УДК 625.42

А.Х. АБДУЖАБАРОВ, Н.М. ХАСАНОВ
E.mail. ksucta@elcat.kg

РАСЧЕТ СВОДА ТОННЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ

Татаал структуралуу, жаранкалары бар тоо – катмарынын чыңалуу абалынын математикалык модели каралат. Серпилгичтик теориясынын тегиздиктеги маселеси чектелген элементар методу менен чыгарылат.

Рассматривается математическая модель напряженного состояния горного массива сложной структуры с тектоническими нарушениями. Плоская задача теории упругости решена методом конечных элементов.

The mathematical model of the intense condition of hills of complex structure with tectonic infringements is considered. The flat problem of the theory of elasticity is solved the method of the finite elements.

Во всем мире наблюдается резкое увеличение строительства тоннелей на дорогах. Это также осуществляется во всех республиках: Таджикистане, Кыргызстане, Узбекистане и Казахстане, где высокая сейсмичность. Для обеспечения непрерывной связи северных и южных регионов республики Таджикистан ведется строительство автодорожного тоннеля «Шахристан», длиной 5,2 км, под Гиссарским хребтом, в обход Шахристанского перевала. Район строительства относится к 9 бальной сейсмичности.

Необходимо определить величины напряжений в грунте основания и вокруг свода тоннеля и координаты где они достигают предельных значений в зависимости от изменения физико-механических свойств грунтов.

Расчеты произведены методом конечных элементов (МКЭ). Положительной стороной этого метода являются: простота получения систем разрешающих уравнений, возможность сгущения сетки элементов в ожидаемых местах высоких градиентов исследуемого параметра и задания любых граничных условий, а также учет неоднородных деформационных и плотностных свойств материала, легко программируются на алгоритмических языках [1]:

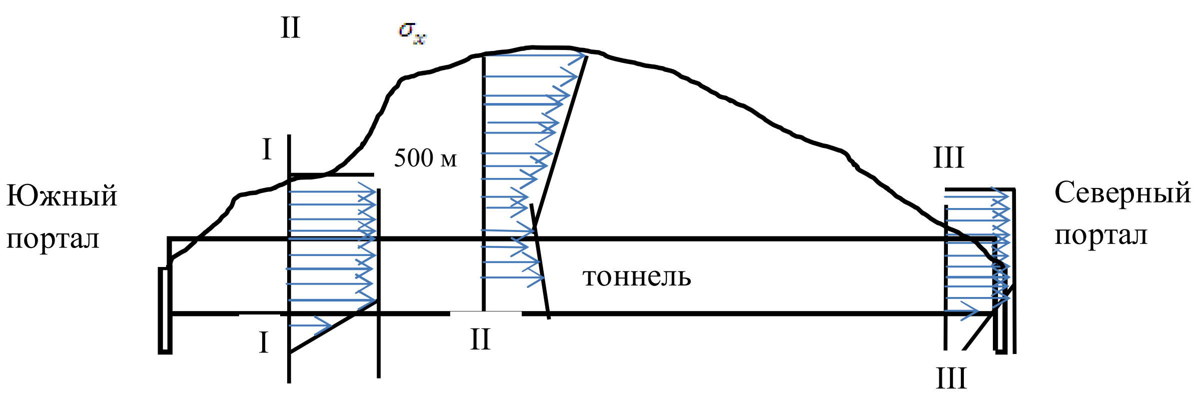

Рис.1. Расчетная схема тоннеля «Шахристан» и эпюры напряжений в трех сечениях

Граничные условия для элементов по мере заглубления изменялись по линейному закону и описывается законом Гука [2]

$$\sigma = (D\varepsilon)К \quad (1)$$

σ – компоненты напряжения;
ε – компоненты деформации;
D – матрица упругости
К – коэффициент упругости.
$К = К_З \times К_с$
Где $К_З$ – коэффициент запаса устойчивости с учетом сейсмического воздействия;
$К_с$ – коэффициент сейсмичности, принимаемый зависимости от интенсивности расчетной сейсмичности.

$D = [dij]$, $(ij = 1,2,3)$ – матрица упругости.

$$\sigma = \{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}\}^T, \ \varepsilon = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\}$$

Линейная связь между компонентами тензора и напряжений имеет вид:

$$\left.\begin{matrix} d_{11} \\ d_{12} \end{matrix}\right\} a_{11} = \left\{\begin{matrix} \cos^4 \varphi \\ \sin^4 \varphi \end{matrix}\right. + 2(a_{13} + 2a_{55})\sin^2\varphi\cos^2\varphi + a_{33}\left\{\begin{matrix} \cos^4\varphi \\ \sin^4\varphi \end{matrix}\right. ;$$

$d_{22} = a_{13}[a_{33} - a_{11} - 2(a_{13} + a_{55} + 2)] \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi;$

$d_{13}[a_{11} \cos^2 \varphi - a_{33} \sin^2 \varphi - (a_{13} + 2a_{55}) \cos^2 \varphi] \sin \varphi \cos \varphi;$

$d_{13} = [a_{11} \sin^2 \varphi - a_{33} \cos^2 \varphi - (a_{13} + 2a_{55}) \cos^2 \varphi] \sin \varphi \cos \varphi;$

$d_{33} = a_{55} + [a_{11} + a_{23} - 2(a_{13} + 2a_{55})] \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \ (dij = dji);$

(2)

$a_{11} = a_{22} = E_1 (n - \gamma_2^2)(1+\gamma_1) - 2\gamma_2^2$

$a_{12} = E_1 (\gamma_1 * n + \gamma_2^2)(1+\gamma_1)[n(1 - \gamma_1) - 2\gamma_2^2]^{-1}$

$a_{13} = E_1\gamma_2[n(1 - \gamma_1) - 2\gamma_2^2]^{-1}$

$a_{33} = E_1(1 - \gamma_1)[n(1 - \gamma_1) - 2\gamma_2^2]^{-1}$

$a_{44} = a_{55} = G_2 * n = E_1 * E_2^{-1}$

где E –модуль упругости, $\gamma_к (к = 1,2)$ – коэффициент пуассона G_2 – модуль сдвига, φ - угол наклона откоса горного перевала у портала тоннеля.

Аналогично ворожение матрицы в средней части тоннеля при $\varphi = 0$, $E_n = E$, $\gamma_к = \gamma$

$G_2 = E[2(1 + \gamma)]^{-1}$ и имеет вид:

$$[D] = \frac{E(1-\gamma)}{(1+\gamma)(1-2\gamma)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\gamma}{1-\gamma} & 0 \\ \frac{\gamma}{1-\gamma} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\gamma}{2(1+\gamma)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Для решения напряженно-деформированного состояния обделки тоннеля используем принцип стационарности полной потенциальной энергии деформируемых систем Лагранжа, система находиться в равновесии, сумма работ всех внутренних и внешних сил равно нулю:

$U + \gamma = 0$

Согласно МКЭ соотношение, определяющие функции формы имеют вид:

$$h_1 = -0{,}25\,(1-\xi)(1+q)(\xi - q + 1)$$
$$h_2 = 0{,}5\,(1-q^2)(1-\xi)$$
$$h_3 = -0{,}25(1-\xi)(1-q)(\xi+q+1)$$
$$h_4 = 0{,}5(1-\xi)(1-q)$$
$$h_5 = 0{,}25(1+\xi)(1-q)(\xi-q-1)$$
(4)
$$h_6 = 0{,}5\,(1-q^2)(1+\xi)$$
$$h_7 = 0{,}25(1+\xi)(1+q)\,(\xi + q - 1)$$
$$h_8 = 0{,}5(1-\xi^2)(1+q)$$

Функции перемещений в пределах элемента:

$$U = \sum_{i=1}^{q} h_i\, u_i; \qquad \gamma = \sum_{i=1}^{q} h_i \gamma_i \qquad (5)$$

где U, γ – перемещение любой точки, $u_i, v_i, i = 1{,}8$ смещение q узлов.

Деформации в пределах элемента определяются путем дифференцирования:

$$\varepsilon x = \frac{du}{dx};\ \ \varepsilon y = \frac{dv}{dy};\ \gamma_{xy} = \frac{dv}{dy} + \frac{dv}{dx}; \text{ или } \{\varepsilon\} = [B]\,\{\delta\}$$

где $\{\delta\} = \{u_1,\ v_1,\ u_2,\ v_2 \ldots\ldots u_8,\ v_8\}$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{dh_1}{d_x} & 0 & \frac{dh_2}{d_x} & 0 & \ldots & \frac{dh_8}{d_x} & 0 \\ 0 & \frac{dh_1}{d_y} & & 0 & \frac{dh_2}{d_y} & \frac{dh_8}{d_y} & \\ \frac{dh_1}{d_y} & \frac{dh_1}{d_x} & \frac{dh_2}{d_y} & \ldots & & \frac{dh_8}{d_y} & \frac{dh_8}{d_x} \end{bmatrix} \qquad (6)$$

Матрица жесткости элемента вычисляется с помощью двойного интеграла:

$$[K^e] = t\int_{-1}^{1}\int_{1}^{1}[B]^T[D][B]\det[Y]\,d\varphi\, d\mathcal{E}$$

Интеграл после применения квадратуры Гаусса – Лежандра приводится к виду:

$$[K^e] = t\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} N_i H_5 [B]^t [D]\,[B]\ /\ det[Y]\ / \qquad (8)$$

где: H_i , H_j (I, j = 1,2,3) весовые коэффициенты n – количество точек интегрирования

Матрица жесткости системы [K] образуется путем суммирования по всем – m элементам матрицы жесткости:

$$[K] = \sum_{i=1}^{m}[K^e] \qquad (9)$$

Если известна матрица жесткости системы [K], то легко получается основная система алгебраических уравнений, связывающие узловые силы с узловыми перемещениями:

$$[K]\{\gamma\} = \{F\} \qquad (10)$$

где: γ и F векторы перемещения и сил всех узлов. Система алгебраических уравнений решается методом последовательного исключения по Гауссу.

На основе изложенного алгоритма была составлена программа и проведены расчеты с целью выяснения влияния сейсмичности в зависимости грунтовых условий на весь грунтовый слой нахождения ствола тоннеля (см. рис. 1).

Наибольшие напряжения в грунте в верхней части и в порталах тоннеля, в средней части наименьшие смещения свода, что позволяет сделать вывод, что на 9 баллов нужно рассчитывать портальную часть свода тоннеля на длину до 100 метров, далее 100-200 метров на 8 балльную расчетную сейсмичность, а среднюю часть достаточно рассчитать на 7 балльную расчетную сейсмичность. Эти результаты имели подтверждение при модельных экспериментах на сейсмоплатформе центробежного моделирования Института механики и сейсмостойкости сооружении АН Узбекистана. Анализ последствий сильных землетрясений многих стран подтверждают повреждение сводов тоннелей в основном в портальной части. При проектировании тоннелей следует выбирать более крутые косогоры, а пологие косогоры увеличивают длины опасных участков при сейсмических воздействиях.

Список литературы

1. Клаф Р.В. Метод конечных элементов в решении плоской задачи теории упругости. М.: Стройиздат. 1967.
2. Ержанов Ж.С., Айталиев Ж.М., Масанов Ж.К. Устойчивость горизонтальных выработок в наклонно-сложном массиве. Алма-Ата, 1971, с 160.