

5. Hoek E., Wood D., Shah S.A. Modified Hoek-Brown Criterion for jointed Rock Masses.- Proceeding ISRM Symposium: Eurock 92 Rock Characterization, J.A. Hudson (ed) , British Geotechnical Society. London. 1992. - P. 209-214.

6. Литвинский Г.Г. Структура и напряженное состояние микродефектного материала (горной породы) / В сб. : Ground Control in Mining /-Донецк : ДонГТУ, 2000.- С. 28-48 .

УДК 622.023.7:510.67

А.Н. Шашенко, В.И. Янко, А.В. Солодянкин

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАЗУПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ

У статті розглянутий принциповий підхід до вирішення чисельної пружно-пластичної задачі оцінки напружень і деформацій навколо горизонтальної виробки, що знаходиться у структурно неоднорідному породному масиві. Наведена аналогія між “жорстким” деформуванням породного зразку і деформуванням приконтурного масиву навколо виробки. Надані принципові співвідношення.

NUMERIC MODELLING OF INTENSELY DEFORMED STATE OF GRADUALLY WEAKENED MASSIF IN THE VICINITY OF THE UNDERGROUND DEVELOPMENTS

The principal approach to the solution of numeric resilient-elastic task of determining the intentions of the deformation around single horizontal mine working placed in a structurally heterogeneous rock massif is considered in the article. The analogy between hard deformation of the rock sample and the deformation of close-to contour massif in the mine working vicinity is stated. The principal correlations are given.

Рассмотрим геомеханическую систему «породный массив-подземная выработка», находящуюся в некотором напряженно-деформированном состоянии под действием массовых сил. Породный массив обладает неоднородной структурой, выработка имеет заданные размеры. Исследуемая система находится в состоянии механического равновесия. Требуется определить компоненты тензоров напряжений и деформаций, а также вектора перемещений в окрестности выработки с учетом возникающих в этой области породного массива структурных изменений. Математическая модель, описывающая равновесное состояние рассматриваемой механической системы, должна отображать основные явления, возникающие вследствие образования зон концентрации напряжений и возможного сопутствующего изменения физико-механических свойств окружающей среды.

При достижении определенного уровня нагрузок (напряжений) в окрестности выработки структурные связи в породном массиве начинают разрушаться. При этом происходит разрыхление породной среды, сопровождающееся увеличением объема [1]. Это явление связано с интенсивным микрорастрескиванием, приводящем к неуправляемому росту и слиянию трещин [2]. Края трещин расходятся, часть материала разгружается, что способствует снижению уровня

напряжений в окрестности выработки. После этого устанавливается новое состояние равновесия, соответствующее минимуму потенциальной энергии для данных нагрузок и конфигурации механической системы.

С дальнейшим ростом нагрузок и развитием процесса разрушения продолжается разрыв внутренних связей материала, что вызывает локальную неустойчивость в отдельных областях. Однако, это не приводит к полному исчерпанию несущей способности породного массива в целом вследствие наличия некоторого количества остаточных связей между отдельными его структурными составляющими, число которых связано с уровнем напряжений в рассматриваемом локальном объеме [1, 2]. Это обстоятельство приводит к постепенному снижению несущей способности породного массива в окрестности выработки, что равносильно появлению ниспадающей ветви на диаграмме жесткого деформирования породного образца. При этом роль жесткого нагружающего устройства по отношению к приконтурному пространству выполняет упруго деформирующаяся часть породного массива.

Как экспериментально установлено [1-3], коэффициент Пуассона μ , который на участке упругого нагружения для большинства горных пород имеет значение от 0,16 до 0,35, с ростом напряжения начинает постепенно увеличиваться и вблизи предела прочности достигает значения, близкого к 0,5. На ниспадающем участке диаграммы «напряжения-деформация» он превышает эту величину, вообще говоря, и теряет свой первоначальный физический смысл, поскольку превалирующим становится процесс разрыхления породного образца, сопровождающийся увеличением его объема.

Другой особенностью диаграммы деформирования является наличие некоторой остаточной упругой деформации при разгрузке в каждой точке ниспадающего участка. Это явление экспериментально установлено при исследовании свойств предельно напряженных пород при малоцикловом нагружении [2]. После выхода на ниспадающий участок цикл «разгрузка-повторное нагружение» приводит к образованию петли гистерезиса, ось которой приблизительно соответствует наклону упругого участка диаграммы. В этом смысле ниспадающий участок диаграммы « σ - ε » является, по сути, геометрическим местом точек предельных состояний породного образца. Форма ниспадающего участка диаграммы отражает структуру исследуемой литологической разности. Область на графике, расположенная правее ниспадающего участка, является совокупностью точек, где выполняется условие несжимаемости материала, сохранившего некоторое остаточное, т.е. предельное для данного уровня деформаций, количество упругих структурных связей.

Для дальнейшего построения модели сформулируем проблему более конкретно. Пусть существует некоторая мера напряжений, так называемое эквивалентное напряжение σ_e , причем при одноосном нагружении (например, $\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) имеет место равенство $\sigma_e = \sigma_1$. Предположим, что эксперимента-

льным путем установлен предел прочности на сжатие R_c исследуемого материала. Тогда для многоосного напряженного состояния процесс потери несущей способности материала начинается в том случае, если в некоторой точке достигается равенство $\sigma_e = R_c$. В нашем случае при достижении эквивалентного напряжения σ_e предельного значения R_c в некоторых точках области, прилежащей к контуру полости, начинается процесс разрыхления горной породы.

Идеализируя реальные диаграммы деформирования, выделим два ярко выраженных участка. На первом из них материал деформируется упруго, так что имеет место закон Гука. В частности, при одноосном нагружении вдоль оси 1 имеем $\sigma_1 = E\varepsilon_1$, где E – модуль Юнга в данном направлении. Коэффициент Пуассона на этом участке предполагается неизменным, его величина, в соответствии с указанным выше, лежит в пределах $0,16 \div 0,38$. По достижении предельного напряжения $\sigma_e = R_c$ имеет место переход на ниспадающий участок диаграммы, вид которого считается известным из эксперимента и может быть описан соответствующей функциональной зависимостью [3]:

$$\sigma_e = f(\varepsilon_e - \varepsilon_e^c), \quad \frac{df}{d\varepsilon_e} < 0 \quad (1)$$

где ε_e – мера эквивалентной деформации материала, соответствующая выбранной мере эквивалентных напряжений, ε_e^c – эквивалентная деформация в момент достижения предельной нагрузки.

На ниспадающем участке коэффициент Пуассона считается равным $\mu \leq 0,5$. Кроме того, предполагается, что по мере дальнейшего деформирования в породном массиве (т. A'_i) возникают остаточные деформации $\varepsilon_e^d = \varepsilon_e - \frac{\sigma_e}{E_e}$, где

$E_e = \frac{R_c}{\varepsilon_e^c}$ – упругий модуль диаграммы « $\sigma_e - \varepsilon_e$ » (рис. 1), так что

$$\varepsilon_e^d = \varepsilon_e - \frac{\varepsilon_e^c}{R_c} \sigma_e. \quad (2)$$

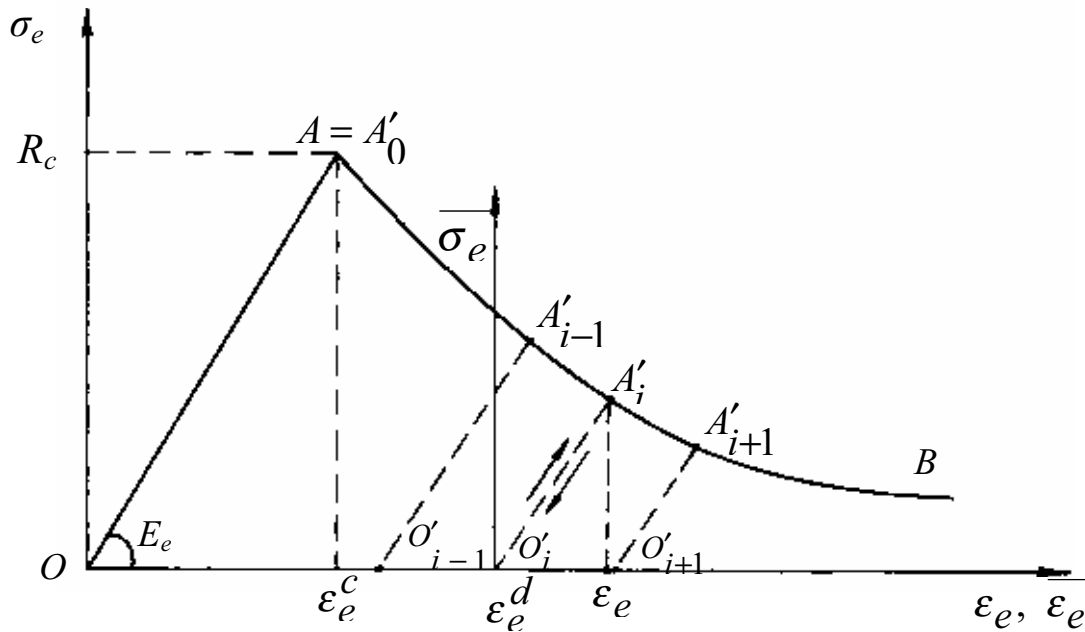


Рис. 1. - Кривая полного деформирования локального объема породного массива

Дополнительно положим, что в любой точке ниспадающей диаграммы разгрузка происходит вдоль наклонной прямой, параллельной упругому участку. При повторном нагружении напряжение σ_e будет возрастать до значения σ_e^c , лежащего на исходной ниспадающей кривой, и при дальнейшем увеличении деформаций диаграмма имеет тот же вид как и в отсутствии цикла «разгрузка-повторное нагружение».

С этой точки зрения, как уже отмечалось, эффективное напряжение $\sigma_e = \sigma_e^c$ можно считать предельным напряжением, а всю ниспадающую ветвь диаграммы – кривой предельного состояния материала горной породы.

С целью математической реализации подобной трактовки воспользуемся методом, аналогичным используемому при описании эффекта Баушингера в механике сплошных сред [4]. Введем «текущую» систему координат с началом в точке O' ($\sigma_e = 0$, $\varepsilon_e = \varepsilon_e^d$), (см. рис. 1) и обозначим

$$\overline{\sigma}_e = \sigma_e, \quad \overline{\varepsilon}_e = \varepsilon_e - \varepsilon_e^d. \quad (3)$$

Тогда в данной системе координат ломанная кривая $O'_i A'_i B$, будет иметь вид, аналогичный исходной диаграмме деформирования OAB , с упругим участком $O'_i A'_i$. Поскольку из (3) следует $\varepsilon_e = \overline{\varepsilon}_e + \varepsilon_e^d$, то в соответствии с (1) и (3) уравнение этой кривой имеет вид

$$\overline{\sigma}_e = f\left(\overline{\varepsilon}_e + \varepsilon_e^d - \varepsilon_e^c\right), \quad \frac{df}{d\varepsilon_e} < 0. \quad (4)$$

Итак, на уровне соотношений связи между напряжениями и деформациями исходная формулировка задачи выглядит следующим образом.

Решение производится для плоского напряженного состояния. Пусть существует некоторая полость Ω_0 с границей Γ_0 , окруженная материалом, деформация которого на некотором расстоянии от Γ_0 подчиняется закону Гука (рис. 2). Наличие полости приводит к возникновению зоны концентрации напряжений, а внутри последней зоны - разрыхления материала Ω_c , которая определяется границей Γ_c . На этой границе имеет место соотношение $\sigma_e = R_c$. Вне границы Γ_c механический отклик материала по прежнему задается законом Гука, а в ее пределах – соотношением (1). В соответствии с вышеизложенным, для любой точки A'_i ниспадающего участка диаграммы между контурами Γ_0 и Γ_c можно построить контур Γ'_d , на котором связь между напряжениями и деформациями дается соотношением (4).

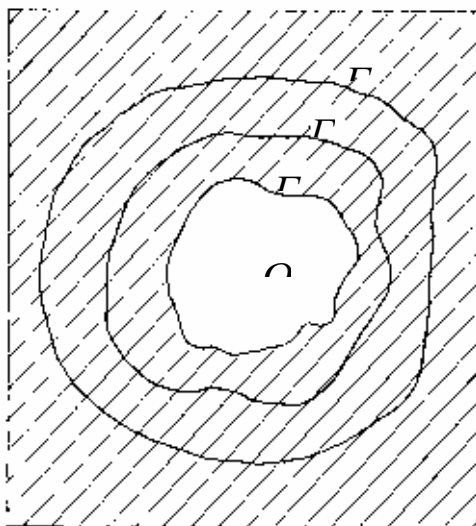


Рис. 2. - К постановке краевой задачи о напряженно-деформированном состоянии разупрочняющегося породного массива вокруг одиночной горизонтальной выработки

Набор контуров Γ'_d ($i=0, 1, 2, \dots$), где $\Gamma'_0 = \Gamma_c$, позволяет, используя численные методы моделирования, полностью описать свойства разрыхленного породного массива между контурами Γ_0 и Γ_c и с учетом этого сформулировать краевую задачу по определению напряженно-деформированного состояния в окрестности выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирничанский Г.Т. Элементы теории деформирования и разрушения горных пород. - Киев: Наук. думка, 1999.-179 с.
2. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. - Киев: Наук. думка, 1989.-192 с.
3. Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статистической геомеханики.- К.: Універ. вид-во «Пулсари», 2002.-304 с.
4. Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагрузениях. - М.: изд-во МГУ, 1969.-264 с.