(\infty)} \end{matrix} \right\} = \pm \frac{P}{2(1-\mu)} \cdot \left[1 \pm \sqrt{(3-4\mu) \cdot (1-2\mu)} \right] \quad (7)$$

Знак \pm обозначает действие сжимающих и растягивающих напряжений на бесконечности (∞).

Наибольшие главные напряжения действуют вдоль оси X^1 (рис 3), которая отклонены от оси X^1 на угол $\pm\alpha^1$ определяются по формуле:

$$2\alpha^1 = \arctg \left(-\frac{2\tau_{x^1y^1}^{(\infty)}}{\sigma_{x^1}^{(\infty)} - \sigma_{y^1}^{(\infty)}} \right) \quad (8)$$

Главные напряжение в массиве на бесконечности (∞) можно представить в виде.

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1^{(\infty)} \\ \sigma_3^{(\infty)} \end{matrix} \right\} = P_0 \pm P_2; \quad (9)$$

$$\text{где: } P_0 = \frac{P}{2(1-\mu)}; \quad P_2 = \frac{P}{2(1-\mu)} \cdot \sqrt{(3-4\mu) \cdot (1-2\mu)}; \quad (10)$$

Переходя от декартовых к полярным координатам и направляя ось X вдоль X^1 (рис 1) для расчётных напряжений, приложенному к внешнему контуру многослойного кольца получим следующее выражение:

$$P^* = \pm(P_0 + P_2 \cdot 2\theta) \quad (11)$$

В дальнейшем расчёт производится для определения коэффициента передачи нагрузок предложенным проф. Н.С.Булычевым последовательно для всех слоёв, начиная изнутри (коэффициент передачи нагрузок через первый внутренний слой равен нулю $K_{0(i)} = 0$) по формулам (12) и (13).

$$K_{0(i)} = \frac{a_{1(i)}}{a_{2(i)} + X_0 \cdot (a_{1(i-1)}^I - K_{0(i-1)} \cdot a_{2(i-1)}^I)}; \quad (12)$$

где $X_0 = \frac{G_i}{G_{1-i}} \cdot \frac{C_{i-1}^2 - 1}{C_{1-i}^2 - 1}$ – отношение модулей сдвига крепи и пород;

$$\begin{aligned} K_{11(i)} &= \frac{1}{B} \cdot (\beta_1 \cdot a_{1(i)}^I - \beta_2 \cdot a_{1(i)}); \\ K_{12(i)} &= \frac{1}{B} \cdot (\beta_2 \cdot a_{2(i)} - \beta_2 a_{1(i)}^I); \end{aligned} \quad (13)$$

$$K_{21(i)} = \frac{1}{B} \cdot (\alpha_1 \cdot a_{1(i)}^I - \alpha_2 \cdot a_{1(i)});$$

$$K_{22(i)} = \frac{1}{B} \cdot (\alpha_2 \cdot a_{2(i)} - \alpha_2 \cdot a_{2(i)}^I);$$

Коэффициент передачи равномерных внешних нагрузок, приложенных на бесконечности, через внешний n -й слой, моделирующей массив пород получен из выражения (12), заменив индекс i на n устранив $R_n \rightarrow \infty$. После преобразований получено:

$$K_{0(n)} = \frac{X_n + 1}{2 + X_0^{II} (a_{1(n)}^I - K_{0(n-1)} \cdot a_{2(n-1)}^I)} \quad (14)$$

где: $X_0^{II} = \frac{G_n}{G_{n-1}} \cdot \frac{1}{C_{n-1}^2 - 1}$;

Затем по формулам (15) и (16) находятся напряжения на контактах слоёв.

$$P_{0(i-1)} = P_{0(i)} \cdot K_{0(i)}; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} P_{2(i-1)} &= P_{2(i)} \cdot K_{11(i)} + q_{2(i)} \cdot K_{12(i)}; \\ q_{2(i-1)} &= P_{2(i)} \cdot K_{21(i)} + q_{2(i)} \cdot K_{22(i)}; \end{aligned} \quad (16)$$

После чего по формулам (17) и (18) вычисляются нормальные тангенциальные напряжения на внутреннем и внешнем контурах каждого слоя.

$$\text{При } r = R_{i-1} \quad (17)$$

$$\sigma_{\theta} = P_{0(i)}m_1 - P_{0(i-1)}m_2 - (P_{2(i)}n_1 - q_{2(i)}n_2 - P_{2(i-1)}n_3 + q_{2(i-1)}n_4) \cdot \cos 2\theta$$

При $r = R_i$ (18)

$$\sigma_{\theta} = P_{0(i)}m_1^I - P_{0(i-1)}m_2^I + (P_{2(i)}n_1 - q_{0(i)}n_2^I - P_{2(i-1)}n_3^I + q_{2(i-1)}n_4^I)\cos 2\theta$$

Расчётные напряжения в крепи от сейсмических воздействий суммируются с напряжениями от горного давления. Проверка прочности слоев производится по экстремальным значениям напряжений.

Если выработка закреплена монолитной бетонной (однослойной) крепью при этом расчётные формулы упрощаются.

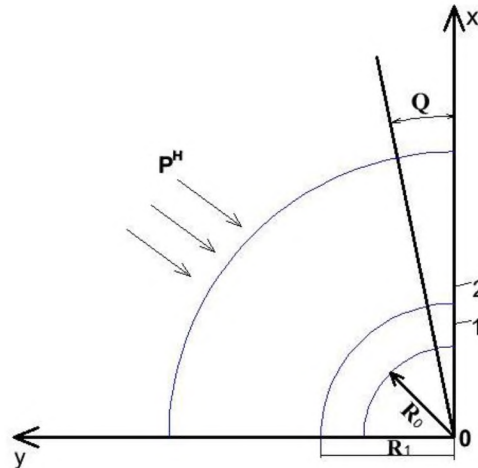


Рис 3. Схема к расчёту монолитной крепи выработки круглого сечения

Если связь крепи с массивом пород не усилена конструктивно (например с помощью анкеров) и крепь проектируется с допущение образования трещин, то на расчетные принимаются только смещающие напряжения P^* .

Коэффициенты передачи нагрузок через внешний слой (массив пород) определяются выражениями, следующими из (13) при $R_0 \rightarrow \infty$ и (14).

$$K_{0(2)} = \frac{d_{1(2)}}{d_{2(2)} + X^{II}d_{1(1)}}; \quad (19)$$

$$K_{11(2)} = 2 \cdot \frac{\beta_1}{B}; \quad K_{22(2)} = 2 \frac{\alpha_1}{B}; \quad (20)$$

где: $B = \alpha_2\beta_1 - \alpha_2\beta_2; \quad \alpha_1 = \frac{1}{X_2+1} (1 + X^{II}b_{1(1)});$

$$\alpha_2 = \frac{1}{X_2+1} (X_2 + X^{II}b_{2(1)}); \quad X^{II} = \frac{G_2}{G_1} \cdot \frac{X_1+1}{(c_1^2-1)^3};$$

$C = \frac{R_1}{R_0}$ характеристика круговой крепи (кольцо); X – коэффициент вида напряженного состояния имеющий значения: $X=3-4\mu$ –при плоской деформации; $X = \frac{3-\mu}{1+\mu}$ –при плоском напряженном состоянии;

Здесь $d_1 = C^2(X + 1); d_2 = 2C^2 + X - 1; d_1^I = C^2(X - 1) + 2; \text{ и } d_2^I = X+1.$

Поскольку напряжение сейсмических волн заранее неизвестно, то необходимо знать экстремальные напряжения в крепи, которые определяются по формулам, следующим из (17) и (18): при $r = R_0$.

$$\sigma_{\theta} = P_{0(1)}m_1 \pm (P_{2(1)}n_1 - q_{2(1)}n_2); \quad (21)$$

$$\sigma_{\theta} = P_{0(1)}m_1^I \pm (P_{2(1)}n_1^I - q_{2(1)}n_2^I); \quad (22)$$

$$\text{где: } m_1 = \frac{2c^2}{c^2-1}; \quad m_2 = \frac{c^2+1}{c^2-1}; \quad m_1^I = m_2; \quad m_2^I = \frac{2}{c^2-1};$$

$$n_1 = 4c^2 \frac{c^2+1}{(c^2-1)^2}; \quad n_2 = \frac{4c^2}{(c^2-1)^2}; \quad n_3 = \frac{c^4+6c^2+1}{(c^2-1)^2}; \quad n_4 = 2 \frac{c^4+2c^2-1}{(c^2-1)^2};$$

$$n_1^I = n_3; \quad n_2^I = 2 \frac{2c^2-c^4+1}{(c^2-1)^2}; \quad n_3^I = 4 \frac{c^2+1}{(c^2-1)^2}; \quad n_4^I = n_2;$$

Экстремальные напряжения суммируются с соответствующими расчётными напряжениями от других видов воздействий на крепь.

По значениям экстремальных напряжений могут быть определены расчётные изгибающие моменты и нормальные силы по формулам:

$$M = d^2 b \frac{\sigma_{\theta}^{вн} - \sigma_{\theta}^{нар}}{12}; \quad N = db \frac{\sigma_{\theta}^{вн} + \sigma_{\theta}^{нар}}{2}; \quad (23)$$

где: $b = 1 \text{ м}$; d – толщина крепи ($d = R_1 - R_0$).

В качестве примера определим напряжение в монолитной бетонной крепи на одном участке турбинного водовода 5-в агрегатов Рогунской ГЭС круглого сечения диаметром 5,49м пройденного на глубине 100 м, при воздействии волны в фазе сжатия от землетрясения силой 9 баллов.

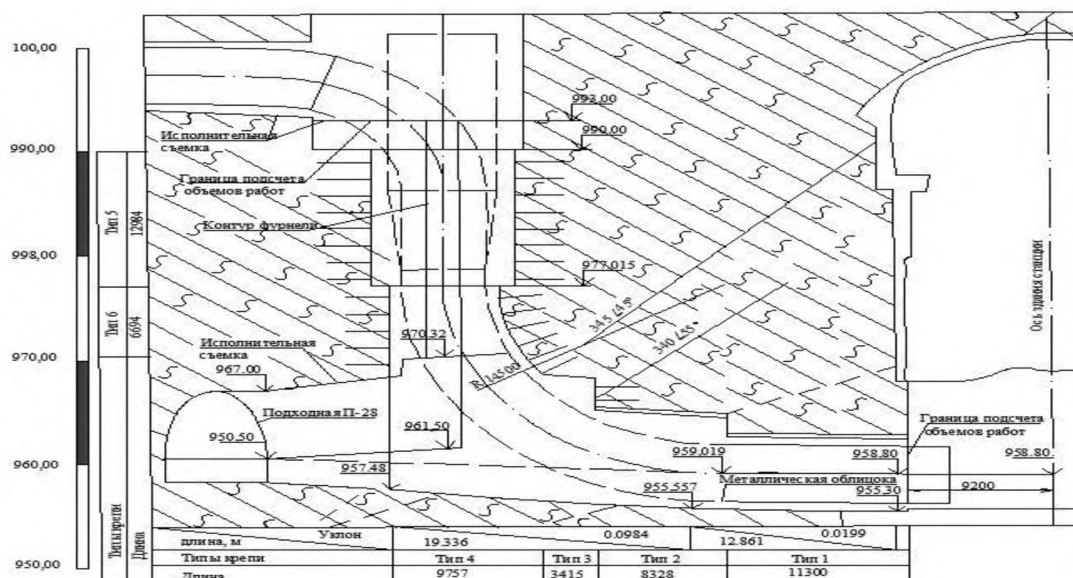


Рис 5. Временный подводящий тракт Рогунской ГЭС.

Исходные данные характеристики пород:

Алевролит, тектонические нарушение III-IV порядка.

$E=10200 \text{ МПа}$; $\mu = 0,31$; $\gamma = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ МПа/м}^3$; $T_0=0,5 \text{ с}$; характеристики крепи:

$R_0=2,745 \text{ м}$; $R_1=3,5 \text{ м}$ $E_k = 2,9 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; $\mu_k = 0,15$.

Коэффициент сейсмичности $k_c = 0,1$.

Подставляя значения величин в формулы (1), (3) и (10) определяем:

Скорость распространения продольных волн

$$C_p = \sqrt{\frac{Eq}{\gamma} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} = \sqrt{\frac{10200 \cdot 9,8}{9,8 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{(1 - 0,31)}{(1 + 0,31)(1 - 2 \cdot 0,31)}} = 2304 \text{ м/с}$$

По результатам сейсмического профилирования на участке машинного зала Рогунской ГЭС значения скоростей продольных волн составит $C_p=2300-3500 \text{ м/с}$.

Квазистатическое напряжение на бесконечности (∞).

$$P = \frac{1}{2\pi} k_0 \gamma C_p T_0 = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot 0,1 \cdot 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 2304 \cdot 0,5 = 47,6 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$$

$$P_0 = \frac{P}{2(1-\mu)} = \frac{47,6 \cdot 10^{-2}}{2(1-0,31)} = 34,5 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$$

$$P_2 = \frac{P}{2(1-\mu)} \cdot \sqrt{(3-4\mu)(1-2\mu)} = \frac{47,6 \cdot 10^{-2}}{2(1-0,31)} \sqrt{(3-4 \cdot 0,31)(1-2 \cdot 0,31)}$$

$$= 28,2 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$$

Определим значение величин, входящих в формулу (19) и (20) и коэффициенты передачи нагрузки.

$$K_{0(2)} = \frac{d_{1(2)}}{d_{2(2)} + X_0^{II} \cdot d_{1(1)}^I} = \frac{1,696}{1,989 + 0,29 \cdot 2,6} = 0,618$$

$$d_1 = C^2(X+1) = 0,784^2(1,76+1) = 1,696$$

$$C = \frac{R_0}{R_1} = \frac{2,745}{3,5} = 0,784; \quad x = 3 - 4\mu = 3 - 4 \cdot 0,31 = 1,76$$

$$d_2 = 2 \cdot C^2 + x - 1 = 2 \cdot 0,784^2 + 1,76 - 1 = 1,989$$

$$d_{1(1)}^I = C^2(x-1) + 2 = 0,784^2 \cdot (1,76-1) + 2 = 2,6$$

$$K_{11(2)} = 2 \cdot \frac{\beta_1}{B} = 2 \cdot \frac{0,28}{-0,164} = -3,415$$

$$B = \alpha_2 \cdot \beta_1 - \alpha_1 \cdot \beta_2 = 0,89 \cdot 0,28 - 0,51 \cdot 0,81 = -0,164$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{x_2 + 1} (1 + X_0^{II} \cdot b_{1(1)}) = \frac{1}{1,76 + 1} (1 + 0,29 \cdot 1,345) = 0,50$$

$$b_1 = C^4(3 + C^2) - D = 0,784^4(3 + 0,784^2) - 0,021 = 1,345$$

$$D = \frac{(C^2 - 1)^3}{X + 1} = \frac{(0,784^2 - 1)^3}{1,76 + 1} = 0,021$$

$$X_0^{II} = \frac{G_n}{G_{n-1}} \cdot \frac{1}{C_{n-1}^2 - 1} = \frac{436}{3893} \cdot \frac{1}{0,784^2 - 1} = 0,29$$

Модуль сдвига породы

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} = \frac{10200}{2(1+0,31)} = 3893 \text{ МПа}$$

Модуль сдвига крепи равен – 436 МПа

$$\alpha_2 = \frac{1}{X_2 + 1} (X_2 + X_0^{II} \cdot b_{1(1)}^I) = \frac{1}{1,76 + 1} (1,76 + 0,29 \cdot 2,39) = 0,89$$

$$b_1^I = 2 \cdot C^4 + C^2 + 1 + D = 2 \cdot 0,784^4 + 0,784^2 + 1 + 0,021 = 2,39$$

$$\beta_1 = \frac{1}{X_2 + 1} (1 - X_0^{II} \cdot b_{2(1)}) = \frac{1}{1,76 + 1} (1 - 0,29 \cdot 0,84) = 0,28$$

$$b_2 = C^4(3 - C^2) + D = 0,784^4(3 - 0,784^2) + 0,021 = 0,84$$

$$b_2^I = C^2 + 1 + D = 0,784^2 + 1 + 0,021 = 1,64$$

$$\beta_2 = \frac{1}{x_2 + 1} (x_2 + X_0^{II} \cdot b_{2(1)}^I) = \frac{1}{1,76 + 1} (1,76 + 0,29 \cdot 1,64) = 0,81$$

$$K_{21(2)} = 2 \cdot \frac{\alpha_1}{B} = 2 \cdot \frac{0,89}{-0,164} = -10,853$$

Определяем напряжения на контакте крепи с породами по формулам (15) и (16):

$$P_{0(1)} = P_{0(i)} \cdot K_{0(i)} = 34,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,681 = 23,5 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$$

$$P_{2(1)} = P_{2(i)} \cdot K_{11(i)} = 28,2 \cdot 10^{-2} \cdot (-3,415) = -96,3 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$$

$$q_{2(1)} = P_{2(i)} \cdot K_{21(i)} = 28,2 \cdot 10^{-2} \cdot (-10,855) = -306,2 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$$

Знак « - » перед величинами $P_{2(1)}$ и $q_{2(1)}$ означает, что максимумы контактных нормальных напряжений повернуты относительно направления оси X^{II} (рис 3) на 90° .

Определим значения величин входящих в формулы (21) и (22).

$$m_1 = \frac{2c^2}{c^2-1} = \frac{2 \cdot 0,784^2}{0,784^2-1} = 3,19; \quad m_1^I = \frac{c^2+1}{c^2-1} = \frac{0,784^2+1}{0,784^2-1} = 4,19$$

$$n_1 = 4C^2 \cdot \frac{C^2+1}{(C^2-1)^2} = 40,784^2 \frac{0,784^2+1}{(0,784^2-1)^2} = 10,91;$$

$$n_1^I = \frac{C^4+6C^2+1}{(C^2-1)^2} = \frac{0,784^4+6 \cdot 0,784^2+1}{(0,784^2-1)^2} = 35,8$$

$$n_2 = \frac{4C^2}{(C^2-1)^2} = \frac{4 \cdot 0,784^2}{(0,784^2-1)^2} = 16,6;$$

$$n_2^I = 2 \frac{2C^2-C^4+1}{(C^2-1)^2} = 2 \cdot \frac{2 \cdot 0,784^2-0,784^4+1}{(0,784^2-1)^2} = 2,0$$

Определим экстремальные напряжения в крепи на внутреннем и внешнем контурах по формулам (21) и (22) а изгибающие моменты и нормальные силы по формулам (23).

При $r = R_0$

$$\sigma_{\theta}^{\text{вн}} = 1,77 \text{ МПа}$$

При $r = R_1$

$$\sigma_{\theta}^{\text{нар}} = 5,6 \text{ МПа}$$

$$M_{\text{max}} = d^2 b \frac{\sigma_{\theta}^{\text{вн}} - \sigma_{\theta}^{\text{нар}}}{12} = 0,75^2 \cdot 1 \cdot \frac{1,77 - 5,6}{12} = 1,8 \cdot 10^{-1} \text{ МПа}$$

$$N_{\text{max}} = d \cdot b \frac{\sigma_{\theta}^{\text{вн}} + \sigma_{\theta}^{\text{нар}}}{12} = 0,75 \cdot 1 \cdot \frac{1,77 + 5,6}{12} = 2,8 \cdot 10^{-1} \text{ МПа}$$

Следует отметить, что в скальных породах при больших длинах сейсмических волн с преобладающим периодом колебаний форма импульса оказывает незначительное влияние на напряжённое состояние крепи.

Таким образом, при воздействии упругих волн на подземное сооружение в нем возникает изменяющиеся во времени напряжённое состояние, которое может быть исследовано с помощью решений динамических задач теории упругости. Величины напряжений зависят от соотношения поперечных размеров горных выработок и длин сейсмических волн.

Список литературы

1. Буличев Н.С. Механика подземных сооружений. М. Недра, 1989 г.
2. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. Изд. 3-е, стер. Москва: Студент, 2012.-542 с.
3. Баклашов И.В. Геомеханика: Учебник для вузов. Том1. Основы геомеханики. М.: МГГУ, 2004.-208 с.
4. Буличев Н.С. О расчете обделок тоннелей в очень слабых грунтах //Проблемы подземного строительства в XXI веке. Тула, 2002, С.35-37.
5. Буличев Н.С., Амусин Б.З., Оловянный А.Г. Расчет крепи капитальных горных выработок. М, Недра, 1974 г.
6. Картозия Б.А., Борисов В.Н. Инженерные задачи механики подземных сооружений. Учебное пособие, М.МГГУ, 2001. -246 с.
7. Картозия Б.А., Федунец Б.И., Шуплик М.Н. и др. Шахтное и подземное строительство. Том1. М, Изд-во, Академии горных наук, 2001. - 607 с.
8. Фотиева Н.Н. Расчет крепи подземных сооружений в сейсмически активных районах. М, Недра. 1974 г.

9.Фотиева Н.Н., Саммаль А.С., Бульчев Н.С. и др. Приближенный учет пространственного характера задачи о влиянии здания и напряженное состояние обделки близко расположенного тоннеля. СамГТУ, Самара, 2004, С.242-245.

10.Фотиева Н.Н. Расчет обделок тоннелей не кругового поперечного сечения. М, Стройиздат, 1974 г.