

Чукин Р.Б.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ГРУНТОВОЕ СЛОИСТОЕ ОСНОВАНИЕ

R.B.Chukin

NUMERICAL MODELING OF SEISMIC SHEAR WAVE PROPAGATION THROUGH LAYERED SOIL FOUNDATION

УДК: 550.34.09(575.2)(04)

В статье приводятся результаты численного моделирования прохождения поперечной сейсмической волны через грунтовое слоистое основание, которое моделируется колонной, состоящей из различных грунтовых материалов. Дается анализ влияния местных грунтовых условий на изменение динамической реакции поверхности основания.

This paper gives the results of numerical modeling of seismic shear wave propagation through layered soil foundation. Foundation is presented as a column which consist of different soil materials. The analysis of influence of local soil conditions on changing of dynamic reaction on surface was made.

Для оценки сейсмической устойчивости грунтовых плотин на грунтовом основании необходимо исследовать влияние местных грунтовых условий на колебания поверхности основания при землетрясении. Исследование процессов распространения сейсмических волн в грунтовых основаниях является актуальной задачей. Хорошо известно, что при прохождении сейсмических волн через слоистое основание наблюдается явление частичного отражения волн: как от границы контакта грунтов, так и от свободной поверхности основания. Наиболее важными для оценки сейсмической устойчивости грунтовых сооружений являются поперечные сейсмические волны (ПСВ). Исследования их влияния на колебания поверхности в натуральных условиях являются дорогостоящим и сложным в реализации мероприятием. В этой связи, выявление особенностей, связанных с прохождением ПСВ через слоистое грунтовое основание, лучше выполнять на основании численного моделирования, т.е. путем проведения численного эксперимента.

Для выполнения численного эксперимента была выбрана модель основания, представляющая из себя колонну высотой 50 метров и шириной 1 метр. Выбор данной модели для исследования прохождения ПСВ обосновывается в [1]. Выявление особенностей влияния геологического строения основания на прохождение ПСВ проводилось на трех видах моделей. Первая модель: однородное скальное основание мощностью 50 метров. Вторая модель: двухслойное основание, состоящее из 35 метрового слоя скальной породы и 15 метрового слоя глинистого грунта. Третья модель: трехслойное

основание, состоящее из 35 метрового слоя скальной породы, глинистого прослоя мощностью 10 метров и 5 метрового слоя песчаного грунта.

Воздействие ПСВ задавалось путем приложения касательного напряжения к нижней границе основания. Величина касательного напряжения рассчитывается по формуле (1) [1,2]:

$$\sigma_s = -2\rho C_s \cdot V_s \quad (1)$$

где: ρ – плотность скальной породы,

C_s – скорость распространения упругих поперечных волн в скальной породе,

V_s – тангенциальная скорость грунта на границе основания.

По условию эксперимента величина амплитуды скорости горизонтальных смещений (СГС) основания колонны принята $V = 1$ м/сек. Значения изменяются от 0 до 1 и определяются функцией $y(t)$ времени t по зависимости (2) из [1]:

$$y(t) = \frac{1}{2}(1 - \cos(2\pi \cdot f \cdot t)) \quad (2)$$

где: f – частота колебания.

Особенностью моделирования является приложение однопикового воздействия ПСВ и то, что касательные напряжения имеют однонаправленное приложение. Схема приложения силового импульса и поведение колонны от сейсмического воздействия поперечной волны представлена на рис.1. Во всех экспериментах колонна моделируется, как упруго-динамическая модель без учета демпфирования грунтов. Это позволяет лучше проследить изменение СГС вдоль колонны при прохождении ПСВ.

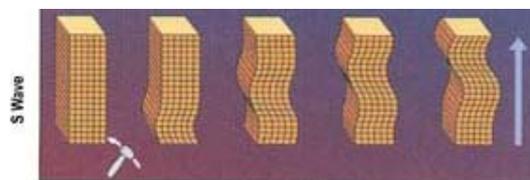


Рис.1. Схема приложения силового импульса и смещение колонны от сейсмического воздействия поперечной волны.

В качестве скальной породы принят гранит. Расчетные свойства гранита были приняты следующие: плотность $\rho = 2700$ кг/м³, скорость распространения упругих продольных волн $C_p = 4500$ м/сек, скорость распространения упругих поперечных волн $C_s = 2250$ м/сек [3]. Динамические

модули упругости K и G определяются из зависимостей:

$$C_{\delta} = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} \quad (3)$$

$$C_s = \sqrt{G/\rho} \quad (4)$$

Граничные условия заданы следующим образом. В основании колонна жестко зафиксирована, а вершина способна свободно колебаться. При жесткой фиксации основания колонны одновременно задана вязкая поверхность затухания, которая полностью поглощает приходящие к ней отраженные волны.

Значения СГС наблюдались в трех контрольных точках модели. Во всех моделях положение контрольных точек оставалось неизменным. Первая контрольная точка располагалась в основании, вторая - в середине, и третья - на вершине колонны. На рис.2 показаны графики изменения СГС при прохождении ПСВ во времени. Линия зеленого цвета – график изменения СГС основания колонны, линия синего цвета – график изменения СГС средней части колонны, линия красного цвета – график изменения СГС вершины колонны.

Из рисунка видно, что амплитуда СГС основания колонны равна 1 м/сек. ПСВ прошла от границы основания до вершины колонны за 0,0275 сек и вернулась обратно с той же скоростью к границе основания. В контрольной точке 2 СГС начала возрастать в то время, когда СГС в контрольной точке 1 снизилась до 0. Амплитуды скоростей в этих двух

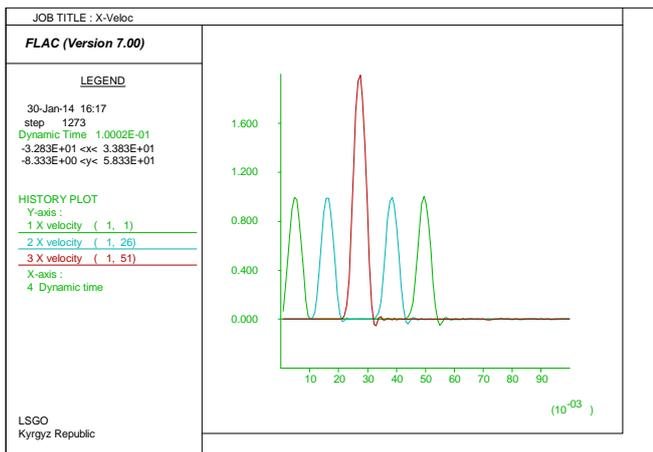


Рис. 2. Графики изменения СГС при прохождении ПСВ во времени в теле колонны.

контрольных точках одинаковы по значениям. СГС вершины колонны увеличилась вдвое и составила 2м/сек. Две последующие линии характеризуют СГС контрольных точек 2 и 1, вызванные отраженной ПСВ от свободной поверхности колонны. После того, как ПСВ вернулась в основание колонны вязкая

поверхность поглощает ее, тем самым, имитируя бесконечную среду. Так же можно наблюдать, что амплитуды СГС контрольных точек 2 и 1 от отраженной волны идентичны и равны половине амплитуды СГС вершины колонны. Отмечаем, что гранитная колонна от прохождения однонаправленного сейсмического воздействия не совершает колебательных движений. На это указывают графики СГС, которые не имеют отрицательных значений.

Во втором численном эксперименте свойства 35-ти метрового гранитного слоя и величина прикладываемого сейсмического воздействия остается такой же, как для первого эксперимента. Глинистый прослой мощностью 15 метров над гранитным основанием имел следующие параметры: $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$, $C_p = 1500 \text{ м/сек}$, $C_s = 750 \text{ м/сек}$. Динамические модули упругости для глины были определены из зависимостей (3) и (4).

На рис.3 показаны записи СГС от приложенного сейсмического воздействия. Для анализа рассмотрим графики распределения СГС за 0,2 секунды прохождения ПСВ. Зеленая линия – СГС основания, синяя – СГС середины, красная – СГС вершины колонны.

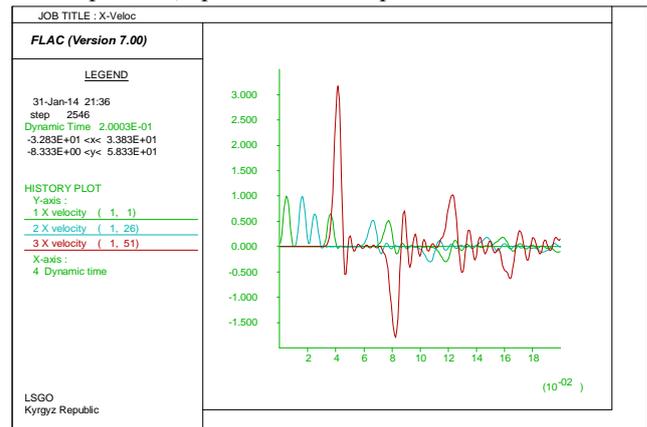


Рис. 3. Записи СГС контрольных точек в теле колонны при прохождении ПСВ на 0,2 секунды расчета.

Поведение колонны из двух материалов от прохождения ПСВ кардинально поменялось по сравнению с поведением однородной колонны. Во-первых, время прохождения ПСВ от границы основания до вершины колонны увеличилось по сравнению с первой моделью с 0,0275 сек до 0,042 сек. Во-вторых, наблюдается эффект колебания колонны. Из графиков видно, что амплитуды СГС контрольных точек 1 и 2, которые расположены в граните, идентичны первому эксперименту и равны 1 м/сек.

ПСВ, подхваченная глинистому прослою, отражается от него и делится на две составляющие, первая из которых движется обратно к основанию, а вторая продолжает движение к вершине. Последующие две кривые синего и зеленого цвета – это СГС от отраженной волны, которая, доходя до основания колонны, полностью затухает. На вершине происходит

увеличение амплитуды СГС до значения 3,17 м/сек. Отраженная ПСВ от свободной поверхности возвращается вниз. Но, доходя до основания глинистого прослоя, опять делится на две составляющие. Первая из которых продолжает двигаться к основанию, а вторая отраженная возвращается к вершине колонны. Вершина колонны продолжает свободно колебаться в обоих направлениях. График СГС красного цвета указывает на то, что сейсмическая волна в глинистом прослое «гуляет» вверх и вниз, отражаясь то от свободной поверхности, то от границы материалов. При отражении от границы материалов каждый раз часть ПСВ уходит в основание колонны, о чем говорят последующие затухающие графики СГС синего и зеленого цветов. Колебания вершины по истечению времени так же затухают. Процесс затухания СГС происходит скачкообразно, что говорит о возникновении различных частот СГС. Все это указывает на то, что поведение колонны от сейсмического воздействия зависит от частоты первоначального силового импульса, динамических характеристик грунтов, а также от их мощности. Разложение в ряд Фурье записи СГС вершины колонны представлено на рис.4. Общая продолжительность колебания вершины колонны увеличилась и составляет примерно 0,5 секунды.

В третьем численном эксперименте колонна представлена 35 метровым гранитным слоем, глинистым прослоем мощностью 10 метров и 5 метровым песчаным слоем над глинистым прослоем. Свойства песка, при которых велся расчет: $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$, $C_p = 400 \text{ м/сек}$, $C_s = 200 \text{ м/сек}$.

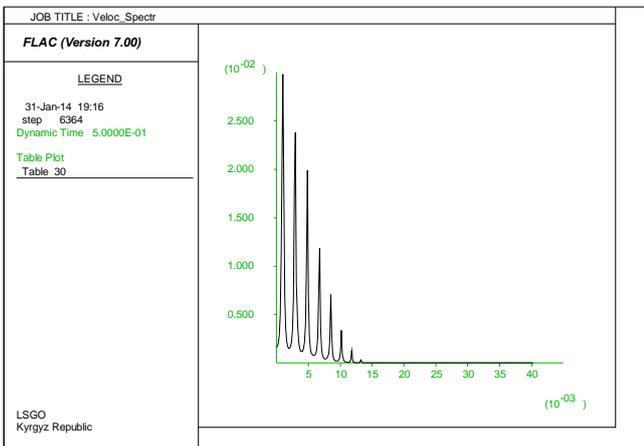


Рис. 4. Энергетический спектр СГС вершины колонны.

Динамические модули упругости для песка были рассчитаны из выражений 3 и 4. Свойства гранита и глины не изменялись. СГС наблюдаются в контрольных точках колонны, как и при двух предыдущих расчетах.

На рис.5 показаны записи СГС в контрольных точках 1, 2 и 3 за 0,3 секунды расчета. Из рисунка видно, что наличие третьего песчаного слоя значи-

тельно изменило характер колебаний верха колонны. Пиковое значение амплитуды СГС меньше, чем во втором эксперименте, и достигло 2,67 м/сек, но амплитуда СГС последующих колебаний от отраженных ПСВ гораздо выше. Рассмотрим прохождение начального импульса более детально. Основной отличительной особенностью от второго эксперимента является то, что отраженная ПСВ от поверхности, доходя до кровли глинистого грунта, отражается и возвращается опять к поверхности колонны. Тем самым, проявился эффект «ловушки» песчаного слоя. Об этом говорит очень небольшая амплитуда колебаний СГС возвращающихся к основанию модели, в то время как на поверхности амплитуда остается достаточно высокой, а также вершина колонны колеблется гораздо дольше. Общая продолжительность колебания вершины значительно увеличилась и даже после 10 секунд расчета не стабилизируется.

Разложение в ряд Фурье записи СГС вершины колонны представлено на рис.6. Из частотного спектра СГС так же можно видеть изменение частоты колебаний.

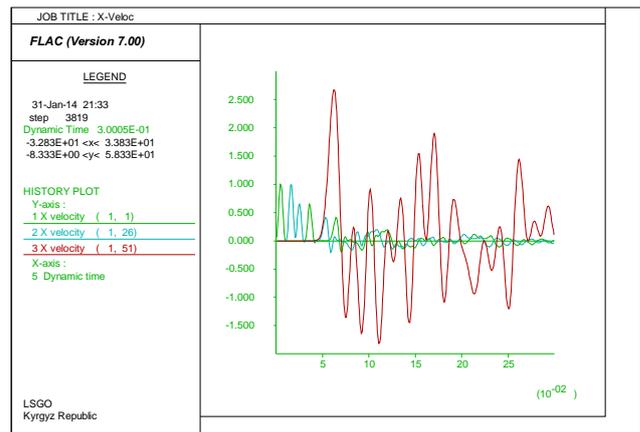


Рис. 5. Записи СГС контрольных точек от прохождения ПСВ на 0,3 секунде расчета.

Выполненные численные эксперименты показали влияние местных грунтовых условий на характер колебаний свободной поверхности слоистого грунтового основания. Наличие в слоистом основании грунтов выше коренных пород с более низкими значениями скоростей распространения упругих волн приводит к динамическому усилению СГС на поверхности при сейсмических воздействиях. Если основание сложено из нескольких грунтовых слоев, то проявляется возможность появления эффекта «ловушки». Эффект «ловушки» приводит к увеличению частотных характеристик СГС и продолжительности колебания поверхности основания. Можно предположить, что и мощность верхнего слоя грунта будет оказывать влияние на частотные характеристики СГС и продолжительность колебания.

Таким образом, выполненные численные эксперименты показали значимое влияние местных грунтовых условий на изменения скоростей горизонтальных смещений, частотных характеристик скоростей горизонтальных смещений и продолжительность колебания поверхности основания.

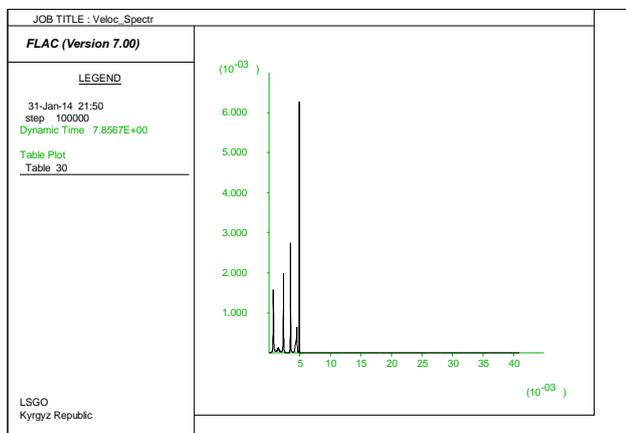


Рис. 6. Энергетический спектр СГС вершины колонны.

Все это указывает на необходимость тщательного проведения инженерно-геологических исследований с учетом сейсмических условий площадки строительства.

Литература:

1. FLAC. Dynamic analysis. Shear wave propagation in a vertical column.
2. И.Н. Белкова, В.Б. Глазовский, А.А. Готлиф, Д.В. Мишин. Оценка динамической реакции основания энергоблока при сейсмических воздействиях. Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Том 239 Основания и грунтовые сооружения. СПб.2001,стр.135-143.
3. С.В. Поляков. Сейсмостойкие конструкции зданий: Учебное пособие для вузов.-2-е изд.-М.: Высш. школа, 1983.-304 с.
4. Ю.К. Зарецкий, В.Н. Ломбардо. Статика и динамика грунтовых плотин.- М.:Энергоатомиздат, 1983.- 256 с.

Рецензент: к.т.н. Ким Эльвена Александровна