

Расчет конструкций на действие сейсмических сил и оценка их сейсмостойкости

УСТОЙЧИВОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПЛОТИНЫ ИЗ ОСОБО ТОЩЕГО УКАТАННОГО БЕТОНА ПРИ МАКСИМАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Ю.П. ЛЯПИЧЕВ*, д-р техн. наук, профессор, академик РАН

М.Е. ГРОШЕВ**, канд. техн. наук

*Российский университет дружбы народов

** Центр службы геодинамических наблюдений в электроэнергетической области (ЦСГНЭО), Инженерный центр - РАО ЭС России

В новом (2003 г.) СНиП-33-03 «Гидротехнические сооружения в сейсмических районах» сейсмостойкость плотин I и II классов должна определяться в рамках волновой теории (ВТ) на два уровня сейсмических воздействий: нижний – проектное землетрясение (ПЗ) и верхний – максимальное расчетное землетрясение (МРЗ). Соответствующие максимальные пиковые ускорения основания $\alpha^{ПЗ}$ и $\alpha^{МРЗ}$ определяются в зависимости от расчетной сейсмичности площадки $J^{рас}$, зависящей от нормативной сейсмичности $J^{норм}$ с учетом отличия местных грунтов от трех основных и двух промежуточных категорий грунта, расчетных амплитуд ускорения основания (в долях g) A_{500} и A_{5000} для соответствующих нормативных периодов повторяемости ПЗ (500 лет) и МРЗ (5000 лет) и коэффициентов $k^{ПЗ}$ и $k^{МРЗ}$ перехода от этих периодов к принятым периодам, соответственно, 100-500 и 5000 и 10000 лет. По СНиП для плотин I класса, расположенных в районах с $J^{норм}=9$ и 10 баллов (карта С, ОСР-97) с нормативным и расчетным периодом повторяемости 5000 лет, на скальном основании I категории, пиковые значения $\alpha^{МРЗ}$ составят 0,24g ($J^{норм}=9$ баллов) и 0,48g ($J^{норм}=10$ баллов).

Ниже даны результаты численных расчетов сейсмостойкости новой плотины симметричного профиля высотой 100 м с заложением откосов 0,5, наружными зонами из укатанного бетона и центральной зоной из камня, упрочненного цементом (рис.1), предложенной первым автором в 1998 г. [1].

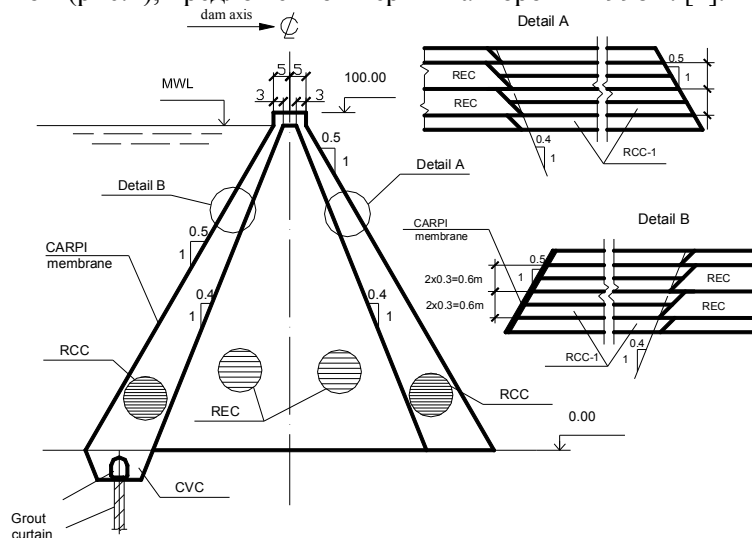


Рис. 1. Симметричная плотина высотой 100 м с наружными зонами из УБ (RCC), центральной зоной из камня, упрочненного цементом (REC) и экраном из пленки CARPI (CVC – обычный бетон; gallery – галерея; grout curtain – цемзавеса)

В качестве воздействия использовалась синтетическая акселерограмма землетрясения с пиковым горизонтальным ускорением 0,2g (ПЗ) и 0,4g (МРЗ) и вертикальным ускорением, равным 0,7 горизонтального, длительностью воздействия 10 с и преобладающей частотой 3–5 герц, близкой к частоте основного тона колебаний гравитационных плотин высотой 100 м.

При численной оценке сейсмостойкости системы «плотины–основание–водохранилище (ВБ)» 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: $\{U\}$, $\{V\}$, $\{W\}$ - векторы относительных перемещений, скорости и ускорения в фиксированных точках расчетной области, $\{R(t)\}$ – вектор переменных динамических воздействий.

Решение системы уравнений (1) производится по методике, используемой в расчетах плотин из обычного бетона [2]. В расчетах 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.

Для описания поведения УБ использована упругопластическая (с упрочнением) модель обычного бетона типа модели Зумпфера [3], используемая в ЦСГНЭО в сейсмических расчетах бетонных плотин, в которой приняты сдвиговые параметры швов УБ (угол внутреннего трения $\varphi=45^\circ$, сцепление C и предел прочности на растяжение поперек шва $p=C$) (рис. 2). Описание деформируемости УБ в модели выполнено с помощью кусочно-гладкой поверхности нагружения, отделяющей в пространстве напряжений область упругой работы УБ 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.

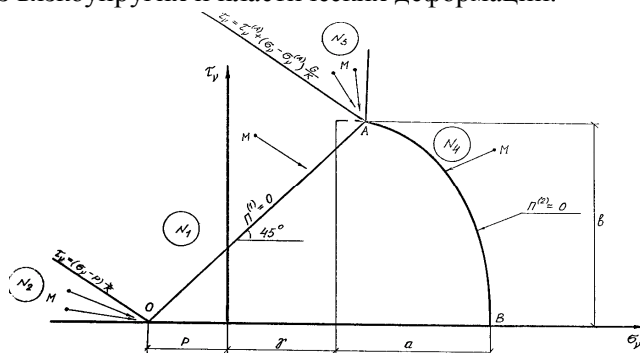


Рис. 2. Упругопластическая (с упрочнением) модель укатанного бетона

Для определения приращений вязкоупругих и пластических деформаций используется ассоциированный с функцией нагружения закон течения, следующий из принципа максимума Мизеса:

$$d\varepsilon_{ij}^{vp} = \sum_r d\lambda_r \frac{\partial f_r}{\partial \sigma_{ij}}. \quad (2)$$

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

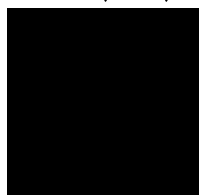
$$\tau_v = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}; \quad \sigma_v = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}. \quad (3)$$

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

$$\gamma_v^{vp} = \frac{\varepsilon_1^{vp} + \varepsilon_2^{vp}}{2}; \quad \theta_v^{vp} = \frac{\varepsilon_1^{vp} + \varepsilon_2^{vp}}{2} \quad (4)$$

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

$$\tau_v = \sigma_v - p, \quad (5)$$



(6)

Геометрическая интерпретация функций нагружения (5, 6) и поверхность нагружения в плоскости τ_v - σ_v с 2 сингулярными точками O и A показаны на рис. 2.

Уравнение (5) отражает процесс разрушения УБ при преобладании растягивающих напряжений, а уравнение (6) описывает поведение УБ в случае его разрушения от сжимающих напряжений. Модель УБ позволяет воспроизводить в расчетах образование в плотине горизонтальных трещин (раскрытие швов УБ), а в основании плотины произвольных трещин и последующую работу УБ в зоне таких трещин только на сжатие. В этих расчетах использовались те же параметры прочности на сдвиг швов УБ-3 и УБ-0, что и в предыдущих расчетах сейсмостойкости в рамках ЛСТ, а также следующие параметры деформируемости скального основания: $E = 10000$ МПа и $\nu = 0,2$.

Результаты расчетов сейсмостойкости плотины на воздействие акселерограммы ПЗ с пиковым горизонтальным ускорением $0,2g$ и вертикальным $0,14g$ показаны на рис. 3 и 4. На рис. 3 показаны гистограммы горизонтальных перемещений 6 контрольных точек на верховом откосе плотины (первая точка в основании откоса, шестая – на гребне плотины, шаг точек по вертикали 20 м), из которого видно, что реакция плотины вполне упругая и перемещения полностью затухают к концу ПЗ без каких-либо остаточных величин. Максимальное горизонтальное ускорение на гребне плотины при воздействии ПЗ достигает $0,31g$, т.е. коэффициент усиления амплитуды колебаний составляет $1,55$.

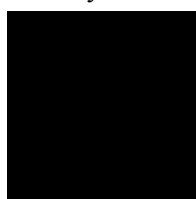


Рис. 3. Гистограммы горизонтальных перемещений 6 контрольных точек верхового откоса при воздействии ПЗ: пиковое горизонтальное ускорение $0,2g$, вертикальное - $0,14g$

На рис. 4 показана сетка КЭ плотины и основания, на которой видна одна короткая трещина или раскрытие шва в основании верховой зоны УБ-3 при ПЗ. Результаты расчетов сейсмостойкости плотины на воздействие акселерограммы МРЗ с пиковым горизонтальным ускорением $0,4g$ и вертикальным – $0,28g$ показаны на рис. 5-7. На рис. 5 показаны гистограммы горизонтальных перемещений 6 контрольных точек на верховом откосе плотины при воздействии МРЗ, из которого видно, что реакция плотины в нижней части плотины упругая с полным затуханием колебаний без остаточных перемещений, а в верхней (боль-

шей) части ее реакция – упругопластическая: на фоне затухания колебаний в конце воздействия остаются небольшие пластические перемещения.

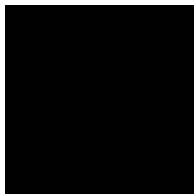


Рис. 4. Сетка конечных элементов плотины и раскрытие шва (жирная линия) в основании верховой зоны при ПЗ: горизонтальное ускорение 0,2g, вертикальное – 0,14g

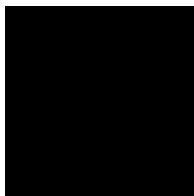


Рис. 5. Гистограммы горизонтальных перемещений 6 контрольных точек верхового откоса при МРЗ: пиковое горизонтальное ускорение 0,4g, вертикальное – 0,28g

Картина образования горизонтальных трещин или раскрытия швов УБ показана на рис. 6, из которой видно, что при воздействии МРЗ в нижней части плотины глубина раскрытия швов с верхового откоса достигает середины профиля, а с низовой - ее четверти. Учитывая на верховом откосе водонепроницаемую пленку CARPI противодействие в раскрытых швах УБ исключается и сейсмическая безопасность плотины обеспечена. Раскрытия швов в наружных зонах плотины при МРЗ можно избежать, если произвести их обработку цементным раствором слоем 2 см, что позволит в 2 раза повысить сцепление шва. Распределение горизонтальных ускорений в 6 точках верхового откоса при МРЗ на рис. 7 показывает, что максимальное ускорение на гребне из-за упругопластической реакции плотины составляет всего 0,28g.

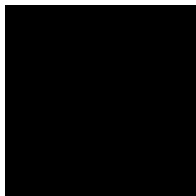


Рис. 6. Сетка конечных элементов плотины и раскрытие швов УБ (жирные линии) в плотине при МРЗ: пиковое горизонтальное ускорение 0,4g, вертикальное – 0,28g

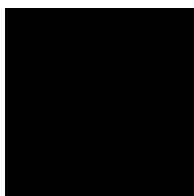


Рис. 7. Горизонтальные ускорения (доли g) в 6 контрольных точках верхового откоса при воздействии МРЗ: пиковое горизонтальное ускорение 0,4g, вертикальное - 0,28g

Был также выполнен расчет сейсмостойкости плотины на воздействие гипотетического максимального землетрясения с пиковым горизонтальным ускорением 0,8g и вертикальным 0,56g, который показал, что в верхней части плотины (высотой 10 м) возникает прогрессирующий сдвиг, а ее остальная часть работает упруго с затуханием колебаний без остаточных перемещений. В этом

случае все швы УБ плотины остаются раскрытыми по всей ширине профиля, максимальное горизонтальное ускорение на гребне достигает 0,38g.

Таким образом, можно считать, что новая плотина высотой 100 м обжатого профиля (заложение откосов 0,5) имеет примерно двойной запас сейсмостойкости при воздействии максимального расчетного землетрясения (МРЗ), что подтверждает высокую сейсмостойкость подобных плотин и указывает на необходимость их рассмотрения в проектах гидроузлов, расположенных в сейсмически активных районах при любых грунтовых условиях.

На рис. 8, 9 показаны профили (заложения откосов 0,7) водосливной и глухой секций (высота 65 м) из тощего УБ-0 Юмагузинской плотины, расположенной на аллювиальном основании р. Белая в Башкирии (сейсмичность 8 баллов).

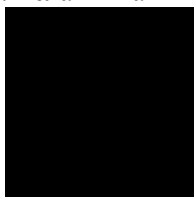


Рис. 8. Разрез по водосливной секции Юмагузинской плотины из УБ-0 (вариант)

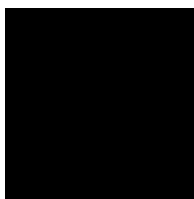


Рис. 9. Разрез по глухой секции Юмагузинской плотины из УБ-0 (вариант)

Л и т е р а т у р а

1. *Ляпичев Ю.П.* Плотины составные: из укатанного бетона (УБ) и УБ и камня, упрочненного цементом (проектирование и строительство) (на испанском языке). Семинар в компании ESAGEN, Медельин, Колумбия, 1998.- 120 с.
2. *Бронштейн В.И., Грошев М.Е.* Расчетная оценка сеймонапряженного состояния бетонных плотин по записям параметров их колебаний. Свид-во об официальной регистрации программы для ЭВМ №980290. М.: Роспатент, 1998
3. *Грошев М.Е., Шаблинский Г.Э.* Применение теории пластического течения для описания деформируемости бетона в условиях двухосного нагружения. М.: "Строительство и архитектура", 1991

STABILITY AND STRENGTH OF NEW DAM OF ROLLER COMPACTED VERY LEAN CONCRETE UNDER MAXIMUM SEISMIC ACTIONS

Yu.P. Lyapichev, M.E. Groshev

Results of seismic stress-strain state analysis are considered for the new symmetrical 100 m high dam with slopes of 1/0.5 (V/H), outer zones of roller compacted concrete (RCC) and wide central zone of rockfill enriched with cement mortar. As a seismic loading the horizontal and vertical components of strong earthquakes of 8 and 9 grades were assumed. As a RCC model the elastoplastic model of RCC with shear parameters of joints was used. It was found that the new dam has double seismic safety under action of earthquake of 9 grade that indicates for consideration of the dam in hydroprojects in very seismic regions of Siberia and Far East of Russia.