

Т. Г. САГДИЕВ, Г. С. СЕЛЕЗНЕВ

К МЕТОДИКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ҚАМЕННО-НАБРОСНОЙ ПЛОТИНЫ НУРЕКСКОЙ ГЭС НА МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ СЕЙСМОВЗРЫВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В работе приводятся основные положения методики экспериментального исследования сейсмостойкости плотин из местных материалов на моделях с помощью сейсмовзрывного воздействия.

Строительство плотин из местных материалов потребовало теоретических обоснований ряда явлений и создания научно обоснованных и экспериментально проверенных методов расчета. Если для статических условий работы сооружений имеются достаточно надежные методы расчета, то для условий динамического воздействия сил на плотины, главным образом землетрясений, они носят весьма приближенный характер. В связи с этим используемые ныне методы качественного и количественного анализа сейсмических деформаций оставляют сомнение в их окончательной достоверности. Поэтому в каждом отдельном случае требуется экспериментальная проверка результатов расчета и эффективности принятых антисейсмических мероприятий.

Очевидно, проведение экспериментальных работ оказывается возможным только на уменьшенных моделях. Причем, ввиду специфического характера используемого материала и сейсмических деформаций в плотинах из местных материалов, экспериментальные исследования в подавляющем большинстве основывались на методах механического подобия в классическом его представлении. Практические трудности реализации условий подобия при построении модели приводили исследователей к позициям простого подобия, когда все множители подобия, за исключением множителей для линейных размеров и времен, равняются единице. И все же объекты исследования воспроизводились в модели довольно приближенно и подвергались упрощенным экспериментам. Объясняется это следующими обстоятельствами.

Все без исключения исследования сейсмостойкости плотин на моделях проводились на сейсмических платформах, которые хотя имеют различные конструктивные схемы, но по габаритам примерно одинаковые. Незначительные размеры сейсмоплатформ по отношению к габаритам натуральных плотин определяли выбор довольно малых значений масштабов моделирования. При таких значениях линейного множителя условия подбора материалов модели оказывались практически невыполнимыми, что приводило к значительным искажениям, а порой к простому использованию материала натуры. Попытки создания сейсмической платформы больших размеров для частичного устранения отмеченных недостатков пока не увенчались успехом.

Постановка экспериментов в обычных лабораторных условиях при существующих конструкциях сейсмоплатформ исключает возможность моделирования статически приложенных объемных сил, являющихся основными силовыми факторами в рассматриваемых типах плотин. В результате изучаемые модели подвергались воздействиям только динамических сил и на этой основе приходилось давать заключения о сейсмостойкости проектируемых и возводимых плотин. Здесь можно отметить центробежные машины как оборудование, обеспечивающее моделирование объемных сил. Однако еще меньшие размеры кареток этих машин, а также достаточно сложная аппаратура дают возможность исследовать только отдельные фрагменты и узлы плотин.

Наконец, моделирование сейсмических движений грунтов при помощи колебаний сейсмоплатформ является довольно грубым приближением, так как сложный, по существу неустановившийся, процесс заменяется однокомпонентными гармоническими колебаниями.

В настоящей работе приводятся основные положения методики исследования сейсмостойкости плотин из местных материалов на моделях с помощью сейсмовзрывного воздействия. Эта методика разработана в связи с экспериментальным изучением сейсмостойкости каменно-набросной плотины Нурекской ГЭС, возводимой в условиях высокой сейсмической активности района строительства, и основана на теории расширенного подобия, предложенной А. Г. Назаровым. На этой основе в отличие от классической теории подобия оказывается возможным вывод условий моделирования путем непосредственного сопоставления физических величин, определяющих изучаемое явление, без предварительного задания уравнений связи. Далее, модель объекта исследования возводится непосредственно на естественных грунтах, в которых генерируются направленные сейсмовзрывные волны, моделирующие землетрясение.

Переход от сейсмической платформы к естественным грунтам позволяет исследовать модели больших размеров, что положительно сказывается на точности получаемых результатов. При этом существенно облегчается задача подбора материалов модели. Кроме того, условия фундирования на естественных, специальным образом подбираемых грунтах ближе подходят к действительной картине, чем на сейсмоплатформе.

Переходя к изложению метода моделирования, следовало бы отметить, что и в нашем случае не может быть достигнуто полное подобие, в связи с тем что приходится становиться на путь приближенного подобия. Однако теория расширенного подобия допускает корректирование результатов исследований путем последующего изменения множителей подобия в соответствии с неизбежными отступлениями от требуемых значений величин.

Как известно, в плотинах рассматриваемого типа приходится иметь дело с материалами, обладающими некоторой связностью, и с сыпучими материалами, для которых, в целом, упругие свойства приобретают второстепенное значение. Ввиду того, что в современных условиях невозможно получить механические характеристики материала плотины в целом, достоверно определяющие поведение и прочностные свойства природы, принимается метод поэлементного моделирования теории расширенного подобия. Этот метод допускает моделирование механических свойств натурного объекта по отдельным составляющим материала, механические свойства которых, как обычно, легко устанавливаются или, по крайней мере, доступны изучению. При этом оказывается доступным изучение составляющих (элементов) материала как в упругой зоне, так

и до стадии разрушения. Построение модели из специально подобранных составляющих материала, отвечающих условиям подобия, и укладка их в соответствии сатурой обеспечивают подобие механических процессов при подобном загружении модели.

В общем виде при рассмотрении плотин из местных материалов последние могут быть охарактеризованы объемным весом или плотностью ρ , углом внутреннего трения φ , удельным сцеплением (земляная плотина) c , модулем упругости E и коэффициентом Пуассона μ . Параметрами, определяющими динамические процессы, в нашем случае будут смещение u или амплитуда A , скорость V , ускорение W и частота f или период T .

В качестве основных величин наиболее удобно выбрать следующие: l —линейный размер, σ —нормальное напряжение, ρ —плотность материала, ε —относительная деформация, t —время. Согласно теории подобия эти величины должны быть преобразованы в соответствии со следующими равенствами:

$$l' = \alpha l, \quad (1) \quad \rho' = \delta \rho, \quad (3)$$

$$\sigma' = \beta \sigma, \quad (2) \quad \varepsilon' = \gamma \varepsilon, \quad (4)$$

$$t' = \eta t, \quad (5)$$

где α , β , δ , γ —множители подобия.

В общем виде величины, определяющие поведение плотины, представляются следующими равенствами преобразования:

$$\varphi' = \varphi, \quad (6) \quad u' = \alpha \gamma y, \quad (10)$$

$$c' = \beta c, \quad (7) \quad V' = \frac{\alpha l}{\eta} V, \quad (11)$$

$$E' = \frac{\beta}{\gamma} E, \quad (8) \quad W' = \frac{\alpha \gamma}{\eta^2} W, \quad (12)$$

$$\mu' = \mu, \quad (9) \quad T' = \eta T, \quad (13)$$

Причем для достижения динамического подобия необходимо выполнение условия:

$$\eta = \alpha \sqrt{\frac{\delta \gamma}{\beta}}. \quad (14)$$

Равенства (2—4 и 6—9) достаточно полно определяют механические свойства материалов и представляют собой условия моделирования при подборе необходимого материала модели. Равенства (5 и 10—14) определяют подобие сейсмической нагрузки. Собственно выполнение приведенных равенств обеспечивает подобие объемных сейсмических напряженных состояний модели и натуры и, следовательно, подобное развитие по величине и направлению сейсмических деформаций. Однако в конкретной обстановке полное соблюдение всех условий моделирования при сравнительно произвольном выборе множителей подобия оказывается довольно трудной, а порой и неразрешимой задачей. В частности, для моделей принятых масштабов нет возможности моделировать ускорения силы тяжести, так как при этом, например, в случае простого подобия ускорения в модели должны быть во столько раз большими, во сколько модель геометрически меньше натуры. На данном этапе развития техники экспериментирования отсутствуют возможности удовлетворения этому требованию. Отсюда, естественно, встает вопрос о рассмотрении такого

варианта моделирования, при котором исходным условием было бы равенство ускорений в натуре и модели

$$W' = W \text{ и } g' = g, \quad (12')$$

или из равенств (12) и (12¹) следует, что

$$\frac{\alpha\gamma}{\eta^2} = 1. \quad (15)$$

Подстановкой в (15) значения η из (14) находим

$$\frac{\beta}{\alpha\delta} = 1, \text{ или } \beta = \alpha\delta. \quad (16)$$

В соответствии с этим условия преобразования определяющих величин представляются следующими равенствами:

$$\sigma = \alpha\delta\sigma, \quad (2') \qquad E' = \frac{\alpha\delta}{\gamma} E, \quad (8')$$

$$t' = \sqrt{\alpha\gamma} t, \quad (5) \qquad y' = \eta^2 y, \quad (10')$$

$$c' = \alpha\delta c, \quad (7') \qquad V' = \eta V = \sqrt{\alpha\gamma} V, \quad (11')$$

$$T' = \sqrt{\alpha\gamma} T. \quad (13')$$

Выражения (1, 3, 4, 6 и 9) остаются без изменения.

Попытка изменения множителя подобия для деформаций в соответствии с требованием (16), вытекающим из условия равенства ускорений, дает возможность моделировать статически приложенные объемные силы, что в конечном результате, с точки зрения механики, приводит к моделированию всех силовых факторов, имеющих место в теле плотины.

В общем случае для модели можно принять произвольный материал, если он удовлетворяет условиям (2—4 и 6—9). Однако, учитывая значительные объемы материалов, необходимых для возведения сравнительно больших моделей, экономичнее использовать для них также местные строительные материалы. С точки зрения приближения условий работы модели к натурным условиям, целесообразнее использовать в модели одни и те же материалы или одного и того же месторождения, что и в натуре. Это приводит к тому, что множители подобия для плотностей и относительных деформаций будут равны единице, т. е.

$$\rho' = \rho \quad (3') \quad \text{и} \quad \delta = 1, \quad (17)$$

а также

$$\varepsilon' = \varepsilon \quad (4') \quad \text{и} \quad \gamma = 1. \quad (18)$$

Следовательно, равенство (16) приобретает следующий вид:

$$\beta = \alpha. \quad (16')$$

В результате достижения $\rho' = \rho$ обеспечивается моделирование как гидростатических, так и гидродинамических сил. Это существенно для моделирования процесса деформаций при сейсмическом воздействии.

Учет последних равенств приводит к варианту моделирования, практическое осуществление которого не встречает неразрешимых препятствий. При этом условия моделирования принимают довольно простой вид:

$$\begin{aligned}
 l' &= \alpha l, & c' &= \alpha c, & (7') \\
 \sigma' &= \alpha \sigma, & E' &= \alpha E, & (8') \\
 \rho' &= \rho, & \mu' &= \mu, & (9) \\
 \varepsilon' &= \varepsilon, & y' &= \alpha y, & (10') \\
 t' &\sqrt{\alpha} t, & V' &= \sqrt{\alpha} V, & (11') \\
 \varphi' &= \varphi, & W' &= W, & (12') \\
 T' &= \sqrt{\alpha} T. & & & (13')
 \end{aligned}$$

На сейсмостойкость плотин оказывает влияние и состояние основания. Главным образом, учету подлежат свойства основания в случае слабых грунтов, которые подвержены осадкам, нарушению устойчивости, вплоть до выборразжигания. Скальные основания, благодаря отсутствию в них указанных деформаций, специальными расчетами не подвергаются. Тем не менее, с точки зрения моделирования, механические свойства как тех, так и других видов оснований подлежат учету.

При слабых грунтах оснований необходимо выполнение следующих равенств преобразований:

$$\sigma' = \beta \sigma \quad (2)$$

и

$$E' = \frac{\beta}{\gamma} E, \quad (8)$$

или в случае последнего варианта моделирования:

$$\sigma' = \alpha \sigma \quad (2')$$

$$E' = \alpha E. \quad (8')$$

В этом случае не допускаются отступления в ту или другую сторону от требуемых величин.

При скальном же основании необходимо выполнение следующих равенств:

$$\sigma' \geq \beta \sigma \quad (19)$$

и

$$E' \geq \frac{\beta}{\gamma} E, \quad (20)$$

или

$$\sigma' \geq \alpha \sigma \quad (19')$$

и

$$E' \geq \alpha E. \quad (20')$$

В отличие от предыдущего случая здесь допускаются отступления в сторону увеличения от требуемых величин. Иначе говоря, в качестве основания модели можно принять любые скальные породы, для которых прочность и модуль упругости были бы не ниже значений (2') и (8') соответственно.

Проведенные рядом авторов теоретические и экспериментальные работы показывают принципиальную возможность моделирования землетрясений при помощи сейсмовзрывного воздействия. Достигается это путем афинного преобразования спектра для характерного параметра колебаний грунта, подлежащего моделированию. В наших исследованиях в качестве исходной данной принимается спектр сейсмических ускорений. При этом допускается произвольное очертание спектра зем-

землетрясения, форма которого устанавливается на основе обработки фактического инструментального материала, полученного в районе Нурека во время землетрясений.

Задача получения спектра взрыва, полностью подобного спектру землетрясения, является практически неосуществимой. Однако задача получения нужного спектра существенно облегчается путем осуществления приближенного подбора взрыва, которое заключается в следующем. Для натурной плотины устанавливаются несколько периодов колебаний по основным формам, например, по трем первым формам: T_1 , T_2 , T_3 . На спектре землетрясений отыскиваются значения ординат-ускорений, отвечающих найденным периодам. Далее проводятся различные предварительные пробные взрывы, из которых отбирается такая система взрывов, спектр волн которой удовлетворяет, по крайней мере, в трех точках подобным преобразованиям, например, согласно равенств $(12'')$ и $(13'')$.

На основе современных теоретических и экспериментальных исследований можно составить достаточно полное качественное представление о поведении плотин из местных материалов, подверженных действию сильных и разрушительных землетрясений. Необходимость конкретного решения задачи проектирования и строительства плотин в каждом отдельном случае требует знания количественной стороны вопроса. Именно на такой основе достигается наиболее экономичное и технически обоснованное решение практической задачи. На наш взгляд, количественную характеристику поведения плотин при воздействии сейсмических сил с достаточной для практики точностью можно получить путем экспериментальных исследований моделей, основанных на предлагаемой здесь методике моделирования. В сказанном выше можно убедиться, если сопоставить масштабы моделирования по разным методикам. Каменнонабросная плотина Нурекской ГЭС, высотой 300 м, допускает исследование ее модели путем использования существующих сейсмических платформ при масштабе моделирования максимум до 1/300, т. е. высотой модели 1 м, длиной по низу 4 м и по гребню 2,5 м. В нашем случае масштабы моделирования в принципе можно доводить до 1/10, т. е. высоту модели до 30 м.

Исходя из конкретных условий экспериментальной базы и наличия средств, программой исследования сейсмостойкости каменнонабросной плотины Нурекской ГЭС предусматривается масштаб моделирования 1/50, т. е. высота модели 6 м, длина по основанию вдоль русла 24 м и по гребню 14 м. При таких размерах модели плотины, возводимой на скальных грунтах, и воздействии на нее специальным образом подобранных сейсмовзрывных волн, задача получения количественных данных становится практически достижимой.

Одновременно с этим необходимо заметить, что было бы неправильно думать о том, что только на основе этих экспериментов можно получить исчерпывающие сведения о поведении изучаемого объекта. Вполне понятно, что такие сведения можно получить только в результате комплексных исследований.

Институт сейсмостойкого
строительства и сейсмологии
АН Таджикской ССР.