

А. П. СИНИЦЫН

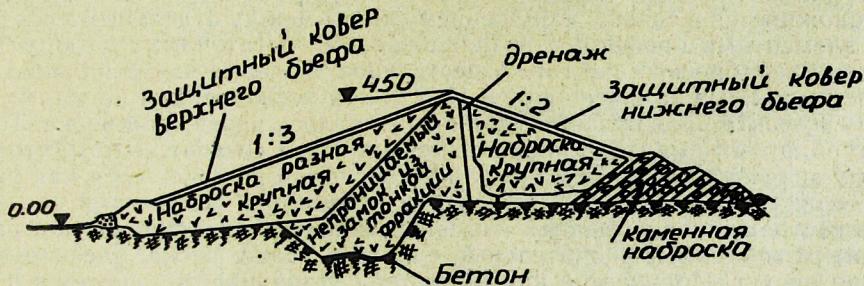
УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОТИНЫ ИЗ МЕСТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

В работе дается оценка действия вертикальной составляющей сейсмической нагрузки на плотину, вызывающей перемещения отдельных элементов ее профиля.

Плотины из местных материалов обычно имеют треугольный профиль. При сейсмической нагрузке плотина приходит в движение, и ее напряженное состояние меняется с течением времени. Если на отдельных участках профиля напряжения и деформации превзойдут предельные величины, то в результате может произойти разрушение плотины.

Для бетонных гравитационных плотин, как показали исследования ряда авторов [1, 2, 3], существенное значение имеет вертикальная составляющая сейсмической нагрузки. Для плотин из местных материалов, у которых имеется достаточно вытянутый профиль, как например, у американской плотины Мамутс-Пулдам (фиг. 1), влияние вертикальной составляющей сейсмической нагрузки на общую устойчивость плотины будет еще больше.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы определить перемещения отдельных элементов профиля плотины, которые может вызвать вертикальная составляющая сейсмической нагрузки, и оценить эффект ее действия.



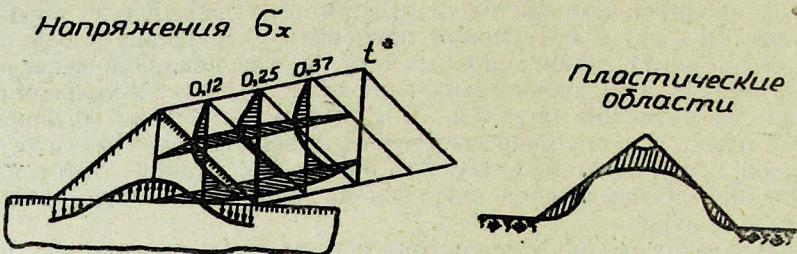
Фиг. 1.

При малых амплитудах сейсмических волн перемещения профиля плотины могут не выходить за предел упругости. В этом случае остаточных смещений частей профиля плотины не получается и ее можно рассматривать как упругий треугольный клин. При сильных сейсмических воздействиях связь между отдельными элементами профиля плотины нарушается, движение частиц усложняется, происходят оползни и отслаивание отдельных ее частей.

Задача о расчете плотин треугольного профиля на динамические нагрузки в пределах упругой стадии была разработана нами ранее [4], и результаты подробно доложены на координационном совещании в ВОДГЕО в мае 1962 г. В этих исследованиях плотина рассматривалась

как упругая динамическая система с несколькими степенями свободы. Пользуясь этим методом мы получили динамические поверхности влияния, которые позволяют определить изменение реакций упругого основания в процессе движения плотины. Было также обнаружено, что при динамических воздействиях изменяется величина противодавления, в результате чего коэффициент устойчивости плотины становится функцией времени и имеет максимальное и минимальное значения. Дальнейшие исследования, проведенные автором в этом направлении [5, 6], показали, что получается существенная разница в напряженном состоянии плотины между процессом стационарных колебаний и фазой вступления, когда приходится учитывать бегущую волну.

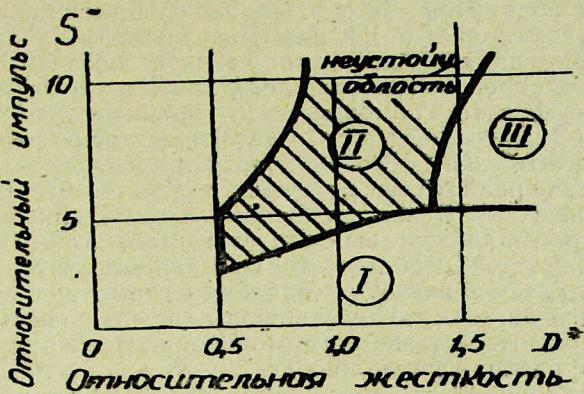
Опираясь на эти исследования, мы получили, в первом приближении, те области на профиле клина, в пределах которых образуются пластические деформации. Это показано на фиг. 2. Таким образом, для упругой стадии, соответствующей слабым сейсмическим воздействиям (2–3 балла), представляется возможным сделать расчет и оценить условия прочности и надежности плотины.



Фиг. 2.

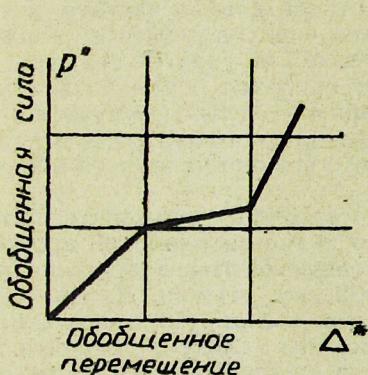
При сильных сейсмических воздействиях расчет плотины значительно усложняется в связи с нарушением связей между отдельными частями или элементами профиля и возникновением остаточных деформаций. Для камненабросных плотин существенное значение имеет явление, которое было нами замечено еще в 1942 г. при исследовании на малых моделях эффекта прохождения ударного импульса через слой песка. Тогда было обнаружено интересное явление, которое состоит в том, что при малых значениях величины импульса сыпучее тело ведет себя как упругое, только при вполне определенном соотношении жесткостей системы. Если соотношение жесткостей изменить до некоторого критического значения, то возникают значительные сдвиги в толще песка, деформации сильно растут. Получается как бы потеря устойчивости системы. Если соотношение жесткостей продолжать менять в том же направлении, то дальше система работает опять как упругая и ее коэффициент жесткости становится другим. На фиг. 3 приведена диаграмма, на которой показаны области больших деформаций или области неустойчивости. На этой диаграмме по оси абсцисс отложен параметр, характеризующий жесткость системы; по оси ординат — параметр, характеризующий внешний импульс; I область соответствует упругой стадии работы системы при малом внешнем импульсе; II область характеризуется возникновением сдвигов в сыпучей среде и появлением больших перемещений в теле плотины (для краткости ее можно назвать областью неустойчивости); III. область отвечает сыпучей среде, в которой произошло переуплотнение частиц, в результате которого она получила некоторую повышенную жесткость. При расчете такой системы представляется возможным при-

менять способ динамического расчета, разработанный нами для систем с несколькими степенями свободы, но связь между деформациями и напряжениями в этом случае будет нелинейной. Эту нелинейную зависимость, связывающую напряжения и деформации, необходимо получить из специально поставленных опытов.

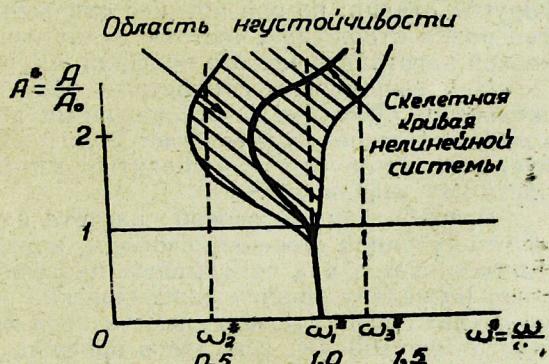


Фиг. 3.

Для получения общих выводов, относящихся к оценке устойчивости плотины, представляется возможным заменить криволинейный закон изменения жесткости системы ломанным графиком, состоящим из трех линейных участков (фиг. 4). Исследовать задачу теперь можно с помощью так называемых «скелетных кривых», которые соответствуют возникновению резонанса и значительному нарастанию смещений между элементами системы. Как известно, для линейной системы с одной степенью свободы «скелетные кривые» представляют собой прямые линии,



Фиг. 4.



Фиг. 5.

параллельные оси ординат (на фиг. 5 они показаны для каждой части пунктиром). На графиках по оси абсцисс отложены отношения частот; по оси ординат — амплитуды. Сначала, когда в процессе движения жест-

кость системы уменьшается, «скелетная кривая» искривляется в левую сторону, затем, после того как жесткость системы увеличивается, она искривляется в правую сторону. При этом возникает область неустойчивого движения и сдвигов в каменной наброске (на фиг. 5 эта область заштрихована). Пользуясь графиками, изображенными на фиг. 4 и 5, представляется возможным сделать оценку общей устойчивости плотины в первом приближении. Для этого необходимо определить зависимость, которая характеризует физические свойства каменной наброски и получить график, связывающий напряжения и деформации. Затем следует этот график аппроксимировать тремя линейными отрезками, как это было указано на фиг. 4. С помощью этого упрощенного графика следует определить три значения частоты, отвечающие трем разным участкам графика, и получить таким образом полосу, в пределах которой располагается «скелетная кривая» всей системы, а также соответствующую ей область неустойчивого движения. Этот этап исследования относится к изучению свойств профиля плотины. Для того, чтобы дать ответ на вопрос, устойчивой или неустойчивой является при данном сейсмическом воздействии плотина, следует изучить отдельные гармоники, составляющие спектр сейсмической волны, относящейся к вертикальной составляющей поверхности волны. Отдельные гармоники, которые попадают в полосу неустойчивости, изображенную на фиг. 5, могут вызвать сдвиги в профиле плотники при дополнительном условии, что амплитуды этих гармоник располагаются выше горизонтальной прямой, соответствующей отношению $A : A_0 = A^* = 1$.

Таким образом, если спектр действия сейсмической нагрузки имеет такие амплитуды, которые не попадают в область неустойчивости, построенную для данного профиля плотины, то этот профиль будет надежным.

Для практических целей криволинейные области неустойчивости можно заменить ступенчатыми, как это сделано на фиг. 6, где заштрихована область, соответствующая устойчивому профилю. Чертеж построен в безразмерных координатах: по оси ординат отложена относительная амплитуда, которая равна отношению амплитуды данного члена разложения спектра действия к амплитуде, полученной от этой нагрузки в упругой стадии; по оси абсцисс отложена относительная частота, которая равна отношению частоты данного члена спектра действия сейсмической нагрузки к частоте профиля, вычисленной по упругой стадии.

При выполнении конкретных расчетов придется ограничиться несколькими обертонами, отвечающими высшим частотам вынужденных колебаний. В результате будет получено несколько точек, которые следует нанести на чертеж и убедиться в том, что все они находятся вне области неустойчивости.

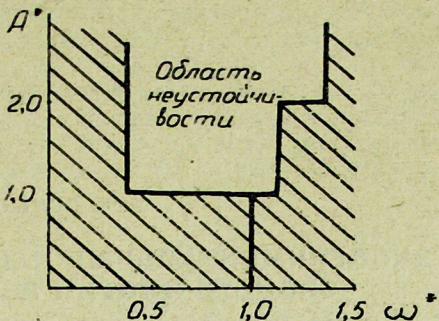
Разработанный способ расчета нами изложен применительно к системе с одной степенью свободы, которая является наиболее простой и вместе с тем, как показывают многочисленные опыты, достаточно хорошо позволяет оценить динамические свойства плотин. Дальнейшее уточнение расчета можно сделать, если перейти к системе с несколькими степенями свободы. Для этого профиль плотины следует разбить на участки, которые будут связаны между собой нелинейными связями, отвечающими физическим свойствам материалов, из которых сделаны данные участки, и тем силам (трения и сцепления), которые возникают на границах этих участков. Для такой системы расчет будет значительно сложнее, но принципиальных затруднений для его выполнения не встретится, если применить электронные вычислительные машины. Увеличение числа степеней свободы вызовет соответствующее увеличение числа

«скелетных кривых» на графиках неустойчивости, которые могут между собой пересекаться. Эти точки пересечения обладают тем интересным свойством, что для них эффект неустойчивости определяется не только параметрами внешнего динамического воздействия, но и характеристиками тех взаимных связей, которые существуют между отдельными элементами системы. Этот вывод имеет существенное практическое значение. Он указывает на то, что при неудачном сопряжении отдельных частей профиля плотины ее устойчивость сейсмическим воздействиям может сильно понизиться. Таким образом, разработанный метод позволяет дать оценку общей устойчивости плотины треугольного профиля из местных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Ф. Саваренский и Д. П. Кирнос. Элементы сейсмологии и сейсмометрии, Гостехиздат М., 1955.
2. С. В. Медведев. Инженерная сейсмология, Госстройиздат, М., 1962.
3. А. Г. Назаров. Метод инженерного анализа сейсмических сил, Изд-во АН Армянской ССР, Ереван, 1959.
4. А. П. Синицын. К вопросу об определении сейсмической нагрузки на массивные сооружения. Бюллетень Совета по сейсмологии АН СССР, № 8, М., 1960.
5. А. П. Синицын. Влияние бегущей сейсмической волны на массивные сооружения. Тр. Ин-та физики Земли АН СССР, № 17 (184), М., 1961.
6. А. П. Синицын. Балка на двухслойном полупространстве за пределом упругости. Исследования по теории сооружений, Госстройиздат, в. X, 1961.

Военно-инженерная академия им. В. В. Куйбышева.



Фиг. 6.