

ГЕОМЕХАНИКА ГЛУБОКИХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

На сегодняшний день информационные технологии и вычислительные средства достигли уровня развития, который позволяет решать сложнейшие задачи с учётом максимального количества факторов, процессов и явлений, влияющих на рассматриваемые системы. Данное обстоятельство позволяет не только расширить границы классов задач, поддающихся решению, но и значительно увеличить достоверность получаемых результатов. Развитие технологий численного моделирования позволяет, в числе прочего, значительно продвинуть понимание процессов, происходящих в породных массивах при горной добыче. Особенно актуальной представляется проблема численного моделирования геомеханических процессов, поскольку в геомеханике каждая задача является по сути уникальной, вследствие специфических исходных данных (горно-геологические и горнотехнические условия).

В докладе рассматриваются примеры решения некоторых уникальных задач геомеханики подземных сооружений на базе использования современных численных методов. В частности, затронуты следующие проблемы:

- выбор/построение критериев предельного состояния подрабатываемых массивов горных пород;
- построение реологических моделей для исследования долговременного геомеханического состояния геотехнических подземных сооружений;
- особенности моделирования геомеханических процессов, протекающих в окрестности подземных сооружений на умеренных и больших глубинах.

Проблема выбора критериев предельного состояния подрабатываемых массивов горных пород изучается исследователями уже не один десяток лет [1], однако выработать универсальный критерий, который бы позволял оценивать прочность породных массивов для широкого диапазона задач подземной геомеханики не удастся. Сегодня существует множество критериев предельного состояния, каждый из которых позволяет оценить прочность массива при тех или иных условиях [2]. Некоторые критерии теоретически позволяют оценивать прочность горных пород с высокой степенью достоверности, однако такие критерии

зачастую включают в себя большое количество экспериментальных параметров, что делает их практическое применение затруднительным. Это связано с тем, что на практике не всегда есть возможность провести уникальные экспериментальные исследования с большим количеством образцов горных пород. Другим существенным недостатком существующих критериев предельного состояния является тот факт, что все они выведены на основании лабораторных испытаний, проводимых на небольших образцах. Таким образом, упомянутые критерии игнорируют масштабный фактор и могут давать некорректные оценки прочности породных массивов при решении реальных задач в реальных условиях.

В докладе предлагается универсальный алгоритм оценки прочности массивов горных пород. Основная идея данного алгоритма заключается в том, что до выполнения оценки состояния массивов горных пород, следует оценить тип напряженно-деформированного состояния, в котором находятся те или иные участки рассматриваемой области массива. Сделать это можно, например, построив распределение коэффициента Надаи-Лоде [3]:

$$\mu = \frac{2(\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 \quad (1)$$

После этого для оценки прочности рассматриваемого массива горных пород в различных областях следует применять те критерии предельного состояния, для которых базовыми являются те же физические процессы и явления, которые имеют место в данном участке породного массива. Так, в областях обобщённого сжатия следует применять, например, критерии максимальных сжимающих напряжений и деформаций, в областях обобщённого растяжения – критерии максимальных растягивающих напряжений и деформаций, а в областях обобщённого сдвига – критерий Кулона-Мора, Друкера-Прагера или Хука-Брауна. При наличии достаточного количества экспериментальных данных можно дополнительно использовать эмпирические критерии.

Далее, на основании полученных оценок, следует выделить области вероятного предельного состояния (нарушения сплошности/разрушения) породной толщи. Если в какой-либо области предельное состояние массива прогнозируется как возможное по нескольким критериям, то вероятность разрушения пород в такой области выше. После выделения в массиве зон вероятного предельного состояния следует уточнить данные области при помощи критериев запредельного деформирования. В качестве такого критерия предлагается использовать модифицированный критерий Кулона-Мора [3]:

$$|\sigma_1 - (2\lambda + 1)\sigma_3 + E^* \varepsilon^*| \leq \sigma_c \quad (2)$$

где ε^* – деформация разрушения, E^* – модуль Юнга на ниспадающей ветви диаграммы деформирования.

Таким образом, описанный алгоритм позволяет получить вероятностные оценки прочности подрабатываемых породных массивов на основании системы критериев предельного состояния с учётом физических особенностей каждой конкретной задачи. Реализация данного алгоритма при помощи аналитических методов весьма трудозатратна и не всегда даже возможна, поэтому его исполнение предлагается выполнять путем проведения серии численных экспериментов.

Говоря об оценке прочности подрабатываемых породных массивов нельзя не отметить, что основной интерес представляет оценка длительной прочности и долговечности подземных сооружений. В отличие от случая расчета мгновенной прочности для изучения поведения породных массивов в течение продолжительного временного интервала нельзя ограничиваться «простейшими» математическими моделями поведения горных пород, такими как закон упругости Гука и модель Кулона-Мора. При рассмотрении длительных промежутков времени значительное влияние на поведение породных масс оказывают реологические эффекты, что обуславливает необходимость корректного выбора реологических моделей поведения подрабатываемых массивов горных пород.

В докладе рассматривается ряд реологических моделей, основанных на наследственной теории ползучести и обсуждаются алгоритмы и особенности их численной реализации. Сравнительный анализ некоторых моделей представлен, например, в нашей работе [4]. Показано, что для практического использования наиболее целесообразно применение модели, учитывающей, как неустановившуюся, так и установившуюся стадии ползучести породного массива [4]:

$$\varepsilon(t) = C_1 \sigma_{eqv}^{c_2} t^{c_3} + C_4 \sigma_{eqv}^{c_5} t \quad (3)$$

где $\varepsilon(t)$ – деформация в момент времени t , $C_1 - C_5$ реологические константы пород, σ_{eqv} – эквивалентные напряжения по Мизесу.

Приводятся примеры применения предложенного алгоритма оценки прочности и долговечности породных массивов к решению сложных прикладных задач. В частности, рассматриваются задачи о прочности и долговечности породного массива в окрестности подземных сооружений на большой и умеренной глубинах.

Замечание. Большой считаем глубину, на которой собственный вес пород превышает их предел прочности. В противном случае глубина считается умеренной.

Классификация глубин является ключевым фактором при решении данной задачи, поскольку «механика» процессов, происходящих на больших и умеренных глубинах, значительно отличается. Данное различие моделируется при помощи различных схем учёта бокового горного давления. Боковое давление на умеренных глубинах рассчитывается по известной формуле Динника, а на больших глубинах принимается равным литостатическому.

В результате модельных исследований показано различие в геомеханическом поведении породного массива в окрестности выработок, расположенных на умеренных и больших глубинах. Данный факт является важным и обуславливает, например, разные подходы к использованию мер охраны и крепления выработок.

Литература

1. Фисенко Г. Л. Предельное состояние горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.
2. Васильев Л. М., Васильев Д. Л., Малич Н. Г., Ангеловский А. А. Механика образования форм разрушения образцов горных пород при их сжатии: Монография. – Днепро, ИМА-пресс. – 2018. – 176 с.
3. Журавков, М.А. Математическое моделирование деформационных процессов в твердых деформируемых средах (на примере задач механики горных пород и массивов) / М.А.Журавков. – Мн., БГУ, 2002. – 456 с.
4. Zhuravkov M.A., Hvesenya S.S., Lapatsin S.N., 2020 Durability analysis of underground structures based on various creep models of the enclosing salt rock massif. E3S Web of Conferences. Vol. 201, 03007.