

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СООРУЖЕНИЯ С ГРУНТОМ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

© 2007 В.Г.Баженов, Н.С.Дюкина,¹ С.В.Зефилов²

В работе представлена математическая модель контактного взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических нагрузениях. Разработана методика восстановления импульсной сейсмической нагрузки, прикладываемой к нижней границе грунтового массива, по известной на поверхности экспериментальной сейсмограмме. Предложен эффективный конечно-элементный метод численного моделирования безграничного полупространства путем введения специальных граничных условий.

1. Постановка задачи

Проблема динамического взаимодействия сооружения с основанием — одна из основных в динамике и сейсмостойкости сооружений. Известно, что от характеристик основания существенно зависят динамические характеристики самого сооружения и, следовательно, его реакция на динамические воздействия. Осложняют решение задачи недостаточная информация о параметрах воздействия, сложность и высокая стоимость проведения экспериментов на физических моделях, условность переноса результатов с модели на натуру. Численному моделированию взаимодействия сооружений с основанием при сейсмических воздействиях препятствует, в частности, большая трудоемкость расчетов.

С целью сокращения вычислительных затрат была предложена [1] математическая модель поведения сооружений при сейсмических воздействиях, а также разработаны и усовершенствованы методы и программы динамического расчета.

¹Баженов Валентин Георгиевич (bazhenov@dk.mech.unn.ru), Дюкина Надежда Сергеевна (boyarinovanadya@mail.ru), кафедра численного моделирования физико-механических процессов Нижегородского государственного университета, 603950, Россия, г.Нижний Новгород, пр.Гагарина, 23.

²Зефилов Сергей Вениаминович (zefirov@dk.mech.unn.ru), НИИ механики Нижегородского государственного университета, 603950, Россия, г.Нижний Новгород, пр.Гагарина, 23.

Поскольку максимальные повреждения получает сооружение, находящееся в эпицентре землетрясения, приходящие из источника землетрясения к сооружению сферические волны предлагается моделировать как совокупность плоских волн сжатия, растяжения и сдвига, распространяющихся под прямым углом к поверхности грунта. В силу малости давлений, поведение грунта при прохождении сейсмических волн можно принять идеально упругим. Контактное взаимодействие между грунтовым основанием и зданием моделируется с учетом сухого трения. Расчетная область и здание находятся в поле силы тяжести. Задача решается в плоской постановке.

2. Восстановление импульсной сейсмической нагрузки

При численном решении источник землетрясения моделируется импульсной нагрузкой C_0 , 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. Достаточно просто установить зависимость сейсмограммы точки поверхности C_1 от сейсмограммы нижней границы области грунта C_0 для двухслойного грунта:

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

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 верхнего грунта, T — удвоенный период пробега продольной или поперечной волной верхнего слоя грунта по толщине, n — количество отражений импульса от границы сред. Исходя из формулы (1), можно выразить искомую функцию C_0 .

Однако, 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.

В результате численной дисперсии пакет волн, имеющих различные амплитуды, будет искажаться при пробеге в грунтовой массе, 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 в виде дискретного разложе-

ния

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

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

В уменьшенной расчетной области решаем сеточно-характеристическим методом одномерную вспомогательную задачу о пробеге волны в грунтовой среде, исходную нагрузку задаем в виде функции Хевисайда. Зная, как изменилась тарировочная функция при пробеге грунтового массива, можем по экспериментальной сейсмограмме восстановить импульсную нагрузку, прикладываемую к нижней границе грунтового массива:

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

где H_0 — тарировочная функция; H_1 — сейсмограмма на поверхности, полученная из решения вспомогательной 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 -слойного 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 (рис. 1). 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. Шаг разностной сетки согласуется со скважностью сейсмограммы — он берется достаточно малым для того, чтобы описать все высокочастотные осцилляции, присутствующие в импульсных нагрузках сдвиговой и продольной волн. Подбор сетки, обеспечивающей равенство импедансов для слоев грунта при ее измельчении, 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 каждой точке на нижней границе грунта задается нагрузка в виде компонент скорости V_x , V_y , восстановленных по численной методике из экспериментальной поверхностной

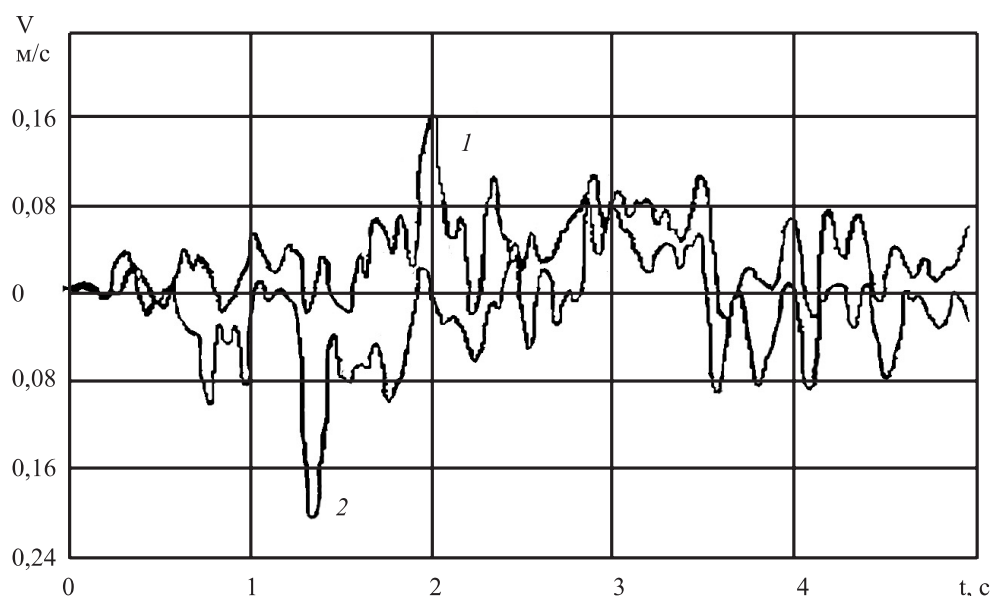


Рис. 1. Экспериментальная сейсмическая нагрузка на поверхности. Кривая 1 соответствует V_x , кривая 2 соответствует V_y

сейсмограммы. На боковых границах грунтового массива осуществляется пересылка скоростей из приграничных узлов сетки, таким образом уменьшается влияние краевых эффектов на результаты расчетов.

Разработанная численная методика применена для расчета взаимных смещений грунта и зданий насосной станции и реакторного отделения АЭС "Бушер" при оценке прочности подземных водоводов под действием эксплуатационных и сейсмических нагрузок. 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. Геометрические параметры расчетных областей представлены на рис. 2, 3.

Используемые в задачах механические характеристики для грунта $E = 2100$, МПа, $\nu = 0,37$, $\rho = 1850$, кг/м³, при этом скорость распространения поперечных волн $C_s = 654$, м/с, скорость распространения продольных волн $C_p = 1065$, м/с. Характеристики реакторного отделения: $E = 20000$, МПа, $\nu = 0,15$, $\rho = 2840,50$, кг/м³. Характеристики насосной станции: $E = 20000$, МПа, $\nu = 0,15$, $\rho = 1350,895$, кг/м³.

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 0,3. 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.

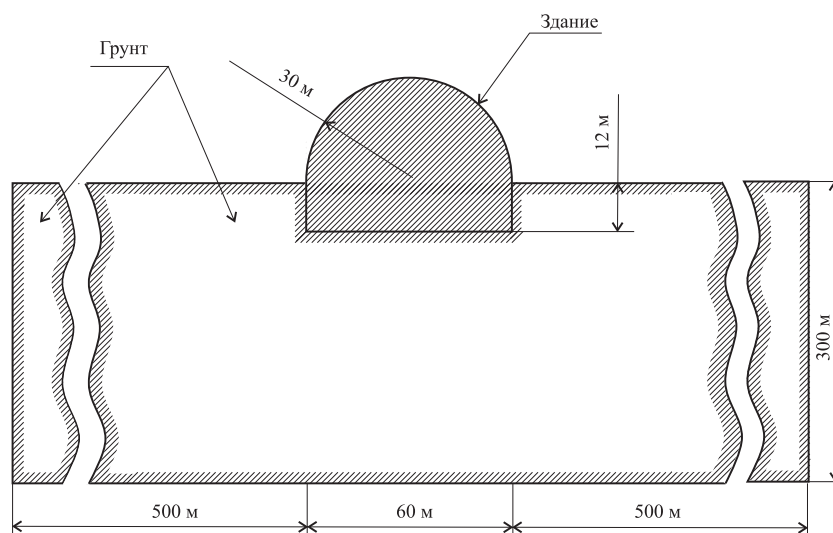


Рис. 2. Реакторное отделение

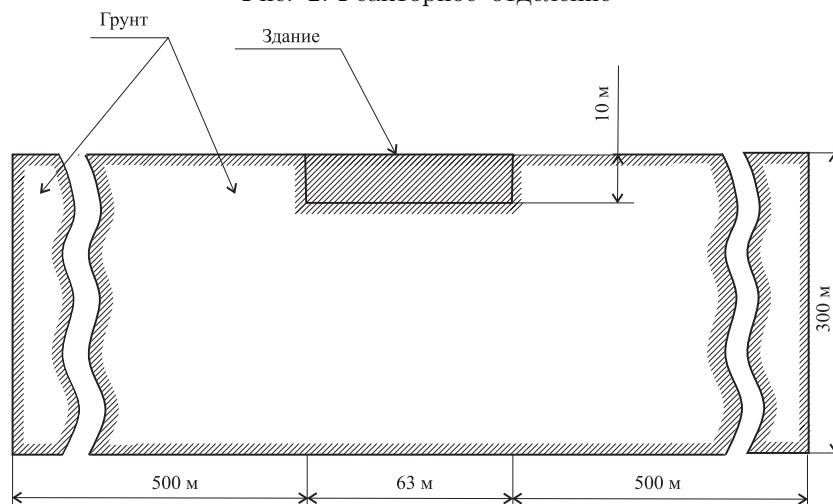


Рис. 3. Насосная станция

В результате расчета были получены временные зависимости относительных горизонтальных и вертикальных смещений боковых стенок сооружений и грунта. Рассматривались взаимные смещения для граничных точек, находящихся на глубине приблизительно 3,5 м — поскольку разностные сетки для здания и прилегающего грунта не совпадают, сравнивались смещения ближайших узлов на линии их контакта. Пиковые амплитуды смещения стенок реакторного отделения и грунта составили 1,32 мм в вертикальном направлении и 1,6 мм в горизонтальном направлении. Аналогичная оценка для насосной станции: 0,06 мм — по вертикали и 0,06 мм — по горизонтали.

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

Работа выполнена при частичном финансировании Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 05-08-33618-а) и ведомственной научной программы "Развитие научного потенциала высшей школы" (проект 4657).

Литература

- [1] Численное Моделирование задач взаимодействия сооружений с двухслойным грунтовым основанием при сейсмических воздействиях / В.Г.Баженов [и др.] // Пробл. прочности и пластичности: межвуз. сб. – 2005. – Вып. 67. – С. 162–167.
- [2] Баженов В.Г. Пакет прикладных программ "Динамика-2" / В.Г.Баженов, С.В.Зефирова, А.В.Кочетков // Прикл. пробл. прочности и пластичности. Исследование и оптимизация конструкций: межвуз. сб., науч. тр. – Горький: Изд-во, Горьк. ун-та, 1987. – С. 4–13.

Поступила в редакцию 15/V/2007;
в окончательном варианте — 15/V/2007.

NUMERICAL MODELLING OF SOIL-STRUCTURE DYNAMICAL INTERACTION UNDER SEISMIC LOADING

© 2007 V.G. Bazhenov, N.S. Dyukina³ S.V. Zefirov⁴

In this paper a mathematical model and numerical procedure for modelling such processes are considered. A computer-aided procedure for reconstructing the pulse load values applied to the entire lower boundary of the multi-layer soil domain from the known seismic diagram on the half-space surface is developed. An effective finite-element method for a modeling of half-space by introducing special boundary conditions is proposed.

Paper received 15/V/2007.

Paper accepted 15/V/2007.

³Bazhenov Valentin Georgievich (bazhenov@dk.mech.unn.ru), Dyukina Nadezhda Sergeevna (boyarinovanadya@mail.ru), Dept. of Numerical Modelling of Physico-Mechanical Processes, Nizhni Novgorod State University, Nizhni Novgorod, 603950, Russia.

⁴Zefirov Sergey Veniaminovach (zefirov@dk.mech.unn.ru), Research Institute of Mechanics of Nizhni Novgorod State University, Nizhni Novgorod, 603950, Russia.