УДК624.15.

Салямова К.Д., д.т.н., проф., Хўжакулов М.Ж. магистер.
Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз Ташкентский Государственный Транспортный университет, г.Ташкент,Узбекистан

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЯ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Для определения напряжений и перемещений точек сечения тоннеля (рис.1а) использован численный метод конечных элементов, заключающийся в аппроксимации исследуемой сплошной среды, которая в данном случае представляет собой обделку тоннеля, разбиваемыми треугольными или прямоугольными элементами, соединенными в узлах (рис.1б). Каждый узел имеет по два возможных перемещения - горизонтальное и вертикальное, за исключением тех узлов, которые приходятся на жесткое основание и жесткие боковые грани, где точки неподвижны. При этом каждый элемент имеет те же физические свойства, что и рассматриваемая среда в месте расположения элемента. От выбора сетки разбиения (мелкой или частой) зависит порядок полученной системы и количество искомых неизвестных, которыми являются перемещения узловых точек. Выбранная сетка разбиения показана на рис.1б, а число узлов – 66.

Для нахождения перемещений узлов составляется система уравнений, представляющая собой условие равновесия всей области в целом и каждой узловой точки в отдельности. Согласно условию равновесия сходящейся системы сил, сумма всех сил, приложенных в каждой из 66 точек, равна нулю

$$\sum_i \overline{F}_i = 0 \qquad (1)$$

Все действующие нагрузки в плоскости сечения – активные силы и реакции – прикладываются в узловых точках и рассматривается равновесие всей области, которое соблюдается при условии, если соблюдается равновесие каждой узловой точки. К активным силам относятся: собственный вес, давление, оказываемое грунтом на стенки канала, сила инерции при сейсмике и др. распределяются по узловым точкам. Считается, что материал обделки (бетон) обладает упругими свойствами. Тогда в узловые точки добавляются и силы упругости, являющиеся по сути, реакциями на деформацию сечения под действием внешних сил.

По разработанной методике, программы для численного решения задач с применением метода конечных элементов вариационная задача сводится к решению алгебраической системе уравнений равновесия сечения тоннеля, находящегося под действием внутренних и внешних сил. В ходе решения определяются перемещения узлов, по ним с помощью уравнений Коши –

деформации конечных элементов, и, наконец, с помощью закона Гука – компоненты напряжений.

а) б)

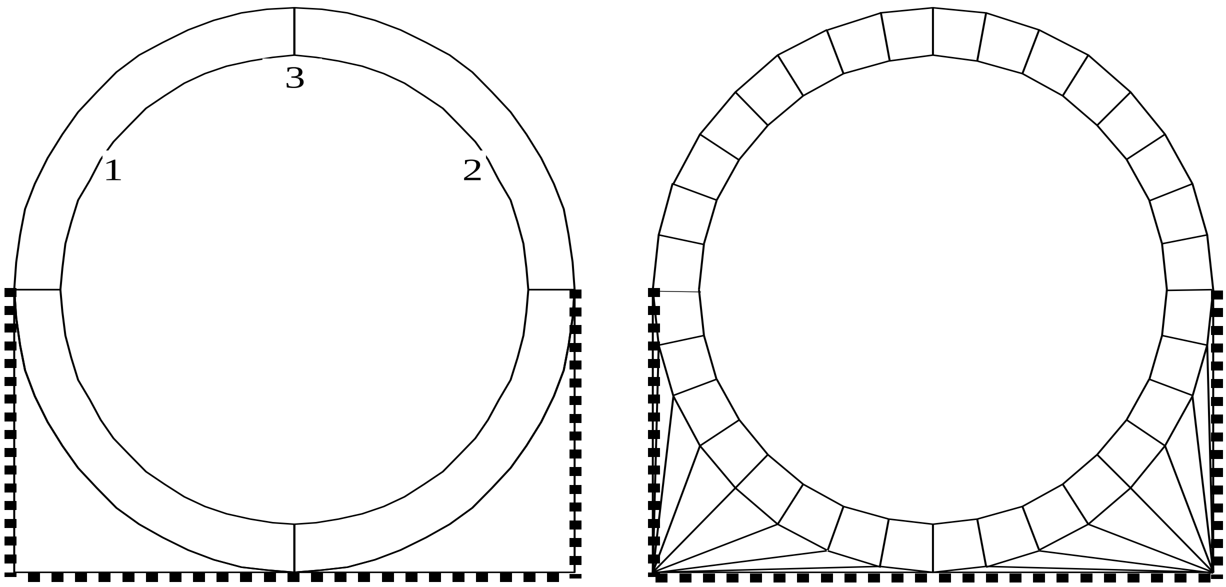

Рис.1. Сечение подводящего тоннеля Туполангской ГЭС (а) и конечно-элементная дискретизация обделки прямоугольными и треугольными элементами (б)

Для выполнения расчета напряжений в точках обделки при указанных нагрузках и сейсмическом воздействии были использованы следующие характеристики облицовочного материала - Бетон-В-15: модуль упругости Е=25000МПа; плотность ρ=2500кг/м^3; коэффициент Пуассона ν=0,3. Кроме этого, поскольку исследуемое сечение тоннеля находится на глубине 80м от свободной поверхности грунта, по его боковой поверхности распределяется давление грунта f, определяемое по формуле $f = \gamma H$, где $\gamma = 2500 кгс/м^3$ - удельный вес окружающего грунта; Н=80м – глубина заложения тоннеля. В результате получаем f=2500x80=2x10^{5}кгс/м^2=2x10^{6}Па=2МПа.

Силы упругости в узлах i-го элемента представляют собой обобщенную реакцию на единичные перемещения соседних узлов элемента. При этом коэффициенты жесткости представляются квадратной матрицей 6-го порядка (для треугольного элемента) или 8-го (для четырехугольного) – по числу узловых перемещений в элементе и называется матрицей жесткости элемента$[k]^r$. Чтобы выполнить расчет необходимо иметь матрицы жесткости отдельных элементов. Матрица жесткости устанавливает соотношение между узловыми силами (силами упругости) и перемещениями по направлению этих сил и приведены в монографиях по МКЭ, например [1,2].

Рассматривая равновесие всех узлов системы, получается система линейных алгебраических уравнений, в которой коэффициентами при искомых перемещениях являются элементы общей матрицы жесткости, а свободными членами будут сосредоточенные по узлам нагрузки от внешних сил – веса и бокового давления на поверхность обделки тоннеля от окружающего грунта, а также горизонтально направленной сейсмической силы при 9-ти балльном землетрясении равной $S_{\max} = 0{,}4Q$.

Общая матрица жесткости [K] получается объединением матриц жесткости всех конечных элементов $[k]^r$. Процедура формирования общей матрицы жесткости выполняется автоматически с использованием таблицы индексов. Такой алгоритм изложен в работе [3-4] -

$$[\mathrm{K}] = \sum_r [k]^r .$$

Общая матрица жесткости определяет силы упругости, возникающие в узлах модели в зависимости от перемещений узлов {q} -

$$\overline{F}_{упр} = [K]\{q\} \qquad (2)$$

Итак, силы упругости представляют обобщенную реакцию на перемещения узлов, вызванные действием внешних сил: собственный вес Q, сейсмическая сила $S_{\max} = 0{,}4Q$ и давление на поверхность от окружающего грунта $\{\boldsymbol{f}\}$. Все силы распределяются по узлам. При этом собственный вес равномерно распределяется по всем узлам элемента и имеет вертикальное направление, сейсмическая сила направлена горизонтально, а давление, приложенное к узлам на поверхности тоннеля , направлено ортогонально этой поверхности.

Таким образом, все указанные силы, действующие в плоскости рассматриваемого сечения тоннеля уравновешены в каждой узловой точке, следовательно, выполняется уравнение (1). Подставляя в (1) все указанные силы, получим матричную систему уравнений, каждое из которых выражает условие равновесия каждого узла системы под действием сходящихся сил: упругих (от деформации элементов), объемных (от веса и сейсмического воздействия) и поверхностных (от окружающего грунта)

$$[K]\{q\} = \{\mathrm{F}\} \qquad (3)$$

где $\{\mathrm{F}\}=\{\mathbf{Q}\}+\{\boldsymbol{f}\}+\{\mathbf{S}_{0\max}\}$; вектор $\{q\}$ – искомые перемещения узлов системы.

Система алгебраических уравнений (3) имеет высокий порядок, равный общему числу узловых перемещений в системе. Решение этой системы, т.е. нахождение неизвестных узловых перемещений $\{q_i\}$ выполнено с использованием метода Гаусса по заложенной в компьютер готовой программе, доступной для пользователя.

По полученным в ходе решения системы (3) узловым перемещениям $\{q_i\}$ находятся перемещения внутри элементов по формуле [1,2]

$$\{u\}^r = [U]^r \{q\}^r \qquad (4)$$

Здесь и далее индекс rотносится к r–му элементу, а матрица $[U]^r$ – выражает связь между узловыми перемещениями и перемещениями точек внутри r–го элемента.

Далее, с помощью соотношений Коши, определяются компоненты деформации $\{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}\}^r$ в элементе r-

$$\varepsilon_x^r = \frac{\partial u^r}{\partial x}$$
$$\varepsilon_y^r = \frac{\partial v^r}{\partial y}$$
$$\gamma_{xy}^r = \frac{\partial u^r}{\partial y} + \frac{\partial v^r}{\partial x}$$

Здесь $\bar{u}^r = \{u^r, v^r\}$ - горизонтальные и вертикальные перемещения точки тела с координатами $\{x, y\}$ внутри r–$го$ элемента

И, наконец, по полученным деформациям с использованием закона Гука, определяется уравнение состояния, выражающее зависимость между компонентами напряжений $\{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}\}^r$ и деформаций $\{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}\}^r$ для упругой среды

$$\begin{aligned} \sigma_x^r &= \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \\ \sigma_y^r &= \frac{E}{1-\nu^2}(\nu\varepsilon_x + \varepsilon_y) \\ \tau_{xy}^r &= \frac{E}{2(1+\nu)}\varepsilon_{xy} \end{aligned} \quad \text{или} \quad \{\sigma\}^r = \begin{pmatrix} \sigma_x^r \\ \sigma_y^r \\ \tau_{xy}^r \end{pmatrix} = [C]\{\varepsilon\}^r \tag{5}$$

где E – модуль Юнга, ν - коэффициент Пуассона, а матрица С для изотропного материала выражает зависимость между напряжениями и деформациями (закон Гука) в виде

$$[C] = \frac{E}{1-\nu^2}\begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \tag{6}$$

Таким образом, кратко изложенная процедура метода конечных элементов, используемая при расчете, позволяет определить компоненты напряжения в элементе$\{\sigma\}^r = \{\sigma_x^r, \sigma_e^r, \tau_{xy}^r\}$ через найденные из алгебраической системы уравнений (3) узловые перемещения $\{q\}^r$.

При расчете напряжений в сечении тоннеля использовался доступный для пользователя комплекс вычислительных программ.

Были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния сечения тоннеля с бетонной обделкой при сейсмическом воздействии с учетом глубины заложения.

Все компоненты напряжений позволяют сделать определенные выводы относительно опасных зон в обделке, т.е. зон, где возможно превышение допустимых напряжений при сейсмическом воздействии.

Изложенный вкратце метод конечных элементов применен к определению перемещений (u - горизонтальных и v - вертикальных) и изменению при этом формы сечения тоннеля . Было рассмотрено два варианта воздействия: 1 – собственный вес и боковое давление окружающего грунта и 2) – вес, боковое давление и горизонтальная сейсмическая сила, соответствующая 9-балльному землетрясению. При расчетах учитывались характеристики бетона В-15 ($E_б$=30000МПа; $\gamma_б$=2000 кгс/м^3; коэффициент Пуассона ν=0,15), а также глубина (80 м) заложения тоннеля в грунте с плотностью $\gamma_{гр}$=2500 кг/м^3.

На рис.1б показано разбиение модели канала на конечные элементы. По существующим программам была составлена и решена алгебраическая система уравнений (3), где в первом варианте расчета учитывались только 2 слагаемых в правой части: вес - {Q} и боковое давление грунта - {f}, а во втором дополнительно учитывалась и сейсмическая сила $\{S_{0max}\}$. По найденным в ходе решения системы (3) узловым перемещениям {q} получено деформированное состояние сечения, приведенное в одинаковом масштабе (1:500) для двух вариантов воздействия (рис.2). Деформированное состояние изображено на фоне недеформированной сетки и представляет в первом случае просадку купола, вызванную давлением окружающего грунта (рис.2а). а во втором - просадку, сопровождающуюся отклонением купола в направлении сейсмического воздействия (рис.2б).

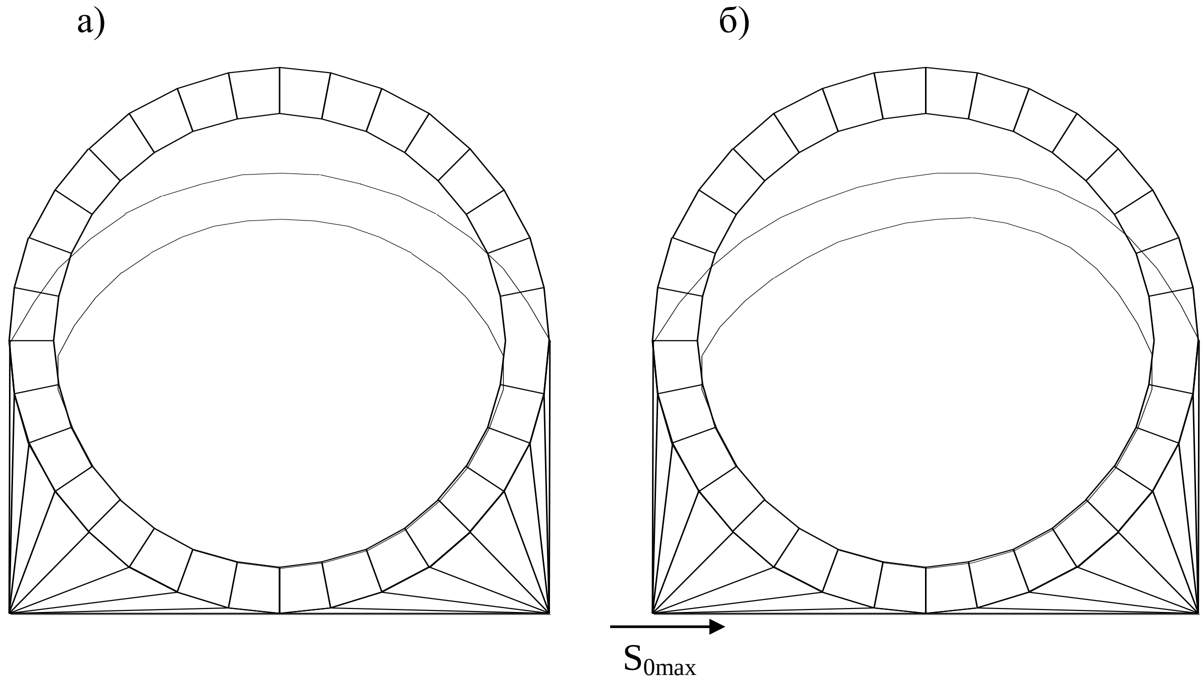

Рис.2. Деформация сечения тоннеля с учетом собственного веса и давления окружающего грунта (а) и с дополнительным учетом сейсмической силы (б)

Выводы:

- разработана постановка решения статических задач по определению плоского напряженно-деформированного состояния обделки тоннеля при нагрузках;
- решение задач по определению деформационного состояния обделки при учете сил гравитации и сейсмическом воздействии показало, что симметричная относительно вертикали нагрузка вызывает симметричную деформацию сечения (рис.2а), тогда как при дополнительной горизонтальной сейсмической силе купол обделки отклоняется в горизонтальном направлении воздействия. Нижняя половина облицовки жестко закреплена и поэтому остается неподвижной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике.- М.:Мир, 1975. -541 с.
2. Розин Л.А. Расчет гидротехнических сооружений на ЭЦВМ. Метод конечных элементов. Л: Энергия.-1971.-214с.
3. Салямова К.Д., Руми Д.Ф. Трансформация напряженно-деформированного состояния основания сооружения при неравномерном увлажнении грунта.//Вестник БГТУ им.В.Г.Шухова.2016.№5.-С.94-96
4. Салямова К.Д., Турдикулов Х.Х. Статическое напряженное состояние высокой грунтовой плотины с учетом данных натурных наблюдений. //Узб.Ж.Проблемы Механики.№2.2019.-С.-30-36.