

МДЭ - МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ В СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ ГЕОМАТЕРИАЛАХ

С.В. Клишин, С.В. Лавриков, О.А. Микенина, А.Ф. Ревуженко

*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН
630091, Новосибирск, Россия*

Введение. В современной механике горных пород значительное внимание уделяется исследованию роли внутренней структуры среды и анализу ее влияния на напряженно-деформированное состояние породных массивов. Иерархия внутренней структуры массива играет важную роль во всех квазистатических и динамических процессах его деформирования [1-3]. Блочность строения горного массива определяет такие его свойства, как дилатансию, внутреннее трение, сцепление, приводит к нелинейности поведения и анизотропии. Наряду с этим, блочность массива допускает множественность форм его равновесного состояния. Отдельные области массива могут быть «заряжены» энергией в виде внутренних самоуравновешенных напряжений. При определенных условиях накопленная энергия может быть высвобождена, причем этот процесс может носить неустойчивый катастрофический характер в виде толчков и горных ударов.

Существует множество экспериментальных фактов и натуральных наблюдений, показывающих, что внутренние самоуравновешенные напряжения играют важную роль в процессах деформирования и разрушения горных пород [4-8].

В [9] рассмотрен физический образец, моделирующий свойство горной породы запасать и высвобождать упругую энергию (плоская деформация). Проведенные лабораторные эксперименты и теоретические оценки показали, что после сжатия и последующей полной разгрузки образец способен аккумулировать до 30% энергии, затраченной на его деформирование.

В настоящее время одним из наиболее перспективных методов моделирования процессов деформирования геоматериалов является метод дискретных элементов (МДЭ) [10,11]. В работах [12,13] предложено в рамках МДЭ использовать специальный потенциал опосредованного взаимодействия частиц (упругие пружины). Частицы среды, связанные упругими элементами, за счет трения способны самозаклиниться. Это позволяет описать свойство геоматериалов аккумулировать, а затем и высвобождать накопленную упругую энергию.

В настоящей работе рассматривается численное моделирование процесса деформирования модельных образцов, способных запасать энергию, в пространственном случае.

Постановка задачи. В МДЭ твердое тело моделируется ансамблем дискретных частиц, как правило, сферической формы. Сами частицы предполагаются недеформируемыми. Перемещение частиц в пространстве описывается уравнениями движения Ньютона. Силы, возникающие в процессе соударения частиц, рассчитываются на основе моделей контактной механики с учетом нормальной и касательной составляющих. В рамках указанного подхода с помощью выбора потенциала взаимодействия между частицами можно описать движение твердых частиц в жидкости, процессы теплообмена, адгезию, полидисперсные среды и др.

В версии метода [12,13] для выделенного кластера частиц вводятся дополнительные упругие связи, которые действуют в пределах кластера даже при отсутствии непосредственного контакта между частицами. Для описания таких связей используется специальный потенциал опосредованного взаимодействия частиц.

Одна из проблем при решении задач с помощью МДЭ заключается в формировании начальных равновесных упаковок частиц. В настоящей работе начальные упаковки, представляющие собой модельный образец, были получены с помощью предварительных расчетов на установление из неравновесных регулярных упаковок. Задавались неравновесные регулярные упаковки в форме параллелепипеда. Определенные кластеры частиц связывались растянутыми упругими элементами. Вся структура помещалась над гладкой поверхностью. В процессе деформирования растянутые упругие элементы сжимались, что с учетом трения между частицами и веса среды приводило к формированию конфигурации образца нерегулярной формы, лежащего на гладкой поверхности. Образец считался сформированным, когда процесс деформирования достигал стационарного равновесного состояния.

Были рассмотрены две начальные упаковки: упаковка типа «шар» (внешняя сферическая оболочка представляла кластер частиц, связанных упругими элементами) и упаковка типа «куб» (два независимых кластера перевязанных частиц, поочередно заполняющих узлы кубической решетки).

Уравнения поступательного и вращательного движений частиц имеют вид:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \sum_{j=1}^k \mathbf{F}_{ij} + m_i \mathbf{g}, \quad J_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^k \mathbf{M}_{ij}, \quad i = \overline{1, N} \quad (1)$$

где $\mathbf{v}_i, \boldsymbol{\omega}_i$ – векторы линейной и угловой скорости, m_i – масса, J_i – момент инерции i – частицы, $\mathbf{F}_{ij}, \mathbf{M}_{ij}$ – соответственно главный вектор и главный момент сил, k – координатное число, N – общее число частиц, \mathbf{g} – вектор ускорения свободного падения. Для расчета силы, возникающей при контакте частиц, используется вязкоупругая модель Кельвина-Фойгта с учетом нормальной и касательной составляющих, дополненная упругими связями граничных частиц. Расчет нормальной составляющей силы осуществляется с использованием закона Герца контактной механики [14], при расчете касательной составляющей используются представления Миндлина-Дересевича [15]. Упругое взаимодействие связанных граничных элементов описывается с помощью линейного закона Гука. Выражения для расчета сил приведены в работах [10-13].

Результаты численного моделирования. Проведем численное моделирование цикла «сжатие-разгрузка» модельных образцов. Сжатие будем осуществлять между двумя гладкими параллельными пластинами до некоторого фиксированного значения деформации с последующей полной разгрузкой.

На рис. 1 показана типичная диаграмма «сила-перемещение». Видно, что на стадии сжатия она содержит участки локального разупрочнения, что свидетельствует о локальном высвобождении накопленной упругой энергии. После полной разгрузки финальная конфигурация образца имеет остаточную деформацию. Это означает, что упругие элементы находятся в растянутом (по отношению к исходному) положении и в них запасена упругая энергия. На рис. 2 показан график величины энергии упругих элементов, отнесенной к общей работе, затраченной на деформирование образца. В точке C процесс достигает равновесного состояния. Окончательная доля аккумулируемой энергии в образце типа «шар» составила ~5%, в образце типа «куб» ~8%.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского Научного Фонда, проект № 16-17-10121.

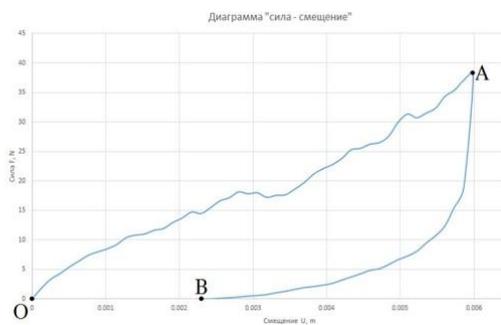


Рис. 1. Типичная расчетная диаграмма «сила-перемещение»: *OA* – сжатие, *AB* – разгрузка

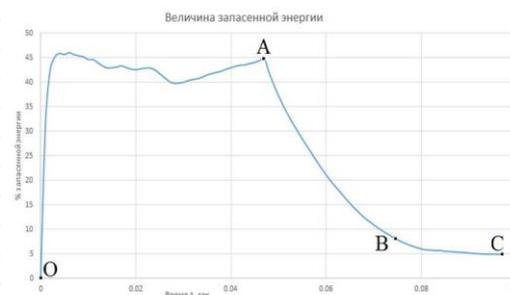


Рис. 2. Величина запасенной энергии, отнесенная к общей работе деформирования: *OA* – сжатие, *AB* – разгрузка, *BC* – релаксация

Выводы

1. Введение специального потенциала взаимодействия между частицами среды в рамках метода дискретных элементов позволяет описать свойство геоматериала запасать и высвобождать упругую энергию.
2. Сжатие модельного образца геоматериала приводит к аккумулярованию части энергии в виде внутренних самоуравновешенных напряжений. В пространственном случае образец способен запасать до 10% энергии, затраченной на его деформирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский М.А. Об естественной кусковатости горных пород // Доклады АН СССР. – 1979. – т. 247. – № 4.
2. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. – М.: Геос, 2016, 424с.
3. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия. Отв. ред. академик Н.Н.Мельников. Новосибирск, изд-во СО РАН, 2012, 631с.
4. Ставрогин А.Н., Ширкес О.А. Явление последействия в горных породах, вызванное предшествующей необратимой деформацией // ФТПРПИ. – 1986. – № 4., с. 16-27.
5. Файф У., Прайс К., Томпсон А. Флюиды в земной коре. М.: Мир, 1981, 438с.
6. Адушкин В.В., Гарнов В.В., Курленя М.В., Опарин В.Н., Ревуженко А.Ф. Знакопеременная реакция горной породы на динамическое воздействие // Доклады АН. – 1992. – т. 323. – № 2. – с. 263-269.
7. Влох Н.П., Липин Я.И., Сашурин А.Д. Исследование остаточных напряжений в крепких горных породах // Современные проблемы механики горных пород. Л.: Наука, 1972, с. 186-189.
8. Горяинов П.М., Давиденко И.В. Тектоно-кессонный эффект в массивах горных пород и рудных месторождений – важное явление геодинамики // ДАН СССР. – 1979. – т. 247. - № 5. – с. 1212-1215.
9. Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф. Об одной экспериментальной модели горной породы // ФТПРПИ. – 1991. – № 4. – с. 24-30.
10. Клишин С.В., Ревуженко А.Ф. Исследование задачи Янсена методом дискретных элементов в трехмерной постановке // ФТПРПИ. – 2014. – № 3. – с. 10-16.
11. Клишин С.В., Ревуженко А.Ф. Об одном классе вихревых течений сыпучей среды // ФТПРПИ. – 2015. – № 6. – с. 11-18.
12. Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф. Численное моделирование процесса накопления и высвобождения упругой энергии в структурно-неоднородных геоматериалах // ФТПРПИ. – 2016. – № 4. – с. 22-28.
13. Lavrikov S.V., Revuzhenko A.F. DEM Code-Based Modeling of Energy Accumulation and Release in Structurally Heterogeneous Rock Masses // AIP Conference Proceedings 1683, 020121 (2015).
14. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989, 509с.
15. Mindlin R.D., Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces. J. Appl. Mech., Trans. ASME. – 1953. – 20. – p. 327-344.