

ОБ ОДНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СРЕЗ

Анвар Исмагилович Чанышев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, a.i.chanyshev@gmail.com; Новосибирский Государственный Университет Экономики и Управления, 630099, Россия, г. Новосибирск, Каменская, 52, профессор кафедры МиЕН

Ильгизар Маратович Абдулин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный просп., 54, научный сотрудник, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

Обсуждается вопрос возможности определения прочностных свойств горных пород на основе применения данных, полученных при срезе горных пород по заранее указанному направлению. Утверждается, что из этих экспериментов возможно установить лишь предельную силу трения при движении разрушенных частей материала друг по другу.

Ключевые слова: напряжения, деформации, эксперименты, срез, критерий прочности Кулона-Мора, угол внутреннего трения

AN ALTERNATIVE INTERPRETATION OF SHEAR TESTING DATA

Anvar I. Chanyshev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Phys.-Math.), office: +7 (383) 205 30 30 (716); Novosibirsk State University of Economics and Management, 52 Kamenskaya street, Novosibirsk, 630099, Russia, Professor at the Mathematics and Natural Sciences Department, office: (383) 243 94 75, e-mail: a.i.chanyshev@gmail.com

Igizar M. Abdulin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Researcher, e-mail: i.m.abdulin@mail.ru

The authors discuss determinability of rock strength using data from tests on shearing along the pre-set direction. It is claimed that such tests can only provide the limiting friction force of particles during their contact motion.

Keywords: stresses, strains, tests, shear, Mohr–Coulomb failure criterion, internal friction angle

Введение

При решении задач горного дела требуется знать прочностные свойства материалов на сжатие, растяжение, на сдвиги, и т.п. Для этих целей производятся отборы образцов горных пород. Особое внимание уделяется внутренней структуре материалов так, чтобы в результате испытаний в них реализовывалось бы

однородное напряженно-деформированное состояние. Из серии экспериментов на образцах выделяются опыты на срез [1], когда за счет вертикального сжатия образцов и применения специально изготовленных оголовников для концов образца в нем создается направление принудительного скольжения, не совпадающее с плоскостями действия максимальных касательных напряжений или с плоскостями, следующими из условия прочности Кулона-Мора. Через угол наклона плоскости принудительного скольжения к оси абсцисс устанавливается отношение нормального и касательного усилий, остающееся неизменным вплоть до полного смещения одной части разрушенного образца по другой. С изменением угла наклона плоскости скольжения получаются разные отношения нормального и касательного усилий, разные их значения, с помощью которых формируется кривая прочности геоматериала, по виду совпадающая с условием прочности Кулона-Мора. По этой кривой устанавливаются коэффициент сцепления горной породы, угол внутреннего трения. Преимущество этого вида испытания очевидно – из сжатия находятся все возможные другие пределы прочности материала. Однако здесь имеются некоторые замечания, на которых попытаемся заострить внимание.

Попытаемся подойти к этим экспериментам критически, оценивая все выполняемые шаги.

Анализ представленного метода изучения прочностных свойств горных пород на срез при осевом нагружении материала

В [1] рассматривается следующая схема нагружения материала (рис. 1).

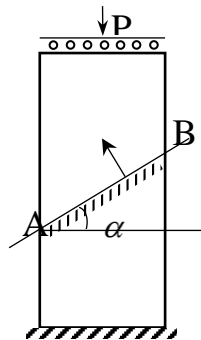


Рис. 1. Схема нагружения образца горной породы при срезе под действием осевого сжатия (проектируемая плоскость среза составляет с горизонтальной осью угол α).

Образец горной породы в виде кругового цилиндра или прямоугольного параллелепипеда подвергается действию осевого сжатия. Концы образца помещаются в металлические обоймы. Сила осевого сжатия равна P . Точки A и B на рис. 1 свободны от действия обойм. Чтобы не ограничивать сдвиг материала по плоскости AB с нормалью \vec{n} к верхней части образца прикладывается сила P с применением роликовой постели [1], свободно перемещающейся в горизонтальном

направлении. Точка приложения силы P перемещается вместе постелью влево (вправо) в зависимости от направления образующейся плоскости скольжения.

При этом нормальное сжимающее напряжение и касательное определяются по формулам тензорного проектирования в предположении, что в образце реализуется однородное напряженное состояние сжатия. Согласно [1]

$$\tau_n = \frac{P}{S_0} \cos \theta, \quad \sigma_n = \frac{P}{S_0} \sin \theta,$$

где P – разрушающая вертикально сила, $\theta = \pi/2 - \alpha$ – угол между плоскостью из среза и направлением действия разрушающей силы, $S_0 = ld$ – площадь плоскости среза, d – диаметр).

Рассмотрим процесс сжатия образца. До тех пор, пока не началось сдвигание одной части образца относительно другой (образующихся при разрушении образца), можно считать, что в нем (в образце) создается однородное напряженно-деформированное состояние с отличным от нуля напряжением

$$\sigma_y = \frac{P}{S},$$

где S – площадь поперечного сечения образца, P – приложенная сила (все другие напряжения σ_{ij} полагаются равными нулю). Если допустить, что разрушения в образце начнутся на тех площадках, где касательное усилие τ_n на площадке с нормалью \vec{n} по модулю достигнет какого-то значения τ_s , то тогда очевидно, что впервые это произойдет на площадках действия максимального касательного напряжения, образующих с осью y углы $\pm\pi/4$. Это случится в силу того, что касательное напряжение τ_{xy} связано с другим касательным напряжением $(\sigma_x - \sigma_y)/2$ условием

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2} + \tau_{xy}^2 = \tau_s. \quad (1)$$

При этом τ_{xy} – касательное напряжение, действующее на площадке с нормалью y в направлении оси x , $(\sigma_x - \sigma_y)/2$ – касательное усилие, действующее в плоскостях, образующих угол $\pm 45^\circ$ с осью y . Из (1) следует, что τ_{xy} достигнет максимума, если $(\sigma_x - \sigma_y)/2 = 0$, то есть там, где $\sigma_x = \sigma_y$, то есть на площадках действия максимальных касательных напряжений. Из (1) также следует, что τ_{xy} обращается в ноль там, где площадка с нормалью y – главная. Таким образом

получается, что в сжатом в направлении z образце разрушения прежде всего наступят на площадках, ориентированных под углом $\pm 45^\circ$ к оси сжатия. И пока разрушение наступит на площадке с нормалью \vec{n} , наклоненной под углом α к оси абсцисс, разрушение произойдет в целом веере площадок, расположенных в секторе с углом $\pi/4 - \alpha$, $\pi/4 + \alpha$. На рис. 2 представлена структура материала вдоль плоскости скольжения с нормалью $\vec{n} = (-\sin \alpha, \cos \alpha)$.

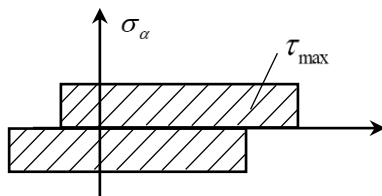


Рис. 2. Схема сдвига одной разрушенной части материала по другой

На этом рисунке представлено, что скольжение одной части образца горной породы по другой его части будет происходить, когда материал вдоль этой плоскости и сверху и снизу будет уже разрушенным. То, что регистрируется в опытах на срез, представляет собой предельную силу трения при движении двух частей уже разрушенного материала.

Аналогичная картина имеет место, если в качестве условия разрушения горной породы принять условие Кулона-Мора [2]

$$\max_n |\tau_n + a\sigma_n| = \tau_s, \quad (2)$$

где $a = \operatorname{tg} \psi$, ψ – угол внутреннего трения. В этом случае площадки, на которых выполняется условие (2), наклонены к оси сжатия под углом $\pm(45^\circ + \psi/2)$. Т. е. получаем аналогичную ситуацию как на рис. 2. Прежде чем наступит сдвиговое разрушение вдоль AB на рис. 1, материал в соседних с AB областях уже разрушится за счет выполнения (2) на более ранних этапах нагружения силой P .

Отметим, что задачи, связанные с исследованиями сдвигового деформирования массивов горных пород исследовались в многочисленных работах [3-12].

Таким образом в случае применения метода изучения прочностных свойств горных пород срезом в экспериментах фиксируется предельная сила трения, которую необходимо преодолеть при сдвигении одной части разрушенного материала по другой.

Сделаем еще одно замечание, касающееся интерпретации экспериментов на срез. Как известно [13], деформируемые твердые тела состоят из связанных друг с другом частиц. Эти частицы остаются прижатыми друг к другу как в естественном состоянии среды, когда на нее никакие внешние силы не действуют, так и в состоянии приложения сил (растягивающих). Этот факт в [14] отмечен как дей-

ствие сил внутреннего взаимодействия частиц, обусловленных силами межатомного, молекулярного взаимодействия, которые в теории упругости никак не учитываются. Возникает вопрос: а где же тогда они учитываются в теориях неупругости, включая теорию разрушения материалов?

Представим себе плоскость скольжения с нормалью \vec{n} , как изображено на рис. 1. В направлении нормали \vec{n} действуют две силы, два усилия: σ_n и N . Усилие N прижимает элементы среды вдоль AB друг к другу в естественном состоянии среды. Кроме N действует усилие σ_n , которое приводит к растяжению слоя материала вдоль AB в случае $\sigma_n > 0$ и сжатию в случае $\sigma_n < 0$. Наличие этих двух усилий означает, что для преодоления силы трения вдоль AB необходимо соблюсти условие

$$|\tau_n| = |(N + \sigma_n)k_{fr}| \geq \tau_s, \quad (3)$$

где τ_s – предельное значение силы (усилие) трения, k_{fr} – коэффициент трения. Сила (усилие) N соответствует теоретической прочности материала [14], т.е. на порядок больше по модулю значения $|\sigma_n|$. Это означает, что величина τ_s в (3) по существу совпадает с произведением

$$\tau_s \approx |Nk_{fr}|. \quad (4)$$

В этом выражении ни величина N неизвестна, ни коэффициент трения k_{fr} . Однако можно допустить, что эти величины в отдельности и тем более в совокупности зависят от сдвига материала вдоль направления AB на рис. 1. Эта зависимость от сдвига γ представлена схематично на рис. 3.

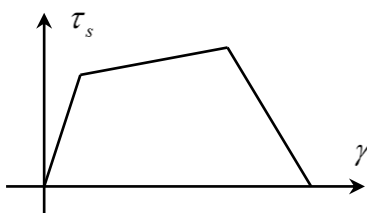


Рис. 3. Зависимость предельной силы (усилия) трения от сдвига γ на вдоль участка AB на рис. 1

Видна упругая (линейная) часть этой кривой, упругопластическая, ветвь запредельного деформирования. Всю эту кривую можно получить на испытательных установках с фиксированными смещениями захватов при условии $m\ddot{x} = F - R = 0$ [15].

Если плоскость AB на рис. 1 – плоскость скольжения, то тогда спрашивается: а как же проявляется величина σ_n , фигурирующая в (3)? В направлении \vec{n} за счет воздействия усилия N в самом первоначальном виде можно допустить образование деформации M по правилу

$$M = \frac{N}{K}, \quad (5)$$

где K – жесткость некоторой пружины, образованной на контактах одних частиц материала с другими, M – это деформация за счет сжатия пружин усилием N . Если учитывается действие σ_n , то вдоль направления \vec{n} будут уже действовать две силы N и σ_n , которые вызовут деформацию

$$\varepsilon_n + M = \frac{N + \sigma_n}{K}. \quad (6)$$

Вычитая из (6) выражение (5), получаем

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_n}{K}. \quad (7)$$

Влияние усилия N здесь исчезло, о чем говорится также в [14].

Из сказанного вытекают вопросы о предназначении величин σ_n , τ_n и N в формировании критериев прочности горных пород [16].

Выводы

1. Показано, что при сжатии образца образуется направление принудительного скольжения горной породы, на котором материал может находиться уже в разрушенном состоянии.

2. Показано, что на площадке скольжения имеются силы межатомного, молекулярного взаимодействия (силы притяжения), которые никоим образом не отражаются в формируемых критериях прочности горных пород.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А17-117121140065-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каркашадзе Г. Г. Механическое разрушение горных пород. – М.: МГГУ, 2004. – 222 с.
2. Соколовский В. В. Теория пластичности. – М.: Высш. шк., 1969. – 608 с.

3. Адушкин В. В., Кочарян Г. Г., Новиков В. А. Исследование режимов движения по разлому // Физика Земли. – 2016. – № 5. – С. 13–24.
4. Артюшков Е. В. Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 456 с.
5. Друкер Д., Прагер В. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование // Механика: Новое в зарубежной науке. Вып. 2. Определяющие законы механики грунтов. М.: Мир. – 1975. – С. 166–177.
6. Кондратьев С. В. Методика измерений относительных перемещений блоков горного массива // Сейсмические приборы. ОИФЗ РАН. – 1996. – вып. 25–26. – С. 151–156.
7. Костюченко В. Н., Кочарян Г. Г., Павлов Д. В. Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба // Физ. мезомех. – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 23–42.
8. Кочарян Г. Г., Марков В. К., Остапчук А. А., Павлов Д. В. Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. – № 5. – С. 5–15.
9. Мухамедиев Ш. А. О дискретном строении геосреды и континуальном подходе к моделированию ее движения // Геодинамика и тектонофизика. – 2016. – Т. 7. – № 3. – С. 347–381.
10. Райс Дж. Механика очага землетрясений. – М.: Мир, 1982. – 217 с.
11. Кочарян Г. Г., Морозова К. Г., Остапчук А. А. Исследование акустической эмиссии слоя геоматериала при сдвиговом деформировании // ФТПРПИ. – 2019. – №3. – С. 15–22.
12. Ревуженко А. Ф., Стажевский С. Б., Шемякин Е. И. О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах // ФТПРПИ. – 1974. – №3. – С. 130–133.
13. Ruppeneit K. V., Liberman Iu. M. Introduction to rock mechanics. – М.: Gosgortekhzdat, 1960.
14. Баренблатт Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении // ПМТФ. – 1961. – Т. 2. – №. 4. – С. 3.
15. Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. – С.-П.: Наука, 2001. – 344 с.
16. Чанышев А. И., Абдулин И. М. Две характеристические функции поведения образцов сульфидной руды при двухосном сжатии // ФТПРПИ. – 2018. – №6. – С. 30–36.

© А. И. Чанышев, И. М. Абдулин, 2021