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

Лекция 3. Трещиноватость и структурное ослабление массива. Рейтинговые классификации (RMR, Q, GSI)

Цель лекции: Сформировать у обучающихся понимание роли трещиноватости в снижении прочности массива, освоить методики количественной оценки качества горного массива с использованием рейтинговых систем RMR, Q и GSI, а также научиться применять эти классификации для выбора параметров крепи и оценки устойчивости выработок..

План лекции:

1) Параметры трещиноватости.
2) Индекс качества породы RQD (Rock Quality Designation).
3) Система RMR (Rock Mass Rating, Bieniawski).
4) Система Q (NGI, Barton et al., 1974).
5) Геологический индекс прочности GSI (Hoek, 1994; Marinos, 2000).
6) Сравнительный анализ классификаций и выбор для разных условий.

1. Прочностные характеристики горных пород и методы их лабораторного определения

Горный массив редко бывает монолитным; он рассечён трещинами различных типов (тектоническими, литогенетическими, техногенными). Трещиноватость – главный фактор, определяющий структурное ослабление и, как следствие, механические свойства массива.

Основные параметры трещиноватости:

- Густота (плотность) трещин – количество трещин на единицу длины (обычно на 1 м). Определяется по керну (RQD) или на обнажениях. Характеризует степень раздробленности массива.
- Раскрытие (апертура) – расстояние между стенками трещины. Измеряется в мм. Влияет на возможность фильтрации воды и заполнителя.
- Шероховатость – степень неровности стенок. Шероховатые трещины обеспечивают большее сцепление при сдвиге, гладкие – снижают прочность.
- Заполнитель – материал в трещине (глина, кальцит, песок, милонит и др.). Твёрдый заполнитель увеличивает прочность, мягкий (глина) – резко снижает сопротивление сдвигу.
- Ориентировка – угол падения и азимут простирания трещин относительно оси выработки. Влияет на устойчивость стенок, кровли и возможность вывалов клиньев.

Для количественной оценки перечисленных параметров разработаны рейтинговые классификации, где каждому свойству присваиваются баллы. Наибольшее распространение получили RMR, Q и GSI.

2. Индекс качества породы RQD (Rock Quality Designation)

RQD предложен Диром (Deere, 1964) как простой показатель трещиноватости по выходу керна.

При бурении скважины колонковым снарядом (диаметр ≥ NX ≈ 54 мм) измеряют суммарную длину кусков керна длиной более 100 мм (4 дюйма) в пробуренном интервале (обычно 1,5–3 м). Формула:

$$RQD = \frac{\sum \text{длина кусков керна} > 100 \text{ мм}}{\text{общая длина интервала}} \times 100\%$$

RQD, %	Качество массива	Характеристика
90–100	Отличное	Практически монолитный, редкие трещины
75–90	Хорошее	Слаботрещиноватый, блоки 0,5–1,0 м
50–75	Удовлетворительное	Среднетрещиноватый, блоки 0,2–0,5 м
25–50	Плохое	Сильнотрещиноватый, блоки 0,05–0,2 м
0–25	Очень плохое	Раздробленный, зоны дробления

RQD входит как параметр в классификации RMR и Q. Позволяет быстро оценить качество массива при геологической документации. Недостатки: не учитывает ориентировку трещин, заполнитель, гидрогеологию.

3. Система RMR (Rock Mass Rating, Bieniawski)

Разработана Бенявски (Bieniawski, 1973-1989) на основе обобщения опыта строительства тоннелей и подземных сооружений. RMR является аддитивной – суммируются баллы по шести параметрам.

Параметры и оценка баллов (по последней версии RMR89)

1. Прочность интактной породы ($\sigma_{сж}$, МПа):

$\sigma_{сж}$, МПа	> 250	100–250	50–100	25–50	5–25	1–5	< 1
Баллы	15	12	7	4	2	1	0

2. RQD (%):

RQD	90–100	75–90	50–75	25–50	< 25
Баллы	20	17	13	8	3

3. Расстояние между трещинами (м):

> 2	0,6–2	0,2–0,6	0,06–0,2	< 0,06
20	15	10	8	5

4. Состояние трещин (шероховатость, раскрытие, заполнитель, выветрелость). Максимум 30 баллов.

Признак	Очень шерох., свежие, сомкнутые	Шерох., слабовыветр., раскрытие <1 мм	Немного шерох., выветр., заполнитель <5 мм	Гладкие, милонит, глина >5 мм	Мягкая глина
Баллы	30	25	20	10	0

5. Приток воды (л/мин на 10 м тоннеля) / отношение порового давления к главному напряжению:

Приток	0 л	<10 л	10–25 л	25–125 л	>125 л
Баллы	15	10	7	4	0

6. Поправка на ориентацию трещин (от –12 до 0 баллов, зависит от падения и простирания относительно выработки). Ухудшает рейтинг при неблагоприятной ориентировке.

Базовый RMR = сумма первых 5 параметров. Окончательный RMR = базовый + поправка на ориентацию.

Классы массива и рекомендации по креплению (для тоннеля пролетом 10 м, срок службы 10 лет)

Класс	RMR	Описание	Крепь (типовые рекомендации)
I	81–100	Очень хороший	Без крепи или локальные анкеры
II	61–80	Хороший	Анкеры длиной 2–3 м через 2–2,5 м, торкрет 50 мм
III	41–60	Удовлетворительный	Анкеры 4 м шаг 1,5–2 м, торкрет 100–150 мм + сетка
IV	21–40	Плохой	Анкеры 5 м шаг 1–1,5 м, торкрет 150 мм, легкие арки
V	<20	Очень плохой	Арки тяжелые, опережающая крепь, заиливание

4. Система Q (NGI, Barton et al., 1974)

Разработана в Норвежском геотехническом институте (NGI) специально для тоннелестроения. Индекс Q рассчитывается как произведение трёх отношений:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

где: Jn – число систем трещин (1-20). Для массивных пород 0,5-1,0; для 1 системы – 2; для 2 систем – 4; для 3 систем – 9; для раздробленных – 20.

Jr – шероховатость трещин (0,5-4). Наивысшее значение – для прерывистых, волнистых, шероховатых.

Ja – степень выветрелости и заполнитель (0,75-20). Свежие сомкнутые – 0,75; глинистые прослои >5 мм – 10-20.

Jw – коэффициент водонасыщения (0,05-1,0). Сухая выработка – 1,0; большой приток – 0,5-0,33.

SRF – коэффициент напряжений (1-20). Низкие напряжения – 2,5; средние – 1,0; высокие (горные удары) – 10-20.

Значения Q изменяются в логарифмической шкале от 0,001 до 1000. Качество массива:

Q	Качество
0,001–0,01	Исключительно плохое
0,01–0,1	Крайне плохое
0,1–1	Очень плохое
1–4	Плохое
4–10	Среднее
10–40	Хорошее
40–100	Очень хорошее
100–400	Крайне хорошее
400–1000	Исключительно хорошее

Рекомендации по креплению: По Q рассчитывают эквивалентный пролет B = 2·ESR·Q^{0,4}, где ESR – коэффициент назначения выработки (от 0,8 для АЭС до 3–5 для временных). Затем по номограммам выбирают тип и параметры крепи.

Связь RMR и Q: эмпирическая формула $RMR = 9 \ln Q + 44$ (для $Q > 1$). Приблизительное соответствие: RMR 50–60 $\Leftrightarrow$ $Q \approx 2–5$.

5. Геологический индекс прочности GSI (Hoek, 1994; Marinos, 2000)

GSI создан специально для критерия Хока-Брауна. Он не требует вычислений – определяется визуально по двум характеристикам:

1. Структура массива**:**

- Ненарушенная (массивная) – крупные блоки, редкие трещины (GSI > 75)
- Блочная – 3 системы трещин, хорошо переплетённые блоки (GSI ~ 60–75)
- Очень блочная – 4 и более систем, плотные угловатые блоки (45–60)
- Раздробленная – слабо переплетённые, сильно нарушенные (30–45)
- Сланцеватая – тонкие слои, листоватые (20–30)

2. Состояние поверхностей трещин:

- Очень хорошее – свежие, шероховатые (GSI + 5–10)
- Хорошее – слабо выветрелые, слегка шероховатые
- Удовлетворительное – выветрелые, гладкие
- Плохое – глинистые налёты, милонит
- Очень плохое – мягкая глина

Применение GSI:

- Входной параметр для критерия Хока-Брауна для расчёта прочности массива.
- Не заменяет RMR и Q, а дополняет их, обеспечивая переход к численному моделированию.

Связь GSI с RMR: $GSI \approx RMR - 5$ (для условий, где RMR определён без поправки на воду и ориентацию трещин).

6. Сравнительный анализ классификаций и выбор для разных условий

Классификация	Основа	Параметры	Область применения	Преимущества	Недостатки
RMR	Сумма баллов	6 (RQD, прочность, трещины, вода, ориентация)	Тоннели, камеры, фундаменты	Простота, много практических рекомендаций	Не учитывает напряжения (SRF)
Q	Произведение отношений	6 (RQD, Jn, Jr, Ja, Jw, SRF)	Тоннели, ГЭС, ядерные объекты	Учитывает напряжения, воду, размер выработки	Более сложен, требует оценки SRF

Классификация	Основа	Параметры	Область применения	Преимущества	Недостатки
GSI	Визуальная (структура + состояние)	2 (структура, стенки трещин)	Вход в критерий Хока-Брауна	Интуитивен, быстр, связь с прочностью массива	Субъективен, не даёт прямых рекомендаций по крепи

Рекомендации по выбору:

- Для предварительной оценки устойчивости (на стадии геологоразведки) – RQD и GSI.
- Для проектирования крепи тоннелей и капитальных выработок – RMR (для обычных пород) или Q (для сложных гидрогеологических и напряжённых условий).
- Для численного моделирования – обязательно использовать GSI (через критерий Хока-Брауна).
- Лучшая практика: комбинирование – определять RMR, Q и GSI для одних и тех же участков и проверять их согласованность. Это повышает надёжность геомеханических прогнозов.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Назовите основные параметры трещиноватости и объясните, как каждый из них влияет на прочность массива.
2. Как вычисляется RQD и для каких целей он используется в классификациях RMR и Q?
3. Перечислите 6 параметров системы RMR. Какие поправки учитывают ориентацию трещин?
4. Что означают параметры Jn, Jr, Ja, Jw, SRF в классификации Q? Какой физический смысл имеет произведение трёх отношений?
5. Чем GSI отличается от RMR и Q? Почему GSI особенно важен для численного моделирования по критерию Хока-Брауна?

Рекомендуемая литература:

1. Bieniawski Z.T. Engineering Rock Mass Classifications. – New York: Wiley, 1989.
2. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support // Rock Mechanics. – 1974. – Vol. 6, № 4. – P. 189–236.
3. Hoek E., Brown E.T. Underground Excavations in Rock. – London: IMM, 1980.

4. Hoek E., Marinos P. A brief history of the development of the Geological Strength Index (GSI) // ISRM News Journal. – 2007.
5. Зубков В.В., Зубков А.В. Геомеханика. – М.: Изд-во МГГУ, 2008.