

## СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ПЛОТИНЫ ИЗ УКАТАННОГО БЕТОНА

Ю.П. ЛЯПИЧЕВ, *д-р техн. наук, профессор*  
*Российский университет дружбы народов*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмостойкость, плотина из укатанного бетона

Кратко рассматриваются методика и результаты расчетов сейсмонапряженного состояния новой конструкции плотины высотой 100 м (заложение откосов 0,5) из укатанного бетона (УБ) и упрочненного цементом камня [1]. Расчеты сейсмостойкости были выполнены на воздействия 8 и 9 баллов по волновой теории: в качестве воздействия использовалась акселерограмма землетрясения с пиковыми горизонтальными и вертикальными ускорениями 0,2 и 0,4g.

Использован метод расчета реакции системы "плотина-основание-водохранилище (ВБ)" на сейсмические воздействия, используемый в ЦСГНЭ – филиале Гидропроекта в расчетах плотин из обычного бетона [2]. При оценке сейсмостойкости системы решается система уравнений движения:

$$[K] \{U\} + [C] \{V\} + [M] \{W\} = \{R_{(t)}\}, \quad (1)$$

где  $[K]$ ,  $[C]$ ,  $[M]$  – матрицы жесткости, демпфирования и масс расчетной области;  $\{U\}$ ,  $\{V\}$ ,  $\{W\}$  – перемещения, скорости и ускорения в фиксированных точках расчетной области,  $\{R_{(t)}\}$  – изменяющееся во времени воздействие.

В задаче не учитывалось влияние гравитационных волн и были упрощены граничные условия между ВБ и плотиной и ВБ и основанием. На этих границах выполняется условие равенства перемещений, нормальных к этим границам, как для твердого тела (плотина и основание), так и для воды. В то же время учитывается передача касательных напряжений на этих границах, что позволяет упростить задачу, отказавшись от введения контактных элементов. Последнее может немного ухудшить НДС плотины, что идет в запас ее сейсмостойкости.

Матрицу демпфирования  $[C]$  представлена состоящей из двух частей, одна из которых пропорциональна матрице масс, а вторая матрице жесткости:

$$[C] = \beta_1 [M] + \beta_2 [K]. \quad (2)$$

Такой подход позволяет подобрать значения параметров  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , удовлетворяющие заданному затуханию на двух фиксированных частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Такое представление матрицы демпфирования позволяет задавать как практически не зависящее от частоты затухание, так и уменьшающееся или увеличивающееся с ростом частоты затухание.

Матрица жесткости зависит от геометрических и физико-механических параметров расчетной области и вида рассматриваемого состояния. Формирование матриц жесткости при использовании различных типов КЭ не вызывает затруднений. Матрица масс в общем случае должна иметь ту же размерность, что и матрица жесткости. Она формируется вместе с матрицей жесткости и базируется на тех же аппроксимирующих функциях.

При прямом интегрировании уравнений (1) равновесие расчетной области рассматривается в дискретных точках временного интервала. Предполагается, что векторы перемещений, скоростей и ускорений момент времени  $t = 0$  известны (начальные условия) и необходимо найти решение (1) на интервале от 0 до  $t$ . Имеющиеся алгоритмы позволяют получить решение в каждый последующий момент времени  $t + dt$ :

$$[K] \{U_{t+dt}\} + [C] \{V_{t+dt}\} + [M] \{W_{t+dt}\} = \{R_{t+dt}\}. \quad (3)$$

Входящие в соотношение (4) перемещения, скорости и ускорения связаны между собой соотношениями:

$$\{V_{t+dt}\} = \{V_t\} + \{0,5W_t + 0,5W_{t+dt}\}dt, \quad (4)$$

$$\{U_{t+dt}\} = \{U_t\} + \{V_t\}dt + \{0,25W_t\} + \{0,25W_{t+dt}\}dt^2. \quad (5)$$

Выражая  $\{W_{t+dt}\}$  из (5) через  $\{U_{t+dt}\}$  и подставляя полученное соотношение в (4) можно получить уравнения для вычисления  $\{W_{t+dt}\}$  и  $\{V_{t+dt}\}$  через неизвестный вектор перемещений  $\{U_{T=dt}\}$ . После подстановки  $\{W_{t+dt}\}$  и  $\{V_{t+dt}\}$  в (3) и выполнения преобразований это уравнение принимает вид:

$$[K]\{U_{t+dt}\} = \{R_{t+dt}\}. \quad (6)$$

Скорость движения частиц плоской волны  $V_n$  и скорость распространения продольной волны  $V_s$  определяются известными зависимостями, с учетом которых соотношение для нормальных напряжений приобретает вид:

$$\sigma_n = V_n \gamma (\lambda + 2\mu) \rho. \quad (7)$$

Аналогично получено соотношение для касательных напряжений  $\tau_n$ :

$$\tau_n = V_s \gamma \rho \mu. \quad (8)$$

Таким образом, для прохождения продольных и сдвиговых волн через заданный контур границы области без отражения от этого контура к матрице демпфирования  $[C]$  нужно добавить диагональную матрицу, содержащую элементы

$$C_{jj} = R \gamma (\lambda + 2\mu) \rho \quad (9)$$

$$C_{ii} = R \gamma \rho \mu, \quad (10)$$

где  $R$  – константа, зависящая от длины примыкающего к данной точке контура и характера сетки;  $i$  – номер элемента вектора скорости, нормального к контуру  $L_n$ ;  $j$  – номер элемента вектора скорости вдоль контура  $L_n$ .

Матрица демпфирования  $[C]$  входит составной частью в приведенную матрицу жесткости  $[K]$  и также используется при вычислении правой части  $\{R_{t+dt}\}$  на каждом временном шаге. Для упрощения ее формирования на каждом временном шаге за основное неизвестное принимаем вектор скоростей  $\{V_{t+dt}\}$ . Теперь, выражая  $\{W_{t+dt}\}$  из (3) и подставляя полученные отношения, а также соотношения

$$\{U_{t+dt}\} = \{U_t\} + \{V_{t+dt}\} dt, \quad (11)$$

$$[K] \{U_t\} = \int \mathbf{B}^T \sigma^t dv \quad (12)$$

в формулу (3) и выполняя преобразования, можно записать:

$$[K] \{V_{t+dt}\} = \{R_{t+dt}\}, \quad (13)$$

где

$$[K] = dt [K] + [M] + [C], \quad (14)$$

$$\{R_{t+dt}\} = \{R_{t+dt}\} + [M] \{W_t\} + [M] \{V_t\} + \int \mathbf{B}^T \sigma^t dv, \quad (15)$$

где  $[B]$  – матрица дифференцирования;  $\sigma^t$  – напряжения в расчетной области на момент времени  $t$ , а интегрирование выполняется по данному объему.

Однозначность численного решения системы уравнений (13) обеспечивается заданием начальных условий, которые при решении динамических задач часто принимаются однородными ( $U = V = W = 0$ ), а также граничных условий на части контура, где не задается условие пропускания продольных и поперечных волн без их отражения от границы.

Для описания поведения УБ использована упруго-пластическая упрочняющаяся модель обычного бетона [3], используемая в ЦСГНЭ – филиале Гидропроекта в сейсмических расчетах бетонных плотин со сдвиговыми параметрами швов УБ. Описание деформируемости УБ в модели пластического течения с упрочнением выполнено с помощью кусочно-гладкой поверхности нагружения, отделяющей в пространстве напряжений область упругой работы материала от области, изменение напряжений в которой сопровождается развитием необратимых пластических деформаций. Введение поверхности нагружения определяет понятия нагрузки, разгрузки и нейтрального нагружения. Полные деформации состоят из вязкоупругих и пластических деформаций. Для определения приращений последних используется ассоциированный с функцией нагружения закон течения, следующий из принципа максимума Мизеса:

$$d\varepsilon_{ij}^{vp} = \sum_r d\lambda_r \frac{\partial f_r}{\partial \sigma_{ij}} . \quad (16)$$

В качестве системы определяющих параметров приняты касательные и нормальные напряжения на площадке максимального сдвига:

$$\tau_v = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}; \quad \sigma_v = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} . \quad (17)$$

Параметрами упрочнения являются сдвиговая и объемная псевдопластические деформации на площадке максимального сдвига:

$$\gamma_v^{vp} = \frac{\varepsilon_1^{vp} + \varepsilon_2^{vp}}{2}; \quad \theta_v^{vp} = \frac{\varepsilon_1^{vp} + \varepsilon_2^{vp}}{2} . \quad (18)$$

Функции нагружения модели формулируются на основании анализа имеющихся экспериментальных данных по УБ следующим образом:

$$\tau_v = \sigma_v - p, \quad (19)$$

$$\left(\frac{\tau_v}{b}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_v - \gamma}{a}\right)^2 = 1 . \quad (20)$$

Уравнение (19) отражает процесс разрушения УБ при преобладании растягивающих напряжений, а уравнение (20) описывает поведение УБ при его разрушении от сжатия. Модель УБ позволяет воспроизводить в расчетах образование горизонтальных трещин (раскрытие швов УБ), а в основании плотины произвольных трещин, и последующую работу УБ в зоне трещин только на сжатие.

Проведенные с помощью упруго-пластической модели УБ расчеты НДС симметричной плотины высотой 100 м с заложением обеих откосов 0,5 из особо жесткого УБ на воздействие землетрясения с пиковым ускорением 0,2g показали, что при 8-бальном землетрясении плотина работает упруго и вполне надежно. При 9-бальном землетрясении (пиковое ускорение 0,4g) в плотине возникают небольшие остаточные деформации вблизи гребня и на обоих откосах плотины появляются трещины на глубину 0,3 ширины сечения, что, однако не приводит к разрушению плотины. Для предотвращения проникновения воды в раскрывшиеся швы УБ и обеспечения их водонепроницаемости на верховом откосе устраивают водонепроницаемый экран из двухслойной пленки CARPI (Швейцария), широко применяемой для гидроизоляции откосов плотин из УБ.

#### Л и т е р а т у р а

1. *Ляпичев Ю.П.* Новые конструкции плотин из укатанного бетона и камня// Проблемы теории и практики в инженерных исследованиях: Сб. научн. трудов. – М.: АСВ, 1998. – С. 39-43.
2. *Бронштейн В.И., Грошев М.Е.* Расчетная оценка сейсмонапряженного состояния бетонных плотин по записям параметров их колебаний. –Свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ №980290. –Роспатент, 1998.
3. *Грошев М.Е., Шаблинский Г.Э.* Применение теории пластического течения для описания деформируемости и прочности бетона в условиях двухосного нагружения// М.: "Строительство и архитектура", 1991.

### SEISMIC RESISTANCE OF ROLLER COMPACTED CONCRETE DAM

Yu. P. Liapichev

The seismic resistance of 100 m high RCC dam of symmetrical profile is considered on action of strong earthquakes (horizontal and vertical accelerograms 0,2 and 0,4 g). The method of seismic response of system "dam-foundation-reservoir" is considered.