

ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

УДК: 519.872.8:550.34.06.013.2

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ РАСЧЕТНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ПЛОЩАДКИ СТРОИТЕЛЬСТВА И ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ДАМБ.*Джаманбаев Мураталы Джузумалиевич, д.ф.-м.н., профессор, КГТУ им. И. Раззакова, 720044, Кыргызстан, г.Бишкек, пр.Ч.Айтматова 66., e-mail:rector@kstu.kg**Чукин Руслан Бектурович, соискатель на степень к.ф.-м.н., КГТУ им. И. Раззакова, 720044 Кыргызстан, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66.*

Аннотация: В статье приводятся методические основы поэтапного решения оценки сейсмической устойчивости грунтовых дамб. Приводятся основные зависимости обработки результатов комплекса специальных исследований необходимых для установления расчетной сейсмичности площадки строительства и выполнения расчетов сейсмической устойчивости. Даются основы подбора акселерограмм для выполнения расчетов по прямому динамическому методу. Предлагается авторский подход для оценки расчетной сейсмичности с учетом местных грунтовых условий на основе численного моделирования. Даются рекомендации по оценке сейсмической устойчивости грунтовых дамб на основании критериев сейсмостойкости по результатам численного моделирования.

Ключевые слова: численное моделирование, расчетная сейсмичность, акселерограмма, максимальный динамический модуль упругости, демпфирование, местные грунтовые условия, критерии сейсмостойкости

NUMERICAL MODELLING USAGE TO JUSTIFY CALCULATION SEISMICITY OF CONSTRUCTION SITE AND SEISMIC STABILITY ASSESSMENT OF EMBANKMENT DAMS.*Jamanbaev Murataly, Doctor of Physic-Mathematical Sc., Professor, KSTU after I. Razzakov, 720044, Kyrgyzstan, Bishkek c. Ch.Aitmatov av.66, e-mail:rector@kstu.kg**Chukin Ruslan, applicant for Candidate of Physic-Mathematical Sc., KSTU after I. Razzakov, 720044, Kyrgyzstan, Bishkek c., Ch.Aitmatov av.66.*

Abstract: The paper provides the methodological basis of the step-by-step solution of seismic stability assessment of embankment dams. The main dependencies of results processing of complex special studies that are necessary to establish the calculation seismicity of construction site and perform analysis of seismic stability are given. The basis of the selection of accelerograms for performing analysis using direct dynamic method is provided. An author's approach is proposed for assessment of calculation seismicity taking into account local soil conditions based on numerical simulation. Recommendations are given on the assessment of embankment dam's seismic stability by results of numerical modelling based on seismic resistance criteria.

Key words: numerical modelling, calculation seismicity, accelerogram, maximum dynamic shear modulus, damping, soil site conditions, seismic stability criteria

Для анализа сейсмической устойчивости грунтовой дамбы производится комплекс исследований по установлению расчетной сейсмичности площадки строительства и получению набора сейсмических записей и их спектров, используемых при нелинейном численном моделировании. Согласно СНиП КР 20-02:2009 «Сейсмостойкое строительство»

[1] расчетная сейсмичность площадки строительства устанавливается по рекомендованной трех стадийной схеме: нормативная сейсмичность, исходная сейсмичность, расчетная сейсмичность. Нормативная сейсмичность определяется по карте сейсмического районирования территории КР, разработанной Институтом сейсмологии НАН КР (приложение Б, СНиП КР 20-02:2009). Исходная сейсмичность устанавливается методами детального сейсмического районирования, - составление сеймотектонической модели исследуемого района с построением карты и определением характеристик основных зон возможных очагов землетрясения. В результате детального сейсмического районирования выявляются разломы, которые могут быть потенциальными источниками землетрясений, их отдаленность от интересующей площадки строительства и характеристики, такие как длина разломов, скорость сдвига и т.д. Зная характеристики выявленных разломов, можно произвести уточняющие расчеты магнитуд и пиковых ускорений на естественной поверхности основания. Например, возможная магнитуда может быть рассчитана по эмпирическому выражению Веллса и Копперсмита [2]:

$$M = 5.08 + 1.16 * \log(SRL),$$

где SRL – выявленная длина разлома в километрах.

Продолжительность землетрясения связана со временем необходимым для высвобождения накопившейся энергии в разрыве пород вдоль разлома. По мере увеличения длины области разрыва пород в разломе время необходимое для высвобождения энергии увеличивается, и в результате увеличивается продолжительность тряски и магнитуда. Чанг и Кринитский [3] производили исследования продолжительности акселерограмм полученных в результате землетрясений различной магнитуды. Используя граничный интервал в акселерограммах $\pm 0,05g$ они определили зависимость продолжительности землетрясения от магнитуды для эпицентра, расположенного не дальше 10 километров. Результат их исследования представлен в таблице 1.

Таблица 1. Продолжительность землетрясения от магнитуды

Магнитуда	Продолжительность в пределах 0,05g (сек)	
	Скальное основание	Грунтовое основание
5,0	4	8
5,5	6	12
6,0	8	16
6,5	11	23
7,0	16	32
7,5	22	45
8,0	31	62
8,5	43	86

Пример определения подбора акселерограммы по продолжительности показан на рисунке 1. Первое превышение границы $\pm 0,05g$ происходит на 1,5 секунде, а последнее на 20,5 секунде, т.о. продолжительность основной части акселерограммы составляет 19 секунд.

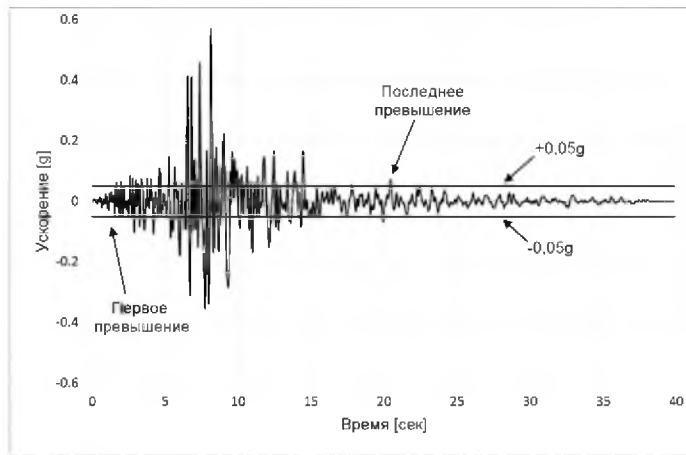


Рис. 1. Пример расчета продолжительности акселерограммы

Величина пикового ускорения может быть рассчитана из уравнений прогнозирования колебаний земной поверхности, в зарубежной литературе известных как GMPE. Существует достаточно большое количество авторов данных эмпирических уравнений, например, каталог, <http://www.gmpe.org.uk/gmpereport2014.html> насчитывает более четырехсот уравнений. Кевин Флеминг, являющийся научным сотрудником Исследовательского центра наук о земле из города Потсдам, Германия, в рамках проекта «Определение Сейсмических Рисков Кыргызстана» финансируемого Всемирным Банком выполнил расчеты по определению пиковых горизонтальных ускорений с помощью нескольких уравнений GMPE по всей территории КР. С результатами его исследований можно познакомиться на веб-платформе Министерства Чрезвычайных Ситуаций КР по адресу <http://geonode.mes.kg/>. На рисунке 2 показана карта с рассчитанными значениями пиковых ускорений в долях от гравитации по всей территории КР.



Рис.2. Карта КР по пиковым горизонтальным ускорениям на поверхности в долях от гравитации

Существует еще один очень важный параметр выбора расчетных акселерограмм, - доминантная частота акселерограммы, характеризующий частоту сейсмического нагружения. Анализ литературы о влиянии, данного параметра на динамическую реакцию различных грунтов приведен в [4]. Анализировать данный параметр можно с помощью математического разложения акселерограмм в частотные спектры. Данная процедура реализована в некоторых программах численного моделирования, например, FLAC. Если подобранные акселерограммы будут содержать различные доминантные частоты, это позволит повысить достоверность выполняемой оценки сейсмической устойчивости и проверить сооружения и его основание на сейсмическую устойчивость при различной динамической нагрузке.

Расчетная сейсмичность учитывает влияние местных грунтовых условий. Анализ расчетной сейсмичности можно выполнить методами численного моделирования. Нами предлагается двух этапный подход учета влияния местных грунтовых условий. На первом

этапе создаётся модель основания сооружения, состоящего только из коренных пород. Выполняя динамический расчет однородного основания и изменяя амплитуды прикладываемой нагрузки добиваемся необходимого пикового ускорения на поверхности. На втором этапе вводится в модель реальные грунтовые условия и повторяется расчет при подобранных значениях нагрузки и амплитуды. Проводится сравнительный анализ влияния местных грунтовых условий на основные характеристики колебаний: пиковое ускорение, продолжительность тряски и частоты.

Основными динамическими параметрами грунтов являются максимальный динамический модуль упругости сдвига – G_{max} , и коэффициент демпфирования – D . Наиболее надежно эти параметры и их изменение от деформации сдвига определяются по результатам лабораторных испытаний образцов грунта. Если лабораторные тесты недоступны, но есть данные о результатах сейсмических геофизических полевых испытаниях с определением скорости прохождения упругой поперечной волны вдоль толщи грунта (V_s), предварительно G_{max} можно определить из зависимости, связывающей эту скорость и плотность грунта (ρ):

$$G_{max} = \rho * V_s^2$$

Если измерения скорости прохождения упругой поперечной волны тоже недоступны, можно воспользоваться формулами, обобщающими результаты лабораторных тестов, проведенных ранее. Для связных грунтов G_{max} можно определить из выражения Хардина [5]:

$$G_{max} = \frac{OCR^k}{0.3 + 0.7e^2} \sqrt{P_a \sigma'_m}$$

где: σ'_m – среднее эффективное нормальное напряжение, $\sigma'_m = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$; e – коэффициент пористости; k – экспонента, являющаяся функцией числа пластичности, т.о. что при $PI, \% = 0, 20, 40, 60, 80$ и 100 значения $k = 0.0, 0.18, 0.31, 0.41, 0.48$ и 0.5 соответственно; P_a – атмосферное давления в тех же единицах измерения, что и G_{max} ; OCR – коэффициент консолидации, определяющийся как отношение максимальных вертикальных эффективных напряжений, действующих на грунт в прошлом (σ'_{vmax}) к настоящим вертикальным эффективным напряжениям (σ'_v); грунт который никогда не испытывал вертикального эффективного напряжения которое было бы больше, чем ныне действующие вертикальные эффективные напряжения называется нормально консолидированным, при этом $OCR=1$ и как следствие G_{max} не зависит от числа пластичности грунта:

$$OCR = \frac{\sigma'_{vmax}}{\sigma'_v}$$

Для несвязных грунтов G_{max} можно определить из выражения Сиды [6]:

$$G_{max} = 21,7K_{2max}P_a \left(\frac{\sigma'_m}{P_a}\right)^{\frac{1}{2}}$$

где K_{2max} – константа, для песков принимается равной 100, а для гравия 200.

При динамической нагрузке максимальный модуль упругости сдвига G_{max} изменяется. Измененный модуль называется секущим модулем сдвига G , и является функцией первоначального максимального динамического модуля G_{max} умноженного на коэффициент уменьшения, который в свою очередь является либо функцией возникших деформаций сдвига, либо возникших общих напряжений в зависимости от математической модели его определения. Соотношение модулей G/G_{max} лежит в основе расчета коэффициента демпфирования D согласно правилу Мазинга [7]:

$$D = \frac{4}{\pi} \frac{1}{1 - \frac{G}{G_{max}}} \left[1 + \frac{\frac{G}{G_{max}}}{1 - \frac{G}{G_{max}}} \ln \left(\frac{G}{G_{max}} \right) \right] - \frac{2}{\pi}$$

Изменение коэффициента деградации G/G_{max} , и коэффициента демпфирования D от деформаций сдвига представляется в виде графиков строящихся по результатам лабораторных тестов. Если такие данные отсутствуют, применяются типовые графики из литературных данных для определенного типа грунта. Например, на рисунке 3 показаны

диапазоны кривых деградации модуля сдвига и увеличения демпфирования в процентах от деформаций сдвига для связных грунтов с числом пластичности от 15-30% согласно данных Вучетича [5].

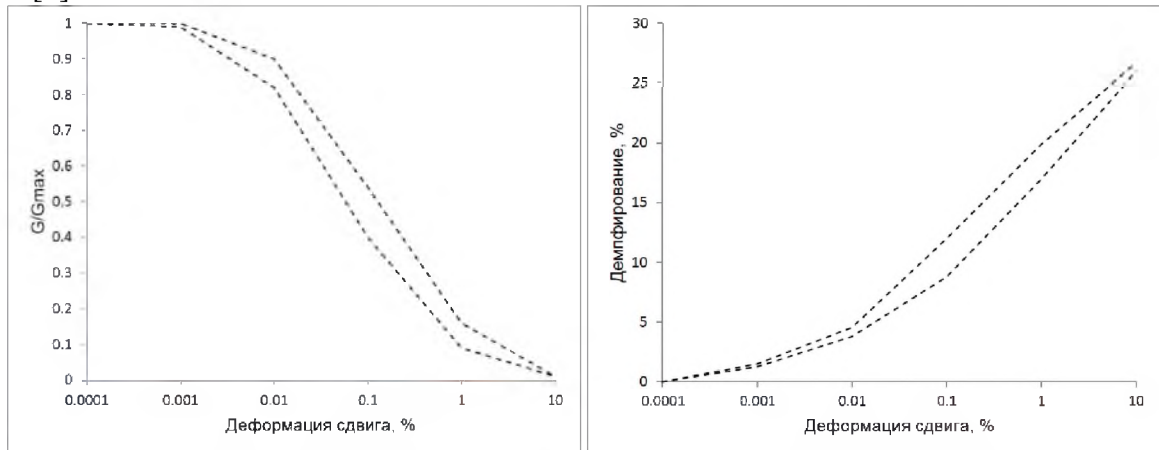


Рис. 3. Кривые изменения G/G_{max} и D от деформации сдвига для связных грунтов с PI от 15 до 30%

Существует несколько математических моделей, описывающих нелинейные динамические характеристики грунтов в численном моделировании (UBCHYST, Sigma 3, Sigma 4, Default Hyst, Hardin и др.). Все эти модели предназначены для симуляции реального поведения грунта в численном моделировании и обладают своими определенными параметрами. В одной из самых продвинутых геотехнических программ FLAC, результаты выбранных динамических характеристик грунтов задаются методом моделирования лабораторного испытания образца грунта. Создается модель единичного объема грунта, который подвергается циклической нагрузке с заданной величиной деформации сдвига. Изменением параметров численной модели добиваются сопоставления динамического отклика численной модели с результатами лабораторных тестов или типовыми из литературных данных. Калибровочный процесс завершается, когда численная модель с заданными параметрами ведет себя максимально приближенно к поведению реального грунта.

Кухлемейер и Лисмер [8] в своих расчетах показали, что «аккуратное» представление прохождения сейсмической волны через численную модель возможно, когда размер пространственного элемента модели, т.е. одной зоны – Δl меньше 1/10 длины волны, ассоциированной с наивысшими частотными компонентами вводимых записей землетрясений:

$$\Delta l = \frac{v_s \min}{10 f_{max}}$$

где, f_{max} – наивысшая значимая частота прикладываемых записей акселерограмм, определяется из разложения записей в частотные спектры; $v_s \min$ – самая низкая скорость прохождения упругой поперечной волны в численной модели.

Результаты численного моделирования оценки сейсмической устойчивости анализируются по полученным смещениям и деформациям в грунтах основания и тела дамбы. Критериями могут выступать: смещения гребня – осадка гребня не должна превышать запаса уровня верхнего бьефа; анализ величин деформаций и сформировавшейся поверхности сдвига – полученные величины деформаций после динамического анализа сравниваются с результатами лабораторных испытаний, для оценки снижения прочностных свойств или потери устойчивости грунта. Проанализировав эти критерии исследователь может констатировать устойчива ли система основание-сооружение или необходимы укрепительные мероприятия.

Таким образом численное моделирование являются неотъемлемой частью каждого этапа анализа сейсмической устойчивости грунтовых дамб.

Список литературы

1. СНиП КР 20-02:2009 Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования. Госстрой КР, 2009.
2. Donald L. Wells and Kevin J. Coppersmith New Empirical Relationships among Magnitude, Rapture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002, 1994.
3. Chang F.K. and Krinitzsky E.L. Duration, spectral content and predominant period of strong motion earthquake records from western United States. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1977.
4. Чукин Р.Б. Особенности динамической неустойчивости связных, несвязных грунтов и скальных пород и их учет при выборе расчетной акселерограммы. Современные проблемы механики. ИГиОН НАН КР, 2015.
5. Vucetic M. and Dobry R. Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, pp. 89-107, 1991.
6. Seed H.B. and Idriss I.M. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Earthquake Engineering Research Center Report, University of California, Berkeley, 1970.
7. Pyke R. Evolution of Soil Models Since the 1970's. Pacific Earthquake Engineering (PEER) Center Workshop, 2004.
8. Kuhlemeyer R. and Lysmer J. Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. J. Soil Mech. & Foundation, ASCE, 1973.

Все статьи, содержащиеся в журнале, прошли через «Антиплагиат».