

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СООРУЖЕНИЙ С ДВУХСЛОЙНЫМ ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В.Г. Баженов, С.В. Зефирова, П.В. Лаптев, Н.С. Дюкина

Нижний Новгород

Разработана математическая модель и методика численного моделирования поведения зданий, сооружений при сейсмических колебаниях с учетом эффектов контактного взаимодействия с грунтовым основанием, которая основывается на сокращении размеров расчетной области и определении граничных значений импульсов сейсмического нагружения, обеспечивающих достаточную точность воспроизведения заданных акселерограмм на поверхности полупространства.

1. Постановка задачи

На сегодняшний день одним из наиболее распространенных численных методов решения задач математической физики является метод конечных элементов. Однако его использование для решения задач взаимодействия зданий и сооружений с грунтовым основанием осложнено рядом факторов. Первым из них является длительность сейсмического воздействия. В различных случаях она может составлять от нескольких секунд до нескольких десятков секунд. Ввиду этого область грунта в расчете должна иметь размеры, достаточные для того, чтобы в процессе сейсмического воздействия эффекты, связанные с отражением волн от границ расчетной области, не оказывали влияния на результаты решения в районе здания. Необходимо, чтобы волны, отраженные от границ массива грунта, не достигали района расположения здания в течение всего времени сейсмического воздействия. Учитывая то, что скорость упругих волн в различных грунтах может достигать нескольких километров в секунду, размеры грунтового массива, удовлетворяющие этому требованию, могут составлять десятки километров. Малые размеры сооружений и их заглубления в грунтовую среду, высокочастотный характер осцилляций в акселерограмме приводят к необходимости использования очень мелкой сетки конечных элементов (КЭ), которая позволит адекватно описать заданное сейсмическое воздействие. При этом число КЭ достигает величин, при которых расчетные затраты даже на современных вычислительных системах становятся неприемлемо большими.

Вторым фактором, осложняющим решение, является неопределенность направления распространения и амплитудных характеристик сейсмических волн. Имеющиеся в распоряжении экспериментальные акселерограммы определяют кинематические характеристики точек поверхности, а для численного решения задачи необходимо иметь импульсную нагрузку, при приложении которой к нижней границе расчетной области на поверхности воспроизводилась бы известная акселерограмма.

Расстояние от эпицентра землетрясения до сооружения может достигать сотен километров, поэтому приходящие из источника землетрясения к сооружению сферические волны можно считать плоскими. Сейсмическое воздействие в этом случае можно представить как совокупность волн сжатия, растяжения и сдвига, приходящих к сооружению под прямым углом к поверхности грунта. В силу малости давлений, поведение материала грунта при прохождении сейсмических волн можно принять идеально упругим. Грунтовый массив обычно содержит несколько слоев, имеющих различные механические характеристики. Будем рассматривать двухслойную грунтовую среду: мягкий грунт в верхнем слое и твердый в подстилающем слое. Между грунтовым основанием и зданием моделируется контактное взаимодействие с учетом сухого трения. Расчетная область и здание находятся в поле силы тяжести. Задача решается в плоской постановке [1].

2. Восстановление сейсмической волны. Одномерная задача

При численном решении источник землетрясения моделируется импульсной нагрузкой, прикладываемой ко всей нижней границе расчетной области грунта. Экспериментальная сейсмическая нагрузка C_1 задается в виде компонент скорости V_x, V_y точек поверхности полупространства в зависимости от времени. Для определения импульсной нагрузки необходимо решить одномерную обратную задачу о пробеге продольной и поперечной волн от нижней границы грунтового массива к его поверхности. В этом случае имеет место следующая зависимость сейсмограммы точки поверхности C_1 от сейсмограммы нижней границы области грунта C_0 :

$$C_1(t) = k_1 k_2 \sum_{n=0}^{\infty} (k_3)^n C_0(t - nT), \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент передачи при прохождении границы сред, k_2 – коэффициент отражения от свободной поверхности верхнего грунта, k_3 – коэффициент отражения от границы раздела сред для верхнего грунта (рис. 1), T – удвоенный период пробега продольной или поперечной волной верхнего слоя грунта по толщине, n – количество отражений импульса от границы сред.

Исходя из формулы (1), находится сейсмограмма C_0 :

$$C_0(t) = \frac{1}{k_1 k_2} C_1(t) - \sum_{n>0} (k_3)^n C_0(t - nT), \quad nT < t < (n+1)T. \quad (2)$$

Коэффициенты k_1-k_3 могут быть найдены аналитически, а также определены из численного решения одномерной задачи о пробеге волны в двухслойной грунтовой среде, где исходная нагрузка задана в виде тарировочной функции (например, функции Хевисайда). Таким образом, сейсмограмма точки поверхности представляется в виде суммы импульса, пришедшего от нижней границы области грунта, и отражений импульса от границы раздела сред. Для определения сейсмического импульса нагружения на большем временном интервале необходимо рассматривать множественные взаимодействия прошедших и отраженных волн, что еще более усложняется с увеличением числа слоев. Поэтому целесообразно перейти к численному методу решения с использованием тарировочных функций.

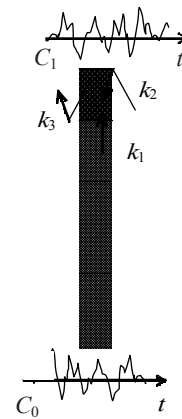


Рис. 1

В результате численной дисперсии пакет волн, имеющих различные амплитуды, будет искажаться при пробеге в грунтовом массиве, поскольку волны различной амплитуды будут распространяться с различными скоростями, поэтому при восстановлении начальной сейсмограммы необходимо учесть дисперсионные эффекты. При численном решении по явной схеме “крест” [2] одномерной задачи о пробеге волны, заданной кусочно-линейными функциями, можно брать число Куранта равным единице, тогда схема “крест” даст те же результаты, что и сеточно-характеристический метод на равномерной сетке. В этом случае дисперсии не будет.

Сейсмограмма может быть представлена ступенчатой функцией со скажностью данных сейсмограммы. Для этого в сейсмограмме выделяются характерные точки: точки локальных минимумов и максимумов. Сейсмограмма может быть представлена в виде дискретного разложения:

$$C_1(t_h) = \sum_i a_i H(t_h - t_i),$$

где a_i – амплитуда сейсмограммы в данной характерной точке, $H(t - t_i)$ – функция Хевисайда, t_i – сдвиг по времени характеристической точки сейсмограммы от момента начала отсчета сейсмограммы на поверхности.

В уменьшенной расчетной области решаем сеточно-характеристическим методом одномерную задачу о пробеге волны в грунтовой среде, исходную нагрузку задаем в виде функции Хевисайда. Сравниваем экспериментальную сейсмограмму точки поверхности с сейсмограммой, полученной при численном решении задачи. Зная, как изменилась тарировочная функция при пробеге грунтового массива, можем по экспериментальной сейсмограмме восстановить импульсную нагрузку:

$$\frac{H_1(t)}{H_0(t - t^*)} = \frac{C_1(t)}{C_0(t - t^*)},$$

где H_0 – тарировочная функция; H_1 – сейсмограмма на поверхности, полученная из решения задачи; t^* – время пробега волны от нижней границы грунтового массива к его поверхности.

Таким образом, определяется импульсная нагрузка на нижней границе грунтового массива отдельно для сдвиговых и продольных волн. Данная методика может быть применена и для n -слоеного грунта.

Тестирование данной методики было проведено для двухслойной грунтовой среды. Сейсмическая волна на поверхности была задана в виде компонент скорости V_x, V_y точки поверхности в зависимости от времени. На рис. 2 кривая 1 соответствует

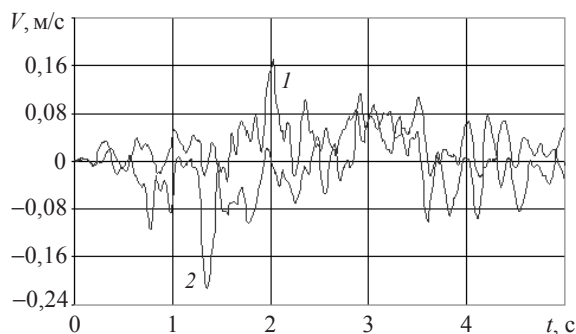


Рис. 2

V_x , кривая 2 соответствует V_y . При восстановлении сейсмической нагрузки по данной методике ошибка не превышает 1%.

3. Двумерная задача

При решении задачи о сейсмических колебаниях сооружения в двумерной или трехмерной постановках расчетная область грунта сокращается до размеров, при которых вклад волн, отраженных от сооружения, становится несущественным. Как показывают численные эксперименты, эта величина составляет 5–10 габаритных размеров основания здания (рис. 3). Шаг разностной сетки, согласуется со скважностью сейсмограммы, он берется достаточно малым для того, чтобы описать все высокочастотные осцилляции, присутствующие в сейсмограмме как сдвиговой, так и продольной волны. Размер сетки должен обеспечивать равенство импедансов для слоев грунта. Подбор такой сетки путем ее измельчения не представляет больших сложностей. Контроль достаточности числа узлов разностной сетки осуществляется путем сравнения экспериментальной сейсмограммы поверхности грунта с сейсмограммой, полученной при численном решении одномерной задачи. В результате отыскиваются кинематические характеристики материальных точек слоев грунта на поверхности и по всей его глубине.

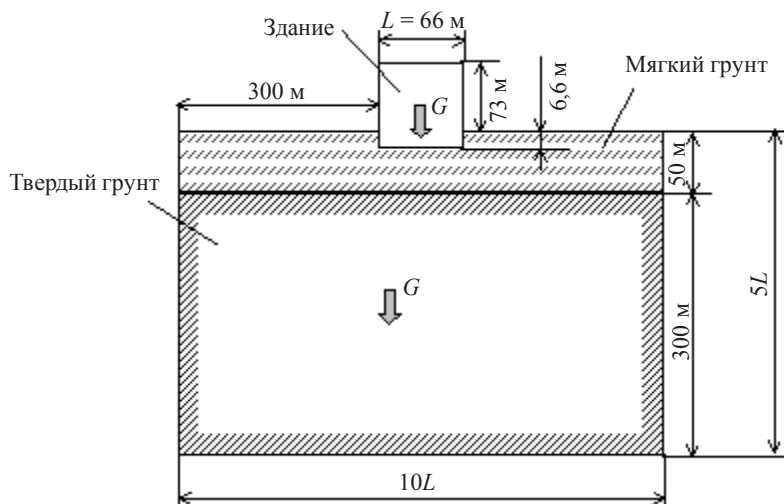


Рис. 3

При решении задачи взаимодействия здания и грунтовой среды под действием сейсмических нагрузок геометрические параметры расчетной области задаются, как показано на рис. 3. Грунтовая среда считается двухслойной, составленной из мягкого (верхний слой) и твердого (подстилающий слой) грунтов. Глубина всей области, заполненной грунтом, берется равной 350 м, при этом слой мягкого грунта составляет 50 м, жесткий – 300 м.

Поведение всех материалов считается упругим. Используемые в задаче механические характеристики для мягкого грунта: модуль Юнга $E = 21$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,37$, плотность $\rho = 1850$ кг/м³, при этом скорость распространения поперечных волн $C_s = 65$ м/с, скорость распространения продольных волн $C_p = 106$ м/с. Характеристики твердого грунта: $E = 2100$ МПа, $\nu = 0,37$, $\rho = 1850$ кг/м³, при этом $C_s = 654$ м/с, $C_p = 1065$ м/с. Характеристики здания: $E = 21$ МПа, $\nu = 0,25$, $\rho = 808$ кг/м³, при этом $C_s = 3100$ м/с, $C_p = 5090$ м/с.

Контактное взаимодействие грунтового массива и здания моделируется с учетом сухого трения, при этом допускается отрыв стенок здания от грунтового массива. Коэффициент трения между грунтом и зданием берется равным 0,3.

Расчетная область разбивается на конечные элементы следующих размеров: высота КЭ для грунтового массива берется в соответствии с численным решением одномерной задачи, а высота ячеек здания считается равной 1 м, ширина ячеек для здания и слоев грунта – 1 м.

В начальный момент времени система грунт–здание находится в поле силы тяжести. Задача об определении начального поля перемещений решается методом стационарирования с введением линейной вязкости.

В каждой точке на нижней границе грунта задается нагрузка в виде компонент скорости V_x , V_y , восстановленных по формулам (2) при следующих значениях коэффициентов: $k_1 = 2$, $k_2 = 1,81$, $k_3 = -0,8$. Для точек на боковых границах грунтового массива задаются сейсмограммы, взятые из численного решения одномерной задачи.

Далее непосредственно решается задача о взаимодействии здания и грунтового основания. Предполагается, что в грунте заглублена система трубопроводов. Поэтому важно определить пиковые амплитуды смещения стенок здания относительно грунта. Пользуясь этими данными, можно будет получить оценку прочности трубопровода. Относительные горизонтальные и вертикальные смещения боковых стенок здания и грунта представлены соответственно на рис. 4, 5, где кривая 1 соответствует смещениям левой стороны здания, а кривая 2 – смещениям правой стороны. Графики представлены для граничных точек, находящихся на глубине приблизительно 3 м. Поскольку разностные сетки для здания и прилегающего грунта не совпадают, сравнивались смещения ближайших узлов на линии их контакта

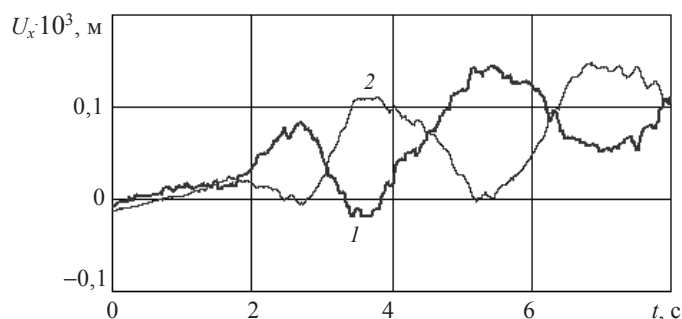


Рис. 4

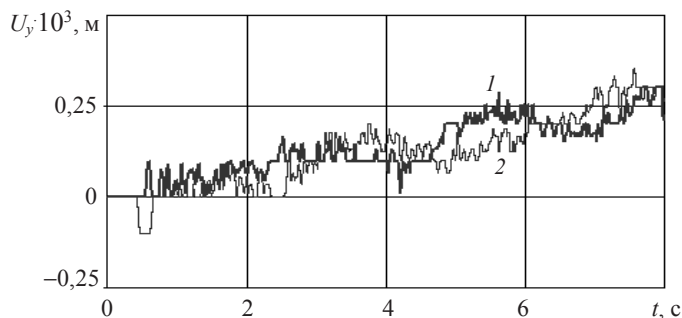


Рис. 5

На рис. 6, 7 представлены соответственно горизонтальные и вертикальные ускорения основания здания (кривые 1) и поверхности грунта (кривые 2). Как видно из графиков, ускорение подошвы здания значительно отличается от ускорения поверхности грунта.

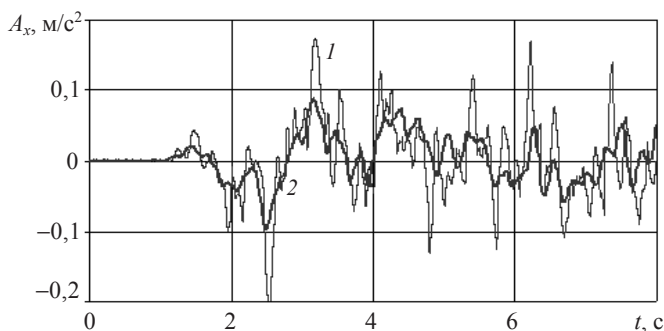


Рис. 6

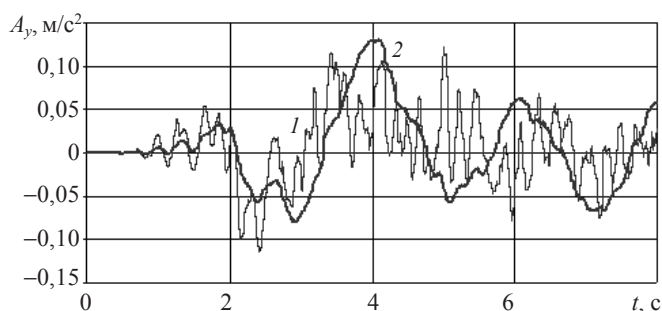


Рис. 7

Разработанная методика решения позволила корректно поставить задачу и учесть эффекты контактного взаимодействия здания с грунтовой средой. Благодаря уменьшению размеров расчетной области, эффективность счета задачи возросла в сотни раз.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-08-33618, 05-01-08055, 05-01-00837), программы “Развитие научного потенциала высшей школы” (проект № 4657) и ФЦНТП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники” (ЛОТ № 2005-Р4-112/001, XII очередь – научные школы, шифр темы Р4-112/001/404).

Литература

1. *Баженов, В.Г.* Методика расчета контактного взаимодействия зданий и сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях / В.Г. Баженов [и др.] // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Матер. XI Международ. симпоз. – Ярополец, 2005. – Т. 1. – С. 10–11.

2. *Баженов, В.Г.* Пакет прикладных программ “Динамика-2” / В.Г. Баженов, С.В. Зефирова, А.В. Кочетков // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Исследование и оптимизация конструкций: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьков. ун-т, Горький. – 1987. – С.4–13.

[28.10.2005]