

基于 Z-P 准则的煤巷围岩稳定性数值模拟研究

张玉宝¹, 赵同彬^{1,2}, 谭云亮¹, 黄娜¹

(1. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 黑龙江科技大学 黑龙江省煤矿深部开采地压控制与瓦斯治理重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150027)

摘要:通过 FLAC^{3D}所提供的二次开发程序接口,利用 VC++6.0 程序语言编写了 Z-P 准则的计算程序,成功实现 Z-P 准则的 FLAC^{3D}二次开发。采用开发的 Z-P 准则和 FLAC^{3D}内置的 M-C 准则对木城涧煤矿二槽煤层锚固支护巷道进行数值模拟,并对巷道围岩的塑性破坏区、位移及应力分布规律进行对比分析。结果表明:Z-P 准则计算的塑性破坏区、位移比 M-C 准则的计算结果偏小,应力比 M-C 准则偏大,但应力集中现象相对不明显,总体分布规律基本一致。将模拟结果与现场钻孔探测数据进行对比可知,Z-P 准则计算的结果更接近现场实际。

关键词:Z-P 准则;FLAC^{3D}二次开发;煤巷围岩;数值模拟

中图分类号:TD313

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2014)02-0075-06

Numerical Study on the Stability of Wall Rock in Coalroad Based on Z-P Criterion

Zhang Yubao¹, Zhao Tongbin^{1,2}, Tan Yunliang¹, Huang Na¹

(1. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao,

Shandong 266590, China; 2. Heilongjiang Ground Pressure and Gas Control in Deep Mining Key Lab,

Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150027, China)

Abstract:Based on secondary development interface program of FLAC^{3D}, the calculation process of Z-P criterion was compiled by the VC++6.0 programming language, and then the secondary development of Z-P criterion was successfully realized in FLAC^{3D}. The Z-P criterion and the M-C criterion were respectively applied to simulating the bolting surrounding rock of coal seam 2 in Muchengjian mining area. The results show that the plastic failure zone and displacement in Z-P criterion are smaller than those in M-C criterion, and stress in Z-P criterion is bigger than that in M-C criterion. But on the whole Z-P criterion's regularity of distribution is in line with that of M-C criterion and the phenomenon of stress concentration is not obvious. Through comparison of the simulation results and field data, the result in Z-P criterion proves to be closer to field result.

Key words:Z-P criterion; secondary development of FLAC^{3D}; wall rock in coalroad; numerical simulation

岩土工程数值模拟研究对所采用破坏准则的屈服面形状、增量方向、角点奇异性等具有特殊要求,因而某些经典强度理论往往不能直接用于相关数值模拟研究。很多专家学者做了大量 FLAC^{3D}二次开发工作,如陈育民、刘汉龙^[1]利用 VC++ 环境在 FLAC^{3D}中实现了邓肯-张本构模型的开发;刘珊珊等^[2]根据

收稿日期:2013-11-14

基金项目:山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2011NJ014);山东科技大学杰出青年科学基金项目(2011KYJQ106);山东科技大学研究生创新基金项目(YC130202);黑龙江省煤矿深部开采地压控制与瓦斯治理重点实验室开放基金项目(F2313-09)

作者简介:张玉宝(1989—),男,山东邹平人,硕士研究生,主要从事岩体力学与采矿工程方面的研究。

E-mail:zybhn2008@126.com

赵同彬(1975—),男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,博士,从事巷道支护与矿山岩体力学方面的研究,本文通信作者。

E-mail:ztbwh2001@yahoo.com.cn

FLAC^{3D}提供的程序接口,实现了粘弹性广义 Kelvin 模型的 FLAC^{3D}二次开发;姚仰平等^[3]以修正剑桥模型为基础实现了统一硬化模型在 FLAC^{3D}中的开发;赵同彬^[4]将自定义的 B-K 锚固本构模型编译到可调用的动态链接库中,大大提高了数值软件的运行效率。在数值模拟模型开发中,在满足相关岩石强度准则准确性的同时又满足计算机程序的实现要求,已成为岩土工程中一个非常具有研究价值以及应用价值的新方向。

本研究基于 Z-P(Zienkiewicz-Pande)准则,通过 FLAC^{3D}所提供的 UDM 程序接口,进行二次开发。并采用开发的 Z-P 准则和 FLAC^{3D}内置的 M-C 准则对木城涧煤矿二槽巷道进行数值模拟研究。

1 Z-P 准则及其 FLAC 二次开发

1.1 Z-P 准则

Mohr-Coulomb(M-C)屈服面是比较可靠的,但存在尖顶和棱角的缺点,致使计算结果往往不够精确。Zienkiewicz等^[5-6]为此提出了 Z-P 准则,在 π 平面上抹圆了 M-C 准则的六个尖角,如图 1 所示。在 $p-q$ 子午面上通过调整系数 a 来逼近 M-C 准则,以消除奇异点,如图 2 所示。

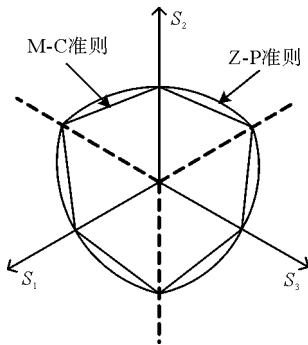


图 1 π 平面上的屈服准则示意图
Fig. 1 Yield criterion on π plane

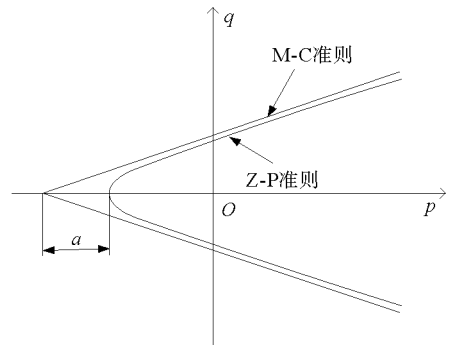


图 2 $p-q$ 子午平面上的屈服准则示意图
Fig. 2 Yield criterion on $p-q$ plane

Z-P 屈服准则的破坏包络线^[7]为

$$F = \beta \sigma_m^2 + \alpha_1 \sigma_m - k + \bar{\sigma}_+^2 = 0. \quad (1)$$

其中: $k = (c^2 - 36a^2) \sin^2 \varphi / (3 - \sin \varphi)^2$; $\beta = -12 \sin^2 \varphi / (3 - \sin \varphi)^2$; $\bar{\sigma}_+ = \sqrt{J_2} / g(\theta_\sigma)$; $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$; $\alpha_1 = 2c \sin 2\varphi / (3 - \sin \varphi)^2$; $g(\theta_\sigma) = \frac{2K}{(1+K) - (1-K) \sin 3\theta_\sigma + 0.3 \cos^2 3\theta_\sigma}$; $K = \frac{3 - \sin \varphi}{3 + \sin \varphi}$; $\theta_\sigma, c, \varphi$ 分别为材料的洛德角、粘聚力及内摩擦角; a 为待定系数,取值与材料的 c, φ 值和允许抗拉强度有关; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为主应力分量; J_2 为偏应力第二不变量。

1.2 FLAC^{3D}二次开发

在 FLAC 本构模型的二次开发中,主要工作是由当前时步的应力状态和应变增量计算下一时步的应力增量和应力状态。材料单元处于弹塑性状态可由屈服准则和应力状态确定是否屈服。若 $F \geq 0$,单元进入屈服;若 $F < 0$,单元仍处于弹性状态。当材料单元处于弹性状态时,迭代过程中弹性本构关系保持不变;当材料单元处于塑性状态时,应该用弹塑性屈服流动法则进行修正,拉伸屈服的单元也要进行应力修正。FLAC^{3D}二次开发的具体流程如图 3 所示,基于 FLAC^{3D}所提供的二次开发程序接口,利用 VC++6.0 程序语言编写 Z-P 准则的计算程序,并编译成动态链接库文件 Z-P.dll,由主程序进行调用和加载,成功实现 Z-P 准则的 FLAC^{3D}二次开发。

作为自定义本构模型内部注册过程的一部分,需要一个静态的实例,并给出头文件定义的所有私有变量的初始值,一般赋值为 0;Properties()函数给出了本构模型中所有参数名称的字符串格式,以 0 结束;GetProperty()函数是返回各模型参数的值,返回值是按照序列数的顺序进行的,从 1 开始,且这个顺序与 Prop-

erties()函数中给出的字符串顺序相同; SetProperty()函数从输入命令 PROP name= dVal 中获得模型参数的赋值,赋值顺序也要按照 Properties()函数中定义的顺序从 1 开始; Initialize()函数对模型计算中的一些常用变量进行初始化,在此函数中没有定义应变,不能进行应变的引用和修改; Run()函数是整个模型开发中最重要的函数,其在 FLAC^{3D}单元计算的每一个循环、每一子单元中都要调用,主要作用是根据应变增量计算应力增量。

2 木城涧煤矿二槽巷道围岩稳定性数值模拟

2.1 工程概况

木城涧煤矿+250 m 水平西二采区二槽位于千北向斜南翼,为一北倾单斜构造,产状为 N75°~E100°,岩层平均倾角 21°。该采区二槽东翼布置了 2 个工作面、西翼布置了 1 个工作面。东一壁工作面走向长 720 m,倾斜长 110 m,其上、下顺槽基本支护方式是锚杆(索)+金属网支护,锚杆长度 2.0 m,锚索长度 6.2 m,锚杆间排距 900 mm×900 mm,锚索间排距为 2 000 mm×2 700 mm,M5 钢带沿巷道走向布置,压在锚索垫板之上。

2.2 模型建立

建立的数值模型尺寸为 45 m×10 m×48 m,巷道形状为梯形,宽 4.5 m,一边高 3.15 m,另一边高 1.85 m,计算模型的平均倾角为 21°,巷道三维计算模型如图 4 所示。模型的前后和左右边界施加水平约束,即水平位移为零;底部边界固定,即底部边界的水平和垂直位移均为零;顶部边界采用应力边界条件,水平和垂直位移不进行约束。考虑岩体的初始应力主要由上覆岩层的自重引起,埋深 800 m,平均容重为 25 kN/m³,故在顶面上方施加 20.0 MPa 的均布载荷。

巷道开挖之后,其围岩将处于复杂的力学环境中^[8],本模拟方案分别采用 FLAC 二次开发的 Z-P 准则和内置的 M-C 准则对煤层支护巷道进行数值模拟研究,对巷道围岩的塑性破坏区、位移及应力值进行对比分析。模型计算的力学参数见表 1。

表 1 岩体物理力学参数表

Tab.1 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩性	厚度/m	容重/(kN/m ³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
细质粉砂岩	16.0	25.0	8.66	6.59	1.6	13.2	32
细砂岩	5.0	26.5	10.64	9.43	1.5	10.0	32
粉砂岩	3.0	25.5	8.80	4.30	1.5	3.2	32
炭质粉砂岩	2.0	28.0	5.00	2.30	1.2	3.2	27
二槽煤	2.8	13.5	1.67	0.77	0.6	1.2	27
粉砂岩	2.0	6.5	13.40	11.43	1.6	7.6	30

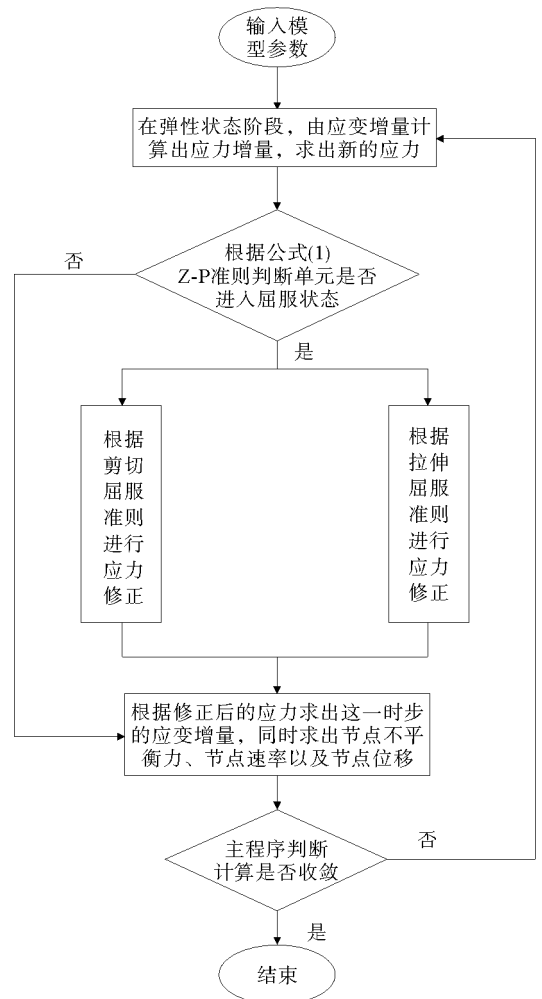


图 3 FLAC^{3D}二次开发程序流程图

Fig. 3 Program flow chart for secondary development of FLAC^{3D}

2.3 数值模拟结果分析

1) 塑性破坏区分析

两种准则计算条件下的巷道围岩破坏区如图 5 所示。由图可知,基于 Z-P 准则计算的巷道围岩破坏区小于基于 M-C 准则计算的破坏区,这与图 1 中两种准则在 π 平面上的分布相吻合,但总体分布规律基本相符。该巷道围岩破坏以剪切破坏为主,图 5(a)中顶板破坏深度约为 1.6~2.0 m,两帮破坏深度约为 0.3~0.5 m,底板破坏深度约为 0.3~1.5 m;图 5(b)中顶板破坏深度约为 1.8~2.2 m,两帮破坏深度约为 0.4~0.7 m,底板破坏深度约为 0.3~1.5 m。

2) 位移分析

两种准则计算条件下的巷道围岩(竖直方向)位移变化情况如图 6 所示。由图 6 可看出,基于 Z-P 准则计算的纵向位移值小于 M-C 准则计算的位移值,但总体位移分布规律基本一致。图 6(a)中顶板的最大位移出现在顶板中部,可达 1.51 cm,底板最大位移出现在左下方,可达 3.65 cm;图 6(b)中顶板的最大位移也出现在顶板中部,约为 1.79 cm,底板最大位移也出现在左下方,约为 3.67 cm。两种准则计算出的位移值相差不大。

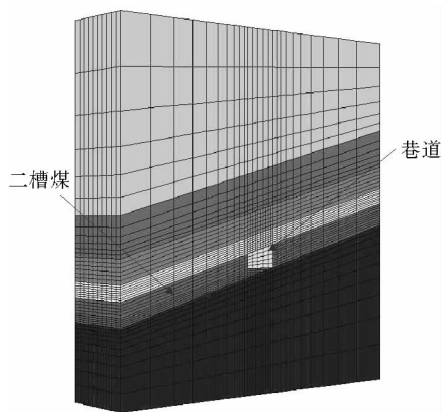


图 4 巷道三维计算模型图

Fig. 4 Three dimensional calculation model of roadway

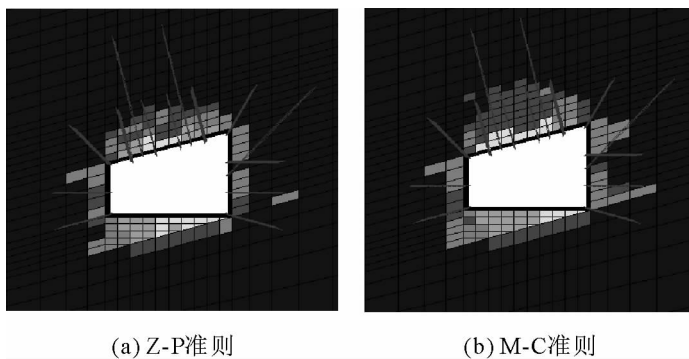


图 5 巷道围岩的破坏区分布图

Fig. 5 Distribution of failure zones in the surrounding rock of roadway

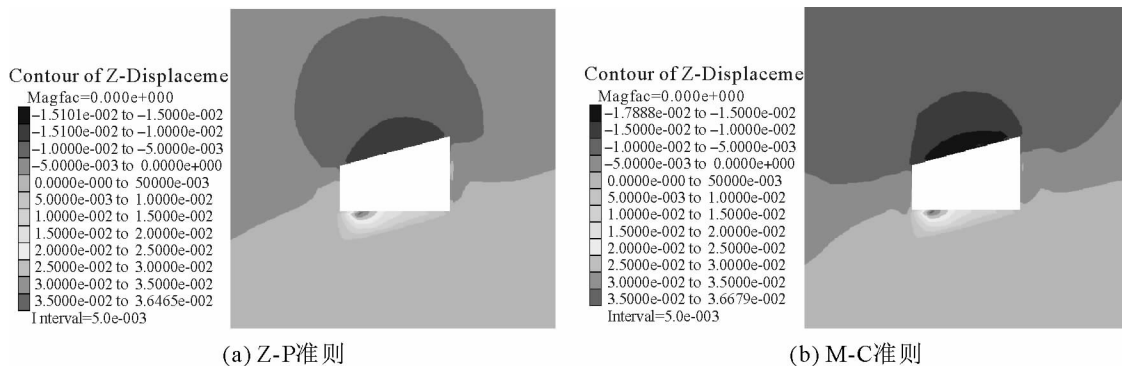


图 6 巷道围岩的竖直方向位移分布图

Fig. 6 Distribution of vertical displacement in the surrounding rock of roadway

3) 应力分析

两种准则计算条件下巷道围岩的垂直应力变化情况如图 7 所示。由图 7 可知,两种准则计算条件下的垂直应力分布规律基本相符,从数值上来说,基于 Z-P 准则计算的应力大于 M-C 准则计算的应力。图 7(a) 中巷道顶板的垂直应力约为 5.5~6.0 MPa,底板的垂直应力约为 4.5~5.0 MPa;图 7(b) 中巷道顶板的垂直应力约为 5.0~5.5 MPa,底板的垂直应力约为 4.0~4.5 MPa。同时可看出基于 M-C 准则计算的垂直应力在巷道右下角存在较大的应力集中,而在相同部位,基于 Z-P 准则的计算结果的应力集中程度明显减小。

由以上分析可知,采用 Z-P 准则数值模拟得到的巷道围岩破坏区、位移、应力分布规律与 M-C 准则基本一致,但是在量值上有一定的差别,具体描述为:Z-P 准则的破坏区、位移比 M-C 准则偏小,垂直应力值比 M-C 准则偏大。由图 1 可看出,Z-P 准则在 π 平面内用修圆公式去逼近 M-C 准则以消除奇异点。屈服曲线在 p - q 子午面上都是光滑曲线,如图 2 所示,这样不仅有利于数值计算,而且在一定程度上使得 Z-P 准则计算的破坏范围与位移较小、应力值却较大。

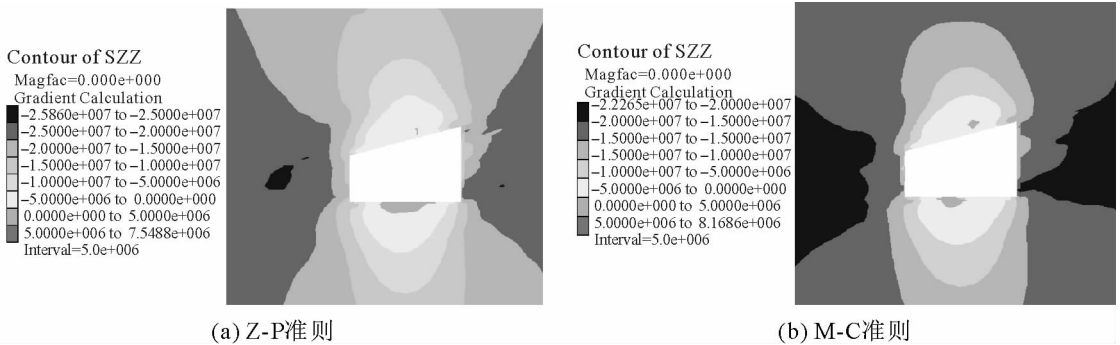


图 7 巷道围岩的垂直应力分布图

Fig. 7 Distribution of vertical stress in the surrounding rock of roadway

3 现场钻孔探测分析

采用 YTJ20 型岩层探测记录仪对巷道顶板的破坏情况进行钻孔探测,该仪器图像分辨率可达 0.1 mm,可用于巷道围岩离层、破裂、错位、岩性变化等情况的探测。在木城涧煤矿二槽西一壁下顺槽距主上山 20 m 处进行钻孔探测,现场巷道围岩的钻孔探测如图 8 所示,探测结果表明,巷道顶板破坏区范围为 2 m 左右,两帮破坏区范围为 0.6 m 左右。其中:顶板在 0~0.5 m 的范围内被一组竖向对称宽裂缝切割,与环状较大离层共存,构成较大的松动破坏区;0.8~1.0 m 范围内存在一条明显的环状离层圈;1.3 m 处存在轻微的离层;1.5~2.0 m 处也存在较大的破碎区。与数值模拟结果相比较可看出,基于 Z-P 准则计算的巷道围岩破坏区范围更接近现场实测数据,而 M-C 准则的计算结果偏于保守。

4 结论

- 1) 基于 FLAC^{3D} 软件提供的二次开发平台,利用 VC++6.0 程序语言将 Z-P 准则编译成动态链接库,成功嵌套到 FLAC^{3D} 中,实现 Z-P 准则的 FLAC^{3D} 二次开发。
- 2) 对木城涧煤矿二槽支护巷道围岩稳定性的数值模拟研究表明:Z-P 准则计算的塑性破坏区、位移比 FLAC 内置的 M-C 准则的计算结果偏小,应力比 M-C 准则偏大,但应力集中现象相对不明显。
- 3) 将现场钻孔探测数据与数值模拟结果进行对比可知,基于 Z-P 准则的计算结果更接近现场实际情况,进一步验证了本研究二次开发 Z-P 准则的正确性和合理性,克服了 M-C 准则因屈服面棱角影响造成的局部应力集中、破坏区域偏大的模拟缺陷,研究成果对地下巷道的稳定性分析具有重要参考价值。

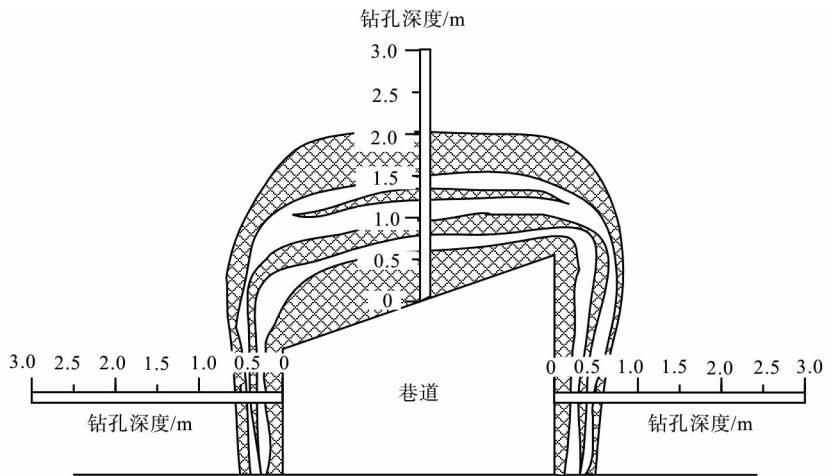


图 8 巷道围岩破坏探测示意图

Fig. 8 The detecting fracture situation of surrounding rock

参考文献:

[1] 陈育民, 刘汉龙, 邓肯-张本构模型在 FLAC^{3D} 中的开发与实现[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2123-2126.
Chen Yumin, Liu Hanlong. Development and implementation of Duncan-Chang constitutive model in FLAC^{3D}[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2123-2126.

[2] 刘姗姗, 赵同彬. 粘弹性广义 Kelvin 模型的 FLAC^{3D} 二次开发[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2010, 29(4): 20-23.
Liu Shanshan, Zhao Tongbin. Secondary development on generalized viscoelastic Kelvin model with FLAC^{3D}[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 29(4): 20-23.

[3] 姚仰平, 胡贺祥, 侯伟. 统一硬化模型在 FLAC^{3D} 中的开发及实现[J]. 工业建筑, 2011, 41(9): 1-7.
Yao Yangping, Hu Hexiang, Hou Wei. Development and implementation of unified hardening model in FLAC^{3D}[J]. Industrial Construction, 2011, 41(9): 1-7.

[4] 赵同彬. 深部岩石蠕变特性试验及锚固围岩变形机理研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2009: 1-15.

[5] Zienkiewicz O C. The finite element method in engineering science[M]. London: McGraw-Hill, 1971: 5-20.

[6] Zienkiewicz O C, Pande G N. Finite elements in geomechanics[M]. London: McGraw-Hill, 1977: 6-14.

[7] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 7-28.

[8] 刘炜, 张睿冲, 杨瑞霞. 深部开采围岩应力及变形数值模拟研究[J]. 金属矿山, 2012(4): 36-39.
Liu Wei, Zhang Ruichong, Yang Ruixia. Numerical simulation on deformation distribution and stress distribution of deep surrounding rock mass[J]. Metal Mine, 2012(4): 36-39.

(责任编辑: 吕海亮)