

УДК 539.1+622.235.535.2

УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

© 2011 г.

Е.А. Вечкина, К.С. Султанов

Институт механики и сейсмостойкости сооружений
 им. М.Т. Уразбаева АН РУз, Ташкент (Узбекистан)

sultanov.karim@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Представлена двухмерная осесимметричная задача о распространении сферической ударной волны в горной породе. Задача решена модифицированным численным методом Уилкинса. На основе численных расчетов выявляется влияние ударной нагрузки, начального радиуса и физико-математических свойств горной породы на напряженно-деформируемое состояние.

Ключевые слова: упругопластическая модель, интеграл движения, сферическая ударная волна, расширение полости, зона разрушений, ударная нагрузка, граничные условия, несжимаемость, численный метод, схема Уилкинса.

При решении динамических задач о напряженно-деформированном состоянии горной породы под действием ударной нагрузки возникает сложная математическая проблема интегрирования нелинейной в общем случае системы уравнений движения, неразрывности и деформирования среды.

Динамическое поведение деформируемой среды описывается системой уравнений, которые для удобства запишем в виде:

$$\rho dU_x/dt = \partial\sigma_{xx}/\partial x + \partial\tau_{xy}/\partial y + \tau_{xy}/y, \quad (1)$$

$$\rho dU_y/dt = \partial\tau_{xy}/\partial x + \partial\sigma_{yy}/\partial y + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})/y;$$

$$\sigma_{xx} = S_{xx} - P + q, \quad \sigma_{yy} = S_{yy} - P + q, \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = S_{zz} - P + q, \quad \tau_{xy} = S_{xy};$$

$$\partial U_x/\partial x + \partial U_y/\partial y + U_y/y = \dot{V}/V, \quad V = \rho_0/\rho; \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \partial U_x/\partial x, \quad \dot{\epsilon}_{yy} = \partial U_y/\partial y, \quad \dot{\epsilon}_{zz} = U_y/y, \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}_{xy} = (\partial U_y/\partial x + \partial U_x/\partial y)/2,$$

где ρ – плотность, ρ_0 – начальная плотность, U_x , U_y – компоненты скорости; σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} – компоненты напряжения, τ_{xy} – касательное напряжение, P – гидростатическое давление; q – искусственная вязкость; S_{xx} , S_{yy} , S_{zz} , S_{xy} – компоненты дивергента напряжений; $\dot{\epsilon}_{xx}$, $\dot{\epsilon}_{yy}$, $\dot{\epsilon}_{zz}$, $\dot{\epsilon}_{xy}$ – компоненты тензора скоростей деформаций; x , y – пространственные координаты; V – объем, t – время. Здесь модели деформирования среды записаны отдельно для шаровой части и для дивергента.

Квадратичная вязкость записывается в виде [1]:

$$q = -c_0^2 \rho_0 A [(dV/dt)/V]^2 / V \quad \text{при } (dV/dt)/V < 0, \quad (5)$$

$$q = 0 \quad \text{при } (dV/dt)/V \geq 0,$$

где c_0 – коэффициент вязкости, A – площадь ячейки. К этим уравнениям следует добавить уравнения состояния в виде [2, 3]:

$$dP/dt = -K (dV/dt)/V,$$

$$dS_{xx}/dt = 2G(\dot{\epsilon}_{xx} - (dV/dt)/3V),$$

$$dS_{yy}/dt = 2G(\dot{\epsilon}_{yy} - (dV/dt)/3V), \quad (6)$$

$$dS_{zz}/dt = 2G(\dot{\epsilon}_{zz} - (dV/dt)/3V),$$

$$d\tau_{xy}/dt = 2G\dot{\epsilon}_{xy},$$

где $K = \lambda + 2\mu$ – модуль объемного сжатия, $G = \mu$ – модуль сдвига, λ и μ – коэффициенты Ламе.

На рис. 1 представлена сетка расчетной области искомых решений, где 1 – точка с координатами (0.62 м; 1.5 м), 2 – (1.59 м; 1.59 м), 3 – (2.656 м; 1.1 м).

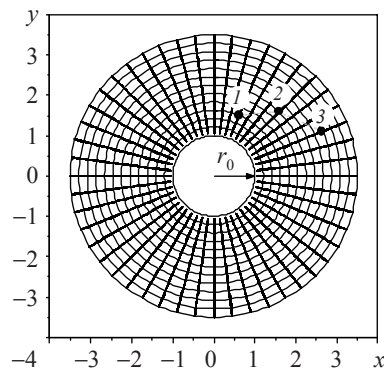


Рис. 1

При численном решении задачи (1)–(6) рассматривалось три типа грунтов: песчаник – модуль Юнга $E = 3500$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.15$, плотность $\rho = 2300$ кг/м³; известняк – модуль Юнга $E = 6500$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.2$, плотность $\rho = 2600$ кг/м³; доломит – модуль Юнга $E = 10000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.28$, плотность $\rho = 2800$ кг/м³.

На рис. 2 приведены изменения напряжения σ_{xx} по времени для фиксированных точек горной породы вокруг сферической полости: в точках 1 – линии с кружками, в точках 2 – линии с квадратами, в точках 3 – линии с ромбами для доломита (кривые 1), известняка (кривые 2) и песчаника (кривые 3).

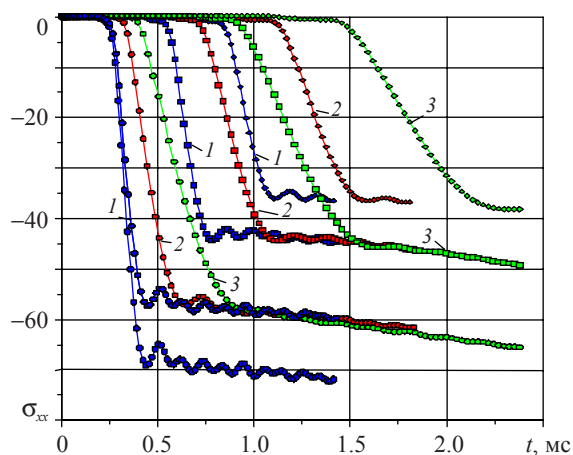


Рис. 2

Как показывают результаты численных решений, при удалении от центра происходит уменьшение или затухание напряжений. Что касается различных скальных пород, то изменение характеристик горной породы влияет не на значения

напряжений, а на время, в течении которого происходит нарастание напряжения до максимума. Например, в доломите этот процесс происходит на 1 мс быстрее, чем в песчанике. При этом деформации и скорости в доломите, известняке и песчанике увеличиваются почти в два раза соответственно.

Получены также изменения остальных компонент напряжений σ_{yy} , σ_{zz} , τ_{xy} , деформаций ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz} , ϵ_{xy} , скоростей частиц u_x , u_y и давления P для различных фиксированных точек горной породы (для песчаника, известняка и доломита).

Анализ полученных численных результатов показывает, что разработанная программа численного решения задачи о расширении сферической полости при ударной нагрузке позволяет рассчитывать напряженно-деформированное состояние горной породы с учетом пластических деформаций. Полученные данные о напряженно-деформированном состоянии упругопластической горной породы позволяют оценить зону разрушений вокруг сферической полости при ударных нагрузках.

Список литературы

1. Евгерев Л.С. Начальная стадия сильного взрыва на поверхности твердой скальной породы // Науч. труды аспирантов НИИ механики МГУ. М.: МГУ, 1973. №1. С. 67–80.
2. Григорян С.С. Об общих уравнениях динамики грунтов // ДАН СССР. 1959. Т. 122, №2. 285 с.
3. Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов // ПММ. 1960. Т. 22, №6. С. 1057–1072.
4. Хусанов Б.Э. Динамическое деформирование структурно неустойчивых сред и нестационарное взаимодействие твердых тел с грунтом: Автореф. дис... доктора наук. Ташкент, 2003.

ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION OF ROCK MASS UNDER INTENSIVE LOADS

Е.А. Vechkina, K.S. Sultanov

A two-dimensional axisymmetric problem of propagation of a shock wave through a rock mass is presented. The problem is solved by the modified Wilkins's numerical method. On the basis of numeric calculations the influence of shock loading, initial radius and physical-mathematical characteristics of the rock mass on the stressed-strained state is revealed.

Keywords: elastic-plastic model, integral of motion, spherical shock wave, expansion of cavity, zone of destruction, shock load, boundary conditions, un-compressibility, numeric method, Wilkins' scheme.