

УДК 624.

Салямova К.Д., д.т.н., проф., Менглиев И. магистрант
Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН Руз,
Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОННЕЛЯ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С УЧЕТОМ ГЛУБИНЫ ЗАЛОЖЕНИЯ

Прогноз напряженно-деформированного состояния (НДС) бетонных конструкций в гидротехнической комплексной системе, имеющих различную глубину заложения, является важной задачей, так как их повреждение при сейсмическом воздействии может явиться серьезной проблемой для народного хозяйства.

В данной работе исследовано НДС бетонной обделки тоннеля при различной глубине заложения при сейсмическом воздействии. При расчетах используются статический и динамический подходы.

При статическом подходе принята теория определения сейсмических сил, возникающих в сооружениях при землетрясении, разработанная японским ученым Ф.Омори [1]. Согласно этой теории, сейсмическая сила определяется как сила инерции по формуле:

$$S_{\max} = m \ddot{y}_{o \max} ,$$

где:

m – масса сооружения;

$\ddot{y}_{o \max}$ – максимальное сейсмическое ускорение в основании. Или, учитывая коэффициент сейсмичности k_c и вес $Q = mg$,

$$S_{\max} = \frac{\ddot{y}_{o \max}}{g} Q = k_c Q ,$$

Коэффициент сейсмичности в наших исследованиях принимается равным 0,4, что соответствует 9-балльному землетрясению.

Такой подход применим для конструкций высокой жесткости. При расчете бетонной обделки тоннеля на сейсмическое воздействие, заменяем действительной схемой с расчетной конечно-элементной дискретизацией, в каждой узловой точке которой сосредоточена масса, находящаяся под действием сходящихся сил – веса, сейсмической силы и силы упругости, являющейся реакцией связи между узловыми точками системы.

Предполагается, что сейсмическое воздействие действует горизонтально и направлено перпендикулярно оси протяженной конструкции. Это позволяет решать задачу в плоской постановке – исследовать НДС, возникающее в плоском сечении обделки тоннеля под действием плоской системы сил,

приходящихся на узлы исследуемого сечения: вес, сейсмическое воздействие, силы упругости и боковое давление окружающего грунта.

Для определения НДС сечения тоннеля использован метод конечных элементов [2] с аппроксимацией сплошной обделки треугольными и четырехугольными элементами, общие узлы которых имеет два возможных перемещения в плоскости сечения. Исключение составляют узлы, приходящиеся на жесткое основание и нижнюю жестко закрепленную часть боковых граней. Полученная методом конечных элементов алгебраическая система уравнений определяет перемещения, деформации и напряжения в элементах бетонной обделки тоннеля.

Для выполнения расчетов были использованы следующие характеристики облицовочного материала – бетон-В-15: модуль упругости $E=25000\text{МПа}$; плотность $\rho=2500\text{кг/м}^3$; коэффициент Пуассона $\nu=0,3$.

Учитываемые при расчете нагрузки – вес – Q , сейсмические силы – S (если учитывается сейсмика) в узлах и боковое давление P на поверхности обделки тоннеля, определяется по формуле $P=\gamma H$, где H – глубина заложения, γ – удельный вес окружающего грунта.

Все указанные силы, действующие в плоскости рассматриваемого сечения, уравниваются силами упругости. Разрешающая матричная система уравнений выражает условие равновесия сил: упругих (от деформации элементов), объемных (от веса и сейсмического воздействия) и поверхностных (давление окружающего грунта)

$$[K]\{q\} = \{F\} \quad (1)$$

где:

$\{F\}=\{Q\}+\{P\}+\{S_{0\max}\}$ – вектор;

$\{q\}$ – искомые перемещения узлов системы, по которым определяются напряжения в сечении обделки тоннеля в зависимости от различной нагрузки.

При динамическом воздействии, т.е. с учетом временного фактора, сооружение и все его узловые точки приходят в движение, а все действующие на каждую материальную точку силы, включая силы инерции, согласно принципу Даламбера, в каждый момент времени уравниваются. Таким образом, при проведении динамического расчета в уравнение равновесия (1), помимо указанных выше сил: веса, бокового давления, сил упругости необходимо добавить силы инерции, зависящие не только от максимальной амплитуды ускорения, но и от времени. Тогда правая часть системы (1) будет иметь вид:

$$\{F\}=\{Q\}+\{f\}-[M](\{\ddot{q}(t)\} + \{\ddot{q}_0(t)\}),$$

где:

$\{\ddot{q}(t)\} + \{\ddot{q}_0(t)\}$ представляет абсолютное ускорение узловых точек, состоящее из переносного (ускорение основания) $\ddot{q}_0(t)$ и относительного ускорения точки $\{\ddot{q}(t)\}$.

Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экр}}$ – характеристика напряженного состояния, по которой судят о возможном переходе тела из упругого состояния в состояние разрушения, определяется по формуле:

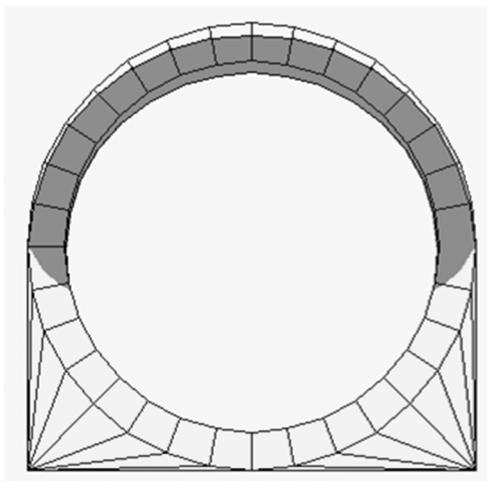
$$\sigma_{\text{экр}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}.$$

Распределение напряжений в сечении обделки при различной глубине заложения и с учетом сеймики показано на рис.1.

На глубине 5 м (рис.1) сейсмическая нагрузка увеличивает напряжения на 50% (с 0,86 МПа до 1,27МПа), а на глубине 1м – уже в 2 раза (с 0,37МПа до 0,72МПа). При этом сдвиг сечения в направлении воздействия становится более выраженным (рис.1б).

Анализ результатов показал, что разница напряжений в обделке тоннеля глубокого заложения при основных нагрузках и при сейсмическом воздействии – незначительна, что объясняется превосходством давления окружающего грунта по сравнению с другими учитываемыми, в том числе и сейсмическими, нагрузками. С уменьшением глубины заложения относительно небольшие напряжения в обделке тоннеля при дополнительной сейсмической нагрузке, резко возрастают, могут явиться причиной повреждения конструкции при землетрясении.

а) $\sigma_{\text{экр макс}} = 0,86 \text{ МПа}$



б) $\sigma_{\text{экр макс}} = 1,27 \text{ МПа}$

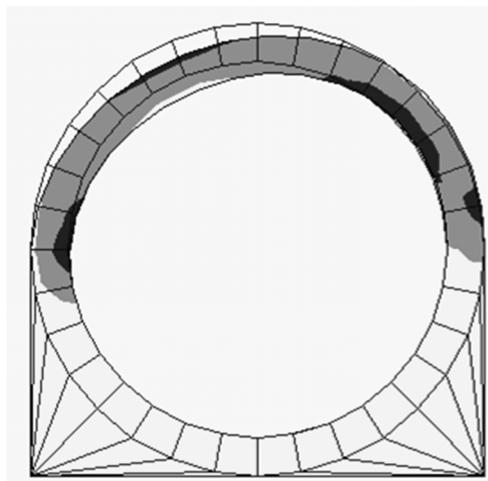


Рис.1. Распределение напряжений в сечении трубы на глубине 5м (а) и с дополнительным учетом сейсмической силы (б)

Таким образом, при основной нагрузке (вес, давление грунта) максимальные напряжения концентрируются на стыке купола с жестко закрепленной нижней частью конструкции, а при дополнительном сейсмическом воздействии, вызывающем сдвиг обделки тоннеля, большие напряжения появляются и в местах наибольшего искривления конструкции.

Проведенные выше расчеты на сейсмические воздействия были выполнены по статической теории, в которой сейсмическая сила, приходящаяся на массу m_i , сосредоточенной в i -ой узловой точке конечно-элементной дискретизации модели, определялась как сила инерции по формуле $S_{i\max} = m_i \ddot{y}_{0\max}$, где m_i – сосредоточенная в i -ом узле масса сооружения, а $\ddot{y}_{0\max}$ – максимальное ускорение основания, не меняющаяся со временем.

При динамическом воздействии, т.е. с учетом временного фактора, сооружение и все его узловые точки приходят в движение, а все действующие на каждую материальную точку силы, включая силы инерции, согласно принципу Даламбера, в каждый момент времени уравниваются. Таким образом, при проведении динамического расчета в уравнение равновесия (1), помимо указанных выше сил: веса, бокового давления, сил упругости необходимо добавить силы инерции, зависящие не только от максимальной амплитуды ускорения, но и от времени. Тогда правая часть системы (1) будет иметь вид:

$$\{F\} = \{Q\} + \{f\} - [M] (\{\ddot{q}(t)\} + \{\ddot{q}_0(t)\}),$$

где:

$(\{\ddot{q}(t)\} + \{\ddot{q}_0(t)\})$ представляет абсолютное ускорение узловых точек, состоящее из переносного (ускорение основания) $\ddot{q}_0(t)$ и относительного ускорения точки $\{\ddot{q}(t)\}$.

Система дифференциальных уравнений движения имеет вид

$$[M] \{\ddot{q}\} + [K] \{q\} = \{Q\} + \{f\} + [M] \{\ddot{q}_0\} \quad (2)$$

где:

$[M]$ – общая матрица масс;

$\{\ddot{q}\}$ – вектор ускорения узлов;

$\{q\}$ – искомые перемещения узлов системы. Остальные обозначения остаются без изменения.

Следующий расчет был выполнен при сейсмическом ускорении основания, задаваемом гармонической функцией:

$$\ddot{q}_0 = 0,4g \sin(62,8t)$$

Здесь 0,4 – коэффициент сейсмичности, соответствующий 9-балльному землетрясению;

g – ускорение свободного падения ($9,8\text{ м/с}^2$);

$62,8\text{ рад/сек}$ – частота воздействия (10 Гц), период $T=0,1\text{ с}$.

Указанное горизонтальное сейсмическое воздействие вызывает поперечные колебания сооружения, т.е. колебания рассматриваемого сечения происходят в своей плоскости. Интенсивность такого воздействия соответствует высокочастотному 9-балльному землетрясению – аналогу Газлийского землетрясения (1976г), преобладающий период которого составлял 0,1с.

Решение системы (2) осуществлялось пошаговым методом Ньюмарка [1] с нулевыми начальными условиями. Перемещения двух симметрично расположенных относительно вертикали точек на куполе бетонного коллектора при таком воздействии представлены на рис.2.

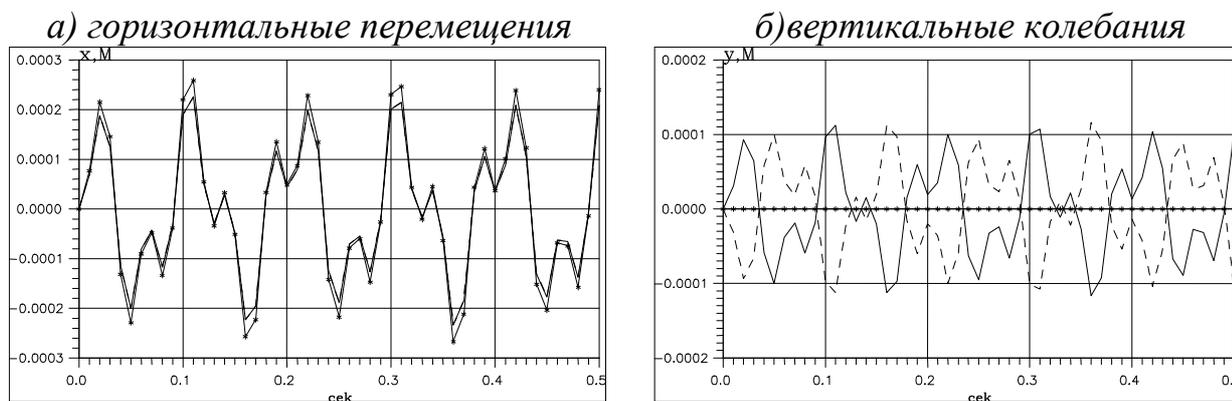


Рис.2. Колебания двух симметрично расположенных точек на обделке тоннеля при сейсмическом воздействии, заданном синтетической акселерограммой Газлийского землетрясения

Результаты показали, что точки верхней части конструкции совершают синхронную вибрацию с частотой воздействия (0,1сек) в горизонтальном направлении, т.е. в направлении воздействия (рис.2а). Вертикальная вибрация (рис.2б) представляет колебания купола с малой амплитудой относительно центральной оси сечения, т.е. колебания симметрично расположенных точек на куполе происходят противофазно.

На основании выполненных расчетов сделано следующее заключение.

Выполненный расчет напряженно-деформированного состояния бетонной обделки тоннеля с различной глубиной заложения с учетом собственного веса, давления окружающего грунта и сейсмического воздействия показал, что при глубоком заложении, сейсмическое воздействие не оказывает значительного влияния на изменение напряжений в бетонной обделке сооружения. И, напротив, сейсмическое воздействие на сооружение мелкого заложения

вызывает значительный рост напряжений, способных привести к разрушению подземных коммуникаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постнов В.А. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций / Постнов В.А., И.Я. Хархурим // Л.: Судостроение. – 1974. – 342 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.:Мир,1975. –541 с.