

УДК 539.3

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
СООРУЖЕНИЙ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ
ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

© 2011 г.

А.В. Гордиенко, Н.С. Дюкина

НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского

andrey16@gmail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Разработана математическая модель и численная методика решения двух- и трехмерных задач динамического взаимодействия сооружения с грунтом при сейсмических воздействиях. Предложен способ решения обратной задачи восстановления сейсмической нагрузки, прикладываемой к нижней границе расчетной области по заданной на поверхности акселерограмме. Сокращение размеров расчетной области при численном моделировании задач становится возможным за счет применения специально разработанных мало отражающих волны граничных условий. Проведены численные исследования поведения сооружений при сейсмических воздействиях, изучено влияние параметров задачи на результаты решения.

Ключевые слова: нагрузка, математическая модель, численное моделирование, контактное взаимодействие.

Изучение динамического взаимодействия сооружения с грунтовым основанием является важным элементом оценки сейсмостойкости примыкающих к сооружению подземных трубопроводов. Применение существующих вычислительных моделей и методов либо ограничено рамками грубой идеализации, либо, при численном решении, чрезвычайно трудоемко. Предлагаемая математическая модель и методика численного моделирования поведения сооружений при сейсмических воздействиях позволяет адекватно описывать процессы сейсмического воздействия, учитывает эффекты контактного взаимодействия и существенно сокращает вычислительные затраты.

Анализ литературы [1] позволил сформулировать основные требования, предъявляемые к математической модели и методике численного решения. Поведение материала грунта принимается идеально упругим. Расчетная область находится в поле силы тяжести. Сейсмическое воздействие моделируется как совокупность волн растяжения-сжатия и сдвига, приходящих к поверхности грунта под прямым углом. К нижней граничной поверхности расчетной области прикладывается импульсная нагрузка, определенная в соответствии с заданными на поверхности полупространства экспериментальными акселерограммами. На боковых границах расчетной области вводятся специально разработанные мало отражающие волны граничные условия. Между сооружением и грунтом моделируется контактное

взаимодействие с учетом сухого трения. Численное моделирование задач осуществлялось в двумерной и в трехмерной постановке. Для описания деформирования тел в рамках гипотез механики сплошной среды используется вариационно-разностный подход, реализованный в рамках ПП «Динамика-2» и «Динамика-3».

Экспериментальные и синтезированные 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. В [1] решена вспомогательная обратная задача определения импульсной нагрузки, прикладываемой к нижней граничной поверхности расчетной области, по заданным на поверхности акселерограммам. Данная задача является некорректной из-за неопределенности расположения источника землетрясения и, как следствие, неопределенности волнового вектора скорости сейсмических волн относительно поверхности. Поскольку здание расположено вблизи поверхности и его размеры по сравнению с длинами сейсмических волн невелики, расположение источника сейсмического воздействия не будет влиять на поведение здания при землетрясении, если при численном расчете приходящие к поверхности сейсмические волны воспроизводят искомую экспериментальную акселерограмму с заданной точностью. Ввиду боль-

шой удаленности источника сейсмических воздействий от объекта приходящие из источника землетрясения к сооружению волны можно считать плоскими. В связи с вышеизложенным будем полагать, что волны сжатия, растяжения и сдвига являются плоскими и распространяются по нормали к дневной поверхности грунта. В соответствии с предлагаемой численной методикой сейсмограмма на поверхности грунта представляется в виде дискретного разложения

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

Сеточно-характеристическим методом решаем одномерную задачу о распространении в грунтовой среде волны, заданной на границе в виде функции Хевисайда. Зная, как изменилась тарировочная функция при пробеге грунтового массива, можем по экспериментальной сейсмограмме C_1 восстановить искомую импульсную нагрузку на нижней границе области грунта C_0 :

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

Тестирование данной методики было проведено на задаче о распространении пакетов сдвиговых и продольных волн в двухслойной грунтовой среде, при этом ошибка не превысила 1%.

Предложен альтернативный метод корректировки скоростей перемещений, при использовании которого одномерные волны сдвига и сжатия не искажаются, проходя по массиву грунта вдоль граничной поверхности. В соответствии с данным алгоритмом, на боковых границах расчетной области на каждом временном шаге осуществляется перенос скоростей перемещений из приграничных узлов сетки в граничные. Для оценки эффективности предложенного способа моделирования граничных условий и сопоставления его с методом квазиравномерных сеток проведено численное решение ряда двумерных задач о пробеге плоской поперечной волны в упругой прямоугольной области. Рассматривались варианты квазиравномерных сеток, разрежающихся по линейному и гиперболическому закону, и установлено, что при использовании малоотражающих граничных условий решение со временем не искажается, применение же квазиравномерных сеток приводит к постепенному искажению решения. На основе ряда вычислительных экспериментов установлено, что вклад волн, отраженных от сооружения, становится несущественным, если расстояние от сооружения до границ расчетной области превышает 10–15 габаритных размеров основания здания. Изложенные выше методики и алгоритмы численного решения внедрены в программные комплексы «Динамика-2», «Динамика-3»,

созданные в НИИМ ННГУ, и использованы при решении задач о взаимодействии строительных конструкций с грунтом при сейсмическом воздействии.

Разработанная вычислительная модель динамического взаимодействия здания с грунтом была применена для анализа поведения частично заглубленных сооружений АЭС «Бушер», Нововоронежской АЭС-2, Калининской и Ростовской АЭС при сейсмических вибрациях. Численное решение ряда задач о сейсмических вибрациях сооружений показало, что процесс динамического контактного взаимодействия сооружения с основанием зависит от многих параметров. Вследствие этого встает вопрос о необходимости анализа факторов, влияющих на поведение сооружения при сейсмических воздействиях.

Проведены исследования сейсмических вибраций сооружений с учетом контактного взаимодействия с грунтом при различных значениях геометрических и физических параметров: массивности сооружения, величины заглубления фундамента, коэффициента трения на контакте сооружения и грунта, интенсивности сейсмического воздействия.

Анализ зависимости вертикальных и горизонтальных смещений от массы сооружения показал, что массивность сооружения оказывает влияние лишь на вертикальные взаимные смещения стенок сооружения и грунта. Анализ зависимости вертикальных и горизонтальных взаимных смещений здания и грунта от величины заглубления фундамента показал, что с увеличением заглубления от 25 до 100% высоты здания вертикальные и горизонтальные смещения уменьшаются в 3 и в 6 раз соответственно. Исследование зависимости взаимодействия сооружения с грунтом от коэффициента трения на контактных поверхностях проведено для сооружения, заглубленного на треть высоты, и для полностью заглубленного сооружения. Из анализа графиков вертикальных и горизонтальных взаимных смещений здания и грунта следует, что коэффициент трения оказывает существенное влияние лишь на вертикальные смещения для полностью заглубленных зданий. Исследование зависимости взаимных смещений стенок сооружения и грунта от величины горизонтальных и вертикальных ускорений на поверхности грунта позволяет сделать вывод, что данная зависимость близка к линейной. На основании серии численных экспериментов с многослойными грунтами установлено, что существенным для проведения расчетов на сейсмостойкость является геологическое строение среды на глубине до 8 величин заглубления сооружения в грунт.

Численные исследования позволяют оценить необходимую для геологических изысканий глубинную разреза, в котором должны быть изучены механические характеристики слоев грунта.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ НШ-4807.2010.8,

а также при поддержке РФФИ (проект №11-08-97023-р_поволжье_а).

Список литературы

1. Дюкина Н.С. Численное моделирование взаимодействия заглубленных сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях: Дисс.... канд. физ.-мат. наук, Н.Новгород, 2009. 131 с.

NUMERICALLY INVESTIGATING THE STRUCTURE/SOIL DYNAMIC INTERACTION UNDER SEISMIC LOADING

A.V. Gordienko, N.S. Dyukina

A mathematical model and a numerical methodology for analyzing 2D and 3D problems of structure/soil interaction under seismic effects have been developed. A procedure for solving the inverse problem of recovery of the seismic load applied to the lower boundary of the analyzed region according to the accelerogram assigned on the surface is presented. Use of the specially developed low-reflecting boundary conditions makes it possible to reduce the dimension of the analyzed region. The behavior of structures under seismic effects has been numerically investigated; the effect of various parameters of the problem on the results of the analysis has been studied.

Keywords: seismic loading, mathematical model, numerical modeling, contact interaction.