УДК 622.831 (575.2) (04)

О СЕЙСМОНАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ В ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ

Б. Жумабаев – докт. техн. наук,
А.А. Аманалиев – канд. физ.-мат. наук,
Б. Ботаканова – ст. преподаватель

In the job view the problem about seismic-stressed state of a hydraulic tunnel of activity nature forces. The hydraulic tunnel mined in an anisotropy massif of a rock ground.

Сейсмонапряженные состояния гидротехнических туннелей в условиях влияния горного рельефа, гидростатического напора, сейсмических волн растяжения-сжатия и сдвига, гравитационных и горизонтальных тектонических сил и анизотропии упругих свойств трансверсально-изотропного массива рассмотрены в [1–6].

Типы массивов пород, свойства которых моделируются с помощью модели трансверсально-изотропного упругого тела, приведены в [6]. Плоскость изотропии ориентирована произвольно и составляет с горизонтальной плоскостью угол φ . Ось OZ направим по простирании плоскости изотропии, оси OX' и OY' соответственно вдоль и перпендикулярно этой плоскости. Свойства такого массива характеризуются законом Гука, записанным в координатной системе OZX'Y' в виде

$$\begin{aligned}
&\varepsilon_{x'} = \frac{1}{E_1}\sigma_{x'} - \frac{\nu_2}{E_1}\sigma_{y'} - \frac{\nu_2}{E_2}\sigma_{z'},\ \gamma_{y'z} = \frac{1}{G_2}\tau_{y'z},\\
&\varepsilon_{y'} = -\frac{\nu_1}{E_1}\sigma_{x'} - \frac{1}{E_1}\sigma_{y'} - \frac{\nu_2}{E_1}\sigma_{z'},\ \gamma_{x'z} = \frac{1}{G_1}\tau_{x'z},\\
&\varepsilon_{z'} = -\frac{\nu_2}{E_1}\sigma_{x'} - \frac{\nu_2}{E_1}\sigma_{y'} + \frac{1}{E_1}\sigma_{z'},\ \gamma_{x'y'} = \frac{1}{G_2}\tau_{x'y'},
\end{aligned} \tag{1}$$

где E_1 и E_2 – модули Юнга в плоскости изотропии OZX' и перпендикулярно к ней, ν_1 и ν_2 – коэффициенты Пуассона в плоскости изотропии и перпендикулярно к ней, $G_1=E_1/(2+2\nu_1)$ и G_2 – модули сдвига в плоскости изотропии и перпендикулярно к ней.

Закон Гука в координатной системе OZXY, полученной вращением вокруг оси OZ на угол φ системы координат OZX'Y', записывается в виде

$$\begin{aligned}
&\varepsilon'_x = a_{11}\sigma'_x + a_{12}\sigma'_y + a_{13}\sigma'_z + a_{16}\tau'_{xy},\ \gamma'_{yz} = a_{44}\tau'_{zy} + a_{45}\tau'_{xz},\\
&\varepsilon'_y = a_{12}\sigma'_x + a_{22}\sigma'_y + a_{23}\sigma'_z + a_{26}\tau'_{xy},\ \gamma'_{xz} = a_{45}\tau'_{zy} + a_{55}\tau'_{xz},\\
&\varepsilon'_z = a_{13}\sigma'_x + a_{23}\sigma'_y + a_{33}\sigma'_z + a_{36}\tau'_{xy},\ \gamma'_{xy} = a_{16}\sigma'_x + a_{26}\sigma'_y + a_{36}\sigma'_z + a_{66}\tau'_{xy}.
\end{aligned} \tag{2}$$

При этом точки массива полупространства с координатами {x; y; z} переходят к новому положению {x=x'cosφ-y'sinφ; y=x'sinφ-y'cosφ; z}.

Упругие постоянные в (2) вычисляются по известным формулам преобразования [4, 6].

Анизотропные массивы равнин, ограниченные горизонтальной дневной поверхностью y=0, испытывают действие объемных сил с горизонтальной ($-\gamma K_c \sin\delta$) и вертикальной ($-\gamma+\gamma K_c \sin\delta$) составляющими, а также тектонических сил растяжения-сжатия в горизонтальном направлении, параллельно оси OX с постоянной интенсивностью T_x по глубине полупространства y<0.

В таком полупространстве имеется гора или впадина, ограниченная криволинейной цилиндрической поверхностью, форма которой изображает гористый рельеф. Образующая этой поверхности параллельна оси OZ и проходит по простирании плоскости изотропии массива, где ось OX – горизонтальная, OY – вертикальная.

При прохождении колебательных синусоидальных сейсмических волн в изотропном горном массиве, как это указано в работе Ш.Г. Напетваридзе [7], возникают напряжения, которые будем называть сейсмическими σ_{ij}^c. Такая задача решена Ж.С. Ержановым, Ш.М. Айталиевым, Ж.К. Масановым [4]? и при этом получены соотношения для определения напряжений анизотропного полупространства. Установлено, что для получения этих соотношений в (3) угол φ достаточно заменить углом α=β+φ, где φ – угол падения сейсмических волн к горизонтальной оси. Компоненты сейсмических напряжений в основной системе координат OXYZ выражаются соотношениями

$$\begin{aligned}
\sigma_x^c &= \pm\frac{1}{2\pi}T_0\gamma K_c\xi V_p(\cos^2\beta+\lambda_{\bar y}^c\sin\beta+\lambda_{\bar x\bar y}^c\sin 2\beta)\pm\frac{1}{2\pi}T_0\gamma K_c S_{\bar y}\sin 2\beta\,,\\
\sigma_y^c &= \pm\frac{1}{2\pi}T_0\gamma K_c\xi V_p(\sin^2\beta+\lambda_{\bar y}^c\cos^2\beta-\lambda_{\bar x\bar y}^c\sin 2\beta)\mp\frac{1}{2\pi}T_0\gamma K_c S_{\bar y}\sin 2\beta\,,\\
\tau_{xy}^c &= \pm\frac{1}{2\pi}T_0\gamma K_c\xi V_p\left[\frac{1}{2}(\lambda_{\bar y}^c-1)\sin 2\beta+\lambda_{\bar x\bar y}^c\cos 2\beta\right]\pm\frac{1}{2\pi}T_0\gamma K_c S_{\bar y}\,,
\end{aligned}\tag{4}$$

где V_p – продольная волна, S_y – поперечная волна, T_0 – преобладающий период колебания частиц породы, $\lambda_{\bar y}^c$, ξ, $\lambda_{\bar x\bar y}^c$ – коэффициенты сейсмического бокового распора [4].

В зоне влияния горы проведен гидротехнический туннель. Направления образующих поверхности горы (каньона) и туннеля параллельны, а кратчайшее расстояние между поверхностями R в три и более раз превышает линейный размер поперечного сечения туннеля R. Контур поперечного сечения туннеля в окрестности ее центра $x_1 = x_0 - x$, y_1 $y_0 - y$ описывается параметрическим уравнением [5]

$$x_1 = R\left[\cos\theta+\varepsilon\sum_{k=2}^{5}a_k\cos k\theta\right],\quad y_1 = R\left[-C\sin\theta+\varepsilon\sum_{k=2}^{5}a_k\sin k\theta\right],\tag{5}$$

где R>0, ε – малый параметр, a_k – некоторые вещественные постоянные. С помощью вариаций значений C, ε и a_k (k=2, 3, ..., 5) можно рассматривать все формы поперечных сечений, которые были моделированы ранее в научной литературе [4]. На контур туннеля может быть приложен гидростатический напор q_0, требуется определить сейсмонапряженное состояние массивов пород вокруг такого туннеля.

Решение поставленной задачи представим в виде суммы полей напряжений:

$$\begin{aligned}
\sigma_x^o &= \sigma_x^n+\sigma_x^p+\sigma_x^c+\sigma_x^m+\sigma_x^н\,,\\
\sigma_y^o &= \sigma_y^n+\sigma_y^p+\sigma_y^c+\sigma_y^m+\sigma_y^н\,,\\
\tau_{xy}^o &= \tau_{xy}^n+\tau_{xy}^p+\tau_{xy}^c+\tau_{xy}^в+\tau_{xy}^н\\
\sigma_z^o &= -a_{33}\left(a_{13}\sigma_x^o+a_{23}\sigma_y^o+a_{36}\tau_{xy}^o\right).
\end{aligned}\tag{6}$$

Здесь напряжения с индексом “п” сверху обозначают поле напряжений анизотропного полупространства ($y\le 0$), которое возникает при совместном действии гравитационных (γ), сейсмических ($K_c\gamma$) и тектонических (T_x) сил; напряжения с индексами “р” характеризуют поле напряжений, которое возникает в результате влияния горного рельефа массивов пород на напряженно-деформированное состояние массивов пород полупространства; напряжения с индексом “с” характеризуют напряжения, возникающие при прохождении сейсмических волн растяжения-сжатия и сдвига;

напряжения с индексом “*m*” характеризуют образование туннеля в зоне влияния горы; напряжения с индексом “н” возникают вокруг туннеля от давлении напора.

Компоненты начального напряженного состояния массива пород в окрестности центра поперечного сечения туннеля, возникающее до его образования, обозначим через S_x, S_y и S_{xy}, которые вычисляются следующим образом:

$$S_x = \lambda_x y + T_x + \sigma_x^p(x_0, y_0) + \sigma_x^c(x_0, y_0),$$
$$S_y = \lambda_y y + \sigma_y^p(x_0, y_0) + \sigma_y^c(x_0, y_0), \tag{7}$$
$$S_{xy} = \lambda_{xy} y + \tau_{xy}^p(x_0, y_0) + \tau_{xy}^c(x_0, y_0).$$

Входящие в эти соотношения величины уже определены [1, 2, 5], остается лишь определить величины σ_x^m, σ_y^m и τ_{xy}^m так, чтобы они удовлетворяли условию отсутствия внешних нагрузок на контуре туннеля. Тогда для определения поля напряжений σ_x^m, σ_y^m и τ_{xy}^m об образовании туннеля на контурных точках воображаемого отверстия должна быть приложена внешняя фиктивная нагрузка. Эта нагрузка выражается интенсивностью горизонтальных X_n^m и вертикальных Y_n^m, ее составляющих:

$$X_n^m = S_x^m \cos(n, x_1) + S_{xy}^m \sin(n, y_1), \quad Y_n^m = S_{xy}^m \cos(n, x_1) + S_y^m \sin(n, y_1). \tag{8}$$

В случае действия только сейсмических сил она выражается следующим образом:

$$X_n^c = S_x^c \cos(n, x_1) + S_{xy}^c \sin(n, y_1), \quad Y_n^c = S_{xy}^c \cos(n, x_1) + S_y^c \sin(n, y_1). \tag{9}$$

Кроме того, на контур туннеля может быть приложено давление напора

$$X_n^н = -q_0 \cos(n, x_1), \quad Y_n^н = -q_0 \cos(n, y_1). \tag{10}$$

Таким образом, поставленная задача с помощью разработанного С.Г. Лехницким [6] метода сводится к отысканию функций $\varphi(z_1^{'})$ и $\varphi(z_2^{'})$ из граничных условий

$$2\,\mathrm{Re}\left[\varphi_1(z_1^{'}) + \varphi_2(z_2^{'})\right] = -\int_0^s Y_n ds + C_1, \quad 2\,\mathrm{Re}\left[\mu_1\varphi_1(z_1^{'}) + \mu_2\varphi_2(z_2^{'})\right] = -\int_0^s X_n ds + C_2, \tag{11}$$

где $z_k^{'} = z_k^* + \lambda_k z_k^*$, $\lambda_k = (1 + i\mu_k)/(1 - i\mu_k)$, (k=1,2). При определении поля напряжений в образовании туннеля в (7) вместо X_n, Y_n следует положить X_n^m, Y_n^m из (8), а при давлении напора $X_n^н$, $Y_n^н$ из (10).

Задачи расчета сейсмонапряженного состояния туннеля как в теоретическом, так и в практическом смысле, направлены на выяснение только одного вопроса: является ли сейсмостойким гидротехнический туннель. Выше решена задача о распределении напряжений вокруг туннеля при заданных направлениях и характеристиках сейсмических волн растяжения-сжатия и сдвига. Однако неизвестны месторасположение очага землетрясения, характеристика его мощности, спектр скорости, ускорение сейсмических волн и т.д. Следовательно, практическое решение такого вопроса, как обеспечение сейсмостойкости проектируемых или эксплуатируемых подземных сооружений, весьма затруднительно. Решение этого вопроса основано на некоторых критериях и методах прогноза, на расчете сейсмонапряженного состояния массивов пород вокруг туннеля при весьма разнообразных условиях и вариантах предположений о характеристиках сейсмических волн ожидаемых землетрясений. По этой причине расчет сейсмонапряженного состояния массивов пород вокруг туннелей должен быть проведен в определенном порядке по нижеследующему алгоритму.

1. Вычисляют коэффициенты закона Гука (2) в двух вариантах, положив в (3) значения углов φ и $\alpha = \beta + \varphi$.

2. Определяют коэффициенты сейсмического бокового распора λ_{ij}^c.

3. Определяют начальное напряженное состояние массивов пород в окрестности центра туннеля, которое возникает без учета сейсмических напряжений.

4. Вычисляют напряжения вокруг туннели без учета сейсмических.

5. Определяют начальное напряженное состояние массивов пород только от действия сейсмических волн растяжения-сжатия.

6. Вычисляют напряжения, возникающие вокруг туннеля от действия сейсмической волны растяжения-сжатия с учетом знаков “плюс” и “минус”.

7. Определяют начальное напряжение состояния только от действия сейсмических волн сдвига (поперечных волн).

8. Вычисляют напряжения, возникающие вокруг туннеля только от действия сейсмических волн сдвига с учетом знаков “плюс” и “минус”.

9. Вычисляют напряжения вокруг туннеля от давления напора q_0.

10. Суперпозицией полей напряжений, найденных с учетом только знаков “плюс” и “минус” тангенциальных нормальных напряжений, находят два возможных сейсмонапряженных состояния вокруг туннелей, находящихся в зоне влияния горного рельефа.

Далее процедура расчета на сейсмостойкость туннелей может быть проведена по той же методике, что изложено в [4] – путем вариации величины угла падения сейсмических волн к горизонту.

Как видно из отмеченного выше, процедура расчета сейсмонапряженного состояния туннеля в условиях влияния горного рельефа и анизотропии свойств пород требует выполнения многовариантных расчетов с использованием ЭВМ.

С этой целью получено аналитическое решение задачи о сейсмонапряженном состоянии массивов пород вокруг напорных гидростатических туннелей, которые находятся в анизотропном массиве горной местности.

Дана методика расчета сейсмонапряженного состояния напорных гидротехнических туннелей, позволяющая установить закономерности распределения напряжений вокруг них в условиях совместного влияния следующих геомеханических факторов: формы рельефа гор, различных вариантов действия в массиве гравитационных, сейсмических и горизонтальными тектонических сил; анизотропии упругих свойств массива; месторасположения и формы туннеля; совместного действия гравитационных сил, тектонического сжатия и сейсмических волн расстяжения-сжатия и сдвига.

Литература

1. *Аманалиев А.А., Жумабаев Б.* Анаилитическая модель напряженного состояния массивов (НСМ) пород с анизотропными свойствами и гористым рельефом // Наука и новые технологии. – 1996. – №2. – С. 45–49.
2. *Аманалиев А.А.* Напряженно-деформированное состояние массивов пород вокруг подземных выработок, пройденных в слоистом массиве горной местности: Автореф. дисс. … канд. физ.-мат. наук. – Бишкек, 1997. – 18 с.
3. *Ботоканова Б.А., Жумабаев Б.* Напряженное состояние пород вокруг гидротехнического туннеля, расположенных в наклонно-слоистом массиве // Развитие инженерных методов в геомеханике: Оценка, прогноз, контроль (Авершиеские чтения). – Бишкек, 2005. – С. 216–224.
4. *Ержанов Ж.С., Айталиев Ш.М., Масанов Ж.К.* Сейсмонапряженное состояние подземных сооружений в анизотропном слоистом массиве. – Алма-Ата: Наука, 1980. – 212 с.
5. *Жумабаев Б.* Распределение напряжений в массивах пород с гористым рельефом. – Фрунзе: Илим, 1988. – 190 с.
6. *Лехницкий С.Г.* Анизотропные пластинки. – М.: Гостехниздат, 1957. – 416 с.
7. *Напетверидзе Ш.Г.* Сейсмостойкость гидротехнических сооружений. – М.: Госстройиздат, 1959. – 216 с.