Дисциплина «Механика горных пород»
для студентов ОП 6В07202 "Горное дело"

Лекция 2. Физико-механические свойства горных пород и методы их определения

Цель лекции: Сформировать у обучающихся системные знания о физико-механических свойствах горных пород, методах их лабораторного определения, а также о закономерностях перехода от свойств образца к свойствам массива с учетом масштабного эффекта и анизотропии. Овладеть навыками интерпретации результатов трехосных испытаний для построения паспортов прочности.

План лекции:

1) Прочностные характеристики горных пород и методы их лабораторного определения.
2) Деформационные характеристики горных пород.
3) Анизотропия и масштабный эффект. Переход от свойств образца к свойствам массива.
4) Определение прочностных параметров по результатам трехосных испытаний (паспорта прочности).

1. Прочностные характеристики горных пород и методы их лабораторного определения

1.1. Общие представления о прочности

Прочность – способность горной породы сопротивляться разрушению под действием механических нагрузок. Прочность является интегральной характеристикой, зависящей от минерального состава, структуры, текстуры, трещиноватости, влажности и температуры.

В зависимости от вида напряженного состояния различают прочность при:

- одноосном сжатии ($\sigma_{сж}$);
- одноосном растяжении ($\sigma_р$);
- сдвиге (τ);
- трехосном сжатии ($\sigma1$, $\sigma2$, $\sigma3$).

1.2. Предел прочности при одноосном сжатии ($\sigma_{сж}$)

Предел прочности на одноосное сжатие – максимальное напряжение, которое выдерживает образец породы до разрушения при сжатии без бокового подпора. Определяется по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{P_{max}}{A_0}$$

где P_{max} – максимальная разрушающая нагрузка, Н;

A_0 – первоначальная площадь поперечного сечения образца, м².

Методика испытаний (ГОСТ 21153.2-84, ASTM D7012, ISRM):

- Образцы – цилиндры диаметром 40-100 мм, с отношением высоты к диаметру 2:1.
- Торцы должны быть параллельны и отшлифованы.
- Скорость нагружения 0,5-1,0 МПа/с (статическое нагружение) или контролируемая деформация.
- Испытательная машина – гидравлический или электромеханический пресс с системой регистрации нагрузки-деформации.

Классификация пород по $\sigma_{сж}$:

Категория	$\sigma_{сж}$, МПа	Примеры пород
Очень слабые	< 5	Торф, рыхлые пески, лесс
Слабые	5-25	Глины, мергели, слабые известняки
Средней прочности	25-50	Аргиллиты, алевролиты, гипс
Прочные	50-100	Песчаники, известняки, сланцы
Очень прочные	100-250	Граниты, базальты, мраморы
Исключительно прочные	> 250	Кварциты, некоторые базальты

1.3. Предел прочности при растяжении ($\sigma_р$)

Прочность горных пород на растяжение значительно ниже прочности на сжатие (в 8-30 раз). Прямое растяжение образцов трудоемко, поэтому широко применяют косвенные методы:

1) Метод бразильского раскалывания (Brazilian test) – цилиндрический образец сжимается по диаметру. Прочность на растяжение:

$$\sigma_р = \frac{2P_{max}}{\pi D L}$$

где D – диаметр образца, L – его длина (толщина).

2) Изгиб – испытание образца-балочки на трехточечный или четырехточечный изгиб. Прочность на растяжение при изгибе выше, чем при раскалывании, но метод чувствителен к дефектам.

3) Раскалывание клином – для крупных образцов.

Типичные соотношения $\sigma_{сж}/\sigma_р$:

- Для магматических пород: 8-15;
- Для метаморфических: 10-20;
- Для осадочных: 15-30.

1.4. Сцепление (c) и угол внутреннего трения (φ)

Эти параметры характеризуют сопротивление породы сдвигу. Они входят в критерий прочности Кулона-Мора:

$$\tau = \sigma \cdot \tan\varphi + c$$

где τ – предельное касательное напряжение; σ – нормальное напряжение на площадке сдвига.

Физический смысл:

- c (сцепление) – сопротивление сдвигу при отсутствии нормального давления (обусловлено силами сцепления между частицами, цементацией).

- φ (угол внутреннего трения) – характеризует трение между частицами; $\tan\varphi$ – коэффициент внутреннего трения.

Методы определения c и φ:

1. Прямой срез (сдвиг): образец (квадратный или круглый) помещается в срезную коробку (обычно две половины). Прикладывается нормальная нагрузка N, затем увеличивается сдвиговая нагрузка T до разрушения. Для нескольких нормальных нагрузок строят график τ = f(σ) и по линейной аппроксимации находят c и φ.

2. Трехосное сжатие: по результатам испытаний при разных боковых давлениях строят круги Мора и огибающую (см. раздел 4).

3. Косвенные методы (по данным о прочности и структуре).

1.5. Оборудование и требования к образцам

- Испытательные прессы с сервогидравлическим управлением для программируемого нагружения.

- Тензометрические датчики (проволочные, полупроводниковые) или LVDT для измерения деформаций.

- Трехосные камеры (стабилометры) для испытаний при боковом давлении.

- Образцы должны быть отобраны с сохранением природной влажности (по возможности) или высушены до постоянной массы. Количество образцов – не менее 5-10 для однородных пород, 10-30 для неоднородных.

2. Деформационные характеристики горных пород

Деформационные свойства описывают поведение породы под нагрузкой до момента разрушения. Основные характеристики: модуль упругости (E), коэффициент Пуассона (ν), модуль деформации (E_0).

2.1. Модуль упругости (модуль Юнга, E)

Модуль упругости характеризует сопротивление породы упругим деформациям. Для линейно-упругого материала:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\text{упр}}}$$

где σ – напряжение, $\varepsilon_{\text{упр}}$ – относительная упругая деформация.

Методы определения E:

- Статический – по начальному прямолинейному участку диаграммы «σ-ε» при одноосном сжатии. Вычисляется как тангенс угла наклона касательной или секущей.

- Динамический – по скорости распространения упругих волн (ультразвуковой метод). Формулы:

$$E_d = \rho V_p^2 \frac{(1+\nu_d)(1-2\nu_d)}{1-\nu_d}, \nu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

где V_p, V_s – скорости продольных и поперечных волн;

ρ – плотность. Динамический модуль обычно на 10-30% выше статического.

2.2. Коэффициент Пуассона (ν)

Коэффициент Пуассона – отношение поперечной деформации к продольной:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{попер}}}{\varepsilon_{\text{прод}}}$$

Для горных пород ν обычно составляет 0,15-0,45. Значения:

- Крепкие магматические породы: 0,15-0,25;
- Осадочные породы: 0,20-0,35;
- Пластичные породы (глины, соль): 0,35-0,45.

Определяется одновременно с E статическим или динамическим методами.

2.3. Модуль деформации (E_0)

В отличие от модуля упругости, модуль деформации учитывает как упругие, так и пластические (остаточные) деформации:

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\text{общ}}}$$

где $\varepsilon_{\text{общ}} = \varepsilon_{\text{упр}} + \varepsilon_{\text{пл}}$. E_0 всегда меньше E; их отношение (коэффициент пластичности) характеризует способность породы к неупругому деформированию.

2.4. Статические и динамические методы: сравнение

Параметр	Статические методы	Динамические методы (ультразвук)
Характер нагрузки	Медленное нагружение	Упругие волны (импульс)
Результат	E, ν, E_0, предел прочности	E_д, ν_д (без разрушения)
Образцы	Требуются стандартные	Можно на керне любой формы
Скорость	Низкая	Высокая
Применение	Проектные расчеты, паспорта прочности	Экспресс-оценка, контроль качества

3. Анизотропия и масштабный эффект. Переход от свойств образца к свойствам массива

3.1. Анизотропия горных пород

Анизотропия – зависимость физико-механических свойств от направления (слоистость, сланцеватость, трещиноватость). Проявляется в различии прочности, деформационных характеристик и скоростей волн вдоль и поперек слоистости.

Коэффициент анизотропии прочности:

$$K_a = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$$

(отношение максимальной прочности к минимальной). Для сланцев K_a может достигать 2-3.

При испытаниях образцы должны быть ориентированы относительно слоистости. В численных моделях анизотропию учитывают заданием разных свойств для разных направлений (например, модель ubiquitous joints в RS2).

3.2. Масштабный эффект

Масштабный эффект – изменение прочностных и деформационных свойств с увеличением объема (масштаба) породы. Прочность крупного образца (и тем более массива) всегда ниже прочности лабораторного образца из-за наличия макротрещин, ослабленных зон, неоднородностей.

Эмпирическая зависимость прочности от размера:

$$\sigma_{\text{масс}} = \sigma_{\text{обр}} \cdot \left(\frac{d_{\text{обр}}}{d_{\text{масс}}}\right)^{\alpha}$$

где α – эмпирический показатель (0,1–0,3). Наиболее распространен переход через рейтинговые классификации.

3.3. Переход от свойств образца к свойствам массива

Прямое использование лабораторных данных в расчетах устойчивости выработок приводит к завышению прочности и, как следствие, к неоправданно оптимистичным прогнозам. Для перехода применяют:

1. Рейтинговые классификации (RMR, Q, GSI)**.** Значение GSI (Geological Strength Index) служит входным параметром для критерия Хока-Брауна, который позволяет рассчитать прочностные параметры массива.
2. Критерий Хока-Брауна (обобщенный):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^{a}$$

где σ_{ci} – прочность образца;

m_b, s, a – параметры, зависящие от GSI и типа породы.

3. Эмпирические коэффициенты: снижение прочности на сжатие в 2-5 раз, модуля деформации – в 3-10 раз по сравнению с лабораторными значениями.

Практические рекомендации:

- Для предварительных оценок: $\sigma_{масс} \approx (0{,}1–0{,}5)\cdot\sigma_{обр}$, $E_масс \approx (0{,}1\text{-}0{,}3)\cdot E_{обр.}$

- Для ответственных расчетов – использовать GSI и критерий Хока-Брауна.

4. Определение прочностных параметров по результатам трехосных испытаний (паспорта прочности)

4.1. Методика трехосных испытаний

Трехосное сжатие реализуется в специальных камерах (стабилометрах), где на образец одновременно действуют:

- Всестороннее гидростатическое давление ($\sigma_2 = \sigma_3$) – боковое давление;
- Осевое напряжение σ_1, увеличиваемое до разрушения.

Обычно проводят серию испытаний на 4-5 образцах при разных значениях σ_3 (например, 0, 5, 10, 20 МПа). Для каждого образца фиксируют разрушающие напряжения σ_1 и σ_3.

4.2. Построение паспорта прочности (огибающей кругов Мора)

Порядок построения:

1. По каждой паре (σ_3, σ_1) строят круг Мора: центр на оси абсцисс в точке $(\sigma_1+\sigma_3)/2$, радиус $(\sigma_1–\sigma_3)/2$.
2. Проводят огибающую линию, касательную ко всем кругам. Для большинства пород огибающая аппроксимируется прямой (критерий Кулона-Мора) или параболой.
3. По углу наклона огибающей к оси абсцисс находят угол внутреннего трения φ**,** а по отрезку, отсекаемому на оси ординат (при $\sigma = 0$), **–** сцепление **c.**

Аналитический метод:

Используют метод наименьших квадратов для подбора прямой $\tau = \sigma \cdot \mathrm{tg}\varphi + c$. Для этого по каждой паре (σ_3, σ_1) вычисляют:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\sin\varphi, \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\cos\varphi$$

и решают систему относительно φ и c.

4.3. Критерий Хока-Брауна для трехосных данных

Альтернативный подход – использование нелинейного критерия Хока-Брауна, который более точен для трещиноватых пород. Параметры m_i, s, a определяют регрессионным анализом. Значение GSI, входящее в эти параметры, можно оценить по результатам трехосных испытаний (обратный анализ).

4.4. Пример расчета (упрощенный)

Допустим, получены результаты:

- $\sigma_3 = 0$ МПа, $\sigma_1 = 80$ МПа;
- $\sigma_3 = 5$ МПа, $\sigma_1 = 120$ МПа;
- $\sigma_3 = 10$ МПа, $\sigma_1 = 155$ МПа.

Строим круги Мора, проводим огибающую. По графику: $\varphi \approx 35°$, $c \approx 12$ МПа.

Значение в проектировании: Паспорт прочности позволяет рассчитать несущую способность целиков, устойчивость стенок выработок и прогнозировать зоны неупругих деформаций.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. В чем разница между прочностью на одноосное сжатие и прочностью на растяжение? Почему эти характеристики отличаются в десятки раз?
2. Какие методы существуют для определения угла внутреннего трения φ и сцепления c? Опишите процедуру построения паспорта прочности по результатам трехосных испытаний.
3. Что такое масштабный эффект и как он влияет на переход от лабораторных свойств образца к свойствам горного массива? Какие классификации используются для этого перехода?
4. Объясните физический смысл модуля упругости E, коэффициента Пуассона ν и модуля деформации E_0. Как они связаны между собой и почему $E_0 < E$?
5. В чем заключается анизотропия горных пород? Как ее учитывают при проведении лабораторных испытаний и в численных моделях (например, RS2)?

Рекомендуемая литература:

1. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Метод определения предела прочности при одноосном сжатии.
2. ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring (2007–2014).
3. Hoek E., Brown E.T. Underground Excavations in Rock. – London: IMM, 1980.
4. Brady B.H.G., Brown E.T. Rock Mechanics for Underground Mining. – Springer, 2004.
5. Зубков В.В., Зубков А.В. Геомеханика. – М.: Издательство МГГУ, 2008.