

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.06.003

基于FLAC^{3D}的深部隧道分区破裂特性研究

吴政, 梁斌, 祝方才, 高乐星, 邹长春

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 深部地层隧道施工期间, 其围岩及支护构成一个复杂的承载体系。开挖导致深部岩体中出现的围岩分区破裂、岩爆等现象会给现场带来极大的安全隐患。围绕分区破裂化这一超常现象, 依托淮南矿区某深部巷道工程, 借助有限差分软件FLAC^{3D}, 通过模拟岩体高温、高地应力等特殊环境下, 建立其响应模型, 研究了原岩应力和内摩擦角对分区破裂化现象的影响。结果表明: 不同原岩压力和内摩擦角对围岩分区破裂现象影响显著; 当原岩压力在17.3~35.0 MPa内逐渐增大时, 间隔破裂区域体积从0增大至 $25 \times 10^2 \text{ m}^3$; 当摩擦角在22~38°区间内逐渐增大时, 间隔破裂区域体积则从 $26.87 \times 10^2 \text{ m}^3$ 降至0, 恢复至浅部隧道传统破坏模式。

关键词: 深部隧道; 原岩应力; 内摩擦角; 分区破裂; FLAC^{3D}数值模拟

中图分类号: U451.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2022)06-0015-07

引文格式: 吴政, 梁斌, 祝方才, 等. 基于FLAC^{3D}的深部隧道分区破裂特性研究[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(6): 15-21.

Research on Zonal Fracture Characteristics of Deep Tunnels Based on FLAC^{3D}

WU Zheng, LIANG Bing, ZHU Fangcai, GAO Lexing, ZOU Changchun

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Due to the fact that, with the surrounding rock and support constituting a complex bearing system, the surrounding rock partition fracture, rock burst and other problems in deep rock mass caused by excavation will bring great potential safety hazards to the site during the construction of deep stratum tunnels. Taking the abnormal phenomenon of zonal fracturing as the research focus, an abnormal response characteristic model has thus been established under the special environment of high temperature, high ground stress, etc. of the deep roadway rock mass, relying on the actual project of a deep roadway in Huainan mining area, and with the help of FLAC^{3D} numerical simulation software, followed by an analysis of the influence of different original rock pressure and internal friction angle on the zonal fracturing. The results show that different original rock pressures and internal friction angles have significant effects on the zonal fracture of surrounding rocks. When the original rock pressure gradually increases within the range of 17.3 MPa and 35.0 MPa, the volume of the interval rupture area increases from 0 to $25 \times 10^2 \text{ m}^3$; when the friction angle gradually increases within the range of 22° and 38°, the volume of the interval rupture area decreases from $26.87 \times 10^2 \text{ m}^3$ to 0, returning to the traditional failure mode of the shallow tunnel.

Keywords: deep tunnel; original rock stress; internal friction angle; partition fracture; FLAC^{3D} numerical simulation

收稿日期: 2021-11-30

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ50039); 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(17C0482)

作者简介: 吴政(1998-), 男, 湖南岳阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为深部隧道超常破坏,

E-mail: 986833199@qq.com

通信作者: 梁斌(1986-), 男, 湖南益阳人, 湖南工业大学讲师, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为岩土工程,

E-mail: 252554582@qq.com

0 引言

随着科学技术的不断进步,在各种工程领域上的拓展逐渐深入,出现了许多不符合浅部围岩破坏方式的现象。在深部采矿工程中,进行深部地层开挖可能出现岩爆、分层破裂、分区破裂化等问题。与浅部工程相比,深部工程受到很大的地应力,使得变形及破坏与浅部工程有明显差异。分区破裂化现象是深部岩体破坏的一个典型特征^[1]。

俄罗斯 Taimyrskii 深层矿洞中出现的岩体交替破坏形式最早被定义为分区破裂化现象,相似现象陆续在其他国家被观测到。如 E. I. Shenyakin 等^[2]通过室内模型试验重现了分区破裂化现象,并在实际深部采矿工程中观察到了此现象的存在。分区破裂化问题在中国最早由钱七虎院士提出^[3],之后李术才^[4]在学术沙龙中提出其使用钻孔电视在淮南矿区丁集煤矿岩层中发现分区破裂化现象;谭云亮等^[5]在新汶矿区孙村煤矿深部巷道围岩中观察到分区破裂现象。分区破裂化现象逐渐被科研工作者们作为深部洞室、巷道围岩开挖破坏的特征和标志。

针对分区破裂化现象产生的原因,研究者们进行了多维度的尝试。就模型试验方面,袁亮等^[6]利用总参工程兵科研三所研制的实验装置进行了深部围岩破裂试验,结果证实了洞室在较大轴向压应力持续作用下会形成交替的破裂区和非破裂区,即分层破裂现象。陈旭光等^[7]通过模型试验,发现围岩应变呈现波浪形变化规律以及洞周锚杆受力出现拉压交替变化现象。张智慧等^[8]利用相似材料制作了多种不同模型,对分区破裂时裂纹的分布和沿巷道轴向的变化规律进行研究。

在理论分析方面,王明洋等^[9]围绕围岩力学、变形两方面进行探究,得出结论为围岩最大压力区的体积是影响分区破裂化现象产生的因素之一,并且以此条件为基础,划定了深、浅部工程活动的界限。周小平等^[10]把开挖过程看成动力问题,分析了分区破裂与巷道开挖的速度、岩石强度的关系。Wu H. 等^[11]将塑性区发育过程中岩体的蠕变破坏视为分区破裂化的一个因素。V. N. Odintsev 等^[12]在研究分区破裂化问题时简化了隧道开挖的三维问题,提出的初始破坏准则用于平面应变问题。其他研究者^[13-19]在数值模拟方面进行了大量研究。王红英^[20]、李树忱^[21]、高富强^[22]、唐礼忠^[23]在数值模拟研究方面得出了一些结论,但对深部岩体本身力学性质没有展开全面分析。深部地层特有的高地应力环境是影响巷道围岩稳定性、大变形、岩爆等问题的重要因素,

为了保证地下工程的正常施工,防止工程事故发生,完善深部工程理论,高地应力作用下的洞室围岩变形及支护对策亟需展开相关研究。因此,在本研究中,以应力应变软化本构模型为基础,对某煤矿深部开挖出现的分区破裂化现象进行模拟分析。探讨原岩应力、内摩擦角两个参数对深部岩体分区破裂的影响,以期对相关研究及工程提供补充和参考。

1 模拟原型与研究方法

1.1 模拟原型

本文的模拟原型为淮南矿区某采区巷道,围岩以破碎带形式出现的带状崩解并不是完全连续的。深部巷道中实测发现的分区破裂化即为围岩内部破裂区和完整区,为交替出现的现象,如图1所示。

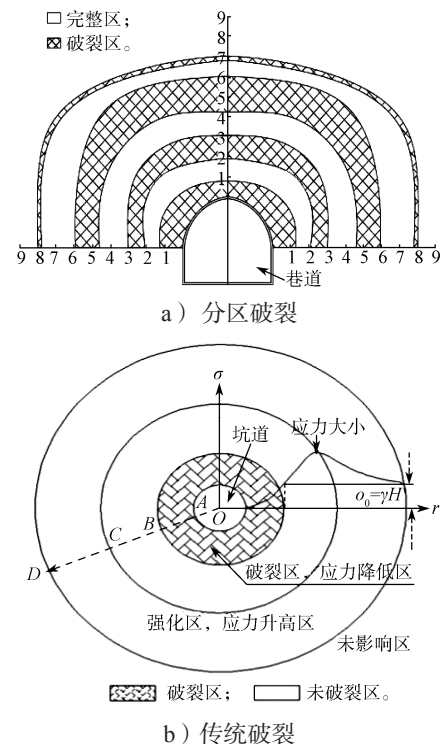


图1 煤矿围岩分区破裂实测现象和传统破裂示意图

Fig. 1 Schematic diagram of zoning fracture of surrounding rock in the coal mine and schematic diagram of traditional fracture

1.2 研究方法

对于地质环境复杂的工程,模型试验通常无法对其进行还原,常采用数值方法进行模拟。其中,有限元法因为考虑了岩体的非连续性、适用于处理复杂边界问题成为岩土工程分析最常用的方法之一。

在有限元方法基础之上开发有限差分软件FLAC^{3D}能更好地考虑岩土体的不连续性和大变形特征,考虑岩体破裂而非分离来研究带状破裂问题,因

此,本研究选择FLAC^{3D}作为连续介质数值分析的数值模拟软件。

2 应变软化本构模型的构建

应变软化模型以摩尔库仑模型为基础,其弹性阶段与摩尔库仑模型一致,区别在于摩尔库仑模型中各个参数在模拟计算过程中都是恒定不变的,而在应力软化模型中,强度参数都会随着塑性应变变化。并且可以通过FLAC^{3D}自带的Fish语言根据需要模拟的内容自定义岩体强度参数与塑性应变函数。应变软化模型的应力-应变曲线如图2所示。

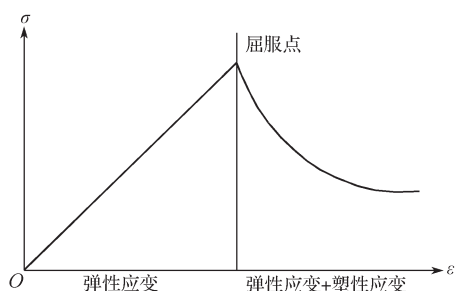


图2 应变软化模型应力-应变关系曲线

Fig. 2 Strain softening model stress-strain relationship

强度低于屈服强度时,总应变为弹性应变,即

$$\varepsilon = \varepsilon^e \quad (1)$$

当强度到达屈服强度以后,总应变包括弹性应变与塑性应变,即

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (2)$$

其中,塑性应变又包括塑性剪切应变与塑性拉伸应变,表达式为

$$\varepsilon^p = \varepsilon^{ps} + \varepsilon^{pt} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),可变为

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{ps} + \varepsilon^{pt} \quad (4)$$

2.1 弹性法则

主应力与主应变形式的胡克定律表达式为

$$\begin{cases} \Delta\sigma_1 = \alpha_1 \Delta\varepsilon_1^e + \alpha_2 (\Delta\varepsilon_2^e + \varepsilon_3^e), \\ \Delta\sigma_2 = \alpha_1 \Delta\varepsilon_2^e + \alpha_2 (\Delta\varepsilon_1^e + \varepsilon_3^e), \\ \Delta\sigma_3 = \alpha_1 \Delta\varepsilon_3^e + \alpha_2 (\Delta\varepsilon_1^e + \varepsilon_2^e). \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\alpha_1 = K + (4/3)G$, $\alpha_2 = K - (4/3)G$, 其中 K 为体积模量, G 为剪切模量。 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、第二、第三主应力。

2.2 屈服函数与势函数

FLAC^{3D}中,应变软化模型剪切屈服函数为

$$\begin{cases} F^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi}, \\ N_\phi = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}; \end{cases} \quad (6)$$

式中: ϕ 为内摩擦角; c 为黏聚力。

拉伸屈服函数为

$$F^t = \sigma_1 - \sigma_3; \quad (7)$$

剪切势函数为

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_1 N_\phi; \quad (8)$$

拉伸势函数为

$$g^t = -\sigma_3. \quad (9)$$

2.3 剪切破坏应力修正

剪切破坏时,根据正交流动法则,有

$$\varepsilon_i^p = \lambda^s \frac{\partial g^s}{\partial \sigma_i}, \quad (10)$$

根据拉伸破坏流动法则,有

$$\varepsilon_i^p = \lambda^t \frac{\partial g^t}{\partial \sigma_i}. \quad (11)$$

式中 λ 为特定的塑性系数。

将式(10)展开,得:

$$\begin{cases} \Delta\varepsilon_1^{ps} = \lambda^s, \\ \Delta\varepsilon_2^{ps} = 0, \\ \Delta\varepsilon_3^{ps} = -\lambda N_\psi. \end{cases} \quad (12)$$

式中 ψ 为剪胀角。

将式(12)代入增量弹性法则式(5),可得剪切破坏应力修正为

$$\begin{cases} \sigma_1^N = \sigma_1^t - \lambda^s \alpha_2, \\ \sigma_2^N = \sigma_2^t - \lambda^t \alpha_2, \\ \sigma_3^N = \sigma_3^t - \lambda^t \alpha_3. \end{cases} \quad (13)$$

3 数值模型的构建

建立淮南矿区某巷道模型,其网格划分立体图如图3所示,模拟长度为50m,隧道半径为5m。该计算模型被离散成55000个单元。

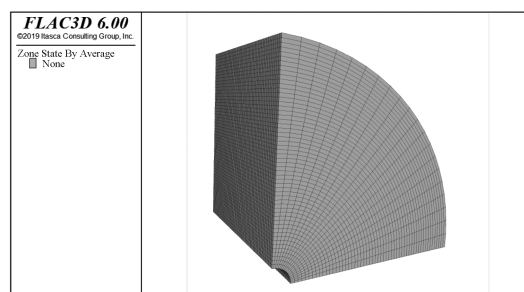


图3 巷道模型网格划分立体图

Fig. 3 Meshing diagram of tunnel model

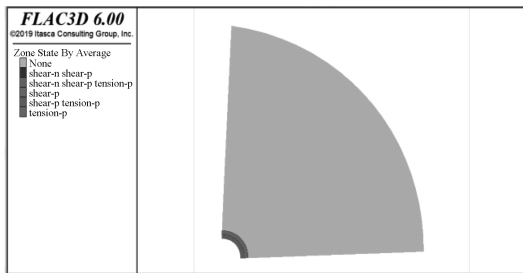
岩石的物理力学参数见表1,为还原实际工程状况,数值模拟时模型底部固定,初始位移和速度为0。

表 1 岩石的物理力学参数

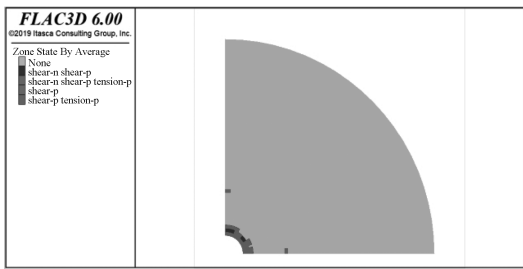
Table 1 Physical and mechanical parameters of the rock

参数	取值	参数	取值
重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	26.2	泊松比	0.25
弹性模量 /MPa	25 000	剪切模量 /MPa	10 000
内摩擦角 /($^\circ$)	30	体积模量 /MPa	16 700
黏聚力 /MPa	5	剪胀角 /($^\circ$)	3.75

在计算时采用两种本构模型，第一种为摩尔库仑模型，第二种为应力应变软化模型。在摩尔库仑模型中，对比岩体的两种强度即峰值强度和残余强度。计算结果如图 4 和 5 所示。



a) 峰值强度



b) 残余强度

图 4 基于摩尔库仑本构模型的模拟计算结果

Fig. 4 Simulation results based on Mohr Coulomb constitutive model

从图 4 所示计算结果可以发现，自巷道开挖后，出现了一条明显的环状塑性带状区域，即分区破裂化现象。图 4a 模拟的破坏方式与浅部巷道破坏方式一致，图 4b 的围岩内部出现部分塑性破坏。

在 FLAC^{3D} 的应力应变软化本构模型中，岩体的弱化与塑性应变有关，当岩体逐渐发生塑性应变时，岩体的抗剪强度、黏聚力、内摩擦角逐渐降低，以此实现岩体软化过程。当塑性剪切应变达到极限值时，岩体被破坏，计算结果如图 5 所示。

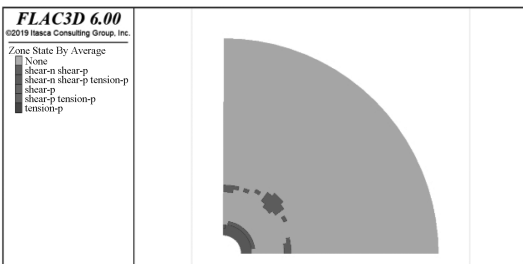


图 5 基于应力应变软化本构模型的模拟结果图

Fig. 5 Simulation results based on the stress-strain softening constitutive model

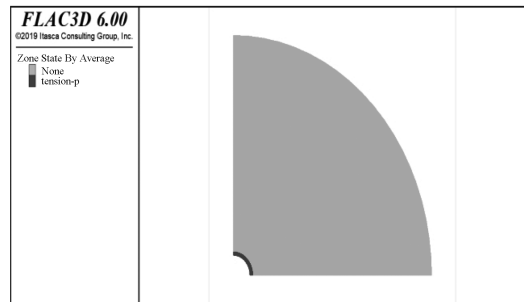
对比图 4 和 5，可得知应力应变软化本构模型比摩尔库仑模型更适用于模拟深部岩体的应力应变特性。

4 影响因素分析

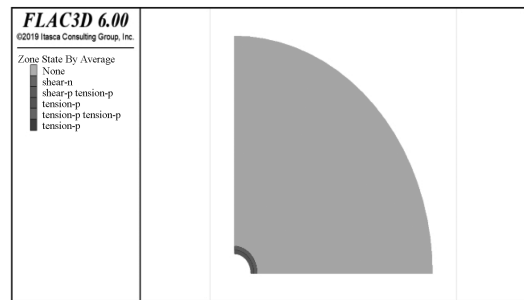
4.1 原岩应力对分区破裂现象的影响

以上述模型为基础，计算出围岩的单轴抗压强度为 17.32 MPa。取原岩应力变化区间为 10~35 MPa，控制变量，改变原岩应力参数，研究原岩应力增长对分区破裂现象产生的影响。结果见图 6a~e，图 7 为不同原岩应力对分区破裂化体积的影响。

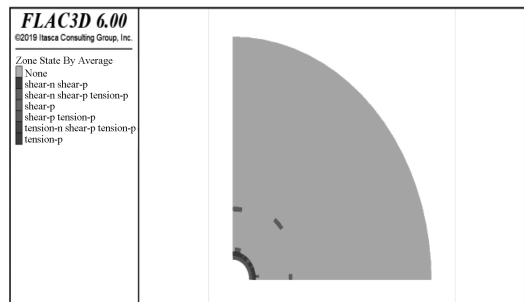
由图 6 和 7 可知，当原岩应力小于 17.3 MPa（即单轴抗压强度）时，巷道破坏方式同浅部隧道破坏方式一致。增大原岩应力到 20 MPa，围岩内部分区域产生塑性变形无成环状趋势， $V=0.755 2 \times 10^2 \text{ m}^3$ 。继续增大原岩应力，塑性区范围增大，直到原岩应力增至 30 MPa，出现了明显的封闭环状塑性区，此时 $V=8.626 \times 10^2 \text{ m}^3$ 。原岩应力增大至 35 MPa 时， $V=25.00 \times 10^2 \text{ m}^3$ 。可得出深部围岩出现分区破裂化现象的重要前提为原岩应力大于岩体的单轴抗压强度。塑性破坏区域的数量与原岩应力的大小呈正相关关系。



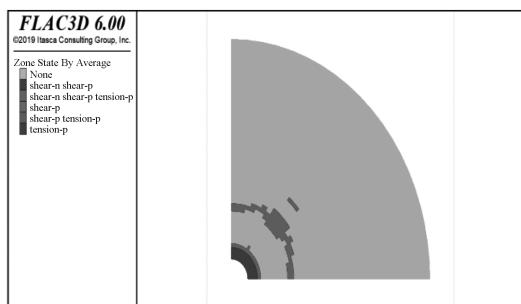
a) 10.00 MPa



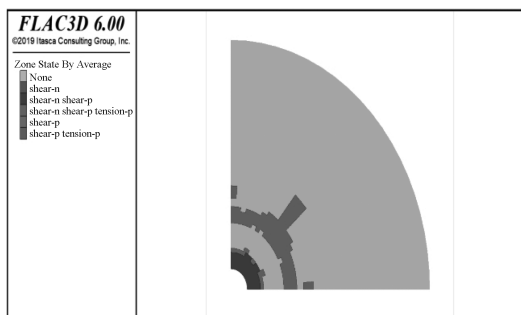
b) 17.32 MPa



c) 20.00 MPa



d) 30.00 MPa



e) 35.00 MPa

图 6 不同原岩应力条件下的分区破裂数值计算结果图
Fig. 6 Zonal fracture numerical calculation diagram under various original rock stress conditions

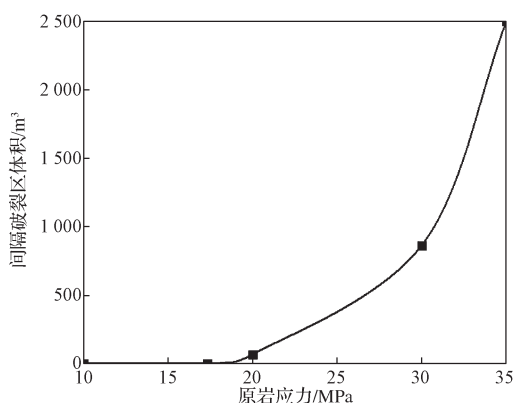


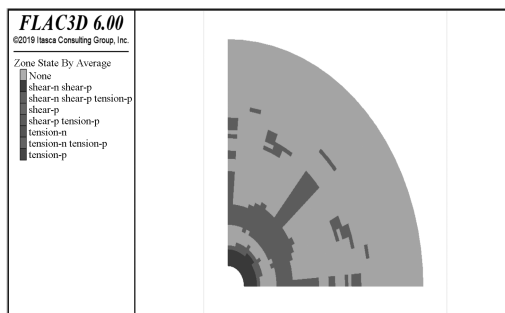
图 7 原岩应力对间隔破裂区体积的影响曲线
Fig. 7 Effect curve of the original rock stress on the interval fracture zone volume

4.2 强度参数对分区破裂现象的影响

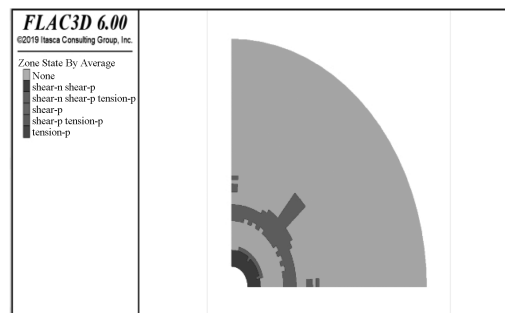
本研究讨论不同强度参数摩擦角 φ 对分区破裂现象的差异, 推理其影响关系。此处参考文献 [1], 根据深部围岩内摩擦角实际变化范围, 随机取值 22, 26, 30, 34, 38° 进行模拟计算, 结果见图 8, 塑性区体积变化如图 9。

根据图 8 和 9 可知, 随着摩擦角 φ 的逐渐增大, 岩体的塑性范围逐渐减小; 当 $\varphi=22^\circ$ 时, 塑性区体积 $V=26.867 \times 10^2 \text{ m}^3$, 且在破裂带外围有形成第二条破裂带的趋势; 当 $\varphi=26^\circ$ 时, $V=17.995 \times 10^2 \text{ m}^3$; 当 $\varphi=30^\circ$ 时, $V=13.849 \times 10^2 \text{ m}^3$; 当 $\varphi \geq 38^\circ$ 时, 围岩出

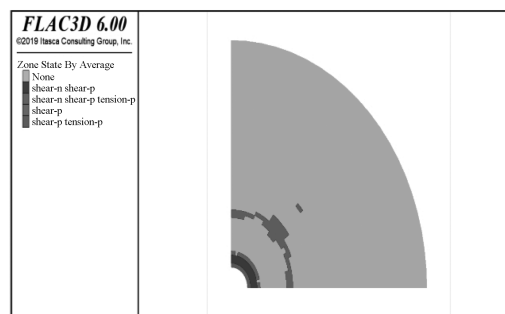
现与传统破坏模式相同的现象。可能的原因是内摩擦角与岩体抗压强度呈正相关, 在原岩应力一致的情况下, 当 $\varphi=22^\circ$ 时, 岩体单轴抗压强度小于原岩应力且差距较大; 内摩擦角增大到 26, 30° 时, 原岩应力仍大于岩体单轴抗压强度, 但差距缩小, 此时岩体塑性区依旧有分区破裂化现象; 当内摩擦角增大到 34° 时, $V=0 \text{ m}^3$, 围岩无明显分区破裂化现象, 此时岩体单轴抗压强度大于原岩应力。



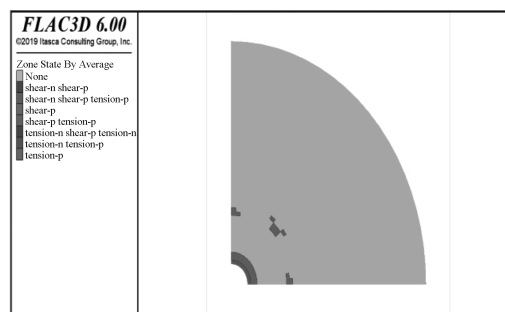
a) $\varphi=22^\circ$



b) $\varphi=26^\circ$



c) $\varphi=30^\circ$



d) $\varphi=34^\circ$

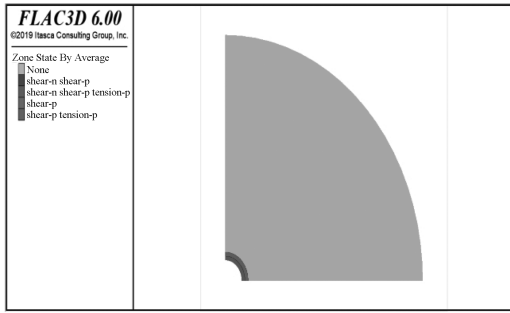
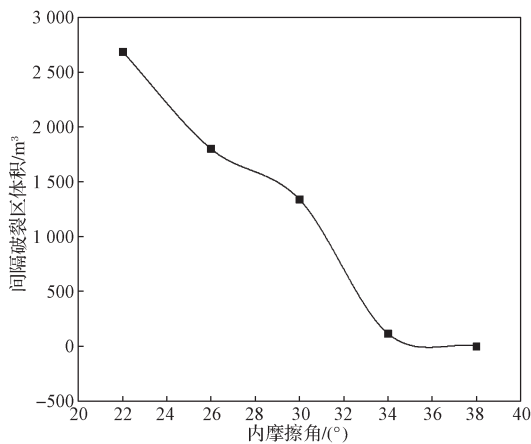
e) $\varphi=38^\circ$ 图8 不同 φ 值下分区破裂数值计算结果图Fig. 8 Numerical calculation result diagram of partition rupture under different φ value conditions

图9 内摩擦角对间隔破裂区体积的影响曲线

Fig. 9 Effect curve of the internal friction angle on the volume of interval fracture zone

5 结论

1) 深部岩体破坏方式与浅部迥异, 在进行深部岩体数值模拟研究中, 应力应变软化本构模型具有良好的适用性, 深部巷道出现分区破裂化现象的一个重要前提为原岩应力大于岩体单轴抗压强度。

2) 深部岩体分区破裂化现象受原岩应力影响显著, 随着原岩应力的增大, 分区破裂带逐渐深入, 且当原岩应力小于 35 MPa 时深入速度呈上升趋势。

3) φ 的变化对分区破裂现象影响显著。内摩擦角与岩体抗压强度正相关, 当 $\varphi=22^\circ$ 时塑性区体积最大。随着内摩擦角增大, 岩体单轴抗压强度增大, 塑性区体积减少。当 $\varphi \geq 38^\circ$ 时, 围岩出现与传统破坏模式相同的现象。

参考文献:

[1] 苏永华, 郑璇. 深部节理岩体分区破裂化机制数值研究[J]. 公路交通科技, 2013, 30(1): 94-101.

SU Yonghua, ZHENG Xuan. Numerical Study on Mechanism of Zonal Disintegration in Deep Rock Mass with Joints[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(1): 94-101.

[2] SHEMYAKIN E I, FISENKO G L, KURLENYA M V, et al. Zonal Disintegration of Rocks Around Underground Workings, Part 1: Data of in Situ Observations[J]. Soviet Mining, 1986, 22(3): 157-168.

[3] 苏仲杰, 钱七虎. 深部硐室围岩分区破裂化现象数值模拟研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(2): 89-94.

SU Zhongjie, QIAN Qihu. Numerical Simulation Research on Zonal Disintegration Phenomenon of Rock Mass Around Deep Grotto[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(2): 89-94.

[4] 李术才, 王汉鹏, 钱七虎, 等. 深部巷道围岩分区破裂化现象现场监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(8): 1545-1553.

LI Shucai, WANG Hanpeng, QIAN Qihu, et al. In-Situ Monitoring Research on Zonal Disintegration of Surrounding Rock Mass in Deep Mine Roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(8): 1545-1553.

[5] 谭云亮, 孙春江, 宁建国, 等. 深部侧空条件下顶板岩层分区破裂探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 2623-2629.

TAN Yunliang, SUN Chunjiang, NING Jianguo, et al. Borehole Exploring Researches on Zonal Disintegration of Roof Strata with Lateral Cave in Deep Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2623-2629.

[6] 袁亮, 顾金才, 薛俊华, 等. 深部围岩分区破裂化模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 987-993.

YUAN Liang, GU Jincai, XUE Junhua, et al. Model Test Research on the Zonal Disintegration in Deep Rock[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 987-993.

[7] 陈旭光, 张强勇, 刘德军, 等. 高地应力深部巷道开挖锚固特性的三维地质力学模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 107-113.

CHEN Xuguang, ZHANG Qiangyong, LIU Dejun, et al. A 3-D Geomechanics Model Test Study of the Anchoring Character for Deep Tunnel Excavations[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(9): 107-113.

[8] 张智慧, 王学滨, 潘一山. 利用多种相似材料模拟分区破裂现象的试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(3): 22-24.

ZHANG Zhihui, WANG Xuebin, PAN Yishan. Experiment on Utilizing Multi-Kinds of Similar Materials to Simulate Zonal Disintegration Phenomenon[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(3): 22-24.

[9] 王明洋, 宋华, 郑大亮, 等. 深部巷道围岩的分区破裂机制及“深部”界定探讨[J]. 岩石力学与工程学报,

- 2006, 25(9): 1771-1776.
- WANG Mingyang, SONG Hua, ZHENG Daliang, et al. On Mechanism of Zonal Disintegration Within Rock Mass Around Deep Tunnel and Definition of "Deep Rock Engineering" [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1771-1776.
- [10] 周小平, 钱七虎, 张伯虎, 等. 深埋球形洞室围岩分区破裂机理 [J]. 工程力学, 2010, 27(1): 69-75, 90.
- ZHOU Xiaoping, QIAN Qihu, ZHANG Bohu, et al. The Mechanism of the Zonal Disintegration Phenomenon Around Deep Spherical Tunnels[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 69-75, 90.
- [11] WU H, FANG Q, ZHANG Y D, et al. Zonal Disintegration Phenomenon in Enclosing Rock Mass Surrounding Deep Tunnels: Elasto-Plastic Analysis of Stress Field of Enclosing Rock Mass[J]. Mining Science and Technology (China), 2009, 19(1): 84-90.
- [12] ODINTSEV V N. Mechanism of the Zonal Disintegration of a Rock Mass in the Vicinity of Deep-Level Workings[J]. Journal of Mining Science, 1994, 30(4): 334-343.
- [13] 张智慧, 潘一山. 深部巷道破坏分区破裂规律三维相似材料实验 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(12): 2780-2786.
- ZHANG Zhihui, PAN Yishan. Three-Dimensional Similar Material Experimental Study on Zonal Disintegration of Deep Tunnel Failure[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2780-2786.
- [14] MA X H, WEI J H, LIU J, et al. Study on the Generation Mechanism and Development Law of the Zonal Disintegration in Deep Burial Tunnels[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 6431048.
- [15] MIRENKOV V E. Zonal Disintegration of Rock Mass Around an Underground Excavation[J]. Journal of Mining Science, 2014, 50(1): 33-37.
- [16] 徐国文, 何川, 汪耀, 等. 层状软岩隧道围岩破坏的连续-离散耦合分析 [J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(5): 966-973.
- XU Guowen, HE Chuan, WANG Yao, et al. Failure Analysis on Surrounding Rock of Soft-Layered Rock Tunnel Using Coupled Continuum-Discrete Model[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(5): 966-973.
- [17] 沙鹏, 伍法权, 李响, 等. 高地应力条件下层状地层隧道围岩挤压变形与支护受力特征 [J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1407-1414.
- SHA Peng, WU Faquan, LI Xiang, et al. Squeezing Deformation in Layered Surrounding Rock and Force Characteristics of Support System of a Tunnel Under High In-Situ Stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1407-1414.
- [18] 李树忱, 钱七虎, 张敦福, 等. 深埋隧道开挖过程动态及破裂形态分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2104-2112.
- LI Shuchen, QIAN Qihu, ZHANG Dunfu, et al. Analysis of Dynamic and Fractured Phenomena for Excavation Process of Deep Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2104-2112.
- [19] 王学滨, 白雪元, 马冰, 等. 巷道围岩非均质性对其分区破裂化的影响 [J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 78-86.
- WANG Xuebin, BAI Xueyuan, MA Bing, et al. Effects of Heterogeneity of Rock on the Zonal Disintegration of the Tunnel Surrounding Rock: a Numerical Study[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(1): 78-86.
- [20] 王红英, 张强, 张玉军, 等. 深部巷道围岩分区破裂化数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 535-540.
- WANG Hongying, ZHANG Qiang, ZHANG Yujun, et al. Numerical Simulation on Disintegration of Surrounding Rock Mass in Deep Mine Roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 535-540.
- [21] 李树忱, 冯现大, 李术才, 等. 深部岩体分区破裂化现象数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1337-1344.
- LI Shuchen, FENG Xianda, LI Shucui, et al. Numerical Simulation of Zonal Disintegration for Deep Rock Mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1337-1344.
- [22] 高富强, 康红普, 林健. 深部巷道围岩分区破裂化数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 21-25.
- GAO Fuqiang, KANG Hongpu, LIN Jian. Numerical Simulation of Zonal Distrigation of Surrounding Rock Mass in Deep Mine Roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 21-25.
- [23] 唐礼忠, 范若楠, 宋祥霖. 深埋巷道分区破裂过程的数值模拟 [J]. 工程爆破, 2020, 26(4): 1-7.
- TANG Lizhong, FAN Ruonan, SONG Yanglin. Numerical Simulation of Zonal Disintegration Process in Deep Roadway[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(4): 1-7.

(责任编辑: 姜利民)