

尾砂胶结充填体蠕变模型及在 FLAC^{3D} 二次开发中的实验研究

赵 奎^{1,2}, 何 文^{1,2}, 熊良宵³, 杨 欣⁴, 王晓军⁵

(1. 江西理工大学 工程研究院, 江西 赣州 341000; 2. 江西理工大学 钨资源高效开发及应用技术教育部工程研究中心, 江西 赣州 341000;
3. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 4. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030;
5. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 关于岩石蠕变特性的研究已有诸多成果, 但对胶结充填体的蠕变特性还缺乏系统地研究。在室内充填体单轴蠕变试验的基础上, 利用 Hoek-Kelvin 模型表征充填体的蠕变特性, 运用粒子群优化算法, 对选用的蠕变模型的参数进行辨识, 并研究各蠕变参数对应力水平的敏感程度。研究结果表明, 在不同分级应力水平加载下, 弹性模量 E_H 和黏滞系数 η 变化较小, 而参数 E_K 对应力水平变化较敏感。利用 FLAC^{3D} 软件二次开发所建立的蠕变模型, 用开发的模型进行分级加载蠕变的数值模拟, 计算结果与试验数据吻合。

关 键 词: 胶结充填体; 蠕变模型; 粒子群优化算法; FLAC^{3D}

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Testing study of creep model for tailing cemented backfill and its secondary development based on FLAC^{3D}

ZHAO Kui^{1,2}, HE Wen^{1,2}, XIONG Liang-xiao³, YANG Xin⁴, WANG Xiao-jun⁵

(1. Engineering Research Institute, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;
2. Engineering Research Center of High-efficiency Development and Application Technology of Tungsten Resources of Ministry of Education, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 3. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China; 4. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
5. School of Resources & Environment Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: Great many results about the creep properties of rock have been achieved, while few reports on the cemented backfill's creep characters were obtained. In this paper, creep property of cemented backfill is characterized by Hoek-Kelvin model. Cemented backfill creep experiments are firstly conducted in the laboratory, then the parameters of Hoek-Kelvin creep model are identified using particle swarm optimization algorithm. Meanwhile, the sensitivity of creep parameters to the stress level is studied. Results show that the numerical value of E_H and η vary little at different loading stress levels, and E_K is very sensitive to the change of loading stress level. The proposed creep model for backfill is developed with the software FLAC^{3D}; and it has been used to numerically simulate multi-stage loading on cemented backfill. The numerical results agree well with the experimental ones.

Key words: cemented backfill; creep model; particle swarm optimization algorithm; FLAC^{3D}

1 前 言

由于在控制地压、提高资源回收率以及促进矿山环保等诸多方面具有显著的优越性, 充填采矿方法的应用日益广泛^[1]。近年来, 研究人员在胶结充填体强度与充填材料配比、充填体力学性质、充填

体稳定性分析等方面进行了大量的研究, 如通过正交试验研究影响尾砂充填体强度的因素^[2]; 进行各种不同应力状态下充填体破坏能耗试验研究^[3]; 通过试验建立充填体损伤模型^[4]; 研究布筋尾砂胶结充填体顶板力学性状^[5], 但在胶结充填体蠕变的研究方面鲜见报道。因此, 通过试验建立充填体蠕变

模型, 不仅具有一定的理论价值, 对工程实际中充填体稳定性计算分析也是十分必要的。

关于岩石和土的蠕变模型方面已有较多研究成果^[6-7], 就岩石蠕变模型而言, 材料的力学参数通常是随时间等因素而变化的^[6]。对于非定常参数蠕变模型, 文献[8]以西原模型为基础, 从试验数据出发, 运用非线性最小二乘法求得了不同应力水平下和不同时刻的蠕变参数; 文献[9]通过引入参数初始黏滞系数、参考时间、参考应力, 建立了非定常的修正 Burgers 模型; 文献[10]通过对现有的非线性理论流变力学模型系统的总结, 归纳出处理参数非线性的 3 种方式。

本文在岩石蠕变模型研究成果的基础上, 根据充填体蠕变试验的结果, 运用粒子群优化算法, 对蠕变模型的蠕变参数进行了辨识, 研究了各蠕变参数对应力水平的敏感程度, 提出并建立了充填体蠕变模型, 应用 FLAC^{3D} 软件二次开发了充填体蠕变模型, 对开发的模型进行了蠕变试验的数值模拟, 模拟结果与试验结果对比表明建立的蠕变模型是可行的, 可为工程实际中充填体矿柱等蠕变计算提供参考依据。

2 非定常参数蠕变方程

2.1 蠕变试验

试验制备了配比为 1:20 (水泥与分级尾砂重量比) 的充填体试件, 水泥为 32.5 级普通硅酸盐水泥, 分级尾砂取自武山铜矿现场充填用尾砂, 试件为圆柱形, 尺寸 (直径×高) 为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 如图 1 所示。在试件高度方向的中央粘贴垂直和水平方向的型号为 BX120-6AA 应变片, 用以测量充填体试件应变, 应变仪为 BZ2205 型程控静态电阻应变仪。

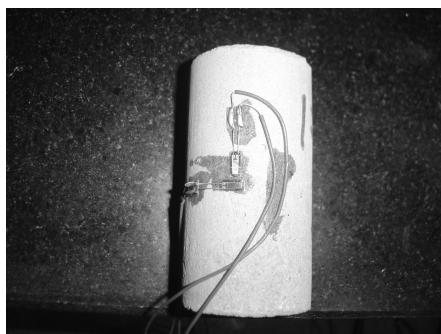


图 1 试件及应变片

Fig.1 Specimen and strain gauges

蠕变试验的加载方式通常有单级加载、分级增量加载, 由于地下开采中充填体如矿柱等, 常为单

轴压缩状态, 这里采用单轴分级增量循环加载卸载方式。这种方式吸取了分级增量加载方式的优点, 并克服其缺点, 能全面反映材料蠕变的加卸载过程^[11]。试验前测得试件的单轴抗压强度约 1.5 MPa, 取强度的 80% 即 1.2 MPa 作为最后一级加载值, 当位移增量小于 0.001 mm/h 时, 施加下一级荷载。由于充填体材料强度较低, 试验采用自制的简易分级增量循环加载卸载装置如图 2 所示, 试件所受实际压力由压力计读出。

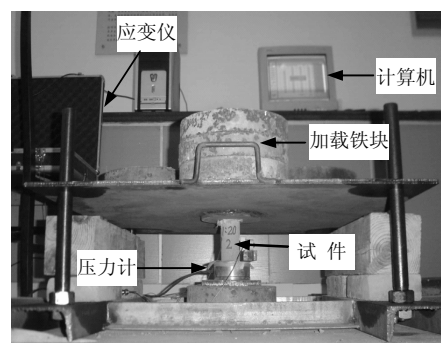


图 2 分级增量加卸载蠕变试验现场

Fig.2 Creep test under step loading and unloading

2.2 蠕变模型

试验结果如图 3 所示, 充填体试件有显著的瞬弹变形, 而且变形随时间的变化基本符合指数形式规律, 可以采用 Hoek-Kelvin (H-K) 体的三元件模型 (见图 4), 分析不同应力水平下的蠕变试验结果^[12-13]。

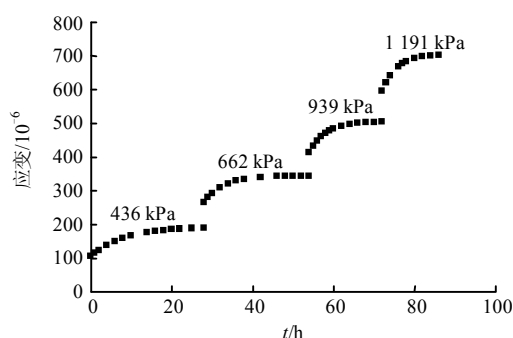


图 3 不同应力水平下试件蠕变曲线

Fig.3 Creep curves of shale under different stress levels

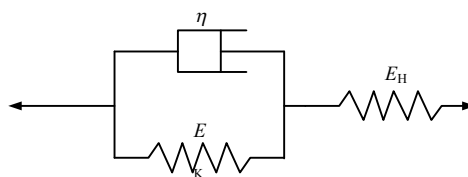


图 4 H-K 蠕变模型示意图

Fig.4 Sketch of H-K creep model

H-K 体的三元件模型的蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_H} + \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - \exp \left(-\frac{E_K}{\eta} t \right) \right) \quad (1)$$

式中: σ 为分级加载的应力, 为一常量; ε 为与时间有关的应变; E_H 、 E_K 分别为 H 体和 K 体的弹性参数; η 为材料的黏滞系数; t 为蠕变时间。

2.3 蠕变方程的建立

粒子群算法是一种智能优化方法, 具有简单易实现且收敛快、易与其他算法结合等优点, 可用于求解大量非线性、不可微和多峰值的复杂优化问题, 广泛应用于岩土工程^[14-17], 尤其是在岩石蠕变参数识别中广泛使用^[18-19]。

应用粒子群算法进行蠕变方程参数反演的关键是建立适应度函数, 根据蠕变公式 (1) 和分级加载蠕变试验数据, 建立适应度计算公式:

$$f = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\varepsilon(j) - \frac{\sigma}{E_H} - \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - \exp \left(-\frac{E_K t(j)}{\eta} \right) \right) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: N 为 σ 应力水平下应变监测次数; ε_j 为 σ 应力水平下第 j 次应变监测值; E_H 、 E_K 、 η 分别为待反演参数, 其余符号意义同前。

采用粒子群优化算法参数反演的结果见表 1。

从表中可以看出, 运用 H-K 模型拟合的充填体蠕变方程相关系数均在 0.97 以上, 表明该模型拟合充填体蠕变方程式是合适的; 在不同分级应力水平加载下, 参数 E_H 、 η 变化较小, 表明对应力水平变化不敏感; 参数 E_K 随应力水平变化较大, 表明该参数对应力水平变化较敏感。

表 1 粒子群优化算法反演结果
Table 1 Particle swarm optimization algorithm inversion results

σ/kPa	E_H/GPa	E_K/GPa	$\eta/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	适应度 f	相关系数 R
436	4.174	4.742	41.028	0.000 68	0.993
662	3.674	8.487	41.056	0.001 05	0.976
939	3.923	10.238	42.115	0.000 75	0.988
1191	3.711	11.006	40.208	0.001 50	0.981

为了更好地表征蠕变规律和应用工程实际, 参考文献[10, 15]采用式 (3) 对表 1 中反演的参数 E_K 进行回归拟合:

$$E_K = A(1 - \exp(-B\sigma + C)) \quad (3)$$

式中: A 、 B 、 C 分别为待拟合常数。

拟合的数值 $A = 11.408 \text{ GPa}$, $B = 0.003 59 \text{ kPa}^{-1}$, $C = 1.025$, 相关系数 $R = 0.999 8$ 。 E_H 和 η 变化较小, 可直接求平均确定它们的取值, $E_H = 3.871 \text{ GPa}$, $\eta = 41.102 \text{ GPa}\cdot\text{h}$ 。

3 蠕变模型在 FLAC^{3D} 软件中的实现

3.1 二次开发环境

FLAC^{3D} 软件自定义本构模型开发必须使用 C++ 语言, 且编译成 DLL 文件 (动态链接库), 动态链接库文件通过 model load 命令加载。

3.2 广义 Kelvin 模型差分形式

二次开发过程中, 需将式 (1) 一维蠕变本构方程扩展成为三维差分形式, 文献[18]给出了具体推导过程, 本文略去推导, 直接列出广义 Kelvin 模型最终的三维差分增量形式方程:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sigma_m \delta_{ij} + S_{ij} ; \quad \sigma_m^N = \sigma_m^O + K \Delta \varepsilon_{kk} \\ e_{ij}^{k,N} &= \frac{1}{A} [(S_{ij}^N + S_{ij}^O) \Delta t - B e_{ij}^{k,O}] \\ S_{ij}^N &= \frac{1}{a} \left[\Delta e_{ij}^k + \left(\frac{B}{A} + 1 \right) e_{ij}^{k,O} + b S_{ij}^O \right] \\ A &= 1 + \frac{G^k \Delta t}{2\eta} ; \quad B = \frac{G^k \Delta t}{2\eta} - 1 \\ a &= \frac{1}{2G^e} + \frac{\Delta t}{A} ; \quad b = \frac{1}{2G^e} - \frac{\Delta t}{A} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: σ_{ij} 为应力张量; σ_m 为球应力张量; S_{ij} 为偏应力张量; δ_{ij} 为 Kronecker 符号; σ_m^N 为新的球应力张量; σ_m^O 为旧的球应力张量; K 为体积模量; $\Delta \varepsilon_{kk}$ 为应变增量的第一不变量; $e_{ij}^{k,N}$ 为新的偏应变张量; $e_{ij}^{k,O}$ 为旧的偏应变张量; Δt 为每一迭代步的蠕变时间增量; S_{ij}^N 为新的偏应力张量; S_{ij}^O 为旧的偏应力张量; Δe_{ij}^k 为偏应变张量的增量; G^k 为 Kelvin 体剪切模量; G^e 为 Hoek 体剪切模量; η 为黏滞系数。

3.3 充填体模型

通过对室内充填体单轴蠕变试验的研究, 得到充填体的蠕变方程, 在 FLAC^{3D} 软件中实现式 (5)。

$$E_K = 11.408(1 - \exp(-0.003 59\sigma + 1.025)) \quad (5)$$

本文通过引入应力强度概念来实现软件自动识别加载应力水平, 定义应力强度为

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为第一、第二、第三主应力。

由经典弹塑性力学可得式 (7) 计算应力强度。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} ; S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij} \\ \sigma_m &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

FLAC^{3D} 软件中通过 *ps->stnS* 指针读取应力张量的各分量, 根据式 (7) 则可求出应力强度 σ_i 。由应力强度的定义可知, 单轴试验时 $\sigma_i = \sigma_1$ 。得到应力强度 σ_i 后, 则可根据式 (5) 计算 E_K 。因此, 本文在 H-K 蠕变模型基础上, 通过引入应力强度概念, 实现了软件自动的读取应力加载水平, 即在 FLAC^{3D} 软件中实现了蠕变参数随应力水平变化而变化的充填体蠕变模型。

3.4 开发模型的验证

需要注意的是蠕变参数的换算问题。式 (8) 分别是 H-K 模型的一维本构和三维张量形式本构:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sigma}{E_H} + \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - \exp \left(-\frac{E_K t}{\eta} \right) \right) \\ \varepsilon_1 &= \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G^e} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G^k} \left[1 - \exp \left(-\frac{G^k}{\eta_1} t \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

为了使三维张量模型和一维模型相对应, 将三维张量模型简化为

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{9K} + \frac{\sigma_1}{3G^e} + \frac{\sigma_1}{3G^k} \left[1 - \exp \left(-\frac{G^k}{\eta_1} t \right) \right] \quad (9)$$

将式 (8) 中一维本构和式 (9) 中三维本构比较, 并结合弹性模量和体积模量与剪切模量定义可得

$$E_K = 3G^k ; \quad \eta = 3\eta_1 ; \quad \frac{1}{E_H} = \frac{1}{9K} + \frac{1}{3G^e} \quad (10)$$

运用 FLAC^{3D} 软件模拟单轴蠕变时可参考式 (10) 转换参数, 即可实现软件中三维本构和一维理论公式的对应。

进行单轴分级加载蠕变试验模拟的步骤如下:

①通过模型调用命令, 导入生成的动态链接库文件来导入蠕变模型。

②设置蠕变分析的参数并调整蠕变时间步长, 时间步长的设定必须满足差分收敛的步长要求。

③施加分级载荷和设置约束条件, 每一分级加载需先进行弹性部分计算以得到瞬时变形, 再进行蠕变计算。

数值模拟计算结果和试验结果如图 5 所示。图

中, 计算结果与试验结果吻合, 其中误差的主要是试验时弹性模量的差异性, 而数值模拟时弹性模量取的是均值。

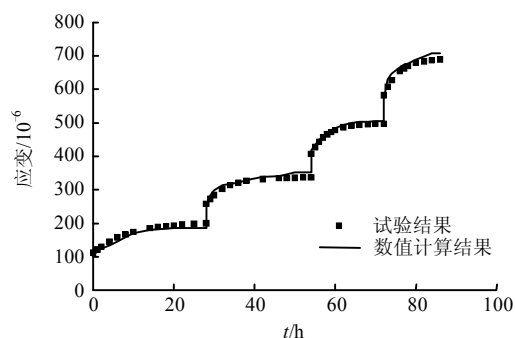


图 5 数值模拟与试验结果对比
Fig.5 Comparison between the model's calculation and test results

4 结 语

通过运用粒子群优化算法, 对室内充填体蠕变试验数据进行了蠕变参数的辨识, 发现在不同应力状态下蠕变参数 E_H 、 η 变化较小, 蠕变参数 E_K 对蠕变应力水平变化十分敏感。提出了充填体蠕变模型, 并确定了蠕变模型中的参数, 利用 FLAC^{3D} 软件二次开发了所建立的蠕变模型, 用开发的模型进行了分级加载蠕变的数值模拟, 计算结果与试验数据吻合。

参 考 文 献

- [1] 周爱民. 矿山废料胶结充填[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [2] 李一帆, 张建明, 邓飞, 等. 深部采空区尾砂胶结充填体强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 865—868.
LI Yi-fan, ZHANG Jian-ming, DENG Fei, et al. Experiment study on strength characteristics of tailing cement backfilling at deep-seated mined-out area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(6): 865—868.
- [3] 邓代强, 高永涛, 吴顺川, 等. 复杂应力下充填体破坏能耗试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 737—742.
DENG Dai-qiang, GAO Yong-tao, WU Shun-chuan, et al. Experimental study of destructive energy dissipation properties of backfill under complicated stress condition[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(3): 737—742.
- [4] 刘志祥, 李夕兵, 戴塔根, 等. 尾砂胶结充填体损伤模型及与岩体的匹配分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 27(9): 1442—1446.

- LIU Zhi-xiang, LI Xi-bing, DAI Ta-gen, et al. On damage model of cemented tailings backfill and its match with rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 27(9): 1442—1446.
- [5] 赵奎, 王晓军, 刘洪兴, 等. 布筋尾砂胶结充填体顶板力学性状试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 9—15.
- ZHAO Kui, WANG Xiao-jun, LIU Hong-xing, et al. Experimental study of mechanical behaviors of cemented tailings backfill roof with reinforcement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(1): 9—15.
- [6] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081—1106.
- SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1081—1106.
- [7] 卢萍珍, 曾静, 盛谦. 软黏土蠕变试验及其经验模型研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1041—1044.
- LU Ping-zhen, ZENG Jing, SHENG Qian. Creep tests on soft clay and its empirical models[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(4): 1041—1044.
- [8] 阎岩, 王思敬, 王恩志. 基于西原模型的变参数蠕变方程[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3025—3035.
- YAN Yan, WANG Si-jing, WANG En-zhi. Creep equation of variable parameters based on Nishihara model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3025—3035.
- [9] 熊良宵, 杨林德, 张尧. 岩石的非定常 Burgers 模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(2): 679—684.
- XIONG Liang-xiao, YANG Lin-de, ZHANG Yao. Non-stationary Burgers model for rock[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2010, 41(2): 679—684.
- [10] 夏才初, 金磊, 郭锐. 参数非线性理论流变力学模型研究进展及存在的问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 454—463.
- XIA Cai-chu, JIN Lei, GUO Rui. Nonlinear theoretical rheological model for rock: A review and some problems[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(3): 454—463.
- [11] 袁海平, 曹平, 万文, 等. 分级加卸载条件下软弱复杂矿岩蠕变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1575—1581.
- YUAN Hai-ping, CAO Ping, WAN Wen, et al. Study on creep rules of soft and intricate ore-rock under step load and unload[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(8): 1575—1581.
- [12] 丁志坤, 吕爱钟. 岩石黏弹性非定常蠕变方程的参数辨识[J]. 岩土力学, 2004, 29(增刊 1): 37—40.
- DING Zhi-kun, LÜ Ai-zhong. Parameter identification of non-stationary creep equation of rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 29(Supp. 1): 37—40.
- [13] 吕爱钟, 丁志坤, 焦春茂, 等. 岩石非定常蠕变模型辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 16—21.
- LÜ Ai-zhong, DING Zhi-kun, JIAO Chun-mao, et al. Identification of non-stationary creep constitutive models of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(1): 16—21.
- [14] 陈云敏, 魏新江, 李育超. 边坡非圆弧临界滑动面的粒子群优化算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1443—1449.
- CHEN Yun-ming, WEI Xin-jiang, LI Yu-chao. Locating non-circular critical slip surfaces by particle swarm optimization algorithm[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(7): 1443—1449.
- [15] 高玮. 基于粒子群优化的岩土工程反分析研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 795—798.
- GAO Wei. Back analysis algorithm in geotechnical engineering based on particle swarm optimization[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 795—798.
- [16] 田明俊, 周晶. 岩土工程参数反演的一种新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1492—1496.
- TIAN Ming-jun, ZHOU Jin. New algorithm for parameter inversion in geotechnical engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(9): 1492—1496.
- [17] 苏国韶, 冯夏庭. 基于粒子群优化算法的高地应力条件下硬岩本构模型的参数辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3029—3034.
- SU Guo-shao, FENG Xia-ting. Parameter identification of constitutive model for hard rock under high in-situ stress condition using particle swarm optimization algorithm[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3029—3034.
- [18] 褚卫江, 徐卫亚, 杨圣奇, 等. 基于 FLAC^{3D} 黏弹塑性流变模型的二次开发研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2005—2010.
- CHU Wei-jiang, XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, et al. Secondary development of a viscoelasto-plastic rheological constitutive model of rock based on FLAC^{3D}[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 2005—2010.
- [19] 罗润林, 阮怀宁, 朱昌星. 基于粒子群—最小二乘法的岩石流变模型参数反演[J]. 辽宁工程技术大学, 2009, 28(5): 750—753.
- RUO Lun-lin, RUAN Huai-ning, ZHU Chang-xing. Parameter inversion of rock creep model based on PSO-least square method[J]. **Journal of Liaoning Technical University**, 2009, 28(5): 750—753.