

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОРОУПРУГИХ СОСТАВНЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

© 2011 г.

И.С. Карелин

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

belov_a2@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассматривается прямой подход метода граничных элементов к решению трехмерных краевых задач пороупругой динамики. Для повышения эффективности численного моделирования применяются элементы параллельных вычислений. Приведены результаты компьютерных экспериментов.

Ключевые слова: граничный элемент, пороупругость, граничные интегральные уравнения, численное обращение интегрального преобразования.

Математическая модель краевой задачи составного пороупругого тела строится из математических моделей для краевых задач однородных пороупругих тел в сочетании с условием контакта. Система дифференциальных уравнений однородного пороупругого тела в преобразованиях Лапласа (параметр s) для смещения \hat{u}_i и порового давления \hat{p} имеет следующий вид [1, 2]:

$$\begin{aligned} G\hat{u}_{i,jj} + \left(K + \frac{1}{3}G\right)\hat{u}_{j,ij} - (\alpha - \beta)\hat{p}_{,i} - \\ - s^2(\rho - \beta\rho_f)\hat{u}_i = -\hat{F}_i, \\ \frac{\beta}{s\rho_f}\hat{p}_{,ii} - \frac{\Phi^2 s}{R}\hat{p} - (\alpha - \beta)s\hat{u}_{i,i} = -\hat{a}, \\ \beta = \Phi^2 s + s^2 k(\rho_a + \Phi\rho_f), \end{aligned}$$

где G, K – константы упругости; Φ – пористость, k – проницаемость, α – эффективный коэффициент напряжений; ρ, ρ_a, ρ_f – пористости скелета, присоединенной массы и жидкой среды; \hat{F}_i, \hat{a} – плотности источников.

Интегральное представление прямого подхода и соответствующие граничные интегральные уравнения (ГИУ) для краевой динамической задачи однородного пороупругого тела можно найти в [1, 3]. Для решения проблемы обращения интегрального преобразования Лапласа применим вариант метода Дурбина [4]. Чтобы ввести гранично-элементную дискретизацию, рассматриваются регуляризованные уравнения в сочетании с условиями контакта. Для повышения эффективности компьютерного моделирования используется параллельный алгоритм, который строится

на базе последовательного алгоритма. Последовательно просматриваются в цикле все узлы аппроксимации граничных перемещений и находятся узлы коллокации, для которых формируются коэффициенты дискретных аналогов. Каждая итерация цикла может быть выполнена параллельно с другими итерациями. Поток исполнения E_k выполняет каждую k -ю итерацию цикла последовательного алгоритма. Максимальное число потоков E_k равно числу итераций цикла по узлам. Таким образом, степень параллелизма алгоритма равна числу узлов аппроксимации обобщенных смещений. Для вычисления коэффициентов дискретных аналогов применяется аналогичный алгоритм. Его степень параллелизма равна числу узлов аппроксимации обобщенных усилий. Параллельный алгоритм реализован на языке Фортран с использованием библиотеки параллельных вычислений OpenMP для реализации потоков исполнения. На этапе работы программы определяется количество ядер процессора и запускает такое же число потоков исполнения для достижения наибольшей производительности на выбранном компьютере.

Представлены результаты расчета ряда задач. Для задачи о действии скачка хевисайдовой осевой силы (H/m^2) на торец консольного тела $1 \times 3 \times 1$ м модели Био [5, 6] со следующими параметрами материала: $E = 1.44 \cdot 10^{10} \text{ H}/\text{m}^2$; $\nu = 0$; $\rho = 2458 \text{ кг}/\text{m}^3$; $\rho_f = 1000 \text{ кг}/\text{m}^3$; $\Phi = 0.19$; $R = 4.7 \cdot 10^8 \text{ H}/\text{m}^2$; $\alpha = 0.86$; $k = 1.9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^4/\text{H} \cdot \text{с}$ используется гранично-элементная сетка, состоящая из 504 элементов. Результаты расчетов перемещений и давлений приведены на рис. 1, 2 соответственно.

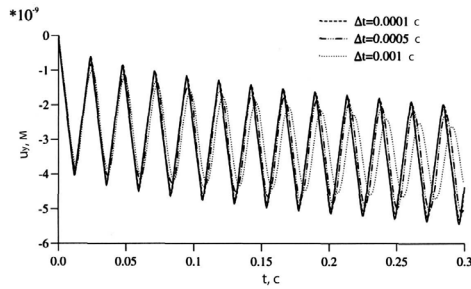


Рис. 1

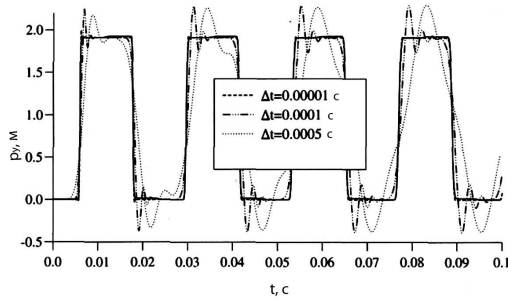


Рис. 2

Для вычисления ускорения алгоритма S_p применялась формула:

$$S_p = \frac{T_1}{T_p},$$

где T_p – время выполнения программы на p процессорах.

В сравнении с последовательным алгоритмом, реализация параллельного алгоритма дает значительный прирост производительности. Вычисления производились на двухъядерном процессоре Intel Core 2 Duo CPU E8400. В таблице

представлено время, потраченное программой для расчета решения для 5 и 10 частот.

Таблица

Количество частот		5	10
		Время работы программы T_p , с	
Алгоритм	последовательный	56	112
	параллельный	21	43
Ускорение алгоритма S_p		2.67	2.60

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК №2222, ГК №27), при поддержке РФФИ (проект №10-08-01017-а) и грантом Президента РФ на поддержку ведущих научных школ НШ-4807.2010.8.

Список литературы

1. Schanz M. Wave propagation in viscoelastic and poroelastic continua. Berlin: Springer, 2001. 170 p.
2. Баженов В.Г., Игумнов Л.А. Методы граничных интегральных уравнений и граничных элементов в решении задач трехмерной динамической теории упругости с сопряженными полями. М.: Физматлит, 2008. 352 с.
3. Аменицкий А.В., Белов А.А., Игумнов Л.А., Карелин И.С. // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. Нижегород. ун-т. 2009. Вып. 71. С. 164–171.
4. Баженов В.Г., Белов А.А., Игумнов Л.А. Гранично-элементное моделирование динамики кусочно-однородных сред и конструкций: Учеб. пособие. Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 2009. 180 с.
5. Biot M. // J. Acoust. Soc. Am. 1956. V. 28, No 2. P. 168–178.
6. Biot M. // J. Acoust. Soc. Am. 1956. V. 28, No 2. P. 179–191.

BOUNDARY-ELEMENT MODELING OF THE DYNAMICS OF POROUS ELASTIC COMPOSITE BODIES USING PARALLEL COMPUTATIONS

I.S. Karelin

A direct approach of the boundary-element method to analyzing 3D boundary-value problems of porous elastic dynamic is examined. To increase the effectiveness of numerical modeling, elements of parallel computations are used. The results of the computer simulations are presented.

Keywords: boundary element, porous elasticity, boundary integral equations, numerical inversion of integral transformation.