

Назимко В.В., д-р техн. наук, професор
(ІФГП НАН України)

ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ПАКЕТУ FLAC3D ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ПІДГОТОВЧОЇ ВИРОБКИ

Назимко В.В., д-р техн. наук, професор
(ІФГП НАН України)

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАКЕТА FLAC3D ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ

Nazimko V.V., D.Sc.(Tech.), Professor
(IPRM NAS of Ukraine)

AN EXPERIENCE OF FLAC3D USE DURING ENTRY STABILITY INVESTIGATION

Анотація. Описано досвід використання пакету FLAC3D для геомеханічного моделювання зрушень масиву навколо підготовчої виробки в складних гірничо-геологічних та гірничотехнічних умовах. Пакет враховує початковий стан системи, має великий набір моделей міцності, які можуть застосовуватись для моделювання незворотних зрушень масиву гірських порід навколо підготовчої виробки. Найбільш підходящими є наступні моделі: модель Кулона-Мора, яка репрезентує механізм руйнування гірських порід у вигляді зрізу; модифікована модель Кулона-Мора, яка враховує анізотропну пластичність, обумовлену наявністю площин ослаблення масиву з певною орієнтацією у просторі; модель твердіючих/розміцнюючих порід, яка враховує нелінійне розміцнення порід на основі варіації параметрів моделі Кулона-Мора (зчеплення, кута внутрішнього тертя, кута розпушення та межі міцності на розтягування) як функції девіаторних пластичних деформацій; а також модель Хоека-Брауна, що інкорпорує правило пластичності, яке варіює в залежності від рівня всебічного стиснення. FLAC3D має вбудовану програмну мову FISH, яка дозволяє користувачам розширювати можливості пакету, створювати власні змінні та нові функції, та практично необмежено добавляти свої вдосконалення.

Ключові слова: підготовча виробка, гірський тиск, незворотні зрушення масиву, комп'ютерне моделювання.

ВСТУП

Проблема негативного прояву гірського тиску на стійкості підготовчих виробок є важливою, а її актуальність невпинно зростає з підвищенням інтенсивності гірничих робіт та глибини залягання родовищ, що відпрацьовуються. Шахтні інструментальні спостереження дозволяють отримати найбільш достовірні параметри проявів гірського тиску, проте їх можливості суттєво обмежені складністю підземних експериментів та недоступністю оточуючих виробки порід. Саме тому комп'ютерні моделі розглядаються як ефективне доповнення методології геомеханічних досліджень. Моделювання проявів гірського тиску на сучасних комп'ютерних моделях дає змогу отримати у динаміці всі компоненти напружень і деформацій, та визначи-

ти стан масиву навколо виробки й причини його руйнування. Існує ряд методів дослідження пружно-деформованого стану масиву навколо підготовчих виробок, які мають свої переваги й недоліки, а також області раціонального застосування. У даній статті вивчається досвід моделювання на пакеті FLAC3D і обґрунтовується його перевага перед традиційними методами.

Історично найбільшу популярність серед чисельних методів дослідження пружно-деформованого стану масиву гірських порід займає метод скінчених елементів (МКЕ) [1-3]. Обмежене використання для моделювання напружень і деформацій товщі гірських порід отримав метод граничних елементів [4]. Проте вказаний метод не отримав широкого застосування у зв'язку з проблемами, що пов'язані з врахуванням моделей, які складаються з областей, які мають різні фізико-механічні властивості.

Останнім часом зростає популярність методів скінчених різниць (МКР) [5,6] для рішення складних геомеханічних задач. Конкуренція методів скінчених елементів і скінчених різниць призвела до того, що обидва методи є практично рівноцінними з точки зору теоретичних можливостей. Вказані методи дають можливість моделювати пружно-деформований стан областей складної форми, які складаються з зон, що мають різні деформаційні, фільтраційні, термодинамічні параметри та показники міцності. Внаслідок вдосконалення обидва методи дозволяють моделювати динамічні процеси, що важливо для задач, пов'язаних з дослідженням сейсмічних явищ.

Досить часто програмні пакети застосовують обидва методи. Наприклад пружно-деформований стан континуальних (об'ємних) ділянок масиву гірських порід моделюється методом скінчених різниць, а витягнутих, наприклад анкерів – методом скінчених елементів. Саме тому конкуренція між методами зміщується з області теоретичних вдосконалень у практичну площину, пов'язану з процесом обчислювання. Так сучасні реалізації методів МКЕ і МКР базуються на застосуванні команд, різноманітність яких з урахуванням параметрів самих команд стала надто високою. За таких умов з одного боку на освоєння конкретних програмних пакетів необхідно витратити значний час, а з другого програмування прикладних задач за допомогою командних строк суттєво обмежує можливості. Введення примітивних засобів типа циклів не вирішує вказану проблему радикально.

Цей недолік був вперше вирішений фірмою Itasca, яка розробила ряд алгоритмів і зокрема FLAC3D [7-9], в яких використовується вбудований паскалеподібний код FISH. Цей код дає можливість користувачу пакету створювати нові змінні та функції. Фактично код дозволяє занурюватись у основну платформу FLAC3D, яка написана на C++ і управляти її роботою за допомогою популярних операторів. Саме цей підхід підвищує потужність пакету на порядок і робить його привабливим з практичної точки зору.

МЕТОДОЛОГІЯ ПРОГРАМНОГО ПАКЕТУ

FLAC3D побудований на комбінації методу скінчених різниць й елементів і створює необмежені можливості для підготовки розрахункової схеми, контро-

лю процесу моделювання, виведення даних, їх обробки та аналізу. Зазвичай програма для вирішення конкретної задачі є сумішшю командних строк й операторів FLAC3D. Тепер можливості користувача не обмежені жорсткою формою команд, а кожна програма моделювання може бути унікальною з врахуванням можливостей користувача, його досвіду і кваліфікації.

Постановка задачі у FLAC3D реалізована у динамічній формі. Диференційне рівняння руху масиву гірських порід записується у вигляді другого закону Ньютона:

$$\frac{\partial \sigma_{i,j}}{\partial x_i} + \rho b_i = \rho \frac{dv_i}{dt} \quad (1)$$

де $\sigma_{i,j}$ – нормальні та дотичні напруження, що діють у масиві гірських порід, Па; x_i – координати декартової системи, м; ρ – щільність гірських порід, кг/м³; b_i – питомі сили, що виникають у масиві гірських порід Н/кг; v_i – швидкість руху елементарних об'ємів масиву, м/сек; t – час, сек.

Таким чином задача вирішується у динамічній постановці з явним урахуванням часу протікання процесів перерозподілу механічних напружень, переносу тепла, або рідини. Це означає, що для отримання стаціонарного рішення або досягнення статичної рівноваги необхідно виконувати спеціальні умови. Розрахункова схема будується з октаедричних блоків, які розбиті на тетраедри. Пакет містить ряд примітивів, за допомогою яких можна створювати розрахункові схеми підземних виробок, тунелів, та моделювати інші пустоти. Можна також використовувати розрахункові схеми, що створені іншими засобами об'ємного проектування.

Пакет FLAC3D побудований так, що у будь-який момент можна зберегти результати розрахунку з усіма змінними і станом моделі, після чого продовжити процес моделювання, обнуливши деякі змінні. Ця властивість є зручною для врахування початкового стану системи. Так наприклад дослідження поведінки будь-якої підземної підготовчої виробки необхідно почати з встановлення геостатичного стану гірського масиву, в якому потім створити порожнину виробки й установити кріплення. Якщо виробка потім попадає у зону впливу очисного вибою, моделюється наступний етап її експлуатації. Усі вказані етапи моделюються по черзі один за одним у послідовності, яка відбувається у реальному гірському масиві.

Суттєвою перевагою FLAC3D є наявність тринадцяти моделей міцності масиву гірських порід. Одна модель є нульовою і призначена для відтворення порожнин. Решта 12 моделей створені для імітації поведінки пружних та пластичних континуумів. Перші три моделі відповідають пружній ізотропній, пружній ортотропній та пружній трансверсально ізотропній моделі масиву. Наступні моделі призначені для імітації поведінки пластичності Дракера-Прагера (наприклад для пластичних деформацій сталюого кріплення), Кулона-Мора і анізотропної пластичності. Остання модель корисна у випадках, коли поведінка масиву, яка описується теорією Кулона–Мора ускладнюється наявністю переважної системи тріщин певної орієнтації, що типово для реальних гірських ма-

сивів. Розроблені також моделі нелінійного розміцнення/зміцнення (strain-hardening/softening) у комбінації з моделлю Кулона-Мора. Важливо, що у даному випадку враховуються такі параметри міцності, як зчіплення, кут внутрішнього тертя, кут розпушення та межа міцності на розтягування. Ці параметри вичерпно відображають нелінійну поведінку переважної більшості порід в умовах об'ємного стиску.

Представлена також модель білінійного розміцнення/зміцнення у комбінації з анізотропною пластичністю. Варто окремо відмітити модель подвійної піддатливості (double-yield model), яка адекватно відображає поведінку закладного матеріалу чи піску в умовах тривимірного пружного стану та зрізу, коли виникає розпушення (наприклад у піску). Є також спеціальна модель для відображення складної поведінки ґрунтів, а також модель Хюєка-Брауна. Варто зауважити, що зміна моделі суттєво змінює характер і величину деформацій підготовчої виробки. Це свідчить про важливість підбору релевантної геомеханічної моделі, та необхідність процесу калібровки (валідації) моделі. Найбільш надійна валідація або перевірка моделі здійснюється на основі співставлення результатів моделювання з даними шахтних інструментальних спостережень.

Можна сказати, що вказані моделі вичерпують поведінку практично усіх можливих масивів гірських порід, наносів та ґрунтів, які оточують підземні виробки або основу паль, фундаментів, гребель та інших наземних споруд. В додаток є можливість будувати свою власну модель та інкорпорувати її у алгоритм FLAC3D. Саме це зумовило переваги й популярність пакету у геомеханічній практиці.

Конкурентоспроможність пакету обумовлена також наявністю блоку, який дозволяє аналізувати складні процеси сейсмічних коливань земної кори й споруд.

ПРИКЛАД МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ПІДГОТОВЧОЇ ВИРОБКИ

На рис. 1 показана тривимірна розрахункова схема для аналізу пружно деформованого стану породи навколо підготовчої виробки. Варто зауважити, що алгоритм FLAC3D дозволяє розбивати розрахункову схему на зони чисельного диференціювання таким чином, що вершини октаєдрів не обов'язково повинні співпадати, як наочно показано на рис. 1. Це сприяє зручності підготовки розрахункової схеми і дає можливість згущувати схему чисельного диференціювання рівняння (1) у тих місцях, де градієнт напружень й деформацій вище. Розбивка розрахункової схеми здійснюється з урахуванням наступних дій, що плануються для виконання. Так, наприклад, якщо планується виїмка підготовчої виробки, необхідно закласти таку форму масиву у зоні розташування порожнини виробки, щоб ця форма відповідала формі виробки як показано на рис. 1. Виїмка виробки здійснюється командою, яка змінює модель масиву на модель порожнини.

7

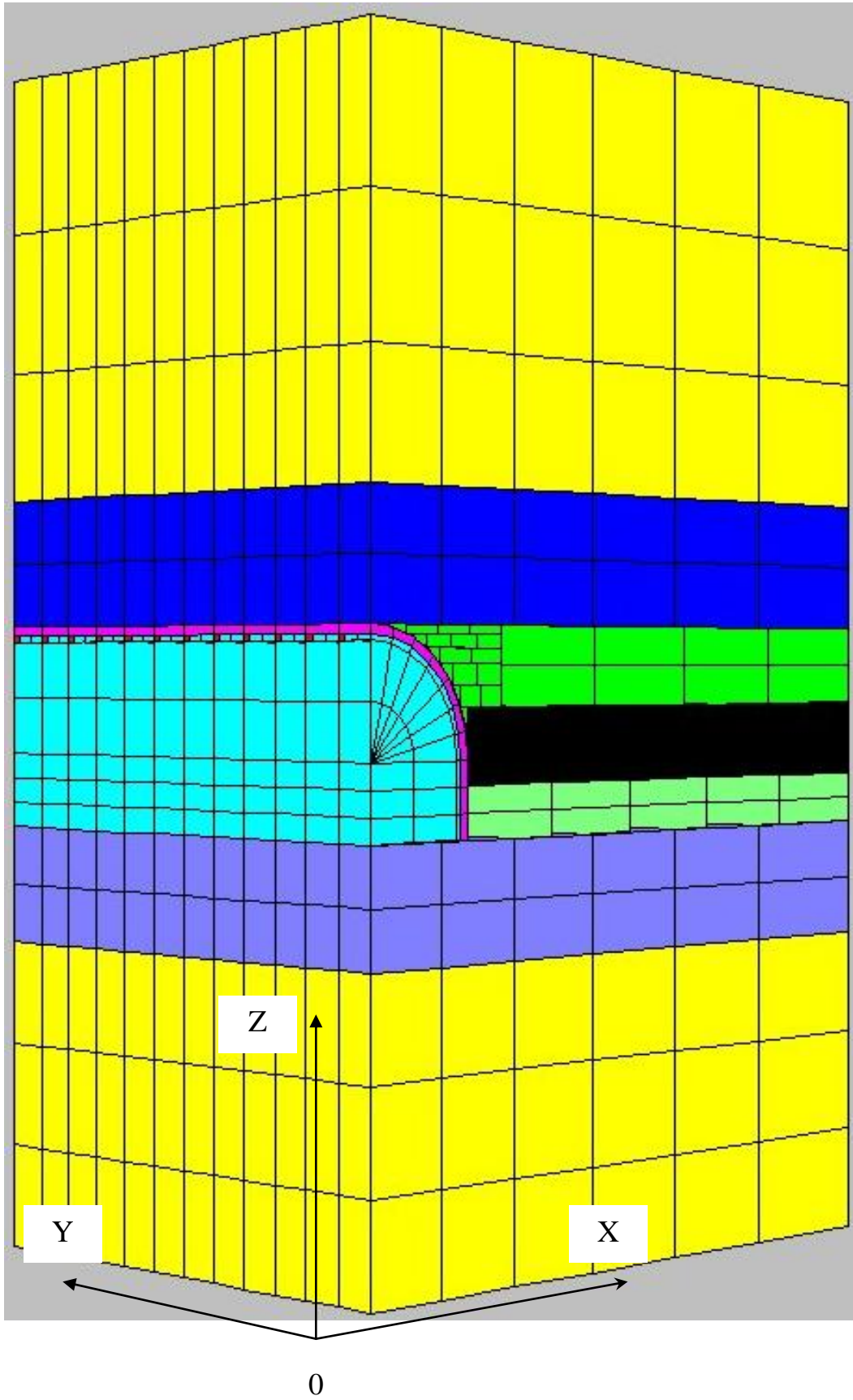


Рисунок 1 - Розрахункова схема тривимірного фрагменту масиву гірських порід навколо підготовчої виробки

Для досягнення геостатичної рівноваги у масиві гірських порід введені спеціальні засоби. Наприклад є можливість ввести розподіл окремих компонент напружень, який завчасно відповідає геостатичній рівновазі. Такий прийом прискорює досягнення рівноваги, що скорочує час моделювання. Створення порожнини підземної виробки також вимагає спеціальних прийомів. Оскільки FLAC3D вирішує задачу про розподіл напружень на основі другого закону Ньютона, усі дії (створення порожнини виробки, встановлення кріплення, відпрацювання очисного вибою) відбуваються у часі і породжують динамічні явища. Таким чином миттєве створення порожнини генерує сейсмічні хвилі, на затухання яких необхідний час.

Для погашення таких динамічних коливань застосовуються спеціальні методи, наприклад метод поступового розм'якшення порід у порожнині виробки. Якщо моделюється комбайнова проходка виробки, можна виймати породу малими порціями так, як це відбувається у реальному підготовчому вибої. Кріплення встановлюється з малим часовим лагом після проходки, що відповідає реальним умовам, коли кріплення виробки здійснюється якомога ближче до прохідницького вибою, а оточуючі породи ще не прийшли в рівновагу.

Таким чином динамічна постановка задачі FLAC3D вимагає від користувачів дотримуватись так званого початкового стану системи, або іншими словами порядок операцій, що моделюються повинен бути таким, яким він є у реальності. Якщо моделюється масив з кінечною міцністю це має велике значення з точки зору достовірності результатів моделювання, оскільки автоматично враховується шлях навантаження системи.

На рис. 2 наведена картина деформацій масиву навколо одинокої підготовчої виробки під час її проходки. Найбільш інтенсивні деформації спостерігаються в площині підготовчого вибою, де відбувається віджимання порід 1 і руйнування масиву попереду вибою на відстані 0,5-1,0 м. У покрівлі виробки реєструється інтенсивне осідання порід 2, що призводить до збільшення вертикального навантаження на рамне кріплення і анкери, встановлені вертикально. Бічні стінки виробки відчувають віджим 3 і зміщуються в її порожнину. Спостерігається також здимання ґрунту 4 і підняття його у вигляді зворотного склепіння. Рішення досягнуто за умов розбивки розрахункової схеми на 9000 зон і 11 тисяч вузлів протягом 16 тисяч циклів (приблизно 5 діб у натурних умовах).

Швидкості вертикальної конвергенції на контурі виробки максимальні безпосередньо позаду підготовчого вибою і знаходяться в межах 10-20мм/добу. Швидкість зближення бокових стінок виробки становить 6-12мм/добу. Спостерігається тенденція зменшення швидкостей конвергенції покрівлі і ґрунту, а також зближення бічних стінок з віддаленням підготовчого вибою, хоча в самому вибої виражений тривимірний характер зрушень. Отримані на моделі кількісні і якісні показники незворотних деформацій масиву задовільно співпадають з показниками, що накопичені за допомогою шахтних інструментальних спостережень в умовах блоку 10 пласта d₄ ш/у Покровське.

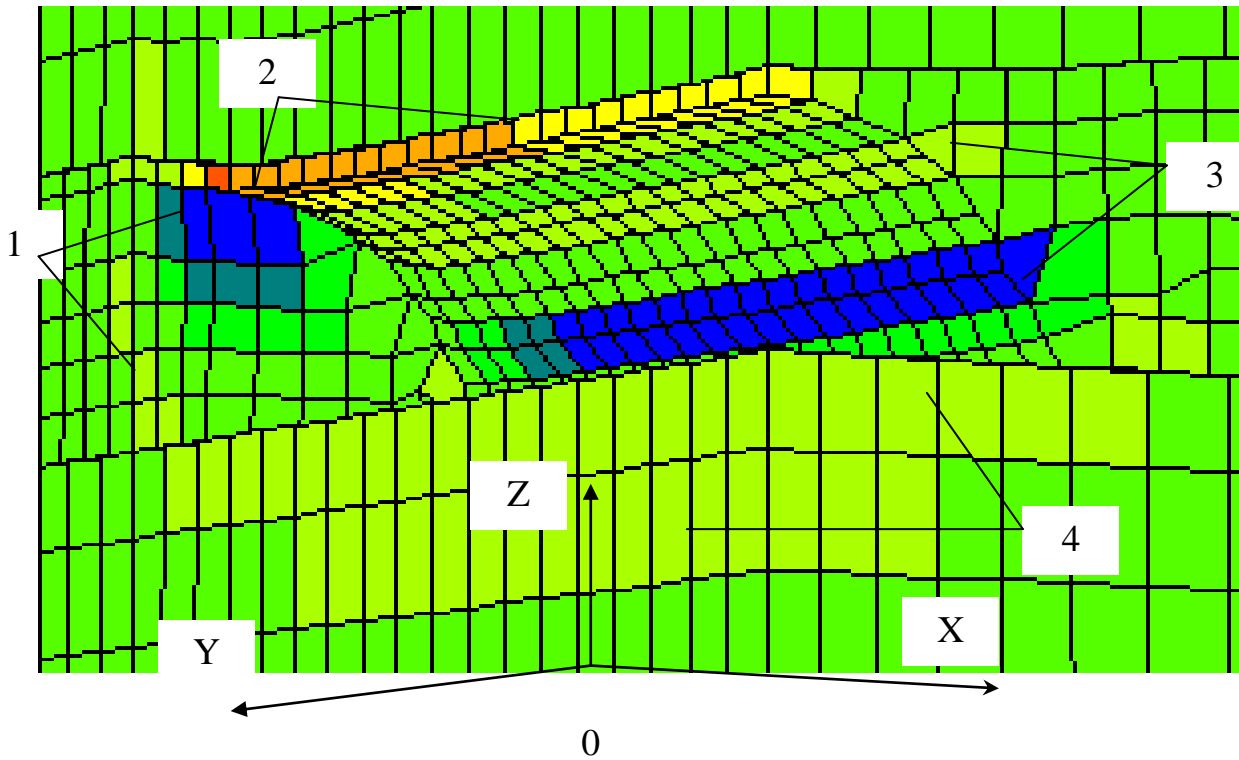


Рисунок 2 - Характер інтенсивного деформування порід навколо виробки з відходом підготовчого вибою

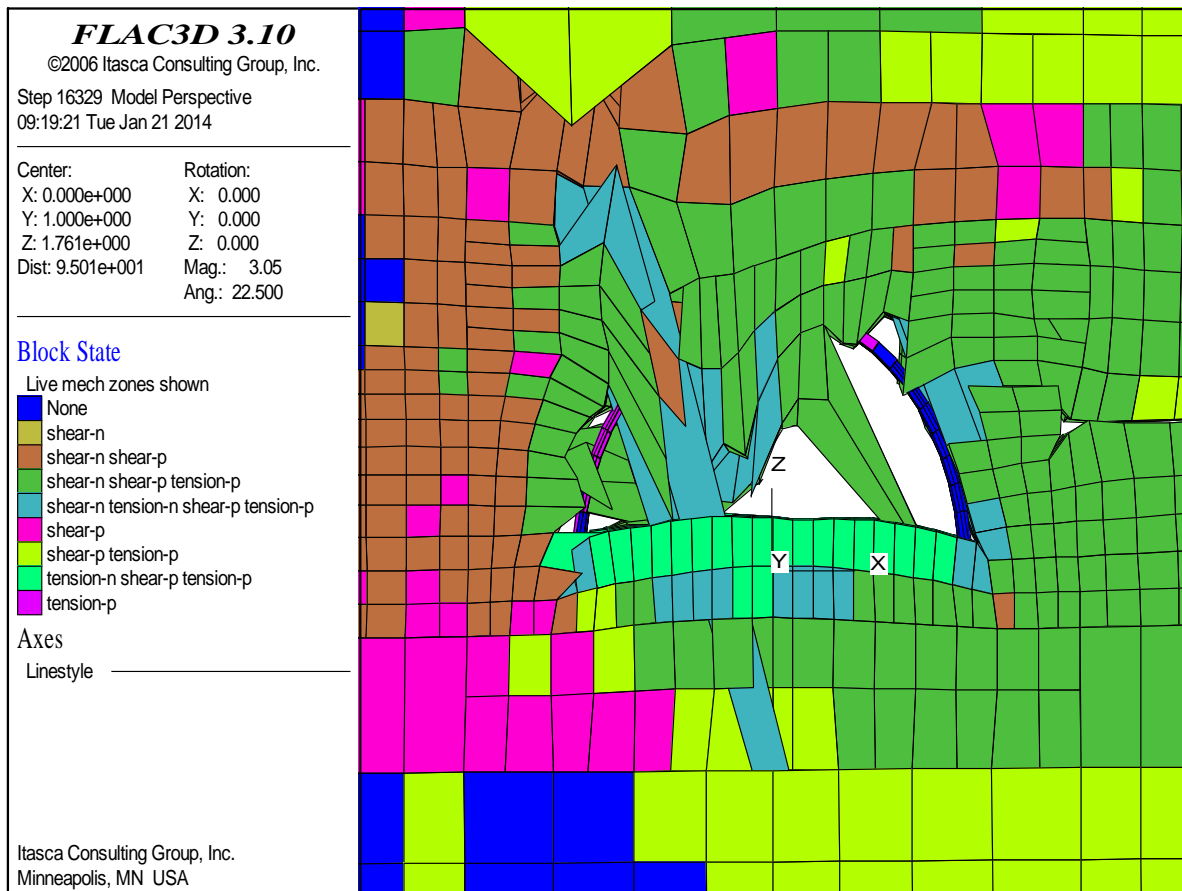


Рисунок 3 - Обвалення слабкої покрівлі у порожнину підготовчої виробки

На рисунках 3-5 показано вплив міцності порід покрівлі й підшви підготовчої виробки на характер деформування її перерізу.

У результаті входу виробки у зоні малоамплітудного геологічного порушення покрівля виробки втратила стійкість. Інтенсивна тріщинуватість покрівлі й фільтрація води з водоносного пісковика, що був розташований над виробкою знизилася зчеплення до 0,02МПа, межу міцності на розтягування до нуля, а кут внутрішнього тертя до 15 градусів. Внаслідок цього покрівля обвалилася у порожнину підготовчої виробки, що відображено на рис. 3. Такі небезпечні явища були зареєстровані в реальних шахтних умовах.

На рис. 4 показано ефект розмокання слабкої підшви підготовчої виробки у результаті її обводнення. Видно, що здимання підшви перевищило 2м. Такий ефект виникає позаду очисного вибою, коли профіль виробки змінюється і руйнується природний відтік шахтних вод. Справа від перерізу підготовчої виробки показаний вироблений простір очисного вибою й літа смуга, яка охороняє виробку позаду лави для забезпечення прямого провітрювання очисного вибою.

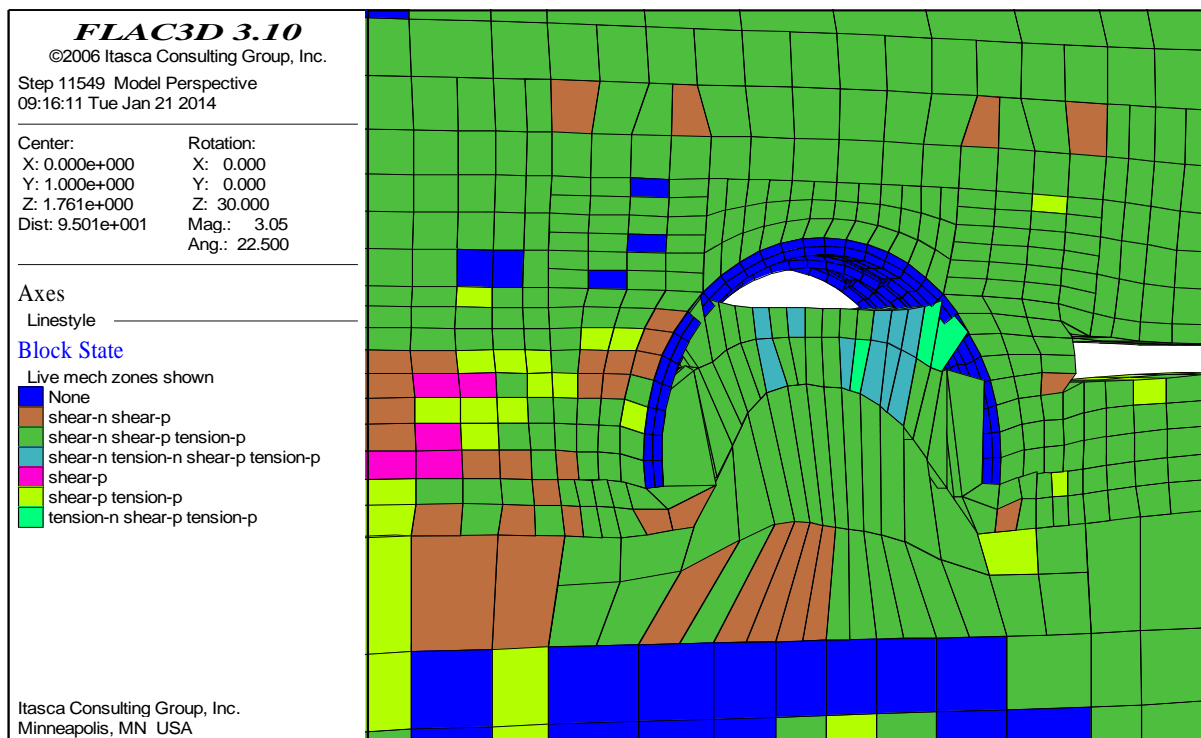


Рисунок 4 - Здимання слабкої підшви

Рисунок 5 демонструє задовільний стан підготовчої виробки на такій самій глибині розташування за умов зміцнення порід покрівлі і належного підтримання виробки. Модель точно відображає реальну поведінку підготовчих виробок і показує ефект належного виконання технології кріплення, експлуатації й охорони виробок.

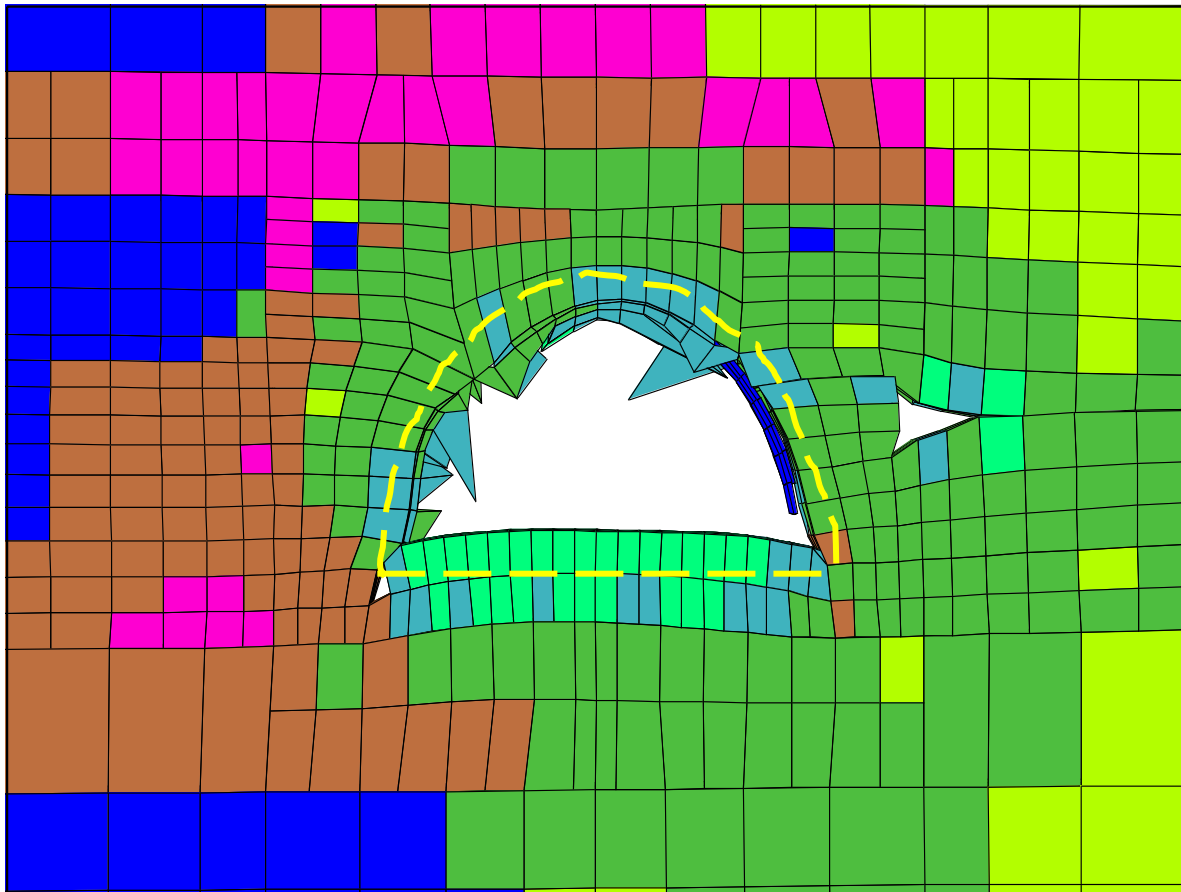


Рисунок 5 - Помірні деформації перерізу підготовчої виробки

Модель слідкує за історією руйнації окремих ділянок масиву і фіксує її у вигляді коментарів. Наприклад на рис. 4 зареєстровані такі стани поза межного деформування порід: зріз на поточному циклі моделювання (shear now), зріз у минулому (shear past) й розрив у минулому (tension past) і т.д. Такий детальний аналіз допомагає зрозуміти складний процес руйнації у динаміці, й відслідкувати усі основні небезпечні моменти поведінки виробки з точки зору забезпечення її стійкості.

ВИСНОВКИ

FLAC3D є потужною спеціалізованою геомеханічною моделлю, яка дозволяє відобразити основні закономірності незворотних деформацій масиву гірських порід навколо підготовчої виробки. Модель дозволяє враховувати початковий стан системи, має тринадцять моделей міцності порід, які охоплюють поведінку практично усіх гірських порід і ґрунтів. Вбудована алгоритмічна мова дає можливість управляти основною платформою FLAC3D, що підвищує ефективність моделі і наближає її можливості до вимог практики.

Досвід моделювання показав, що модель адекватно відтворює такі критичні ефекти з точки зору стійкості підготовчої виробки, як здимання розмоклої підлоги виробки або обвалення слабкої тріщинуватої покрівлі завдяки наявності великого вибору моделей міцності й дотриманню початкових станів системи. Подальшими дослідженнями планується вивчити можливості моделювання не-

пружних деформацій рамного кріплення, яке є основним засобом забезпечення стійкості підготовчих виробок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Геомеханика взаимодействия элементов системы «породный массив-выемочная выработка-охранная конструкция» / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович [и др.] – Днепропетровск: Системные технологии, 2007. – 209 с.
2. Reddy, J.N. (2006), *An Introduction to the Finite Element Method* (Third ed.). - New York, McGraw-Hill.
3. Zienkiewicz, O.C., Taylor R.L. and Zhu J.Z. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals* (Sixth ed.). Berlin, Butterworth-Heinemann.
4. Katsikadelis, J.T. (2012), *Boundary Elements Theory and Applications*, Amsterdam: Elsevier.
5. Olver, P. (2013). *Introduction to Partial Differential Equations*, Dresden, Springer Science & Business Media.
6. Cundall, P. A. (2007). Distinct Element Models of Rock and Soil Structure, in *Analytical and Computational. Methods in Engineering Rock Mechanics – Part. 4*, pp. 129-163. E. T. Brown, ed. London: Allen & Unwin.
7. Rose, B., Andrieux, P. P., O'Connor, C. P. and Verreault, M. (2011), A Systematic Approach to Rock Mechanics Challenges at Xstrata Zinc Brunswick Mine, in *Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geomechanics 2011 (Proceedings of the Second International FLAC/DEM Symposium, Melbourne, Victoria, Australia, February 2011)*, pp. 49-57. D. Sainsbury et al., Eds. Melbourne: Itasca Australia Pty., Ltd.
8. Ivars, M. and Cundall, P. A. (2011), The Synthetic Rock Mass Approach for Jointed Rock Mass Modelling,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 48, 219-244.
9. *FLAC3D* (2008), *Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*. Online Manual. Minneapolis, Itasca.

REFERENCES

1. Bondarenko, V.I., Kovalevskaya, I.A., Simanovich, G.A. [and others] (2007), *Geomechanika vzaimodeistviya elementov sistemy «porodnyi massiv-vyrabotka-ochrannaya konstruktsiya»* [Geomechanics of interface “rock mass – roadway – support cans”], *Sistemnyie tehnologii*, Dnepropetrovsk, UA.
2. Reddy, J.N. (2006). *An Introduction to the Finite Element Method (Third ed.)*, McGraw-Hill, New-York, US.
3. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. and Zhu, J.Z. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals (Sixth ed.)*, Butterworth-Heinemann, Berlin, DE.
4. Katsikadelis, J.T. (2012), *Boundary Elements Theory and Applications*, Elsevier, Amsterdam., Holland.
5. Olver, P. (2013). *Introduction to Partial Differential Equations*, Springer Science & Business Media, Dresden, DE.
6. Cundall, P. A. (2007). “Distinct Element Models of Rock and Soil Structure”, *Analytical and Computational. Methods in Engineering Rock Mechanics*, Allen & Unwin., London, UK, Vol. 4, pp. 129-163.
7. Rose, B., Andrieux, P. P., O'Connor, C. P. and Verreault, M. (2011). “A Systematic Approach to Rock Mechanics Challenges at Xstrata Zinc Brunswick Mine,” *Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geomechanics 2011 (Proceedings of the Second International FLAC/DEM Symposium, Melbourne, Victoria, Australia, February 2011)*, pp. 49-57.
8. Ivars M. and Cundall P. A. (2011), The Synthetic Rock Mass Approach for Jointed Rock Mass Modelling, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, no. 48, pp. 219-244.
9. *FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions* (2008), Online Manual. Minneapolis, Itasca.

Про автора

Назимко Віктор Вікторович, доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу проблем розробки родовищ корисних копалин Інституту фізики гірничих процесів Національної академії наук України (ІФГП НАНУ), Дніпропетровськ, Україна, victor_nazimko@mail.ru

About the author

Nazimko Victor Victorovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Senior Researcher, Principal Researcher in Division of Deposit Extraction, Institute of Physics of Rock Mass under the National Academy of Science of Ukraine (IPRM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, victor_nazimko@mail.ru

Аннотация. Описан опыт использования пакета FLAC3D для геомеханического моделирования сдвижений массива вокруг подготовительной выработки в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях. Пакет учитывает начальное состояние системы, имеет большой набор моделей прочности, которые могут применяться для моделирования необратимых сдвигов массива горных пород вокруг подготовительной выработки. Наиболее подходящими являются следующие модели: модель Кулона-Мора, которая представляет механизм разрушения горных пород в виде среза; модифицированная модель Кулона-Мора, которая учитывает анизотропную пластичность, обусловленную наличием плоскостей ослабления массива с определенной ориентацией в пространстве; модель отвердевающих/разупрочняющихся пород, которая учитывает нелинейное разупрочнение пород на основе вариации параметров модели Кулона-Мора (сцепления, угла внутреннего трения, угла дилатансии и предела прочности на растягивание) как функции девиаторных пластических деформаций; а также модель Хоека-Брауна, которая инкорпорирует правило пластичности, варьирующее в зависимости от уровня всестороннего сжатия. FLAC3D имеет встроенный программный язык FISH, который позволяет пользователям расширять возможности пакета, создавать собственные переменные и новые функции, и практически неограниченно добавлять свои совершенствования.

Ключевые слова: подготовительная выработка, горное давление, необратимые сдвижения массива, компьютерное моделирование.

Abstract: FLAC3D model has been described as a tool for geomechanic modeling. This model provides comfortable simulation of underground roadway behavior under tough condition. The model accounts initial state, a set of constitutive models and irreversible behavior of the surrounding rocks. The most relevant constitutive models that may be used to simulate irreversible behavior of ground and roadway support are: Mohr-Coulomb model that represents shear failure in rocks; ubiquitous-joint model that accounts an anisotropic plasticity that includes weak planes of specific orientation embedded in a Mohr-Coulomb solid; strain-hardening/softening model that allows representation of nonlinear material softening and hardening behavior based on prescribed variations of the Mohr-Coulomb model properties (cohesion, friction, dilation, tensile strength) as functions of the deviatoric plastic strain; and Hoek-Brown model failure criterion that incorporates a plasticity flow rule that varies as a function of the confining stress level. FLAC3D has embedded FISH programming language that enables the user to define new variables and functions. These functions may be used to extend FLAC3D's usefulness or add userdefined features.

Keywords: underground roadway, ground pressure, irreversible ground movement, computer simulation.

Статья поступила в редакцию 18.11.2015

Рекомендовано к печати докт. техн. наук А.П. Круковским