

考虑水压影响的 M-C 准则修正及数值模拟

张明璐¹, 赵同彬^{1,2}, 姚 旺³

- (1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 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;
3. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要:地下水对岩体工程的稳定性具有重要影响。基于岩石有效应力原理修正 M-C 准则, 以 FLAC^{3D} 中的 M-C 模型为基础, 推导修正模型 H-M-C 中的拉应力屈服函数, 剪切、拉伸势函数, 实现该模型的 FLAC 调用。分别采用 M-C 模型与 H-M-C 模型进行巷道稳定性的数值模拟分析, 对比不同水压作用下模型计算结果的差异。结果表明, H-M-C 本构模型可以较好地用于水压力作用的数值模拟计算, 水压力造成巷道变形增加、塑性区的范围变大, 围岩更易发生破裂。

关键词: M-C 准则; 有效应力; 水压力; 数值计算

中图分类号: TD313 文献标志码: A 文章编号: 1672-3767(2015)02-0019-06

M-C Criterion Modification and Numerical Simulation with the Consideration of Effects of Hydraulic Pressure

Zhang Minglu¹, Zhao Tongbin^{1,2}, Yao Wang³

- (1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, 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;
3. College of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: Groundwater plays an important role in the stability of rock mass engineering. In this paper, M-C criterion under the hydraulic pressure was modified based on effective stress principle of rock; tensile stress yield function, shearing and stretching potential function for the modified H-M-C model were derived based on M-C model in FLAC^{3D} so that the constitutive model could be called by FLAC. Numerical simulations were made on roadway stability with M-C model and H-M-C model respectively and model computation results under different hydraulic pressures were compared. The results show that the constitutive model of H-M-C can be better used for numerical simulation of hydraulic pressure effect when compared with M-C model. The hydraulic pressure brings about larger roadway displacement and plastic zone and rock fracture is easier to occur.

Key words: M-C criterion; effective stress; hydraulic pressure; numerical calculation

自 1900 年 Mohr-Coulomb(M-C)强度准则提出至今, 已有 100 多年的历史, M-C 准则以其表达式简捷、物理意义明确、较为全面地反映岩石强度特性的优势, 广泛应用于岩土工程稳定性计算分析中。但 M-C 准则也有不足之处^[1-2]: ①不能反映中间主应力对屈服和破坏的影响; ②在主应力空间上是一个以空间对角线

收稿日期: 2014-09-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474136); 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: 张明璐(1990—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事岩土力学数值分析研究。E-mail: jnzhangminglu@163.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@163.com

或静水压力线为对称轴的六角锥体,棱角的存在给数值计算带来了很大的困难;③没有从岩石的破坏机理上考虑岩石的破坏,过多地简化了赋存环境对岩石强度的影响。许多学者针对 M-C 准则的不足对其进行修正,陶帅等^[3]对 M-C 模型二次开发,使其既考虑拉伸截断又能反映屈服函数的非线性特征;乐家根等^[4]针对 M-C 模型没有考虑中间主应力对材料力学性质影响的问题提出三维应力状态下修正的模型;赵同彬等^[5]将修正的 M-C 模型与 B-K 锚固模型结合建立了适应性更广的粘弹塑性岩体本构模型。考虑周围环境对岩石强度影响的研究尚不多见,岩体作为自然界产物具有赋存地质因子的特性,水的存在会降低岩石的弹性极限^[6],使岩石易于变形,但是对于水在多大程度上影响岩石的变形与屈服强度还缺乏系统的认识。本研究考虑地下水对岩石强度的影响,修正 M-C 准则,推导基于水压力作用的 Hydraulic-Mohr-Coulomb(H-M-C)本构模型,并通过算例与 M-C 模型进行比较,验证 H-M-C 模型的正确性及适用性。

1 考虑水压力作用的 M-C 模型修正

影响岩土工程尤其是地下洞室稳定性的因素既有洞室的形状、尺寸、埋深等,还与岩体的完整性、结构面的产状、地下水的活动状况有关。研究^[7-8]表明,地下水对岩体工程的稳定性具有重要影响,甚至水对岩石造成的损伤会比外力造成的后果更为严重。水对岩石的作用形式有两种:动水压力和静水压力。动水压力是空间位置和时间的矢量函数,对岩体产生切向的推力以降低岩体的抗剪强度。在动水压力作用下,岩体中某些接触面上的颗粒被渗透水冲刷转移,使岩体产生渗透变形。静水压力是空间位置和时间的标量函数,巷道施工中遇到静水压力的情况偏多,受静水压力的影响,岩体的有效应力减小,在降低岩石屈服极限的同时降低岩石的抗剪强度,如图 1 所示,水压力使得莫尔应力圆向左移动,更易达到破坏状态。本文着重研究静水压力作用对岩石及工程稳定性的影响程度。

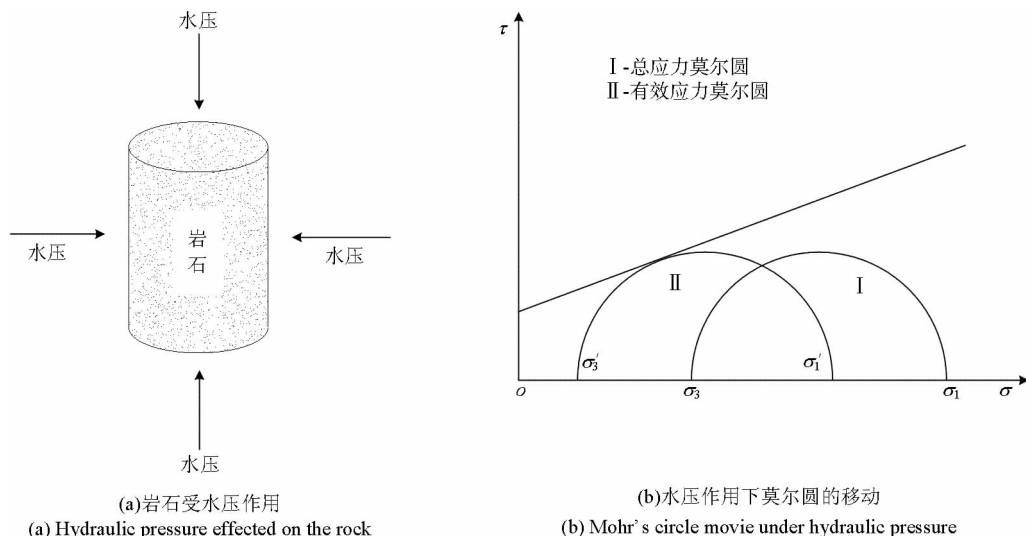


图 1 水压力对应力状态的影响

Fig. 1 Effects of hydraulic pressure on the stress state

1923 年 Terzaghi 在研究饱和沙土地表沉降固结问题中提出有效应力原理,指出有效应力等于上层总压力减去孔隙水压力。1941 年 Biot 借鉴该思路,提出孔隙介质固体变形的本构方程,随后 Robinson 等进一步研究^[9]指出岩石有效应力为:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij}; \tag{1}$$

即

$$\begin{cases} \sigma' = \sigma - \alpha p \\ \tau' = \tau \end{cases} \tag{2}$$

其中: σ'_{ij} 为有效应力张量; σ_{ij} 为总应力张量; α 为等效孔隙压力系数; p 为静水压力。 α 取决于岩石孔隙和裂

隙的发育程度, $0 \leq \alpha \leq 1$, 一般认为岩石无裂隙存在时, α 的大小等于孔隙率的大小; 当岩石的裂隙较多, 孔隙较大时 $\alpha = 1 - \frac{K}{K_s}$, K 为固体骨架的体积模量, K_s 为固体颗粒的体积模量^[9-10]。岩体裂隙中静水压力 p 的方向垂直指向裂隙壁面, $p = \gamma(H - Z)$; γ 为地下水重度, 一般取 10 kN/m^3 ; H 为地下水水头, Z 为位置高程, H, Z 的大小均可通过地质勘测得到。

M-C 强度准则为:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c; \quad (3)$$

其中: c 为内聚力, φ 为内摩擦角。

采用主应力表达:

$$f = (\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi - 2c \cos \varphi. \quad (4)$$

当考虑水压力作用时, 式(3)和式(4)分别变为:

$$\tau = c + (\sigma - \alpha p) \tan \varphi; \quad (5)$$

$$f = (\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi + 2\alpha p \sin \varphi - 2c \cos \varphi. \quad (6)$$

令 $c_w = c - \alpha p \tan \varphi$ 则可写成:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c_w. \quad (7)$$

式(7)表明在水压力的影响下, 岩石的抗剪强度减少了 $\alpha p \tan \varphi$, 单轴抗压强度减少了 $\frac{2\alpha p \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$ 。

根据式(4)可知, 水压力作用时修正的本构模型 H-M-C 中的屈服函数为:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} - 2\alpha p \sqrt{N_\varphi} \tan \varphi. \quad (8)$$

FLAC 中的 M-C 屈服准则又考虑了拉伸破坏, 因此拉应力屈服函数为:

$$f^t = \sigma^t - \sigma_3 + \alpha p. \quad (9)$$

其中: σ^t 为材料的抗拉强度。

对于剪切—拉应力处于边界的情况, M-C 模型的流动法则通过定义三维应力空间中边界附近的混合屈服函数来确定。采用同样的方法, H-M-C 模型中的混合屈服函数为:

$$h = -(\sigma^t - \sigma_3) + [\sigma_1 - N_\varphi \sigma^t + 2(c - \alpha p \tan \varphi) \sqrt{N_\varphi}] \beta. \quad (10)$$

其中: $N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$, $\beta = \sqrt{1 + N_\varphi^2} + N_\varphi$ 。

当发生剪切破坏时, 用剪切势函数 g^s 确定的非关联流动法则, 应力点回归到 $f^s = 0$ 的曲线上; 当发生拉应力破坏时, 用拉伸势函数 g^t 确定的关联流动法则, 应力点回归到 $f^t = 0$ 的曲线上, 如图 2 所示。考虑静水压力作用时, g^s, g^t 两函数的表达式为:

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi - \alpha p (1 - N_\phi); \quad (11)$$

$$g^t = -\sigma_3 + \alpha p. \quad (12)$$

其中: $N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$, ϕ 为剪胀角。

2 H-M-C 模型的数值模拟验证

根据以上推导, 采用 C++ 程序语言根据 FLAC 自带模型源代码, 在 Visual Studio 2010 的环境中编译考虑水压力影响的 H-M-C 模型。模型开发在原有 M-C 模型的基础上, 主要修改头文件与源文件, 增加等效孔隙压力系数 α , 静水压力 p 等变量

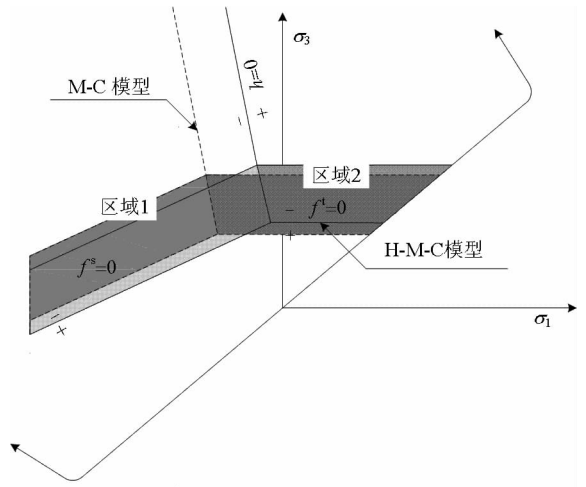


图 2 流动法则区域的对比

Fig. 2 Two flow rule areas and their comparison

及进行迭代作用的中间变量。H-M-C 模型主要功能是应用公式(8)~(12)对结构状态进行塑性判断与修正,流程如图 3 所示。

为了验证修改模型的正确性及其适用性,建立圆形巷道模型。模型大小为 10 m×8 m×10 m,岩层均一,孔隙、裂隙不发育。根据文献[11-12]采用力学参数具体见表 1。底面边界固定,四周固定水平位移,上方施加 2.5 MPa 的压力,模型如图 4。

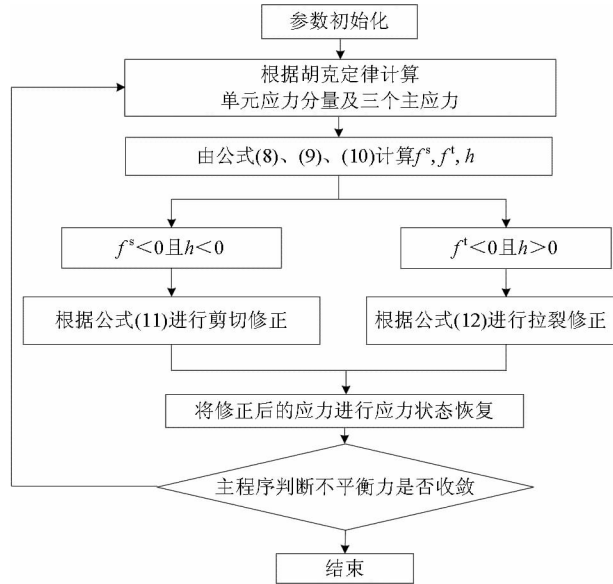


图 3 模型计算流程图

Fig. 3 The model calculation flow chart

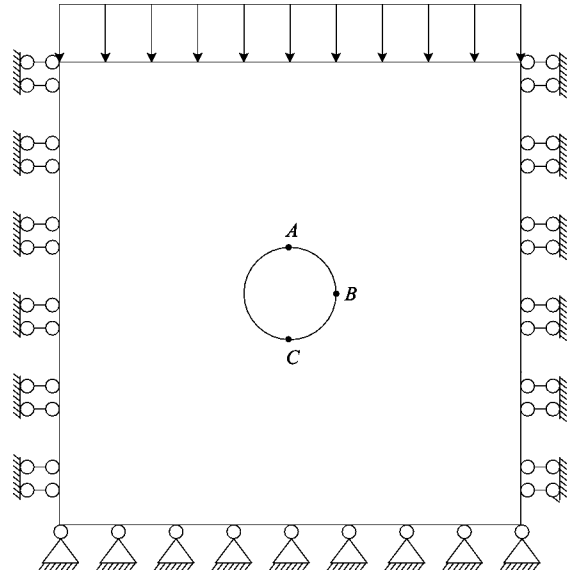


图 4 计算模型示意图

Fig. 4 Calculation model

分别采用 M-C 模型、H-M-C 模型分别进行计算,并选取巷道周边的三个点为监测点(图 4 中 A、B、C 三点),记录位移变化。图 5、图 6 为 M-C 模型与 H-M-C 模型水压力 $p=0$ 时的计算结果对比图。由图可以看出,二者产生的位移几乎完全一致,最大相对误差也仅为 0.17%,塑性区的破碎区范围相同,修改后的模型存在部分单元当前没有发生剪切破坏,两个模型计算的结果吻合情况较好,验证了 H-M-C 模型的正确性。

表 1 模型参数表

Tab. 1 Model parameters

弹性模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	等效孔隙压力系数	静水压力/MPa
2	0.3	0.82	30	1.0	0.966	0~0.6

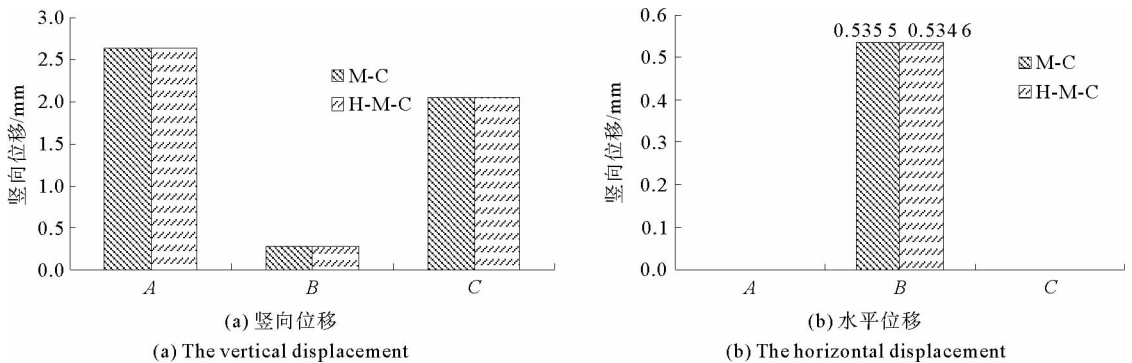


图 5 位移对比曲线

Fig. 5 Comparison of displacement curve

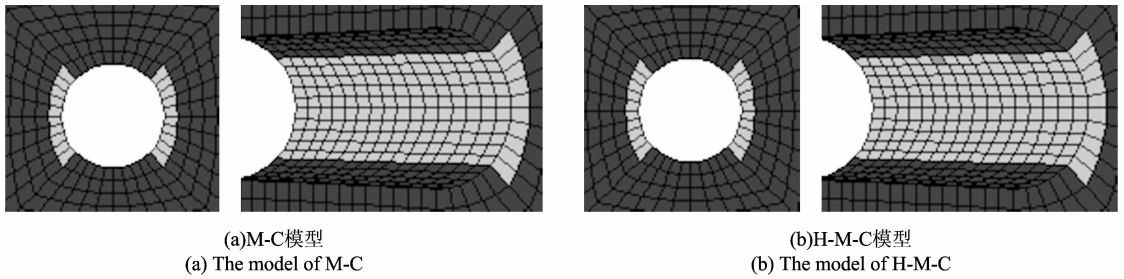


图 6 塑性区对比图

Fig. 6 Comparison of the plastic zone

保持其他条件不变,采用 H-M-C 模型,改变水压力 p 的值,依次改为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 MPa, 研究不同水压力作用下巷道的位移变化及塑性区范围,计算结果如图 7、图 8 所示。结果表明,水压力对巷道的变形、塑性区有显著影响。随着水压力 p 的增加,监测点的位移不断增加,当 $p=0.6$ MPa 时,竖向位移增加了 15.3%,水平位移则增加了 97.4%,接近为原来位移的两倍,与竖向位移相比,水压力对水平位移的

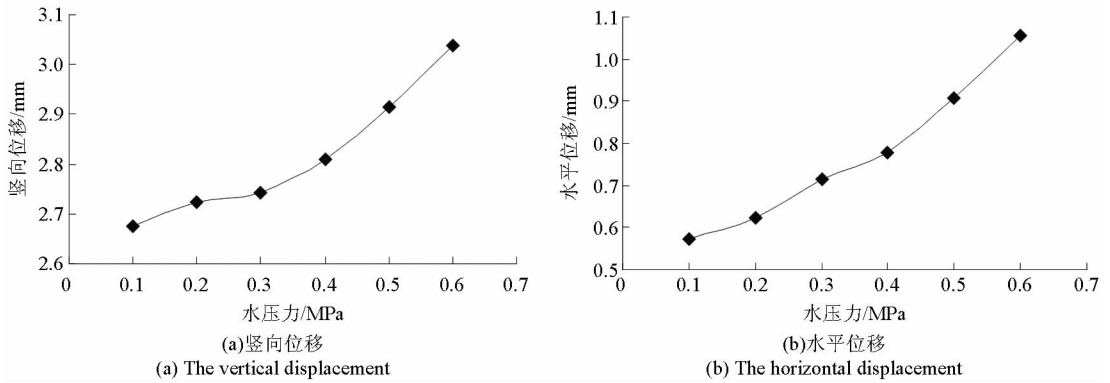


图 7 不同水压作用下位移变化图

Fig. 7 Change process of the displacement

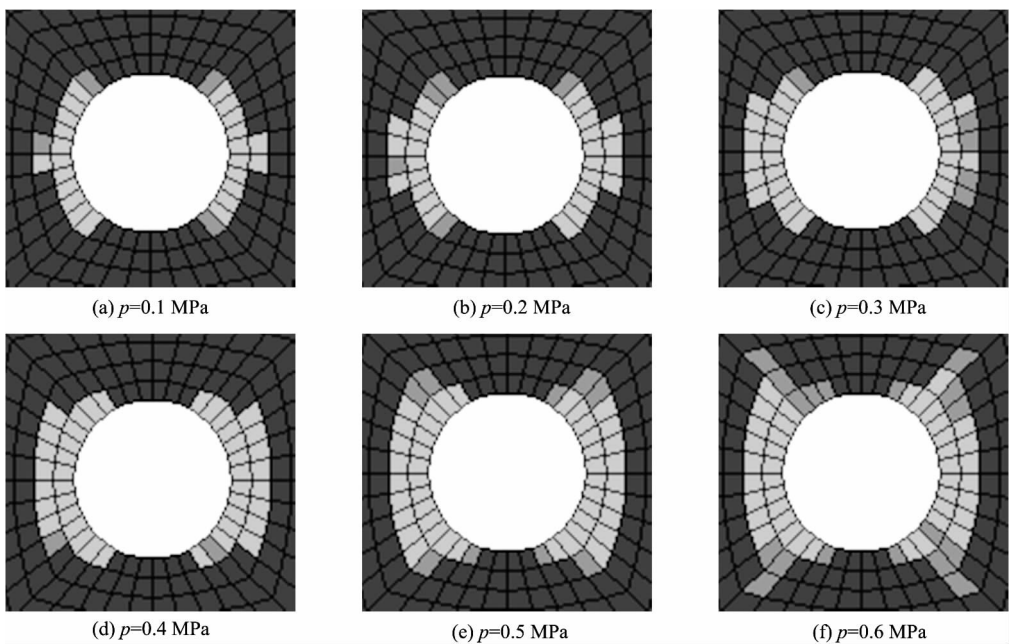


图 8 不同水压作用下塑性区变化图

Fig. 8 Change process of the plastic zone

作用效果更加显著。同时塑性区的范围也不断向四周扩展,这是由于水压力造成颗粒之间的压应力减小,降低了岩石的抗剪强度,促使岩体更易发生破坏。

3 结论

1) 鉴于传统 M-C 准则数值模拟分析中很少考虑水压力作用的情况,对 M-C 准则进行了修正。根据岩石有效应力原理,推导了水压力作用下基于 M-C 准则的屈服函数和塑性流动法则,修正后的准则表达为 $\tau = c + (\sigma - \alpha p) \tan \varphi$, 水压的影响项为 $c_w = c - \alpha p \tan \varphi$ 。

2) 依据 FLAC 所提供的二次开发接口,编写了修正准则的数值计算表达形式,实现 FLAC 的调用计算,并通过与 M-C 模型计算结果对比,验证了 H-M-C 模型的正确性。水压作用下,巷道的变形和塑性区更为显著,围岩更易发生破裂,在数值模拟中应考虑地下水作用的影响。

参考文献:

- [1] 张学言, 闫澍旺. 岩土塑性力学基础[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004: 70-72.
- [2] 张玉宝, 赵同彬, 谭云亮, 等. 基于 Z-P 准则的煤巷围岩稳定性数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2014, 33(2): 75-80.
Zhang Yubao, Zhao Tongbin, Tan Yunliang, et al. Numerical study on the stability of wall rock in coalroad based on Z-P criterion[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2014, 33(2): 75-80.
- [3] 陶帅, 王学滨, 潘一山, 等. 基于摩尔-库伦模型的非线性本构模型的开发及其在应变局部化中的应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 403-407.
Tao Shuai, Wang Xuebin, Pan Yishan, et al. Development of nonlinear constitutive model based on Mohr-Coulomb constitutive model and its application to strain localization[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 403-407.
- [4] 乐家根, 曹平, 蒲成志, 等. 广义摩尔库伦模型及其在 FLAC^{3D} 中的实现[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(3): 112-116.
Yue Jiagen, Cao Ping, Pu Chengzhi, et al. The realization of generalized Mohr-Coulomb model in FLAC^{3D}[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(3): 112-116.
- [5] 赵同彬, 姜耀东, 张玉宝, 等. 黏弹塑性 BK-MC 锚固模型二次开发及工程应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 881-886.
Zhao Tongbin, Jiang Yaodong, Zhang Yubao, et al. Secondary development and engineering application of viscoelasto-plastic BK-MC anchorage model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 81-886.
- [6] 孟召平, 潘结南, 刘亮亮, 等. 含水量对沉积岩力学性质及其冲击倾向性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 2637-2643.
Meng Zhaoping, Pan Jienan, Liu liangliang, et al. Influence of moisture contents on mechanical properties of sedimentary rock and its bursting potential[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 637-2643.
- [7] 康红普. 水对岩石的损伤[J]. 水文地质工程地质, 1994(3): 9-41.
Kang Hongpu. The water damage on the rocks[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1994(3): 9-41.
- [8] 李根, 唐春安, 李连崇. 水岩耦合变形破坏过程及机理研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(5): 593-619.
Li Gen, Tang Chunan, Li Lianchong. Water-rock coupling deformation failure process and mechanism are reviewed[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(5): 93-619.
- [9] 吴海. 有效应力规律的细观机理的数值实验研究[D]. 太原理工大学, 2003: 4-10.
- [10] 唐洪祥, 李锡夔. 饱和多孔介质中动力渗流耦合分析的 Biot-Cosserat 连续体模型与应变局部化有限元模拟[J]. 工程力学, 2007, 24(9): 8-13.
Tang Hongxiang, Li Xikui. The Biot-Cosserat continuum model for coupled hydro-dynamic analysis in saturated porous media and finite element simulation of strain localization[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(9): 8-13.
- [11] 韩彦辉, 刘波. 饱和圆柱岩石试件孔隙弹性响应的 FLAC 数值模拟[C]//第九届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2006: 236-243.
- [12] 王军祥, 姜培男. 孔隙水压力作用的弹塑性 CPPM 算法及隧道围岩力学参数反演[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(3): 525-538.
Wang Junxiang, Jiang Annan. Elastoplastic CPPM algorithm and mechanical parameters inversion of tunnel surrounding rock under the action of pore water pressure[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(3): 525-538.