

#### 岩石力学与工程地质绍兴国际论坛 "岩土工程中国软件"讲座 绍兴文理学院•2020.12.23

# 工程岩体破裂过程局部化分析方法和 CASRock 软件研发与应用

#### 潘鹏志 中国科学院武汉岩土力学研究所 冯夏庭 东北大学































#### 科技中国杂志

#### 工业软件是制造强国之重器

东方网首页 手机版 客户端 东方输入法

新闻 | 滚动 | 上海 | 政务 | 区情 | 纵相 | 评论 | 国内 | 社会 | 政法 | 国际 | 军事 | 财经 | 体育 | 娱乐 | 历史 | 汽车 | [



专家热议我国工业化"卡脖子"痛点:自主核心工业软件是 关键

#### 工信部:将实施国家软件重大工程解决关键软 件"卡脖子"问题



发布时间:03-25 16:08 北京日报报业集团

今天下午,国务院联防联控机制召开新闻发布会,介绍新一代信息技术助力疫情防 控、复工复产和中小企业发展有关情况。





发展历程

- 口 2004: LCA基本计算程序
- 口 2006: EPCA<sup>2D</sup>基本计算程序
- 口 2008: EPCA<sup>3D</sup>基本计算程序
- 口 2009: EPCA<sup>3D</sup> 热力耦合基本程序
- □ 2011: VEPCA 蠕变基本程序
- 口 2012: RDCA<sup>2D</sup>不连续分析基本程序
- ロ 2012: RDCA-TOUGH2程序 (TOUGH2由美国LBNL开发)
- 口 2017: EPCA<sup>3D</sup>-THMC温度-渗流-应力-化学耦合过程基本程序
- 口 2018: EPCA<sup>3D</sup>加入三维硬岩破坏准则及力学模型算法
- 口 2019: EPCA<sup>3D</sup>并行版本,加入RFD评价指标
- 口 2020年1月12日: CASRock 正式发布

- ✓ 静力→动力
- ✓ 串行→并行
- ✓ 单场→多场
- ✓ 连续→非连续
- ✓ 2D→3D







#### CASRock 软件发布会部分专家代表合影







1学研究所 Academy of Sciences



## CASRock 研发团队





#### 技术负责:潘鹏志

核心成员:晏飞、张友良、杨成祥、王兆丰、周扬一、孔瑞 技术支撑:李邵军、陈炳瑞、江权、郑虹、肖亚勋、丰光亮 、梅万全、吴振华、郁培阳





#### 力学与工程国家重点实验室 工程岩体破裂过程局部化分析方法

- ◆ 工程岩体破裂过程特征
- 口 工程岩体:非均质材料
- 口工程岩体所处环境:静力、动力、多场...
- □ 岩体破坏过程:连续⇒非连续
- □ 岩体破坏局部化⇒自组织现象



北山花岗岩单轴压缩破坏过程的 应变场演化实验观测(DIC)







新裂隙萌生和扩展

开挖诱发:已有裂隙扩展、







#### ✤ 工程岩体破裂过程局部化分析思想















破裂全过程:弹性、损伤、屈服⇒裂纹萌生、扩展、贯通⇒块体形成、块体运动





弹脆塑性更新规则

元胞节点 N<sub>/</sub> 平衡方程

 $K_i \Delta u_i = \Delta F_i + \Delta F_i^{\rm p}$ 

 $K_i$ 节点刚度  $\Delta u_i$ 节点位移增量  $\Delta F_i$ 节点力

邻居响应

$$\left\{\Delta F_{i}^{\mathbf{p}}\right\}_{j} = -\int \left[B^{e}\right]_{j}^{\mathrm{T}}\left[D\right]\left\{\Delta \varepsilon_{\mathbf{p}}\right\}_{j} \mathrm{dV}, j = 1, \dots, m_{i}$$

$$\Delta F_i^{\mathbf{p}} = \sum_{j=1}^{m_i} \Delta F_i^{j}$$

通过力⇒位移⇒力⇒ ……的改变在整个求解域内相互传 递,计算仅在局部进行,无需求解大型线性方程组







#### 渗流场更新规则



FEM和CA方法对比

(a) Fracture surface, (b) CA solution, (c) FEM solution

Head

0.04 X

(c)

0.02

Rock and Sell Mechanics. Chinese Academy of



#### \* 力学模型局部化



#### ◆ 细观和宏观模拟方法





#### 细观 vs 宏观

- □ 本构关系:简单 vs 复杂
- □ 单元尺度: 细观 vs 宏观
- □ 岩体材料:非均质 vs 均质



汉岩



岩土力学与工程国家重点实验室

# 工程岩体破裂过程局部化分析方法

#### \* 细观和宏观模拟方法

模型名称	理论基础	适用范围
三维应力依赖的脆延性破坏力学模 型	三维应力依赖的脆延性和三 维应力诱导的各向异性	描述工程材料受三维应力作 用下的脆性破坏和延性破坏
Mohr-Coulomb 模型	Mohr-Coulomb准则	描述塑性剪切变形
含拉截断的Mohr-Coulomb 模型	Mohr-Coulomb准则 Rankie准则	描述塑性剪切和拉伸变形
Drucker-Prager 模型	Drucker-Prager准则	描述塑性剪切变形
动力学模型	Newmark时间积分理论	描述动力学相应
损伤蠕变模型	Perzyna黏弹塑性理论	描述时效变形
线弹性模型	广义胡克定理	描述弹性变形和位移





❖ 连续-非连续模拟方法

岩土力学与工程国家重点实验室

基于连续方法的元胞破裂表征

元胞脆塑性破坏准则

 $Y = F_{3DHRC}$ 

#### 岩体破坏程度指标RFD

$$RFD = \begin{cases} 1 - \frac{g(\theta)\sqrt{Ap^2 + Bp + C} - q}{g(\theta)\sqrt{Ap^2 + Bp + C}}, pre \ peak \\ 1 + \frac{\varepsilon_V^p}{(\varepsilon_V^p)|_{limit}} + \frac{\bar{\gamma}}{(\bar{\gamma})|_{limit}}, post \ peak \end{cases}$$

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$
$$q = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$



#### 基于连续方法模拟的岩石破裂过程





#### ◆ 连续-非连续模拟方法

基于等效塑性应变的工程岩体连续-非连续破坏判据



实现了深部硬岩在复杂应力条件下从弹脆塑性到断裂判断的描述



弹性

 $\overline{\varepsilon}^{p} = 0$ 



#### ✤ THM 耦合过程

力学与工程国家重点实验室

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} (S_l \rho_l) + (S_l \rho_l) \left[ \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{(1-\phi)}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial t} \right] = -\nabla \cdot (\mathbf{q}_{rl} + \mathbf{q}_{rv})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ (1 - \phi) \rho_s e_s + \phi e_l S_l \rho_l \right] = -\nabla \cdot \left( \mathbf{i}_m^h \right)$$

 $\nabla \cdot \mathbf{\sigma} + \rho_m \mathbf{g} = 0$ 



 $p_{sw} = -\Delta \theta p_{sw}^{\max} I$ 









#### ✤ THMC 耦合过程

力学与工程国家重点实验室

$$v_{i} = -\frac{1}{\gamma_{w}} k_{ij} \frac{\partial p}{\partial x_{j}} \qquad \nabla \cdot \left[\frac{1}{\gamma_{w}} k_{ij} \nabla p\right] = 0 \qquad \underline{dM}_{p}$$
$$\frac{dM_{diss}^{PS}}{dt} = \frac{3V_{m}^{2} (\sigma_{a} - \sigma_{c}) k_{+} \rho_{g} A_{c}}{RT}$$
$$\frac{dM_{diss}^{FF}}{dt} = k_{+} A_{pore} \rho_{g} V_{m} \left(1 - \left(\frac{C_{pore}}{C_{eq}}\right)^{m}\right)^{n} \qquad \frac{\partial C}{\partial t} =$$

$$\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{prec}}}{\mathrm{d}t} = k_{-}A_{\mathrm{pore}}\rho_{g}V_{m}\left(\left(\frac{C_{\mathrm{pore}}}{C_{\mathrm{eq}}}\right)^{m}-1\right)^{n}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \mathbf{D} \nabla^2 C - \mathbf{V} \cdot \nabla C$$







✤ THMC 耦合过程

拉格朗日方法模拟颗粒传输











#### 非流动边界传质处理









#### 接触点溶解后向邻居孔隙扩散





# 工程岩体破裂过程分析软件 CASRock

## CASRock 工程岩体破裂过程细胞自动机分析软件

Cellular Automata Software for engineering Rockmass fracturing process







# T程岩体破裂过程分析软件 CASRock

#### 口 前处理模块

- 自带建模功能
- 从Ansys导入
- 从Flac导入
- 材料赋值
- 边界条件
- 初始条件

. . .











科学院武汉岩土力学研究所

Institute of Rock and Soll Mechanics, Chinese Academy of Sciences

中国



### 理论、试验、现场实测、与商业软件对比等多种手段验 证CASRock 软件合理性和精度



DIC 试验观测结果



CASRock 模拟的裂纹扩展过程

CASRock揭示的裂纹扩展过程和破裂机理与实测结果吻合





口 软件验证



爆破荷载对临近隧道影响理论解





# T程岩体破裂过程分析软件 CASRock

#### □ 软件验证







实际破坏结果







#### 口 软件验证



应力-应变曲线

破坏模式

#### 真三轴压缩破裂过程试验





#### □ 软件验证

#### ● 与商业软件对比-圆形洞室开挖后的应力场分布





#### 土力学与工程国家重点实验室 工程岩体破裂过程分析软件 CASRock





#### 口 软件验证

#### 厚壁圆筒内水压和应力耦合弹性解





# 工程岩体破裂过程分析软件 CASRock

## 口 软件功能

- 岩石破裂过程模拟
- ▶ 工程岩体稳定性分析
- ▶ 片帮、岩爆、冲击地压危险性评价
- 动力扰动、瞬态开挖、爆破冲击、蠕变分析
- ▶ 裂隙扩展、裂隙网络扩展分析
- ▶ 多场耦合分析
- ▶ 串行和并行

#### 适用于岩石和工程岩体破裂行为相关问题的研究







#### □ 非均质岩石破裂过程

学与工程国家重点实验







Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences

**实现了声发射/微震的算法,可再现声发射演化过程和进行破裂定位** 





● 裂隙扩展



中国科学院武汉岩土力学研究所 Institute of Rock and Soil Mechanics. Chinaso Academy of Sciences

● 再现单组或多组裂纹动态扩展





#### ▶ 隧道工程开挖支护模拟



实现了多种结构单元,可开展岩石工程支护优化设计





程国家重点实验室





力学与工程国家重点实验室







#### 口 岩体隧洞瞬态开挖稳定性分析









不同应力 (σy=80 MPa, 不同σx) 和地质条件下瞬态开挖围岩破坏行为







#### □ 膨润土加热过程温度-渗流-应力耦合过程分析





#### 应用:高放废物地质处置THM耦合过程模拟



点实验

学与工程国家重

Itate Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineerin







究所





#### ■ 应用: 粗糙裂隙面THMC耦合过程模拟









#### 锦屏深地实验室竖井开挖诱发破坏行为预测与控制

- 高应力( 60-70MPa )
- 硬质大理岩
- 片帮突出







- > 合理预测局部化破坏发生的部
  - 位、深度和空间分布规律
- 为工程设计和及时加强支护提供 科学依据









#### 应用:Mine-by隧洞开挖诱发脆性破坏过程模拟







#### ■ 应用:二氧化碳地质封存盖层稳定性和二氧化碳泄露风险分析









# 应用:二氧化碳地质封存盖层稳定性和二氧化碳泄露风险分析 CO<sub>2</sub>注入咸水含水层诱发盖层裂隙扩展和贯通 CO<sub>2</sub>通过盖层裂隙渗漏到上部含水层 为二氧化碳泄露风险评估提供理论支撑







# 结语

- ☑ 自主研发了一套工程岩体破裂过程分析 软件CASRock
- ✓ 根据具体问题选择合适的功能:细观、 宏观;连续、非连续;THM耦合;静 力、动力、蠕变

## ☑ 下一步:三维连续-非连续破裂全过程











- Feng, X. T., Pan, P. Z., and Zhou, H. (2006). Simulation of the rock microfracturing process under uniaxial compression using an elastoplastic cellular automaton. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43(7), 1091-1108.
- Feng X T, Kong R, Yang C, et al (2019). A three-dimensional failure criterion for hard rocks under true triaxial compression. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019: 1-9.
- Pan, P.-Z., F. Yan, X.-T. Feng, Z. Wu and S. Qiu (2019). "Modeling of an excavation-induced rock fracturing process from continuity to discontinuity." Engineering Analysis with Boundary Elements 106, 286-299.
- Pan, P.-Z., J. Rutqvist, X.-T. Feng and F. Yan (2013). "Modeling of caprock discontinuous fracturing during CO2 injection into a deep brine aquifer." International Journal of Greenhouse Gas Control 19(0), 559-575.
- Pan, P.-Z., J. Rutqvist, X.-T. Feng and F. Yan (2014). "TOUGH–RDCA modeling of multiple fracture interactions in caprock during CO2 injection into a deep brine aquifer." Computers & Geosciences 65(0), 24-36.
- Li, M., W. Mei, P.-Z. Pan, F. Yan, Z. Wu and X.-T. Feng (2020). Modeling transient excavation-induced dynamic responses in rock mass using an elasto-plastic cellular automaton. Tunnelling and Underground Space Technology 96, 103183.
- Pan, P. Z., Feng, X. T., and Hudson J. A. (2009). Study of failure and scale effects in rocks under uniaxial compression using 3D cellular automata. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 46(4), 674-685.
- Pan, P. Z., Feng, X. T. and Zhou H. (2012a). Development and applications of the elasto-plastic cellular automaton. Acta Mechanica Solida Sinica 25(2), 126-143.
- Pan, P. Z., Feng, X. T. and Hudson J. A. (2012b). The influence of the intermediate principal stress on rock failure behaviour: A numerical study. Engineering Geology 124, 109-118.
- Pan, P.-Z., F. Yan and X.-T. Feng (2012c). Modeling the cracking process of rocks from continuity to discontinuity using a cellular automaton. Computers & Geosciences 42(0), 87-99.
- Pan, P.-Z., F. Yan, X.-T. Feng and Z.-H. Wu (2017). Study on coupled thermo-hydro-mechanical processes in column bentonite test. Environmental Earth Sciences 76(17), 618.
- Pan, P. and X. Feng (2018). Numerical Study of the Rockburst Mechanism Using the Elastoplastic Cellular Automaton. Rockburst: Mechanisms, Monitoring, Warning and Mitigation. X.-T. Feng, Butterworth-Heinemann, 183-199.
- Pan, P.-Z., F. Yan, X.-T. Feng, Z. Wu and S. Qiu (2019). Modeling of an excavation-induced rock fracturing process from continuity to discontinuity. Engineering Analysis with Boundary Elements 106, 286-299.
- □ 潘鹏志, 冯夏庭, 邱士利 and 周. 辉 (2011). "多轴应力对深埋硬岩破裂行为的影响研究." 岩石力学与工程学报 30(6), 1116-1125.
- □ 潘鹏志, 冯夏庭 and 周辉 (2009). "脆性岩石破裂演化过程的三维细胞自动机模拟." 岩土力学 30(05), 1471-1476.





#### CASRock

# CASRock 网站:

# www.casrock.cn

# 敬请各位专家批评指正!







