

柱状节理玄武岩卸荷力学特性的数值模拟

金长宇, 侯晓乐, 刘冬, 崔瑞瑞

(东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 白鹤滩水电站厂区内的柱状节理玄武岩是由原生节理与隐晶裂隙共同切割形成的节理岩体。由于两种节理的形成机理、结构形式、空间产状、力学特性的不同,使得柱状节理玄武岩在不同应力状态下,具有不同的破坏模式。利用 D-CRDM 分析方法对柱状节理玄武岩卸荷过程进行了计算分析,同时结合现场声波测试结果分析柱状节理玄武岩的破坏机理与模式。研究表明:卸荷过程中原生节理在张拉作用下易产生表层的剥离破坏,而隐晶裂隙在拉、压状态下均会产生开裂破坏,并诱发岩体的整体失稳。岩体的现场破坏证明了该研究结果的正确性,同时研究结果为洞室的岩体支护方式的选择提供了参考依据。

关 键 词: 岩土力学;柱状节理;原生节理;隐晶裂隙;破坏模式

中图分类号: TD 311

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)02-0243-06

Numerical Simulation of Mechanical Properties of Columnar Jointed Basalt Under Unloading Condition

JIN Chang-yu, HOU Xiao-le, LIU Dong, CUI Rui-rui

(Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: JIN Chang-yu, E-mail: jcy_snow@163.com)

Abstract: Columnar jointed basalt in Baihetan hydropower station is jointed rock mass formed by the combined cutting effect of original joint and aphanitic micro-cracks. Due to the difference of born modes, structures, attitudes and mechanical properties, the failure mode of columnar jointed basalt under various stress states is diverse. In this paper, D-CRDM method was used to simulate unloading process of columnar jointed basalt, and to analyze the failure mechanism and mode of columnar jointed basalt combining with in-situ AE test. This study indicates that in the unloading process, original joints are easy to cause surface spalling in tension state whereas aphanitic micro-cracks were inclined to induce internal cracks of surrounding rock in tension or compression and overall collapse of rock mass. The research results are justified by in-situ observations, and meanwhile, it provides a reference in the selection of supporting methods for underground cavern.

Key words: geotechnical mechanics; columnar joint; original joint; aphanitic micro-cracks; failure mode

柱状节理构造是常见于火山熔岩中的一种规则柱体形态的原生张性破裂构造,在玄武岩中发育的柱状节理最为常见,目前在建的白鹤滩水电站的坝基与地下洞室群基岩中都揭露出该类节理构造。受到节理面的影响,柱状节理玄武岩的强度不高,在卸荷过程中易出现节理开裂,在洞室局部发生岩体的剥落与垮塌现象。为保证围岩的稳定

性并选择合适的支护形式,本文利用 D-CRDM (discrete element method-crack rock mass deterioration model)模拟方法与现场声波测试结果对该岩体不同受力状态下的破坏模式进行研究,根据该研究成果提出了柱状节理的建议支护方案。

柱状节理受到原生节理与隐晶裂隙的影响,

收稿日期: 2014-12-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB732006); 国家自然科学基金资助项目(40902090, 51109035, 51204030); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N110401006); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0275)。

作者简介: 金长宇(1979-),男,辽宁鞍山人,东北大学副教授。

其力学特性极其复杂,破坏模式也相应复杂多变. 诸多学者对其进行了大量研究,钟世英等^[1]基于微结构张量理论分析了柱状节理玄武岩的各向异性强度,并引入 Jaeger 建立了各向异性 Mohr - Coulomb 强度准则;朱道建等^[2]借助广义宏观复合材料理论建立了复合型多弱面软化模型,分析了柱状节理玄武岩的力学特性;徐卫亚等^[3]利用各向异性弹塑性本构模型分析了白鹤滩的坝基稳定性;荣冠等^[4]利用 3DEC 对白鹤滩水电站厂区的 $P_2\beta_3$ 柱状节理玄武岩进行了等级分类. 上述方法主要通过理论模型或者离散元的手段对柱状节理玄武岩内部的节理进行分析研究;由于这些方法忽略了两种节理间的相互影响,因此其分析结果往往具有一定的局限性. 本文在上述研究成果的基础上,提出一种等效连续体与离散元耦合的 D - CRDM 分析方法,并通过该方法对柱状节理的破坏模式进行了分析研究.

1 D - CRDM 分析方法

1.1 原生节理

Gaziev 和 Erlikhman^[5]曾经以模型堆叠的方式来探讨地表荷载引起的节理岩体内应力传递分布及变化规律. 试验结果表明:在相同外力作用下,岩体内应力传递规律会因节理的滑移形成不同的传播方式. 而传递模式的不同导致岩体具有不同的宏观力学特性. 为了掌握柱状节理对玄武岩宏观力学特性的影响,在柱状节理发育洞段进行了玄武岩的承压板测试. 该测试结果表明:洞室围岩水平向的变形模量为 7.58 ~ 18.26 GPa,竖直向的变形模量为 6.03 ~ 7.79 GPa. 在现场试验的基础上,利用 3DEC 对该测试进行了分析研究,发现原生节理的存在改变了岩体自身应力的传递模式,当承压板作用力方向与原生节理面呈小角度时(图 1 中为 α),应力传播主要依靠原生节理面;而当承压板作用力方向与原生节理面呈大角度时(图 1 中为 β),应力传递模式接近连续体. 受节理面的强度较低的影响,柱状节理的水平向变形模量高于竖直向变形模量^[6]. 现场测试与 3DEC 的模拟结果不仅揭示了柱状节理岩体各向异性的缘由,同时也证明了离散元是模拟原生节理力学行为的有效方法.

1.2 隐晶裂隙

隐晶裂隙为柱状节理柱体内颗粒晶体间的微小节理面,这种裂隙在二次应力场的调整过程中易于开裂扩展,导致柱状节理玄武岩单个柱体力

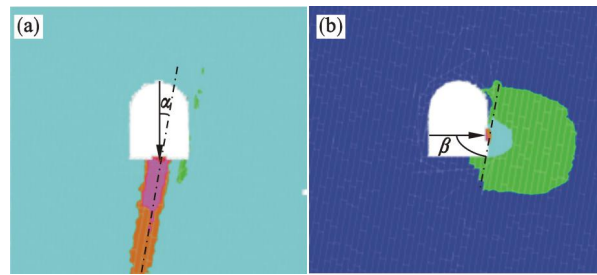


图 1 3DEC 岩体加载示意图

Fig. 1 Schematic of 3DEC rock mass model

(a) — 竖直加载; (b) — 水平加载.

学性质发生弱化,而且会诱发原生节理的进一步开裂,形成“多米诺骨牌效应”的破坏方式. 从宏观层面来看,可认为是隐晶裂隙开裂导致柱体力学性状发生劣化,即单个柱体弹性模量 E 、黏聚力 C 、内摩擦角 φ 以及抗拉强度 T 等力学指标发生弱化. 因此,当以数值模拟方法研究柱状节理玄武岩单个柱体力学行为时,要求其本构模型能够准确地反映隐晶裂隙发育造成岩体屈服以及屈服后力学参数弱化的力学特性. 这里借鉴脆性岩体本构模型^[7]思想,通过岩体的等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}^p$ 对岩体的力学状态进行定义,并通过函数描述力学参数的劣化过程,参见式(1).

$$\left. \begin{aligned} E(\bar{\varepsilon}^p) &= E_0 \cdot f_E(\bar{\varepsilon}^p), \\ C(\bar{\varepsilon}^p) &= C_0 \cdot f_C(\bar{\varepsilon}^p), \\ \varphi(\bar{\varepsilon}^p) &= \varphi_0 \cdot f_\varphi(\bar{\varepsilon}^p), \\ T(\bar{\varepsilon}^p) &= T_0 \cdot f_T(\bar{\varepsilon}^p). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: E_0, C_0, φ_0, T_0 分别为初始状态下柱状节理玄武岩柱体的弹性模量、黏聚力、内摩擦角和抗拉强度; $E(\bar{\varepsilon}^p), C(\bar{\varepsilon}^p), \varphi(\bar{\varepsilon}^p), T(\bar{\varepsilon}^p)$ 分别为一定等效塑性应变状态下的弹性模量、黏聚力、内摩擦角和抗拉强度; $f_E(\bar{\varepsilon}^p), f_C(\bar{\varepsilon}^p), f_\varphi(\bar{\varepsilon}^p), f_T(\bar{\varepsilon}^p)$ 分别是弹性模量、黏聚力、内摩擦角和抗拉强度的变化函数,该函数可以是线性函数、分段函数和非线性函数,函数的选择可以依据室内三轴压缩条件下岩石的声发射试验进行拟合与判别.

在开挖卸荷后隐晶裂隙逐渐开裂贯通,柱体不断地发生剥离现象,这些细观裂缝的扩展降低了岩体完整性. 因此,可以认为隐晶裂隙的破损和新裂隙生成是岩体微结构不断分离的过程. 在这一过程中,岩体弹性模量 E 、黏聚力 C 、内摩擦角 φ 与抗拉强度 T 随等效塑性应变的增加而降低. 在该节理岩体劣化模型中,可认为岩体各个参数是随等效塑性应变变化的递减函数,为表达方便,在此简化为线性的分段函数,参见图 2. 图中各个变量的物理意义如下: E_d 为卸荷后岩体残余弹性模

量, φ_d 为卸荷后岩体残余内摩擦角, C_d 为卸荷后岩体残余黏聚力, T_d 为卸荷后岩体残余抗拉强度, 上述力学参数可以利用室内试验与反分析获得。

该模型在计算时, 每计算一步都根据等效塑性应变的量值动态调整模型的计算参数, 其剪切屈服函数仍然采用 Morh – Coulomb 屈服准则. 当岩体进入屈服状态后, 由于各个参数是随着等效塑性应变不断变化的, 因此与通常的弹塑性本构不同, 该模型的屈服面也是动态变化的 (参见图 3); 同时考虑到柱体内部隐晶裂隙对岩块抗拉强度的影响, 增加了最大拉应力强度准则, 由于抗拉强度也为等效塑性应变的动态函数, 这样可以反映不同状态下隐晶裂隙对柱体强度的影响. 最终利用 C++ 程序编制了 CRDM. dll 动态链接库文件, 可以在 3DEC 平台上调用计算。

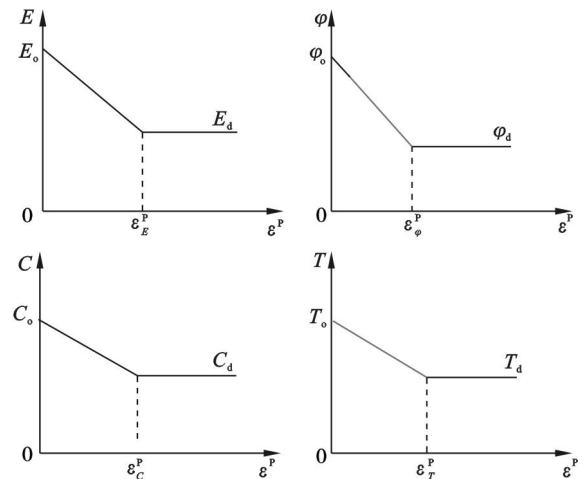


图 2 岩体破坏区内力学参数劣化过程
Fig. 2 Deterioration processes of mechanical parameters in EDZ

2 柱状节理破坏模式分析

2.1 计算与测试结果

为了掌握柱状节理玄武岩的开挖卸荷特性, 在电站两岸开挖了多条水平探洞, 以便对其破坏情况进行观测, 并通过声波检测确定其松弛程度. 本文选择了 $P_2\beta^{3-2}$ III₁ 类柱状节理作为研究对象, 对该岩层内探洞围岩稳定性进行了计算分析. 该计算的地应力测试表明, 水平初始地应力约为 8 MPa, 竖直初始地应力约为 5.7 MPa. 几何模型为准三维模型, 模型边界范围为 30 m × 30 m × 1 m, 探洞的截面尺寸为 3.0 m × 3.0 m, 节理与岩体的计算参数主要利用现场监测信息反演获得, 参见表 1 与表 2.

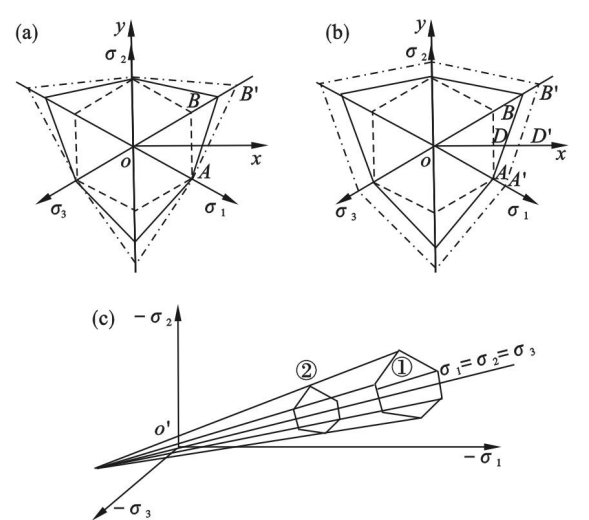


图 3 CRDM 模型的后继屈服面改变特点
Fig. 3 Evolution characteristics of the successive yield surface in CRDM's models

- (a) — π 平面屈服面形状改变;
- (b) — π 平面屈服面等向相似扩展或收缩;
- (c) — 屈服面沿等倾线收缩或扩展.

表 1 节理面力学参数^[8]
Table 1 Mechanical parameters of joints

法向刚度	剪切刚度	摩擦角	黏聚力	抗拉强度
GPa	GPa	(°)	MPa	MPa
52.97	12.88	24.3	0.0	0.0

表 2 岩体等效力学参数^[9]
Table 2 Equivalent mechanical parameters of the rock mass

弹性模量		内摩擦角		黏聚力		抗拉强度	
GPa		(°)		MPa		MPa	
初始	残余	初始	残余	初始	残余	初始	残余
32.30	15.20	35.0	20.0	1.30	0.50	1.25	0.0

数值计算结果显示:

1) 探洞开挖后围岩的变形主要以原生节理的剪切变形为主, 在洞室表层 0.5 m 范围内, 原生节理出现开裂破坏 (见图 4a, 图 4b), 其法向最大变形达到 2.26 mm, 切向变形最大值为 5.23 mm. 受到原生节理产状的影响, 洞室顶拱 (底板) 的变形值小于洞室边墙. 另外洞室下游侧边墙 (图 4c 右侧部分) 的变形略大于洞室上游侧边墙 (图 4c 左侧部分). 受节理产状的影响, 洞室左右边墙变形的方向明显不同 (见图 4c).

2) 应力云图表明, 洞室围岩 0.5 m 范围出现了明显应力松弛区域, 根据最小主应力云图 (图 4d) 可以初步判断, 该区域岩体为受拉区, 最大拉应力达到 2 MPa. 根据最大主应力云图 (图 4e) 初步判断, 在洞室的顶拱、拱角、底板与底角处都存在一定的高应力区域, 尤其下游侧 (右侧底角) 的

应力集中现象最明显。

3) 利用 CRDM 本构模型计算分析时,该本构模型塑性区的产生是由于隐晶裂隙扩展造成的,由图 4f 可以判断,洞室围岩的隐晶裂隙出现了不同程度松弛,松弛区域的岩体多以张拉破坏为主,顶拱与底板的破坏最严重,加之此处有较大的环向应力,即最大主应力方向平行于隐晶裂隙的主方向,导致顶拱隐晶裂隙产生类似于单轴压缩的劈裂破坏,出现了大量的片帮与掉块现象如图 5 所示。

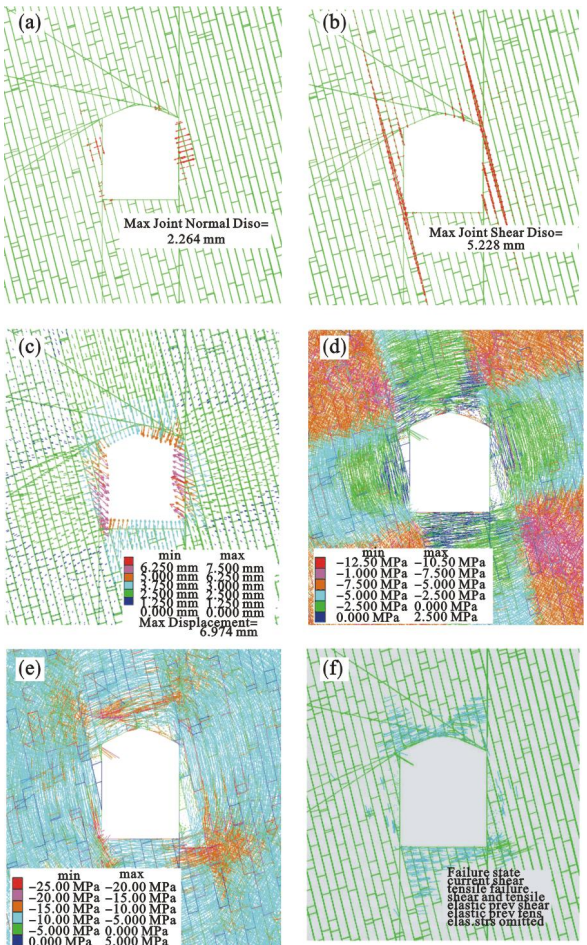


图 4 计算结果
Fig. 4 Numerical results

(a)——节理法向位移;(b)——节理切向位移;(c)——围岩变形;
(d)——最小主应力;(e)——最大主应力;(f)——塑性区。

为了确定岩体的松弛状况,同时验证计算结果的准确性,在探洞内进行了声波测试。根据图 6 的测试结果可知,洞室围岩 0.5 m 内存在一定的声波低速区,该值低于钻孔深部稳定区域岩体的波速,因此可以判断是由于节理开裂造成的松弛区域。洞室拱角与底角 0.5 ~ 3.0 m 处存在一定声波高速区,表明岩体完整性比较好,没有出现明显的松弛现象;而洞室顶拱与底板在 0.5 ~ 3.0 m 处的波速没有升高反而降低,表明此处为松弛区域。

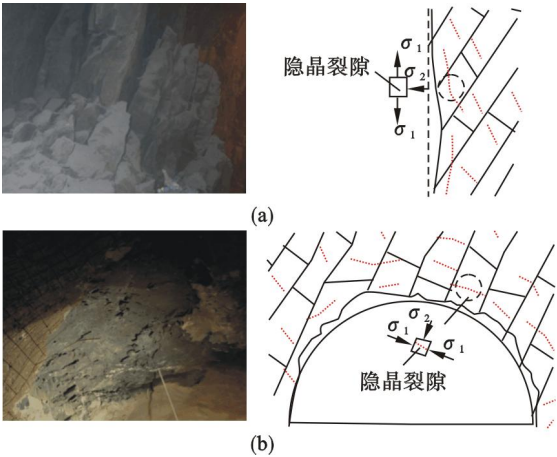


图 5 破坏现象与分析
Fig. 5 Instability phenomenon and its analysis
(a)——边墙破坏模式;(b)——顶拱破坏模式。

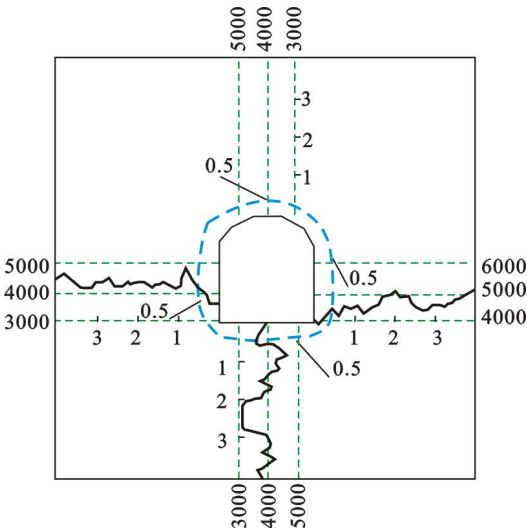


图 6 声波检测结果
Fig. 6 Acoustic test results

2.2 破坏模式分析

上述研究结果表明,柱状节理玄武岩产生的破坏主要分为两种:一种是原生节理的张拉破坏,这种破坏模式主要是由表层的节理卸荷产生;另一种破坏是柱体内部的隐晶裂隙造成,这种裂隙的破坏主要取决于柱体的受力状态,以图 7 单个柱体为例,对其模式进行详细分析^[10-11]。

1) 当柱体处于图 7a 所示状态,即三向受压状态,并且最大主应力方向平行于柱体轴线或者与轴线呈小夹角情况时,该节理处于闭合状态,柱状节理玄武岩处于稳定状态。探洞拱角与底角处 0.5 ~ 3 m 范围出现的环向高应力(见图 4e),导致隐晶裂隙与原生节理闭合,因此出现了声波高速区(详见图 6 右侧的声波高速区)。

2) 当柱体处于图 7b 所示状态,虽然岩体三向受压,但是由于二次应力场的调整,导致围岩内

最大主应力方向与柱体内的隐晶裂隙面平行或呈小夹角, 隐晶裂隙产生劈裂破坏, 岩体出现松弛现象. 探洞顶拱与底板深部处岩体的破坏属于该类型(详见图6 顶拱与底板的声波低速区). 数值分析与测试结果表明, 这个区域大致范围为 0.5 ~ 1.0 倍的洞室高度, 其范围较大. 如果在洞室周边存在结构面, 会加剧隐晶裂隙开裂, 而且会导致更深处的裂隙开裂(白鹤滩柱状节理试验洞的顶拱就是由于层内错动带的存在, 导致顶拱附近出现大范围的声波低速区). 这种破坏模式难以监控预防, 加之松弛区域的范围较大, 易形成大规模岩体坍塌, 因此对现场人员与设备的安全极为不利.

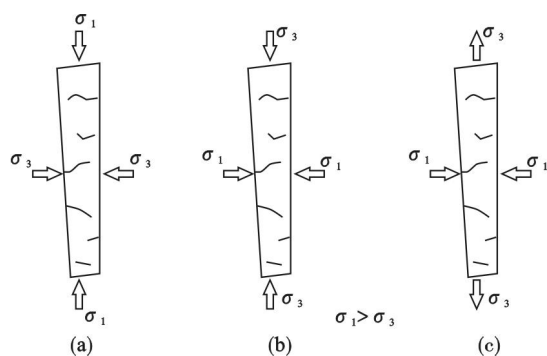


图7 破坏模式分析
Fig. 7 Analysis of failure mode

3) 当柱体处于图7c所示状态, 即在平行于柱体轴线方向或者与轴线呈小夹角情况下产生拉应力时, 柱体极易出现失稳现象, 洞室边墙处岩体的破坏属于该类型, 这种破坏与原生节理的受力与破坏情况密切相关, 因此只有减小原生节理的松弛程度, 才能避免隐晶裂隙的开裂. 这种破坏往往形成表层的局部岩体失稳, 而且容易通过变形对其进行监测, 因此可以及时进行支护或者排险.

根据上述节理破坏模式的研究成果, 本文建议在采用锚喷支护时, 多增加钢拱架与混凝土衬砌连续支护结构的支护量, 以保证柱状节理的整体性.

3 结 论

利用本文提出的研究方法对柱状节理探洞开挖过程进行了模拟分析, 并结合现场的超声波检测结果发现, 原生节理的破坏主要存在于围岩的表层部分, 这种破坏易于观测, 容易对其进行加固和排险. 然而, 隐晶裂隙的破坏存在于围岩的不同区域, 尤其在结构面的影响下, 其开裂的范围与破坏程度会进一步加大, 因此难以观测预防, 这对现场作业的人员和设备具有极大的威胁. 根据上述

节理破坏模式的研究成果, 本文建议在采用锚喷支护时, 多增加钢拱架与混凝土衬砌连续支护结构的支护量, 以保证柱状节理的整体性, 可适当采用有垫板锚杆替代普通锚杆.

致谢 感谢中国水电顾问集团华东勘测设计研究院提供白鹤滩电站厂区探洞的相关资料.

参考文献:

- [1] 钟世英, 徐卫亚. 基于微结构张量理论的柱状节理岩体各向异性强度分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3081 - 3084.
(Zhong Shi-ying, Xu Wei-ya. Anisotropic failure criterion incorporating microstructure tensor for rock mass with columnar joints [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(10): 3081 - 3084.)
- [2] 朱道建, 杨林德, 蔡永昌. 节理岩体复合型多弱面软化模型的研究及实现[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 185 - 191.
(Zhu Dao-jian, Yang Lin-de, Cai Yong-chang. Mixed multi-weakness plane softening model for jointed rock mass [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(2): 185 - 191.)
- [3] 徐卫亚, 郑文堂, 宁宇, 等. 柱状节理坝基岩体三维各向异性数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 949 - 955.
(Xu Wei-ya, Zheng Wen-tang, Ning Yu, et al. 3D anisotropic numerical analysis of rock mass with columnar joints for dam foundation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(3): 949 - 955.)
- [4] 荣冠, 王思敬, 王恩志, 等. 白鹤滩河谷演化模拟及 $P_2\beta_3$ 玄武岩级别评估[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3013 - 3019.
(Rong Guan, Wang Si-jing, Wang En-zhi, et al. Study of evolutionary simulation of Baihetan river valley and evaluation of engineering quality of jointed basalt $P_2\beta_3$ [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 3013 - 3019.)
- [5] Gaziev E G, Erlikhman S A. Stresses and strains in anisotropic foundation (model studies) [C]// Proceedings of the Symposium of the International Society for Rock Mechanics. Rotterdam, 1971.
- [6] Yan D X, Xu W Y, Zheng W T, et al. Mechanical characteristics of columnar jointed rock at dam base of Baihetan hydropower station [J]. *Journal of Central South University of Technology (English Edition)*, 2011, 18(6): 2157 - 2162.
- [7] 江权, 冯夏庭, 陈国庆. 考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 144 - 152.
(Jiang Quan, Feng Xia-ting, Chen Guo-qing. Study on constitutive model of hard rock considering surrounding rock deterioration under high geostresses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 144 - 152.)

(下转第252页)