

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. — М.: Недра, 1982. — 270 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 541 с.
3. Гловински Р., Лионс Ж.-Л., Тремольер Р. Численное исследование вариационных неравенств. — М.: Мир, 1979. — 574 с.
4. Главачек И., Гаслингер Я., Нечас И., Ловишек Я. Решение вариационных неравенств в механике. — М.: Мир, 1986. — 270 с.

УДК 622.02:539.2

Ю.Ю. Булич

О ПРИРОДЕ МОДУЛЯ СПАДА

Модуль спада, или тангенс угла наклона ниспадающей ветви диаграммы напряжение-деформация считается основной характеристикой материалов, определяющей их поведение после достижения предела прочности [1]. Понятие "модуль спада" принадлежит А.М. Линькову, однако под тем или иным названием тангенс угла наклона ниспадающей ветви использовался как деформационная характеристика или послепредельная жесткость с момента получения первых полных кривых бетона в 1938 г. и горных пород в 1965 г. [2]. Применение модуля спада как прочностной характеристики, а ниспадающей ветви как семейства пределов прочности образцов с различной степенью нарушенности развито в работах В.В. Виноградова; как меры хрупкости - в работах В.А. Мансурова и А.Д. Алексеева. На настоящий момент достаточно подробно исследовано влияние на модуль спада испытательной машины, размеров и формы образцов, скорости нагружения, бокового давления и других факторов. Уже не единичны результаты испытаний горных пород в условиях неравнокомпонентного сжатия [1] и сложных траекторий нагружения в запредельной области [3, 4].

При неизменных условиях испытаний и выполнении известных требований к испытательному оборудованию стабильность модуля спада не уступает таким фундаментальным характеристикам как предел прочности и модуль упругости. Наиболее сильно на модуль спада влияет боковое

давление. Однако характерно, что испытания образцов с низким соотношением высоты к диаметру порядка 1:2 и менее дает настолько интенсивное выполаживание модуля спада, для достижения которого при стандартных образцах требуется боковое давление 15-50 МПа. В условиях неравнокомпонентного сжатия увеличение промежуточной компоненты главных напряжений приводит к росту модуля спада, то есть охрупчиванию. В преобладающем большинстве случаев охрупчиванию способствуют низкие скорости продольного деформирования и наоборот, повышение скорости приводит к увеличению энергоемкости предельного деформирования и снижению модуля. Последние два фактора изменяют модуль спада существенно слабее.

Изучение изменений модуля спада при сложных траекториях деформирования в предельной области, в частности при локальных изменениях минимальной компоненты главных напряжений производилось на установке объемного неравнокомпонентного сжатия на основе пресса ПСУ-500 и устройства УППП с активным элементом. Особенностью установки является возможность циклирования боковой нагрузки относительно заданных уровней и ступенчатого ее изменения по осям промежуточного или минимального главных напряжений с непрерывной регистрацией всех компонент главных напряжений и деформаций.

Испытания различных горных пород показали, что снижение минимальной компоненты главных напряжений в предельных состояниях приводит к дополнительному охрупчиванию и увеличению модуля спада. При этом для пород, у которых ниспадающая ветвь диаграммы напряжения-деформации при постоянных боковых давлениях имеет монотонный характер (например, для слабометаморфизованных аргиллитов, гипса, мрамора), величина модуля спада во время воздействия определяется выражением:

$$M^B = M^C + K_3 \frac{\sigma_3}{\varepsilon_1} \quad (1)$$

где M^C - модуль спада до воздействия при $\sigma_3 = \text{const}$;

σ_3 - скорость снижения минимальной компоненты главных напряжений;

ε_1 - скорость продольного деформирования;

K_3 - коэффициент изменения несущей способности на единицу изменения минимального напряжения σ_3 .

Коэффициент K_3 для различных горных пород и углей изменяется в пределах 3÷20, по смыслу близок к параметру A в известном условии прочности $\sigma_1 = \sigma_{сж} + A\sigma_3$, но зависит не только от внутреннего трения, как параметр A , но и от траектории сжатия предельной поверхности при увеличении степени разрушенности.

Подобная структура экспериментальной зависимости модуля спада во время воздействия, посредством снижения минимального главного напряжения позволяет сделать следующие выводы.

1. Модуль спада горных пород в условиях одноосного сжатия не является верхним пределом изменения хрупкости, как это подразумевалось в существующих моделях, основанных на простых траекториях деформирования.

2. Скорость продольного деформирования является фактором, повышающим энергетику процесса запредельного деформирования и в условиях сложных траекторий, в частности при разгрузке минимального главного напряжения.

3. При снижении минимального главного напряжения фактор времени, в отличие от скорости основного (продольного) нагружения, превращается из слабого в сильный.

4. При квазистатическом нагружении по оси σ_1 и относительно динамичном снижении σ_3 энергоемкость доразрушения предельно-напряженных пород может быть сколь угодно низка, вплоть до нулевой, что собственно и происходит вблизи выработок при развитии зон неупругих деформаций.

Второй член выражения (1) указывает на возможную природу модуля спада при одноосном сжатии.

$$M = K^* \frac{d\sigma^*}{d\varepsilon_1} \quad (2)$$

где σ^* - неизвестное гипотетическое давление, эквивалентное боковому, усиленное коэффициентом чувствительности K^* к этому давлению, препятствующее разрушению, скорость снижения которого по мере продольного деформирования определяет природу модуля спада каждого конкретного геоматериала, как скорость потери несущей способности.

В качестве первого приближения σ^* может быть заменена прочностью на растяжение наружных слоев геоматериала или сцеплением. Тогда диапазон изменения K^* - $3+20$ отражает известное соотношение для горных пород прочности на сжатие и растяжение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. - Киев: Наук. думка, 1985. - 192 с.
2. Hudson J.A., Crouch S.L., Fairhurst C. / Soft, stiff and servo-controlled testing machines : a review with reference to rock failure // Eng. Geol., 1972, vol. 13. - P. 155-189.
3. Зарецкий-Феоктистов Г.Г., Танов Г.Н. / Влияние пути нагружения на деформационные характеристики горных пород в запредельной области // ФТПРПИ, 1988, № 5. - С. 7-14.
4. Тарасов Б.Г. Влияние скорости нагружения и вида напряженного состояния на поведение горных пород в допредельной и запредельной областях. - В кн.: Физико-технические и технологические проблемы разработки полезных ископаемых. - М.: ротاپринт ИПКОН АН СССР, 1982. - С. 111-117.

УДК 622.831.24

В.В. Бабец.

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ЭНЕРГОЗАТРАТЫ ПРИ РАЗРУШЕНИИ

Известно, что величина напряжений в горном массиве практически прямо пропорционально зависит от глубины, с увеличением которой значительно возрастают напряжения на контуре выработки. Проведение горных выработок и добыча полезных ископаемых сопровождается выемкой части горного массива, что приводит к перераспределению напряженного состояния и концентрации напряжений в зоне ведения работ, а, следовательно, к увеличению потенциальной энергии горного массива в этой зоне.

На разрушение пород затрачивается некоторое количество энергии, которую необходимо подвести к ней. В подземных условиях эта энергия складывается из двух составляющих: энергии горного массива и механической