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

Лекция 6. Практическое применение численного моделирования в геомеханике

Цель лекции: Сформировать у обучающихся практические навыки по выбору программных комплексов для геомеханического моделирования, построению моделей, заданию граничных условий и свойств пород, интерпретации результатов численных расчётов (поля напряжений, смещений, зон неупругих деформаций). Овладеть методологией поэтапного моделирования последовательности горных работ на примере одиночных и систем выработок.

План лекции:

1) Обзор программных комплексов: RS2/RS3 (Rocscience), FLAC2D/3D, PLAXIS, Phase2, UDEC/3DEC.

2) Принципы построения геомеханических моделей: выбор типа модели (упругая, упругопластическая, критерий Кулона-Мора, Хока-Брауна), задание свойств, граничных условий.

3) Поэтапное нагружение и моделирование последовательности горных работ.

4) Интерпретация результатов: поля напряжений, смещений, зон SF (Strength Factor), пластических деформаций.

1. Обзор программных комплексов

Современное численное моделирование в геомеханике базируется на нескольких основных методах: метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР), метод граничных элементов (МГЭ) и метод дискретных элементов (МДЭ). Выбор программного комплекса зависит от решаемой задачи, требуемой точности и сложности геометрии.

1.1. RS2 / RS3 (Rocscience)

RS2 (ранее Phase2) – двухмерный конечно-элементный пакет для расчёта напряжений и деформаций в подземных выработках и на откосах. Позволяет моделировать:

- Поэтапную выемку породы и установку крепи (анкеры, торкрет, арки);
- Любые формы сечений выработок;
- Упругопластическое поведение с критериями Кулона-Мора, Хока-Брауна (включая обобщённый), и другие модели;
- Проектирование анкерной крепи: расчёт длины, шага, несущей способности;
- Анализ устойчивости откосов с поиском поверхности скольжения.

RS3 – трёхмерная версия, позволяющая учитывать сложную пространственную геометрию.

1.2. FLAC2D / FLAC3D (Itasca)

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) – метод конечных разностей в лагранжевой постановке. Отличается:

- Прямым решением уравнений движения (даже для статических задач), что обеспечивает устойчивость при больших пластических деформациях;
- Наличием моделей для грунтов (Cam-Clay) и пород (Hoek-Brown);
- Возможностью моделирования гидравлического разрыва, термомеханических процессов.

FLAC3D – трёхмерный вариант, широко используется для крупных карьеров и глубоких шахт.

1.3. PLAXIS (Bentley)

PLAXIS – специализированный пакет для геотехники (фундаменты, насыпи, котлованы, слабые грунты). Хорош для расчётов осадок и неупругого поведения мягких пород. Имеет удобный интерфейс и библиотеку моделей грунтов.

1.4. UDEC / 3DEC (Itasca)

UDEC (Universal Distinct Element Code) и 3DEC – метод дискретных элементов (МДЭ) для моделирования трещиноватых и блочных массивов. Отличаются:

- Массив рассматривается как совокупность блоков, разделённых трещинами;
- Возможен учёт раскрытия, сдвига и отслоения блоков;
- Применяются для оценки устойчивости скальных склонов и выработок в сильнотрещиноватых породах.

1.5. Phase2 (Rocscience)

Phase2 – более ранняя версия RS2; до сих пор используется многими проектировщиками. Отличается интуитивным интерфейсом и быстрым расчётом. В настоящее время основные разработки перешли в RS2, но Phase2 остаётся работоспособным.

Таблица 1 – Сравнение методов и ПО

Метод	ПО	Преимущества	Основное применение
МКЭ	RS2/RS3, PLAXIS, Phase2	Сложная геометрия, слоистость, анизотропия	Подземные выработки, откосы, фундаменты
МКР	FLAC2D/3D	Большие пластические деформации, устойчивость, гидромеханика	Глубокие шахты, карьеры, гидроразрыв

Метод	ПО	Преимущества	Основное применение
МДЭ	UDEC/3DEC	Трещиноватые, блочные массивы, отслоение блоков	Скальные склоны, выработки в трещиноватых породах

2. Принципы построения геомеханических моделей

2.1. Выбор типа модели

- Упругая модель (линейная упругость) – быстрая, для оценки начальных напряжений или для пород, работающих в докритической области. Не учитывает остаточных деформаций.

- Упругопластическая модель – наиболее распространена. Сочетает упругое поведение до предела текучести и пластическое течение после. Применяются критерии:

  - Кулона-Мора: простой, требует параметры c (сцепление) и ϕ (угол трения). Хорош для осадочных пород и грунтов.
  - Hoek-Brown: нелинейный, лучше описывает поведение трещиноватых скальных массивов; требует GSI (Geological Strength Index) и прочности образца σ_{ci}.

- Модель ползучести (Кельвина-Фойгта, Максвелла, Бюргерса) – для пород-солей, глин и других пластичных сред, где существенна зависимость деформаций от времени (эффект релаксации и ползучести).

2.2. Задание свойств пород

Входные параметры получают из лабораторных испытаний (одноосное сжатие, трёхосное сжатие, сдвиг) и рейтинговых классификаций (RMR, GSI). Для массивов, нарушенных взрывными работами, вводят параметр D (disturbance factor). Типичный набор:

- Плотность (ρ);
- Модуль упругости (E);
- Коэффициент Пуассона (ν);
- Сцепление (c) и угол трения (ϕ) – для модели Кулона-Мора;
- Параметры Хока-Брауна (m_i, GSI, σ_{ci}, D) – для нелинейного критерия.

2.3. Граничные условия

- Начальные напряжения: задаются по глубине: вертикальное $\sigma_v = \gamma H$, горизонтальное $\sigma_h = \lambda \sigma_v$ (λ – коэффициент бокового давления). Для сложных тектонических полей используют тензор напряжений.

- Фиксация перемещений: нижняя граница модели обычно закреплена по вертикали; боковые границы – закреплены по горизонтали или задаются упругими опорами.

- Свободная поверхность: верхняя граница – без напряжений (top free, stress-free).

- Моделирование выемки: удаление элементов (или снижение их свойств) в соответствующей области.

3. Поэтапное нагружение и моделирование последовательности горных работ

Поэтапное моделирование (stage construction/sequential excavation) – ключевая особенность геомеханических пакетов.

Процедура:

1. Stage 0 – исходное состояние: создаётся модель с естественными напряжениями, без выработок (initial stress state). Фиксируются начальные смещения.
2. Stage 1 – проходка первой выработки: удаляются элементы, соответствующие сечению выработки; прикладывается реакция крепи (если есть). Вычисляются дополнительные смещения и напряжения.
3. Stage 2 – проходка второй выработки или установка крепи: активируются элементы крепи (анкеры, торкрет) или удаляются новые элементы.
4. Stage 3, 4, … – последующие этапы: отработка камер, подработка, установка постоянной крепи и т.п.

В RS2/FLAC это реализуется через stage manager (менеджер стадий), где пользователь задаёт последовательность активации/деактивации материалов и крепёжных элементов.

4. Интерпретация результатов

После расчёта программа генерирует поля, которые визуализируются в виде изолиний, цветовой шкалы и векторов.

4.1. Поля напряжений

- Максимальные главные напряжения (σ_1) – показывают области сжатия, опасные для целиков.
- Минимальные главные напряжения (σ_3) – области с низкими сжимающими или растягивающими напряжениями, где возможны отслоения.
- Коэффициент концентрации напряжений $K = \sigma_{\text{контура}}/\sigma_0$ – позволяет быстро выявить перегруженные зоны.

4.2. Поля смещений (деформаций)

Векторы смещений – наглядно показывают направление и величину перемещений пород (сходимость кровли, выпучивание почвы).

- Изолинии вертикальных смещений – удобны для оценки просадок поверхности над очистными выработками.

4.3. Зоны Strength Factor (SF)

Strength Factor – отношение прочности породы (по критерию) к действующим напряжениям. Интерпретация:

- SF ≥ 1,5 – устойчиво (можно не крепить);
- 1,0 < SF < 1,5 – ограниченно устойчиво, требуется крепь;
- SF < 1,0 – разрушение, зона неупругих деформаций.

В RS2 SF вычисляется по каждому элементу; цветовая шкала (красный – SF<1, зелёный – SF>1) используется для выделения пластических зон.

4.4. Пластические деформации

Показатель Plastic Strain (интенсивность пластических деформаций) – помогает отличить упругую область от области остаточных деформаций.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Какие основные метода численного моделирования используются в геомеханике (МКЭ, МКР, МДЭ)? Для решения каких задач каждый из них предпочтителен?
2. В чём различие между упругой, упругопластической и реологической моделями поведения пород? Какие критерии прочности применяются в упругопластических моделях (Кулона-Мора, Хока-Брауна)?
3. Как задаются граничные условия при моделировании подземной выработки (глубина, коэффициент бокового давления, фиксация смещений)?
4. Что такое Strength Factor (SF)? Как интерпретируются значения SF < 1, 1–1,5 и >1,5? Как SF связан с зонами неупругих деформаций (ЗНД)?
5. Опишите алгоритм поэтапного моделирования последовательности горных работ (от исходного состояния до установки крепи) на примере пакета RS2.

Рекомендуемая литература:

1. RS2 / Phase2 User’s Guide (Rocscience) – 2023.
2. Itasca Consulting Group. FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua, Theory and Background.
3. Jing L., Hudson J.A. Numerical methods in rock mechanics // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – Vol. 39. – P. 409–427.
4. Hoek E., Brown E.T. Underground Excavations in Rock. – IMM, 1980.
5. Potts D.M., Zdravkovic L. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering. – Thomas Telford, 1999.