

Чукин Р.Б.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
ГРУНТОВЫХ ДАМБ ХВОСТОХРАНИЛИЩ

Чукин Р.Б.

КАЛДЫК САКТАГЫЧТАРДЫН КЫРТЫШТЫК ДАМБАЛАРЫН СЕЙСМИКАЛЫК
БААЛООГО ЗАМАНБАП МАМИЛЕЛЕР

R.B. Chukin

MODERN APPROACHES IN ASSESSMENT OF SEISMIC STABILITY
OF SOIL TAILINGS DAMS

УДК: 624.131.537(574) (04)

В статье описываются особенности поведения связных и несвязных грунтов при динамической нагрузке. Приводятся рекомендации по выбору характеристик расчетной акселерограммы в зависимости от вида изучаемого грунта. Анализируются критерии сейсмостойкости грунтовых дамб хвостохранилищ для динамических расчетов.

Ключевые слова: грунт, динамическая нагрузка, разрушение, прочность, дамба, деформация, сейсмическая устойчивость.

Макалада динамикалык жүктөмдө байланышкан жана байланышпаган жер кыртышынын аракетинин өзгөчөлүктөрү сүрөттөлгөн. Изилденип жаткан жер кыртышынын түрүнө жараша эсептик акселерограмманын мүнөздөмөлөрүн тандоо боюнча сунуштар келтирилген. Динамикалык эсептер үчүн кыртыштык дамбалардын жер титирөөгө туруктуулук ченөлчөмдөрү талданган.

Негизги сөздөр: жер кыртышы, динамикалык жүктөм, бузулуу, бекемдик, дамба, майышуу, жер титирөөгө туруктуулук.

The paper describes behavior features of cohesive and cohesion less soils during dynamic loading. The recommendations were given on the choice of applying acceleration characteristics depending on the type of studied soil. Criteria of embankment dam seismic stability are analyzed for dynamic simulation.

Key words: soil, dynamic loading, destruction, durability, dam, deformation, seismic stability

При оценке сейсмической устойчивости грунтовых дамб возведенных на грунтовом основании необходимо учитывать особенности поведения грунтов при циклических нагрузках. Наибольшее количество работ посвящено изучению поведения песков при динамических нагрузках. Это связано, в первую очередь с эффектом разжижения водонасыщенных песчаных грунтов, что ярко проявилось при землетрясениях в Японии, на Аляске, в Калифорнии, на Филиппинах и в других местах земного шара.

Характерными формами реакции песчаных грунтов на динамические нагрузки являются:

1. уплотнение (отрицательная дилатансия) рыхлого песка любой влажности;
2. разжижение водонасыщенного песка, связанное с быстрым нарастанием порового давления на фоне уплотнения грунта вплоть до исчезновения эффективных напряжений;
3. разуплотнение (положительная дилатансия) мало-влажных плотных песков, сопровождающееся их разупрочнением [1].

Под разжижением грунта понимается его переход в текучее состояние вне зависимости от причины такой трансформации: это может быть действие как статической, так и динамической нагрузки, а также подъем уровня грунтовых вод и возникновение значительных градиентов напора. Под динамическим разжижением понимают переход грунта в текучее состояние в результате потери прочности при разрушении структурных связей динамической нагрузкой. Такое разжижение песчаных грунтов связано со стремлением рыхлого грунта к сокращению объема и «взвешиванием» частиц в воде с исчезновением эффективных напряжений. К рыхлой системе относятся пески с относительной плотностью до 0,45 [2]. Под плотными понимаются пески с относительной плотностью более 0,6. Таким образом, пески средней относительной плотности характеризуются значением данной величины в диапазоне 0,45-0,6. Пример иллюстрирующий разжижение песка, в лабораторных условиях, с относительной плотностью 0,5 показан на рисунке 1. До тех пор пока значение относительного порового давления не достигает 100%, деформации незначительны. Как только поровое давление становится равным эффективному напряжению, после 24 циклов нагружения, деформации начинают очень быстро увеличиваться [3].

Длительные пульсирующие нагрузки, особенно при небольших амплитудах деформации, не позволяют даже плотному водонасыщенному песку мобилизовать значительное сопротивление сдвигу и приводят к медленной переупаковке зерен и внезапному разжижению грунта, начинающемуся в пределах сформировавшихся ослабленных зон.

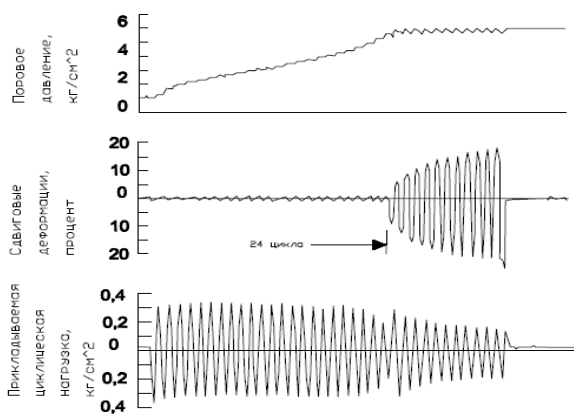


Рис. 1. Нарастание порового давления из-за приложения циклической нагрузки и разжижение песка после 24 циклов нагружения

В сухих песках длительное динамическое воздействие приводит к формированию ослабленных зон разуплотнения, в пределах которых происходит внезапное разрушение массива.

В связных глинистых грунтах при динамическом воздействии возникают тиксотропные процессы. Под тиксотропией понимается физико-химическое явление, присущее коагуляционным дисперсным системам и выражающееся в полном или частичном разрушении структурных связей грунта под действием динамической нагрузки и последующем самопроизвольном их восстановлении (в состоянии покоя), протекающее при неизменных температуре и влажности [4]. Важным свойством тиксотропных систем является их полная обратимость, т.е. восстановление прочности до исходного уровня независимо от количества циклов «разрушение-восстановление». Схематическая кривая этих превращений для чисто тиксотропной системы приведена на рисунке 2, а. Однако, в силу ряда причин, природные связные грунты, как правило, не обладают этим свойством – их конечная прочность после завершения восстановления либо не достигает исходного уровня (рис. 2, б), либо превышает его (рис. 2, в). Поэтому говорят о квазитиксотропности [5] таких грунтов, принимая во внимание, что в основе их реакции на динамическую нагрузку лежат все же тиксотропные процессы, осложненные некоторыми особенностями.

Степень квазитиксотропности глинистых грунтов зависит от двух групп факторов: 1) «внутренних» – характеризующих состав и состояние самого грунта и 2) «внешних» – характеризующих динамическое воздействие. Важнейшими «внутренними» факторами, определяющими прочность структурной сетки грунта, являются: влажность, химико-минеральный состав, дисперсность и т.д. Влияние влажности изучено достаточно подробно. Ее увеличение ускоряет снижение прочности при динамическом воздействии.

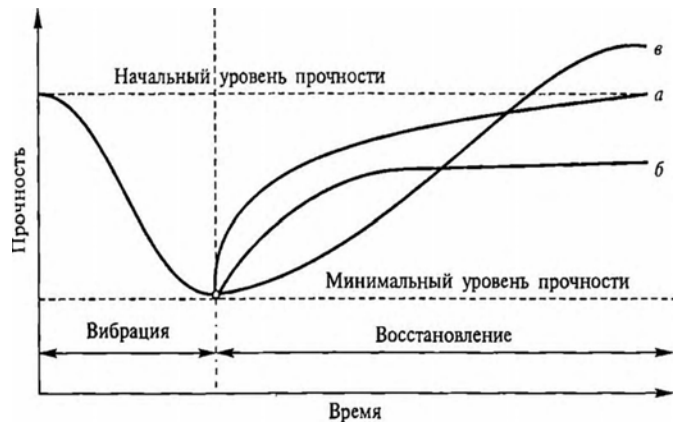


Рис. 2. Схема восстановления прочности тиксотропной системы (а) и квазитиксотропных природных грунтов (б, в)

Это объясняется ослаблением структурных связей и увеличением подвижности частиц по мере утолщения их водных оболочек. Величина влажности максимального разупрочнения не зависит от параметров динамической нагрузки и определяется параметрами грунта.

С увеличением силовых характеристик, т.е. амплитуды и виброускорения возрастает энергия динамического воздействия на грунт, вызывая рост разупрочнения. Наибольший спад прочности наблюдается при виброускорениях до 0,5-0,7g, что в реалиях соответствует очень сильному землетрясению [5]. Виброускорение не является независимым параметром динамической нагрузки и зависит от амплитуды и частоты колебаний. Вопрос о влиянии частоты нагружения на динамическую реакцию дисперсных грунтов является одним из наиболее неопределенных в современной динамике грунтов. Опыт зарубежных ученых показывает, что подобная зависимость существует. Например, для ила из залива Сан-Франциско, при проведении динамических испытаний, увеличение частоты колебаний с 1 до 2 Гц существенно изменяет количество циклов воздействия, необходимых для разрушения образцов. Основная причина частотной зависимости реакции грунта – разная длительность фаз нагружения и разгрузки в цикле воздействия при различной частоте. Но эта причина не единственная. Основываясь на экспериментальных литературных данных, можно указать, еще пять частотно-зависимых эффектов, в той или иной мере определяющих влияние частоты воздействия на динамическую реакцию дисперсных грунтов: 1) темпы диссипации порового давления, 2) рост энергии воздействия с частотой, 3) резонансные явления, 4) проявление ползучести и 5) тиксотропные явления. Чем выше влажность глинистого грунта, тем более выражено влияние частоты динамической нагрузки на его поведение.

Конечная прочность тиксотропной системы после завершения ее упрочнения величина постоянная, не зависящая от характеристик действовавшей динамической нагрузки. Восстановленная же прочность квазитиксотропного грунта, напротив, являе-

тся в какой-то мере функцией степени разрушения их природной структуры и, следовательно, определяется интенсивностью динамической нагрузки. При этом с ростом энергии воздействия конечная прочность снижается для грунтов, поведение которых характеризуется кривой б на рис.3, и, как правило, немного увеличивается для случая, представленного кривой в. Наибольший прирост прочности грунта обычно отмечается в течение первых 3-10 минут отдыха, и с этой точки зрения весь процесс восстановления можно разделить на два этапа: начальный, когда формируется, в основном, структурная сетка, и завершающий, связанный с ее дальнейшим упрочнением.

Для инженеров проектировщиков, занимающихся расчетами сейсмической устойчивости грунтовых дамб по прямому динамическому методу накопленный опыт зарубежных исследователей, описываемый в данной статье, является напутствием для выбора расчетной записи акселерограммы. Это связано с тем, что разные характеристики динамической нагрузки оказывают разное влияние на грунты. Данный выбор должен основываться на геологическом разрезе площадки строительства с определением преобладающего типа грунта в нем и моделировании наихудших сейсмических событий для конкретного случая. Для основания содержащего пески выбор расчетной записи должен базироваться на ее продолжительности. Частотные характеристики и пиковые ускорения играют важную роль в исследовании сейсмической неустойчивости песчаных грунтов, но как уже было описано выше, даже плотные пески способны разжижаться после продолжительной сейсмической нагрузки. В задачи инженеров входит определение максимально возможных зон подверженных разжижению и их влияние на устойчивость возведенной грунтовой дамбы, для этого рекомендуется использовать акселерограммы продолжительностью более 60 секунд. Пример расчетной записи для моделирования сейсмической реакции основания содержащего водонасыщенные пески показан на рисунке 3.

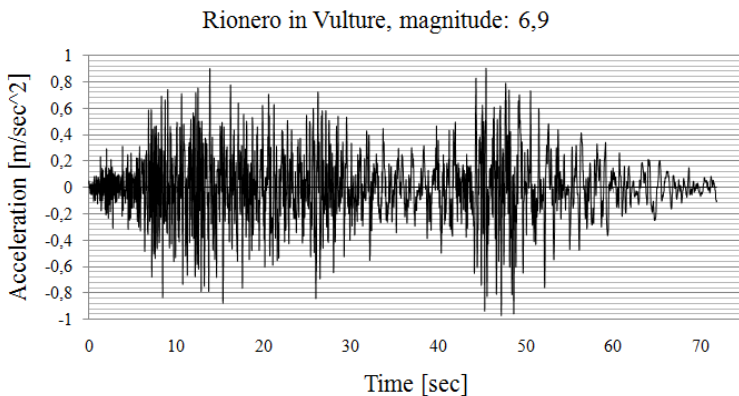


Рис. 3. Характерная расчетная запись ускорений для оценки сейсмической реакции оснований содержащих водонасыщенные пески, продолжительностью 71 секунда.

Для глинистых грунтов, необходимо выявление резонансных эффектов и их влияние на устойчивость возведенной грунтовой дамбы. Для этого расчетные записи должны содержать различные спектры по частотному составу. Продолжительность тряски немаловажный фактор, но его роль не так значительна как для расчета основания содержащего пески.

Оценка сейсмической устойчивости грунтовых дамб рассматриваемых по динамическому методу должна проводиться по второму предельному состоянию, т.е. по допустимым деформациям возникающих в грунтах. Предельное состояние дамбы характеризуется наличием повреждений (осадок, смещений, трещин), которые могут привести к нарушению напорного фронта, либо исключаящих возможность ее нормальной эксплуатации. Характер нарушения напорного фронта может быть различным. Возможно резкое, непосредственно связанное с воздействием понижение гребня дамбы вследствие осадки грунта либо вследствие потери устойчивости и обрушения откоса по кривой скольжения, захватывающей гребень дамбы. В случае если откос сложен из несвязных грунтов, может наблюдаться такой вид деформаций, как выполаживание, т.е. пересыпание частиц грунта с поверхности откоса, вследствие чего происходит уменьшение угла наклона откоса к горизонту. Процесс выполаживания может сопровождаться одновременной осадкой гребня дамбы.

Самым неблагоприятным видом отказа грунтовой дамбы является прорыв напорного фронта с образованием волны прорыва. Поэтому в качестве критерия сейсмостойкости может быть принято абсолютное смещение гребня дамбы. Так, осадка h гребня дамбы не должна превышать запас уровня верхнего бьефа:

$$h < \Delta h = \nabla_{Гр.пл.} - \nabla_{ББ} \quad (1)$$

где: $\nabla_{Гр.пл.}$ – отметка гребня дамбы; $\nabla_{ББ}$ – отметка воды в верхнем бьефе.

Достижению опасных осадок гребня предшествуют перемещения и деформации грунта, которые могут сформировать в теле дамбы зоны разуплотнения и трещинообразования. В этом случае должны анализироваться величины деформаций сдвига, возникших во время динамической нагрузки, рост которых может привести к формированию поверхностей скольжения и потере устойчивости откоса. Определение значений возникших деформаций сдвига возможно с помощью расчета напряженно-деформированного состояния дамбы во время динамического расчета. Например, для динамического расчета устойчивости дамбы хвостохранилища Кумтор, при применении записи акселерограммы с низкой доминантной частотой, анализировались деформации сдвига по графикам деформации/напряжения в трех контрольных точках модели: тело дамбы, фронтальная и тыльная части

упорного клина, показанные на рисунке 4. На рисунке 5 представлен график деформации/напряжения в грунтах тела дамбы, точка №1 из рисунка 4. Деформации отложены по горизонтальной оси, и их максимальное абсолютное значение достигало 0,078%. На рисунке 6 представлен график деформации / напряжения в грунтах упорного клина, точка №2 из рисунка 4. Максимальное значение деформаций достигало 0,36%. На рисунке 7 представлен график деформации/напряжения в грунтах упорного клина, точка №3 из рисунка 4. Максимальное значение деформаций достигало 0,95%.

Формирование зон разуплотнения и трещинообразования характеризуются сдвиговыми деформациями грунта, вызванных динамической нагрузкой, более 1 - 2%. Формирование поверхностей скольжения связано с дальнейшим увеличением деформаций до величин порядка 2 - 5%. При этом для реализации движения по сформировавшимся поверхностям и обрушения откосов необходимо, чтобы поверхности скольжения пересекали тело дамбы и имели выход на поверхность откоса. Сейсмостойкость дамбы будет считаться нарушенной, если зона опасных деформаций пересекает поперечное сечение дамбы и расположена ниже отметки верхнего бьефа. На рисунке 8 показано распределение максимальных деформаций сдвига возникших во время динамического расчета. Как видно из рисунка образовавшаяся поверхность сдвига проходит через суглинистый прослой в основании дамбы. Сформированная поверхность сдвига упирается в упорный клин и не имеет выхода на свободную поверхность, что говорит о сейсмической устойчивости дамбы.

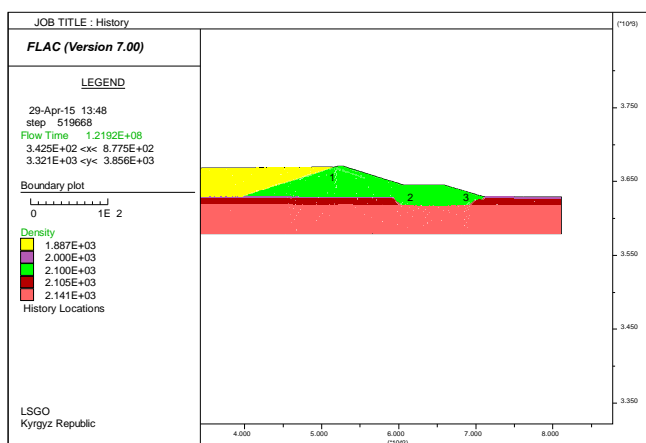


Рис. 4. Расположение контрольных точек, для построения графика деформации/напряжения

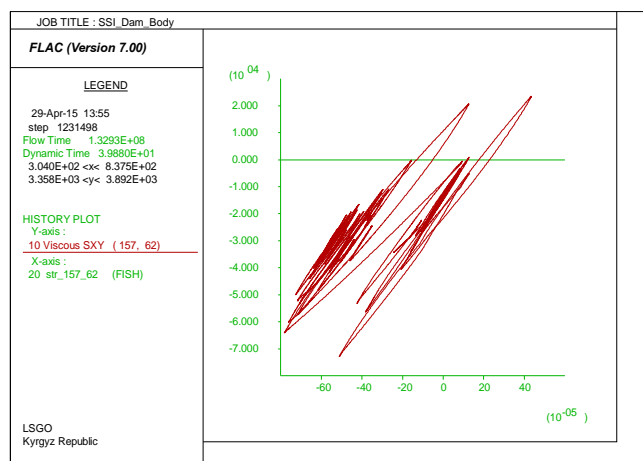


Рис. 5. График деформации/напряжения в грунтах тела дамбы

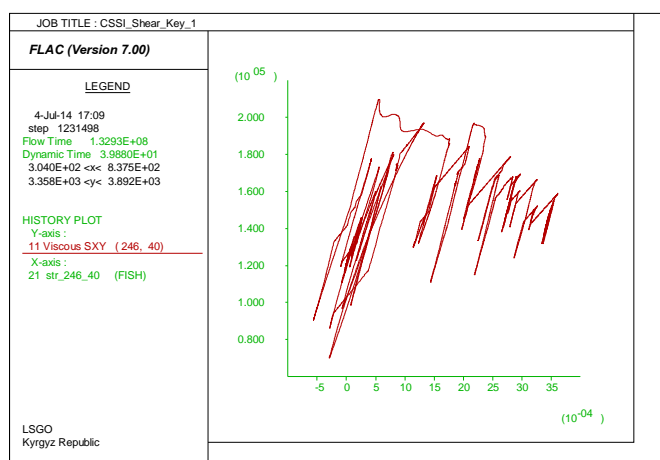


Рис. 6. График деформации/напряжения в грунтах упорного клина, фронтальная часть

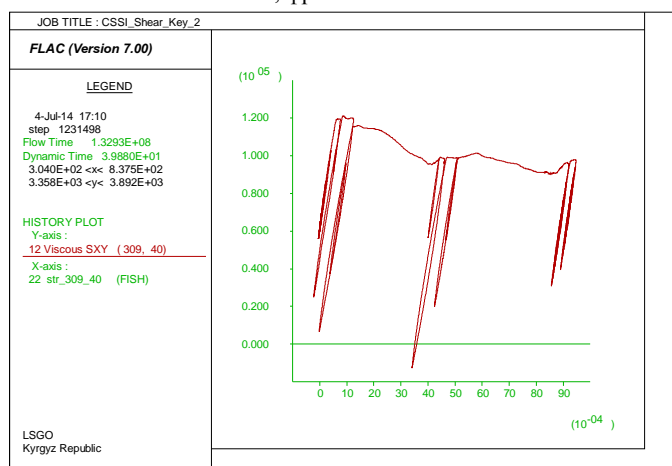


Рис.7 График деформации/напряжения в грунтах упорного клина, тыльная часть

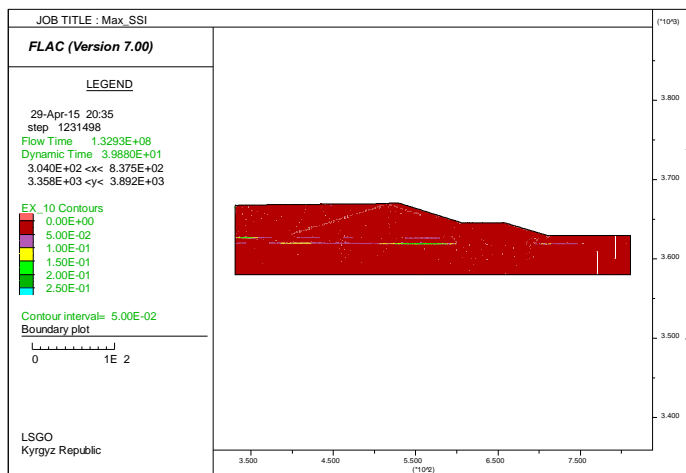


Рис. 8 Распределение максимальных сдвиговых деформаций

Литература:

1. Вознесенский Е.А. Динамические свойства грунтов и их учет при анализе вибраций фундаментов разного типа // Геозкология. 1993. № 5. С. 37-65.
2. Vaid Y.P., Chern J.C. Mechanism of deformation during cyclic undrained loading of saturated sands // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 1983. V. 2. №2. P. 171-176.
3. Seed H.B. Landslides during earthquakes due to soil liquefaction, ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Division. 1968. V.94. №SM5. P. 1053-1122.
4. Кожобаев К.А. Тиксотропия, дилатансия и разжижение дисперсных грунтов. г.Бишкек: Изд-во «Илим». 1991. 210с.
5. Вознесенский Е.А., Калачев В. Я., Трофимов В. Т., Коваленко В. Г. Квзитиксотропные изменения в глинистых грунтах. М.: Изд-во МГУ. 1990. 143с.

Рецензент: к.т.н. Ким Э.А.