

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ЗАДАЧИ НЕОДНОРОДНО АНИЗОТРОПНОГО МАССИВА, СОДЕРЖАЩЕГО ГОРНУЮ ВЫРАБОТКУ

В природе горные породы имеют слоистую структуру (рис. 1). Как правило, напластования и слоистости массива бывают наклонными, что, в свою очередь, составляет сложную структуру массива и ориентирует на анизотропные модели.

Транспропная модель массива в указанном выше смысле соответствует мелкомасштабной слоистости и кусочно-однородной крупномасштабной слоистости, когда слои непрерывно контактируют. Расчетные модели такого типа слоистости казахстанскими геомеханиками очень хорошо изучены. Реальную наклоннослоистую структуру горного массива лучше описывает модель наклоннослоистого массива Ж.С.Ержанова, Ш.М.Айтиалиева, Ж.К. Масанова, Р.Б. Баймахана [ЕАМБ], с помощью которой аналитическими /1, /2, /3/ и численными методами механики деформируемого твердого тела решен ряд задач подземных сооружений /4, 5, 6, 7, 8/ и др.

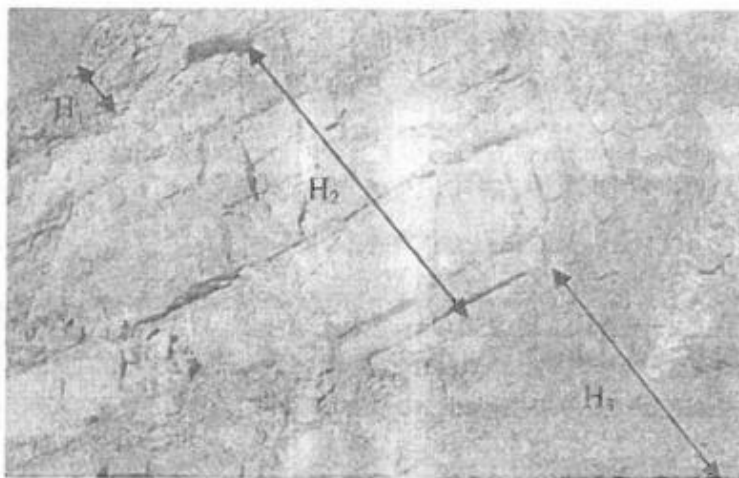


Рис. 1. Пример наклонно-слоистого транспропного строения массива горных пород: Н1 – поверхностные осадочные отложения; Н2 – мелкие слои; Н3 – крупные слои

На рис. 1 и 2 показаны примеры реальных строений горных массивов анизотропного наклонно-слоистого строения и заложенного в нем транспортного подземного сооружения.

Состояние современных подземных сооружений осложняется в связи с повсеместным углублением горизонта горных работ, освоением месторождений

полезных ископаемых со сложными геологическими условиями высокогорья, складчатости и тектонической нарушенности.

При этом активно действующими силами, наряду с собственным весом массива, рассчитываемым ниже горизонта, выступают вес горной части (возвышаемый над горизонтом), изменяющийся по нелинейной зависимости, из-за структурной неоднородности геологической среды (отличный от веса по Динику); тектонические силы, направленные горизонтально и порою несколько раз превышающие вертикальные силы (вес массива); изменяющиеся по глубине, а по некоторым предположениям они имеют остаточные величины на земной поверхности.

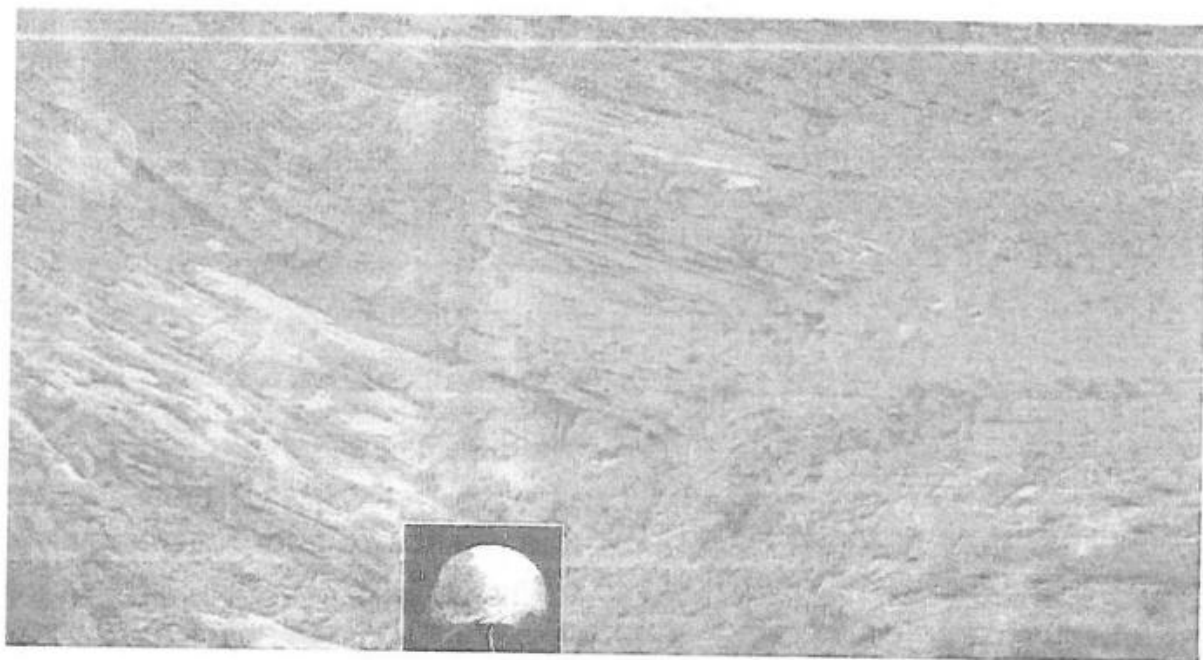


Рис. 2. Пример прохождения протяженного транспортного тоннеля через анизотропный горный массив наклонного и мелкослоистого строения

Рудное тело, которое имеет наклонно-слоистое строение с углом наклона φ_1 , может располагаться, в свою очередь, в скальном массиве, который тоже имеет наклонно-слоистое строение с другими углами наклонов φ_2 (рис. 3). Естественно, вследствие многовекового геостатического и тектонического сжатия нижние и верхние границы рудного тела находятся в жестком контакте со скальной породой.

Теперь изложим конечноэлементный алгоритм составления матрицы пластичности элемента по Ямаде применительно к определению пластических зон вокруг выработки в транспортном массиве

Уравнение статического равновесия с учетом геостатических и тектонических сил составляем по общеизвестному правилу МКЭ в виде /5/.

$$[R] \cdot \{U\} = \{F\} + \{T\}, \quad (1)$$

где $[R]$ – матрица жесткости системы; $\{U\}$ – вектор перемещений; $\{F\}, \{T\}$ – векторы гравитационных и тектонических сил. Система уравнений (1) решается любым из численных методов, применяемых в МКЭ. Компоненты деформации и напряжений вычисляются с помощью матричных соотношений

$$\{\varepsilon\} = [B]\{U\}, \quad (2)$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}, \quad (3)$$

где $\{\varepsilon\}$ и $\{\sigma\}$ – векторы компонент деформации и напряжений и $[D]$ – матрица упругих характеристик, состоящая из упругих постоянных для трансропного массива.

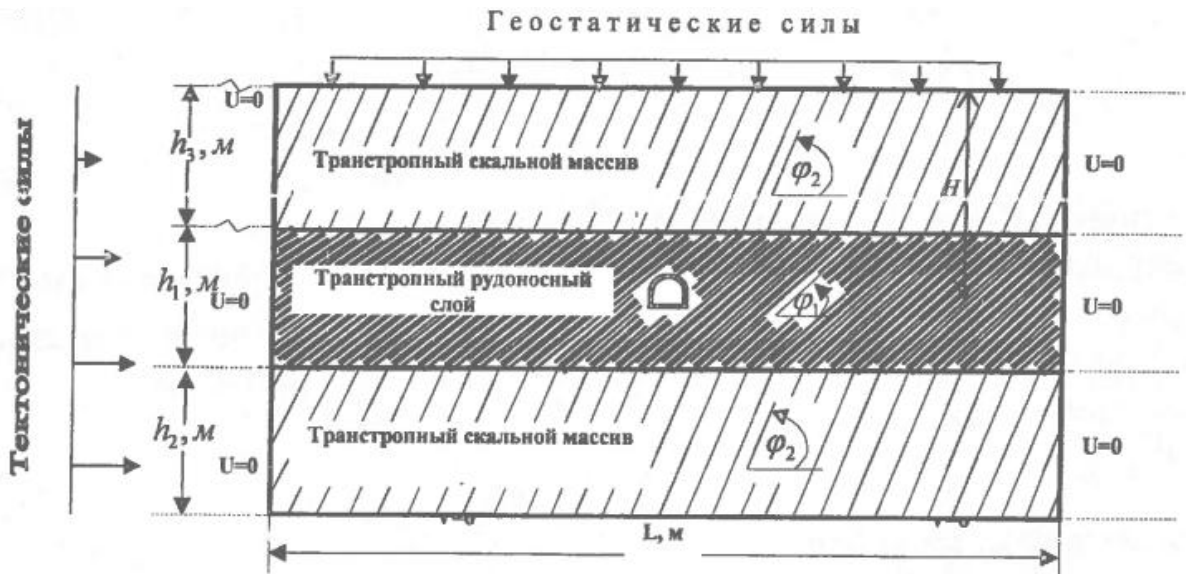


Рис. 3. Схема расположения выработки в неоднородно трансропном массиве

В упругопластических задачах для пластических областей часто вызывает затруднения составить матрицу пластичности элемента в явном виде. И здесь применяются различные подходы. Нам кажется, что среди всех подходов самым удобным является прямое составление матрицы пластичности по методу И. Ямады, Н. Июшимуры и Т. Сакураи. Этот подход почему-то не приводится в литературе по МКЭ. Известно, что в теории приращений пластической деформации уравнения равновесия МКЭ записываются в виде /9/

$$[R]\{dU\} = \{dF\}, \quad (4)$$

где $[R]$ – матрица упругопластической жесткости системы, $\{dU\}$ – приращение перемещений, $\{dF\}$ – приращение нагрузок. Поскольку матрица $[R]$ в данном подходе формируется суммированием для упругой области матрицы жесткости элементов (МЖЭ) $[k]$ и для пластической области из матрицы пластичности элемента (МПЭ) $[k]^p$, то для удобства представим ее в виде

$$[R] = \sum_{q=1}^N ((k-2) * [r]^q + ((k-1) * [r]^p), \quad k = 1, 2 \quad (5)$$

Здесь $k=1$ соответствует упругим, $k=2$ – пластическим элементам, q – номера конечных элементов. МЖЭ и МПЭ составляются обычными правилами МКЭ с помощью матрицы упругости $[D]^e$ и пластичности $[D]^p$. Структура матрицы упругости $[D]^e$ в МКЭ широко известна и имеет следующий вид/9/.

$$[D]^e = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & & & & \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Матрица пластичности составляется по закону Прандтля-Рейсса. Матрицы жесткости элементов $[r]^e$ и $[r]^p$ при применении конечных элементов треугольной формы вычисляются с помощью следующих уравнений:

для упругого состояния

$$[r]^e = \int [B]^T [D]^e [B] dV, \quad (dV = t dx dy) \quad (7)$$

для пластического состояния

$$[r]^p = \int [B]^T [D]^p [B] dV, \quad (8)$$

где $[B]$ – матрица базисных функции; $[B]^T$ – транспонированная матрица $[B]$.

Для пластического состояния Y Yamada и др. /10/ получили следующую симметричную матрицу:

$$[D]^p = [D]^e - \frac{2G}{S} \begin{bmatrix} \sigma_x'^2 & & & & & \\ \sigma_x' \sigma_y' & \sigma_y'^2 & & & & \\ \sigma_x' \sigma_z' & \sigma_y' \sigma_z' & \sigma_z'^2 & & & \\ \sigma_x' \tau_{yz} & \sigma_y' \tau_{yz} & \sigma_z' \tau_{yz} & \tau_{yz}^2 & & \\ \sigma_x' \tau_{zx} & \sigma_y' \tau_{zx} & \sigma_z' \tau_{zx} & \tau_{yz} \tau_{zx} & \tau_{zx}^2 & \\ \sigma_x' \tau_{xy} & \sigma_y' \tau_{xy} & \sigma_z' \tau_{xy} & \tau_{yz} \tau_{xy} & \tau_{zx} \tau_{xy} & \tau_{xy}^2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $\sigma_x', \sigma_y', \sigma_z'$ – компоненты девиатора напряжения; $\tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}$ – касательные напряжения.

Вычисляется параметр S :

$$S = (2/3)\bar{\sigma}^2 \left(\frac{H'}{3G} + 1 \right) \quad (10)$$

где $H' = d\bar{\sigma} / d\bar{\varepsilon}^p$, $\bar{\sigma}^2 = 3/2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + 2\tau_{yz}^2 + 2\tau_{zx}^2 + 2\tau_{xy}^2)$

$$d\bar{\varepsilon}^p = \sqrt{2/3(d\varepsilon_x^2 + d\varepsilon_y^2 + d\varepsilon_z^2 + 1/2(\gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2 + \gamma_{xy}^2))}$$

В этих выражениях G – модуль сдвига; H' – наклон кривой интенсивности напряжений $\bar{\sigma}$; $d\varepsilon^p$; $d\varepsilon_x^p, d\varepsilon_y^p, d\varepsilon_z^p, \gamma_{yz}^p, \gamma_{zx}^p, \gamma_{xy}^p$ – пластические деформации. Напряжения и полная деформация получаются интегрированием величин приращений, вычисленных на каждом этапе приращения нагрузок. Процедуру применения такого подхода алгоритма Y. Yamada изложил в работе /10/.

Список литературы

1. Ержанов Ж.С., Айталиев Ш.М., Масанов Ж.К. Устойчивость горизонтальных выработок в наклонно-слоистом массиве. – Алма-Ата, 1971: – 160 с.
2. Ержанов Ж.С., Айталиев Ш.М., Масанов Ж.К. Сейсмонапряженное состояние подземных сооружений в слоистом анизотропном массиве. – Алма-Ата, 1980. – С. 206.
3. Ескалиев М.Е., Баймахан Р.Б., Мурзабеков Г.Т., Кожамкулова Ж.Ж. Влияние внутреннего давления на контуре полости на размер упругопластических зон в мелкослоистом массиве // Вестник КазГУ. Серия: математика, механика, информатика. – 2002. – №1(26). – С.102-107.
4. Салгараева Г.И. Жерасты казбаларынын кернеулик-деформацияланган куйне массивтин геологиялык бузылуларынын асери. Автореф. ... дисс. канд. физ.-мат. наук. – Алматы, 2004. – С. 24.
5. Баймахан Р.Б. Расчет сейсмонапряженного состояния подземных сооружений в неоднородной толще методом конечных элементов / Под ред. Ш.М. Айталиева. – Алматы, 2002. – С. 232.
6. Рысбаева Г.П. Закономерности трещинообразования на контуре подземного сооружения в анизотропном массиве: Автореф. ... дисс. канд. физ.-мат. наук. – Алматы, 2010. – 21 с.
7. Сейнасинова А.А. Напряженное состояние слабосвязного массива в окрестности подземной выработки с учетом естественных и искусственных неоднородностей: Автореф. ... дисс. канд. физ.-мат. наук. – Алматы, 2010. – 88 с.
8. Кожамкулова Ж.Ж. Упругопластическое состояние выработки в неоднородном массиве со специальными условиями пластичности: Автореф. ... дисс. канд. физ.-мат. наук. – Алматы, 2010. – 21 с.

9. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – С. 541.
10. Yamada Y., Yoshimura N., Sakurai T. Plastic Stress-strain Matrix and Its Application for the Solution of Elasto-Plastic Problems by the Finite Element Method. Ibid. Vol.10, 1968. - P. 343.