

МЕТОДИКА И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПЫТНЫХ НАСЫПЕЙ ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ВИБРОПЛАТФОРМЕ

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При проектировании гидросооружений в сейсмоопасных районах наряду с расчетами проводятся экспериментальные, в том числе модельные, исследования с целью получения дополнительной информации о частотах и формах их собственных колебаний, напряженно-деформированном состоянии, прочности, устойчивости, условиях и характере разрушения при землетрясениях [1—7].

Для решения некоторых задач сейсмостойкости (определения динамических характеристик, сейсмонапряженного состояния и др.) гидросооружений из грунтовых материалов с учетом упругой стадии их работ при землетрясениях применяются методы ультразвукового моделирования, динамической фотоупругости, исследования упругих моделей с помощью сейсмоплатформ, взрывов и др.

Однако реальные грунты, слагающие основания и используемые для возведения гидросооружений, представляют собой сложную многокомпонентную среду с деформируемым скелетом, обладающую, даже при умеренных по интенсивности динамических воздействиях, нелинейными, вязкими и пластическими свойствами [3]. Важной особенностью несвязных грунтов является их способность при рыхлом сложении к уплотнению, а при плотном сложении к разрыхлению при сдвиге, т. е. дилатантные свойства, которые в случае водонасыщения этих грунтов могут приводить к возникновению в них дополнительного порового давления.

Существенное влияние на сейсмостойкость оснований и элементов гидросооружений из водонасыщенных несвязных грунтов оказывает также их способность к потере устойчивости структуры и возникновению частичного или полного разжижения при динамических, в том числе сейсмических, воздействиях.

Многие из указанных свойств и особенностей грунтов, обусловленных их многокомпонентным составом и минерально-дисперсным строением, практически не поддаются моделированию, а само их наличие и попытка учета в модельных исследованиях приводит к необходимости строгого выполнения условий подобия объемных статических и сейсмических сил, изменения во времени сейсмического воздействия и других технически трудно осуществимых требований.

Поэтому такие актуальные и сложные задачи проблемы сейсмостойкости гидросооружений из грунтовых материалов, как определение их напряженно-деформированного состояния, прочности, устойчивости возможных повреждений и характера разрушения с учетом реальных свойств и особенностей грунтов при достаточно интенсивных сейсмических воздействиях, не могут быть решены на основе методов моделирования.

Для решения некоторых задач могут использоваться данные инструментальных наблюдений за поведением гидросооружений, преимущественно при слабых и редко при сильных движениях грунтов их оснований, вызванных землетрясениями [1].

Однако случаи интенсивных сейсмических воздействий на гидро-

сооружения крайне редки (к их числу относится повреждение земляной плотины Сан-Фернандо Нижняя при землетрясении 7/II 1970 г. вблизи г. Лос-Анжелеса, США), а полученная информация часто оказывается недостаточной для обоснованного решения всего комплекса указанных выше задач.

Для этих целей иногда проводятся очень сложные и трудоемкие исследования натурных сооружений при динамических воздействиях, возбуждаемых вибраторами, производственными и специальными (включая ядерные) взрывами. Однако в целях обеспечения безопасности существующих гидросооружений такие испытания обычно проводятся только при их упругих колебаниях, возбуждаемых динамическими воздействиями малой интенсивности.

В последнее время для оценки предельно устойчивых углов откоса [1], развития и диссипации избыточного порового давления в водонасыщенных грунтах [10] при сейсмических воздействиях и решения некоторых других частных задач проводятся исследования фрагментов (откосов, больших образцов и др.) из натуральных материалов при тех же параметрах воздействия, которые ожидаются в основании проектируемого сооружения при расчетном землетрясении.

Таким образом, в настоящее время практически не имеется разработанной методики решения указанных выше актуальных задач сейсмостойкости гидросооружений из грунтовых материалов с учетом их пелинейных, пластических, дилатантных и других свойств, а также особенностей как многокомпонентной среды с деформируемым скелетом, которые в определенных условиях могут приводить к снижению их прочности и устойчивости при сейсмических воздействиях.

В связи с этим во ВНИИГе производилась разработка комплексного экспериментально-расчетного метода исследования сейсмостойкости гидросооружений из грунтовых материалов, включающего:

исследования колебаний, напряженно-деформированного состояния, прочности, устойчивости, характера повреждений и разрушения опытных насыпей из грунтовых материалов при динамических воздействиях, возбуждаемых с помощью виброплатформы ВП-100;

испытания грунтов, используемых для возведения опытных насыпей, при статических и динамических (сейсмических) нагрузках с целью обоснованного выбора подходящих динамических моделей грунтов и определения их расчетных параметров;

расчеты по различным методикам опытных грунтовых насыпей при заданных (реализуемых в опытах) динамических воздействиях с использованием соответствующих динамических моделей грунтов и их расчетных характеристик.

При этом опытная насыпь достаточно больших размеров должна рассматриваться как самостоятельный физический объект (а не модель конкретного сооружения), имеющий определенную форму и размеры, выполненный из грунтовых материалов с изученными путем специальных испытаний деформационными и прочностными свойствами и подвергающийся динамическим нагрузкам с заданными (регистрируемыми в опытах) параметрами. Это дает возможность использовать результаты предлагаемого способа исследований для решения широкого круга задач сейсмостойкости гидросооружений при их работе как в упругой стадии, так и за пределами упругости.

В состав этих задач могут входить:

изучение поведения однородных и разнородных (состоящих из водоупорного ядра или экрана, верховой водонасыщенной и низовой водонасыщенной упорных призм) опытных насыпей различных разме-

ров и конфигураций, а также определение их динамических характеристик (частот и форм собственных колебаний, коэффициентов затухания и др.) при их работе в упругой стадии, отвечающей условиям как плоской, так и пространственной задач, и различной интенсивности динамического воздействия;

изучение влияния нелинейных свойств грунтов на поведение и указанные выше характеристики опытных насыпей, определение критических параметров динамического воздействия, приводящих к возникновению и развитию в различных условиях их необратимых (пластических) деформаций;

исследование напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости опытных насыпей с учетом их работы за пределами упругости, оценка их возможных повреждений и характера разрушений при интенсивных динамических воздействиях.

Полученные при этих исследованиях результаты могут быть непосредственно использованы для некоторых выводов о поведении (колебаниях, напряженно-деформированном состоянии, прочности, устойчивости и др.) опытных насыпей при тех условиях, в которых проводились рассматриваемые опыты, и для оценки возможности распространения указанных выводов на соответствующие натурные сооружения с учетом данных о динамических свойствах их материалов, параметрах сейсмического воздействия и других факторов.

Кроме того, должны проводиться расчеты опытных насыпей из грунтовых материалов с учетом их работы в упругой стадии и за пределами упругости при заданных динамических воздействиях по различным методикам с целью проверки их применимости для решения указанных выше задач, совершенствования существующих и разработки новых методов расчета сейсмостойкости гидросооружений из грунтовых материалов.

II. МЕТОДИКА И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В соответствии с этим во ВНИИГе производилась разработка методики и технологии экспериментальных исследований опытных насыпей из грунтовых материалов на виброплатформе ВП-100 с размерами рабочего стола 4×6 м и грузоподъемностью 50 т. Для этих целей был изготовлен плоский металлический лоток длиной 6,4 м и высотой 2,4 м, ширина которого путем перестановки одной из боковых стенок могла меняться от 0,6 до 2,5 м. Передвижная боковая стенка была выполнена из оргстекла с нанесенной на него сеткой для наблюдения за остаточными деформациями опытной насыпи во время опыта. Лоток устанавливался на стол виброплатформы и жестко крепился (приваривался) к нему.

Опытные насыпи изготавливались путем постепенной отсыпки грунта из бункера, установленного на лоток, в деревянную опалубку, укрепленную на специальном шаблоне и фиксирующую заданные откосы насыпей (рис. 1). В процессе отсыпки насыпи производилась установка в различных ее точках по заранее намеченной схеме (рис. 2) специально изготовленных в комплексной лаборатории сейсмостойкости сооружений датчиков для измерения ускорений, напряжений и деформаций грунта.

Ускорения колебаний на откосах и в теле опытных насыпей измеряли с помощью датчиков Раевского [8] чувствительностью 5×10^{-3} г/мм (где g — ускорение силы тяжести). Для измерения динамических напряжений использовались тензометрические датчики с гидроусиле-

нием [9] чувствительностью до 8 Па/мм, а для измерения динамических деформаций—индуктивные датчики чувствительностью до $5 \cdot 10^{-7}$. Описание конструкции и принципов работы датчиков ускорений и динамических напряжений приводится в работах [8-9]. Для усиления и регистрации сигналов от датчиков применяли многоканальные усилители 8АНЧ-7М и осциллографы Н-115.

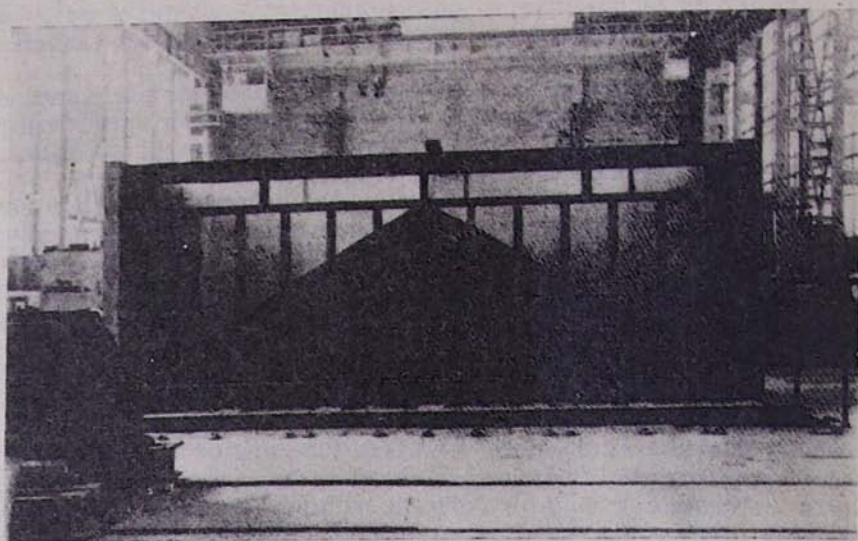


Рис. 1. Вид опытной насыпи в лотке на виброплатформе

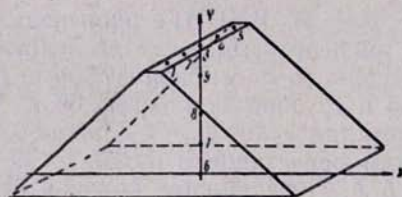


Рис. 2. Схема размещения точек измерения ускорений опытных насыпей

Колебания опытных насыпей поперек гребня возбуждались с помощью виброплатформы ВП-100, которая в диапазоне частот от 2,0 до 50 гц могла развивать ускорение от сотых долей до 2,5 g.

В задачи первого этапа исследований входили:

оценка степени приближения работы исследуемых насыпей при разной ширине жесткого лотка к условиям плоско-деформированного состояния;

определение динамических характеристик (частот и форм собственных колебаний) и напряженно-деформированного состояния опытных насыпей при различной интенсивности динамического воздействия, задаваемого гармоническими колебаниями виброплатформы;

Исследование влияния интенсивности воздействия (ускорений колебаний виброплатформы) на динамические характеристики опытных насыпей и отношение ускорений гребня к ускорениям основания;

определение критических значений ускорений, при которых возникают необратимые деформации откосов насыпи, а также изучение характера их деформирования при ускорениях выше критических.

Для обеспечения работы опытных насыпей при их испытаниях на виброплатформе в условиях, приближающихся к плоскодеформированному состоянию, необходимо устранение или максимально возможное ослабление влияния трения о боковые стенки лотка. В ряде опытов перед отсыпкой насыпей на стенки лотка наклеивали с помощью вазелина прокладки из кальки для снятия трения грунта. Однако при отсыпке грунта часто происходило повреждение прокладок. В связи с этим была проведена специальная серия опытов при разной ширине лотка, т. е. при разной длине l насыпей по гребню, равной 1,3; 2,0 и 2,5 м и, соответственно, при их высоте h , равной в первых двух случаях 1,65 м, а в третьем случае — 1,25 м. Наименьшее расхождение (в пределах 15—20%) между записями ускорений в точках 3—5 гребня (рис. 2) наблюдалось при ширине насыпи $l=2,5$ м и высоте $h=1,25$ м, т. е. при соотношении $l/h \approx 2,0$.

Приводимые здесь результаты опытов относятся к насыпям указанных выше размеров. Для отсыпки насыпей использовался песок Подпорожского карьера крупностью 0,5—2,0 мм с объемным весом в предельно рыхлом состоянии $\gamma_{\text{мин}} = 1,36 \text{ г/см}^3$, в предельно плотном $\gamma_{\text{макс}} = 1,60 \text{ г/см}^3$, весовой влажностью 2 % и с углом естественного откоса $\varphi = 35^\circ$. Средний объемный вес грунта в теле насыпи определялся в процессе ее отсыпки. Он был равен $\gamma = 1,45 \text{ г/см}^3$. Определение частот и форм собственных колебаний производилось по резонансному методу. При этом основанию насыпей с помощью виброплатформы сообщались горизонтальные колебания с заданными ускорениями, которые в каждом опыте поддерживались постоянными (с точностью до 20—25%) и дискретно изменяющейся через 1—2 гц частотой. При каждом шаге изменения частоты производилась запись горизонтальных w_x и вертикальных w_y ускорений в точках 1—9 (рис. 1), а в некоторых опытах — также запись трех компонент напряжений и трех компонент деформаций в точке [8].

Амплитуды ускорений при переходе от первого к последующим опытам данной серии увеличивались ступенями от 0,05 до 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,28 г. По их результатам строились резонансные кривые каждой точки наблюдения, с помощью которых определялись частоты и формы собственных колебаний опытных насыпей. На рис. 3 показаны графики изменения отношения горизонтальных ускорений гребня w_r к соответствующим ускорениям основания $w_{\text{осн}}$ насыпи при двух фиксированных частотах ($f_1 = 16 \text{ гц}$ и $f_2 = 35 \text{ гц}$) и при изменении ускорений колебаний основания $w_{\text{осн}}$ в пределах от 0,04 до 0,28 г (т. е. в 7 раз). Из приведенных графиков видно, что изменение в указанном выше диапазоне ускорений $w_{\text{осн}}$ приводило к изменению отношения $w_r/w_{\text{осн}}$ при частоте $f_1 = 16 \text{ гц}$ от 10 до 4, (т. е. в 2,5 раза), а при частоте $f_2 = 35 \text{ гц}$ — от 4 до 1 (т. е. в 4 раза). С помощью таких графиков строили амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) для различных точек опытных насыпей. На рис. 4 показаны АЧХ горизон-

тальных колебаний точки 3 гребня (рис. 2), определявшиеся по отношению ее ускорений w_r к ускорениям точки 6 основания $w_{осн}$ насыпи при различной интенсивности динамического воздействия, т. е. ускорений точки 6 основания $w_{осн}$, изменявшихся в пределах от 0,11 до 0,17 g. По приведенным графикам могут быть найдены четыре резонансных частоты насыпи, равные $f_1=16$ гц, $f_2=24$ гц, $f_3=32$ гц и $f_4=40$ гц. При изменении интенсивности динамического воздействия (характеризуемого ускорениями точки 6 основания насыпи) в пределах от 0,11 до 0,17 g отношения $w_r/w_{осн}$ на указанных выше частотах

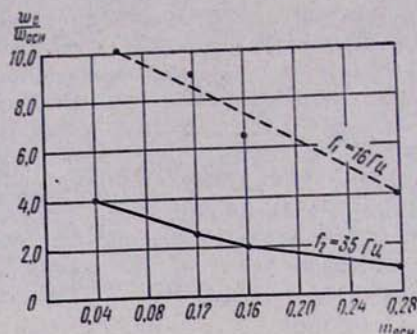


Рис. 3. Графики изменения отношения $w_r/w_{осн}$ ускорений гребня w_r к ускорениям основания $w_{осн}$ в зависимости от $w_{осн}$ при частотах $f_1=16$ гц и $f_2=35$ гц

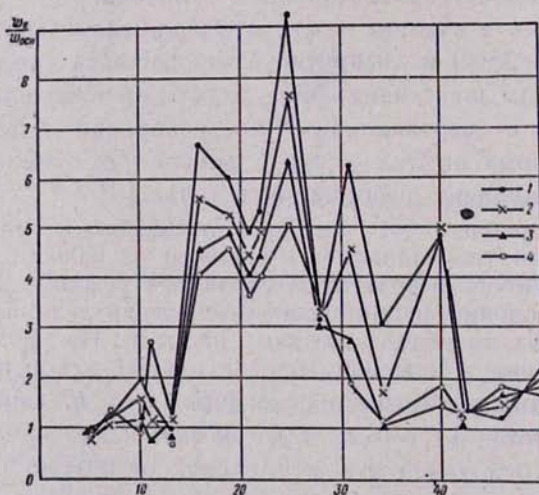


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики точки 3 гребня насыпи при разных ускорениях основания $w_{осн}$

изменялись соответственно в диапазоне от 6,7 до 4,1 (т. е. в 1,5 раза) при $f_1=16$ гц; от 9 до 5 (в 1,8 раза) при $f_2=24$ гц; от 6,3 до 2,0 (в 134

3,1 раза) при $f_3=32$ гц и от 5 до 1,5 (в 3,2 раза) при $f_4=40$ гц. Таким образом, при изменении ускорений основания от 0,11 до 0,17 g наблюдалось значительное уменьшение отношения $w_r/w_{осн}$ ускорений точки 3 гребня w_r к ускорениям точки 6 основания $w_{осн}$, величина которого возрастала с увеличением частоты колебаний от 1,5 при $f_1=16$ гц до 3,2 при $f_4=40$ гц, т. е. в два с лишним раза. Изменение периодов резонансных колебаний опытных насыпей с увеличением интенсивности динамического воздействия в диапазоне от 0,11 до 0,17g в рассматриваемых опытах определить не удалось. Указанный выше характер изменения величины отношения $w_r/w_{осн}$ ускорений точки 3 гребня к ускорениям точки 6 основания насыпи очевидно определяется одновременным влиянием многих факторов, включая нелинейные (зависимость динамических модулей упругости и коэффициентов затухания колебаний от статического напряженного состояния, интенсивности динамического воздействия) и пластические свойства грунтов, увеличение поглощения с возрастанием частоты колебаний и др. Для оценки влияния каждого из этих факторов по отдельности необходимы дополнительные исследования.

На рис. 5 изображены три первые формы собственных колебаний опытной насыпи, построенные по записям ускорений в точках 3 и 6—9 при резонансных частотах $f_1=16$ гц, $f_2=24$ гц и $f_3=32$ гц. Достаточно уверенно построить четвертую форму собственных колебаний по записям ускорений в точках 3 и 6—9 опытной насыпи также не удалось.

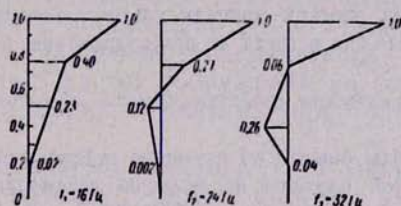


Рис. 5. 1—3 формы горизонтальных (перпендикулярно гребню), собственных колебаний точек 3 и 6—9 по оси ОУ

Определение критического уровня динамического воздействия, при котором не наблюдалось остаточных деформаций грунта в теле опытной насыпи, производилось по записям датчиков относительных деформаций при ступенчатом увеличении ускорений виброплатформы от первых к последующим опытам. В насыпях с уклонами откосов 1:2 остаточные деформации грунта в точке 8 возникали при ускорениях 0,10—0,15 g, а в насыпях с уклонами откосов 1:2,4—при ускорениях $>0,15$ g.

Кроме этих опытов производилось также определение динамических характеристик Подпорожского песка (скоростей распространения продольных V_p и поперечных V_s волн) методами свободных колебаний образцов и ультразвуковым. В дальнейшем должны быть проведены расчеты частот и форм собственных колебаний, а также напряженно-деформированного состояния опытных насыпей различными методами (конечных элементов, конечных разностей и др.) с целью сопоставления их результатов с данными экспериментальных исследований.

Таким образом, предложенный расчетно-экспериментальный метод позволяет решать многие сложные и актуальные задачи, связанные с определением напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости гидросооружений из грунтовых материалов при их работе как в упругой стадии так и за пределами упругости.

Разработаны методика и технология исследований опытных насыпей из грунтовых материалов на большой виброплатформе (размерах в плане 4×6 м, грузоподъемностью 50 т), а также комплекс высокочувствительной аппаратуры для измерения ускорений, напряжений и деформаций в различных точках опытных насыпей при динамических воздействиях, задаваемых колебаниями виброплатформы.

В результате первого этапа исследований получены некоторые ценные сведения о динамических характеристиках опытных насыпей, влиянии нелинейных и пластических свойств грунтов на их поведение при колебаниях различной интенсивности и др., которые могут быть использованы для проверки и уточнения существующих методов расчета сейсмостойкости гидросооружений этого типа и решения других задач.

ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург М. Б., Красников Н. Д., Савинов О. А. Проектирование и строительство больших плотин. Вып. 1—«Строительство плотин в сложных условиях» (по материалам IX международного конгресса по большим плотинам) М., «Энергия», 1972.
2. Ярышев Б. П., Липовская В. Я., Сокерина Н. П., Яроцкая Л. В. Изучение волновых полей в неоднородных массивах скальных оснований и плотинах из грунтовых материалов на плоских моделях ультразвуковым методом. В сб. «Совершенствование методов расчета и проектирования в сейсмических районах, Л., «Энергия».
3. Красников Н. Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения. Л., Стройиздат, 1970.
4. Мельник В. Г. Результаты опытов по изучению сейсмостойкости фрагментов упорных призм Нурекской плотины на большой сеймоплатформе. Тр. координационных совещаний по гидротехнике (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева), вып. 47, 1969.
5. Назаров А. Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел (к теории моделирования). Ереван, Изд. АН АрмССР, 1965.
6. Савинов О. А., Красников Н. Д., Айрапетян Б. М. Лаборатория крупномасштабных модельных исследований сейсмостойкости гидросооружений ВНИИГа. Тр. координационных совещаний по гидротехнике (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева), вып. 94, 1972.
7. Сагдиев Т. Г., Селезнев Г. С. К методике экспериментальных исследований сейсмостойкости каменно-набросной плотины Нурекской ГЭС на модели с помощью сейсмозрывного воздействия. В сб.: Инженерная сейсмология, вып. 1—2, Душанбе—Ленинакан: Изд. АН Тадж. ССР, 1964.
8. Раевский Н. П., Субботин М. И. Измерение линейных ускорений. М., Изд. АН СССР, 1961.
9. Руководство по применению прямого метода измерения давлений в сыпучих средах и грунтах. М., ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 1965.
10. Finn W. D. Lian, Emery I. I., Gupta V. P. A Shaking Table Study of the Liquefaction of Saturated Sands during Earthquakes. Proceedings of the third European Symposium on Earthquake Engineering. Sofia, September 14—17, 1970. Sofia, 1971.