

文章编号: 1000-7598-(2004) 08-1225-04

节理岩体蠕变特性研究

杨松林^{1,2}, 张建民², 黄启平¹

(1. 湖南五凌水电开发有限责任公司, 湖南 长沙 410007; 2. 清华大学 岩土工程研究所, 北京 100084)

摘 要: 在已知岩石和节理蠕变规律的前提下, 推导了节理岩体蠕变模型的一般表达式。假定岩石体积变形和节理法向压缩变形为弹性变形, 忽略节理的剪胀现象, 认为只有岩石畸变和节理剪切滑移与时间有关, 从而推导了含三组相交节理的岩体蠕变模型及其参数。根据反演出的岩石和节理蠕变模型, 计算了含三组相交节理的岩体在单轴应力作用下一些节理参数对岩体单轴蠕变的影响。分析表明, 节理间距、剪胀系数以及节理夹角都对岩体的单轴蠕变变形有明显影响。节理间距越大, 剪胀系数越大, 节理夹角越小, 节理岩体的单轴蠕变柔量也就越小, 岩体的蠕变变形也越小。

关 键 词: 节理岩体; 蠕变模型; 蠕变柔量; 畸变; 体变

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Analysis of creep model of jointed rock

YANG Song-lin^{1,2}, ZHANG Jian-min², HUANG Qi-pin¹

(1. Hunan Wuling Hydropower Development Corporation Limited, Changsha 410007, China; 2. Geotechnical Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The generalized creep model for jointed rock is derived according to the creep model of rock and joint. With the prerequisite that volume strain of rock and compressive normal deformation of joint are elastic and with no account of shear dilatancy of joint the creep model of rock mass permeated by three sets of joints is derived to take account of viscoelastic deviatoric strain of rock and shear displacement of joint. With the creep models of rock and joints obtained by back analysis for experiment data the influence of some parameters on uniaxial creep of rock mass cut by three sets of intersected joints is analyzed. According to the above analysis the joint interval and shear dilatancy index and angle between two sets of joints have important effect on uniaxial creep of jointed rock. The axial creep compliance and creep deformation of jointed rock are decreased with the increase of joint interval and shear dilatancy index and with the decrease of angle between two sets of joints.

Key words: jointed rock; creep model; creep compliance; deviatoric strain; volume strain

1 前 言

节理岩体是工程岩体的普遍对象, 越来越多的水利、交通和能源工程都建筑在岩石地区, 其工程设计、施工、运营、稳定性和加固等都直接依赖于节理岩体的强度、变形和破坏等特征, 而这些特性常常具有显著的时间相关性。因此, 节理岩体流变特性的研究具有重要的工程意义。节理岩体的流变特性由岩块和节理面这两部分的流变特性共同决定, 但目前节理岩体弹塑性性质的研究^[1~5]较为深入, 而对节理岩体流变特性^[6~11], 尤其是节理面流变特性的分析较为少见, 从而限制了岩体流变理论的发展及其在工程中的应用。

如果节理岩体的表征单元体存在, 且其一维尺寸要比所研究的整个工程岩体小 10^2 数量级, 那么就可以将节理岩体蠕变模型与连续介质力学方法相结合, 从而对整个工程岩体进行连续介质力学分析^[12]。在此条件成立的前提下, 本文推导出节理岩体的一般蠕变模型, 分析了有三组节理分布时岩体的蠕变参数, 并以工程岩体反演出的岩石和节理蠕变模型为基础, 探讨了节理间距、节理剪胀效应以及节理交角对节理岩体蠕变特性的影响。

2 节理岩体的蠕变模型

节理岩体的蠕变来自两部分, 一是岩石的蠕变 $\varepsilon_{ij}^R(t)$, 二是节理的蠕变 $\varepsilon_{ij}^J(t)$, 它们可分别表示为

收稿日期: 2003-05-22

修改稿收到日期: 2003-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50128908), 国家重点基础研究发展规划项目(973)(No. 2002CB412707)。

作者简介: 杨松林, 男, 1973 年生, 企业博士后, 副教授, 主要从事岩土力学方面的研究。E-mail: songlinhong@sohu.com

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^R(t) = \mathbf{C}_{ijkl}^R(t) \boldsymbol{\sigma}_{kl} ; \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^J(t) = \mathbf{C}_{ijkl}^J(t) \boldsymbol{\sigma}_{kl} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{C}_{ijkl}^R(t)$ 和 $\mathbf{C}_{ijkl}^J(t)$ 分别为岩石和节理的蠕变柔量张量； $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$ 为应变张量； $\boldsymbol{\sigma}_{kl}$ 为应力张量； $i, j, k, l=1, 2, 3$ 。

因而，节理岩体的蠕变 $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}(t)$ 可以表示为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}(t) = \mathbf{C}_{ijkl}(t) \boldsymbol{\sigma}_{kl} = (\mathbf{C}_{ijkl}^R(t) + \mathbf{C}_{ijkl}^J(t)) \boldsymbol{\sigma}_{kl} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{C}_{ijkl}(t)$ 为节理岩体的蠕变柔度张量。

定义偏应变和偏应力如下：

$$\left. \begin{aligned} e_{ij} &= \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij}; \quad s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}; \\ \varepsilon_{kk} &= \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}; \quad \sigma_{kk} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中，当 $i=j$ 时， $\delta_{ij}=1$ ； $i \neq j$ 时， $\delta_{ij}=0$ 。

在岩石材料满足均匀各向同性的前提下，假定岩石体变是弹性的，而畸变却是粘弹性的，则有如下关系式：

$$e_{ij} = J_1(t) s_{ij}; \quad \varepsilon_{kk} = J_2 \sigma_{kk} \quad (4)$$

得到蠕变情况下岩石的应力-应变关系：

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = J_1(t) \boldsymbol{\sigma}_{ij} + \frac{J_2 + J_1(t)}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (5)$$

由此岩石的蠕变柔量张量可以写为

$$\mathbf{C}_{ijkl}^R(t) = J_1(t) \delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{J_2 + J_1(t)}{3} \delta_{pk} \delta_{pl} \delta_{ij} \quad (6)$$

而对于节理，其蠕变关系可以写为

$$\bar{\delta}_p(t) = D_{pq}(t) \bar{\tau}_q \quad (7)$$

或者

$$\begin{Bmatrix} \bar{\delta}_n(t) \\ \bar{\delta}_s(t) \\ \bar{\delta}_t(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{nn}(t) & D_{ns}(t) & D_{nt}(t) \\ D_{sn}(t) & D_{ss}(t) & D_{st}(t) \\ D_{tn}(t) & D_{ts}(t) & D_{tt}(t) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\tau}_n \\ \bar{\tau}_s \\ \bar{\tau}_t \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式中 n 为垂直于节理面的方向； s 与 t 为节理面内相互垂直的两个方向； $\bar{\delta}_n(t)$ 为节理的闭合变形， $\bar{\delta}_s(t)$ 和 $\bar{\delta}_t(t)$ 为节理的剪切变形； $\bar{\tau}_n$ 为节理的法向应力； $\bar{\tau}_s$ 与 $\bar{\tau}_t$ 为节理的剪切应力； $D_{pq}(t)$ 为节理蠕变柔量矩阵； $p, q=n, s, t$ 。

根据 Cauchy 应力公式，有：

$$\boldsymbol{\tau}_j^{(r)} = \boldsymbol{\sigma}_{ij} \mathbf{n}_i^{(r)} \quad (9)$$

式中 $\boldsymbol{\tau}_j^{(r)}$ 为整体坐标系下第 r 组节理面上的应力矢量； $\mathbf{n}_i^{(r)}$ 为整体坐标系下垂直于第 r 组节理面的法向单位矢量。

根据能量守恒原理，在蠕变过程中的任一时刻 t ，应力所做的功等于所有 M 组节理因位移而做功的总和，即

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^J(t) = \sum_{r=1}^M \boldsymbol{\tau}_j^{(r)} \delta_j^{(r)}(t) \quad (10)$$

将式 (9) 代入式 (10) 得到：

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^J(t) = \sum_{r=1}^M \mathbf{n}_i^{(r)} \delta_j^{(r)}(t) \quad (11)$$

节理的变形和应力可以在局部坐标系与整体坐标系之间转换，即

$$\delta_j^{(r)}(t) = \mathbf{T}_{jp} \bar{\delta}_p^{(r)}(t); \quad \boldsymbol{\tau}_j^{(r)} = \mathbf{T}_{jp} \bar{\boldsymbol{\tau}}_p \quad (12)$$

式中 $\mathbf{T}_{jp}$ 为坐标转换矩阵的分量。

根据式 (8)，式 (9)，式 (11) 和式 (12) 可以得到所有 M 组节理的蠕变柔量张量为

$$\mathbf{C}_{ijkl}^J(t) = \sum_{r=1}^M \mathbf{n}_i^{(r)} \mathbf{T}_{jp}^{(r)} D_{pq}^{(r)}(t) \mathbf{T}_{lq}^{(r)} \mathbf{n}_k^{(r)} \quad (13)$$

3 节理的变形特性分析

在节理变形的分析中认为，节理面内的剪切变形特性是各向同性的，就有 $D_{ss}(t) = D_{tt}(t)$ 。同时认为节理法向变形并不引起剪切变形，即 $D_{sn}(t) = D_{tn}(t) = 0$ 。而且节理面内两个垂直方向的剪切变形也互不影响，则有 $D_{st}(t) = D_{ts}(t) = 0$ 。

关于节理在法向应力作用下的蠕变规律，目前还没有进行深入地研究，又由于节理法向压缩变形要比剪切变形小得多，为简单起见，可以作为弹性变形来处理，认为 D_{nn} 与时间无关。

对于粗糙节理，在发生剪切变形时，一般都会使节理产生法向膨胀，可以用膨胀系数 $\alpha = \tan \beta$ 来表征， β 为膨胀角，即有 $\bar{\delta}_n = \alpha \bar{\delta}_s$ ，而不考虑剪切膨胀时 $D_{ns}(t) = D_{nt}(t) = 0$ 。

4 含三组相交节理的岩体蠕变模型

岩体的三组相交节理表示在图 1 中，节理组 1 与节理组 2 具有相同的力学性质，两者的夹角为 θ ，且与水平面的夹角都为 $\theta/2$ ，节理间距都为 d ，剪切蠕变柔量 $D_{ss}(t) = D_{tt}(t) = \lambda_s(t)/d$ ，法向压缩柔量 $D_{nn} = \lambda_n/d$ 。第 3 组节理与水平轴 X 垂直，与水平轴 Y 平行，节理间距为 d_3 ，剪切蠕变柔量 $D_{ss}(t) = D_{tt}(t) = \lambda_{s3}(t)/d_3$ ，法向压缩柔量 $D_{nn} = \lambda_{n3}/d_3$ 。

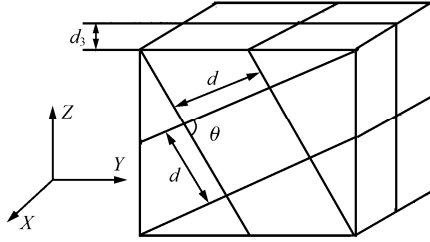


图1 岩体的三组节理分布

Fig.1 Rock mass with three sets of joints

如果忽略节理的剪切膨胀, 根据式(2)和式(13)可以推导出节理岩体的蠕变柔量矩阵:

$$[\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{zz} \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}]^T = [A][\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{zx}]^T \quad (14)$$

式中

$$[A] = \begin{bmatrix} h_{11}+v_{11} & h_{12}+v_{12} & h_{13}+v_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & h_{22}+v_{22} & h_{23}+v_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & h_{33}+v_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & h_{44}+v_{44} & 0 & 0 \\ & \text{对称} & & & h_{55}+v_{55} & 0 \\ & & & & & h_{66}+v_{66} \end{bmatrix}$$

$$h_{11}=h_{22}=h_{33}=\frac{J_2+2J_1(t)}{3}; \quad h_{12}=h_{13}=h_{23}=\frac{J_2-J_1(t)}{3};$$

$$h_{44}=h_{55}=h_{66}=2J_1(t); \quad v_{11}=\lambda_{n3}/d_3;$$

$$v_{22}=2\sin^2\theta\left(\frac{\lambda_n}{d}\sin^2\frac{\theta}{2}+\frac{\lambda_s(t)}{d}\cos^2\frac{\theta}{2}\right);$$

$$v_{33}=2\cos^2\theta\left(\frac{\lambda_n}{d}\sin^2\frac{\theta}{2}+\frac{\lambda_s(t)}{d}\cos^2\frac{\theta}{2}\right);$$

$$v_{44}=\frac{\lambda_{s3}(t)}{d_3}+\frac{\lambda_s(t)}{d}2\sin^2\frac{\theta}{2};$$

$$v_{55}=\frac{\lambda_n}{d}2\sin^2\theta+\frac{\lambda_s(t)}{d}2\cos^2\theta;$$

$$v_{66}=\frac{\lambda_{s3}(t)}{d_3}+\frac{\lambda_s(t)}{d}2\cos^2\theta;$$

$$v_{23}=\frac{\sin^2\theta}{2d}(\lambda_n-\lambda_s(t)); \quad v_{12}=v_{13}=0$$

从式(14)可以看出, 尽管岩石材料的蠕变是各向同性的, 但由于节理的存在使得节理岩体蠕变出现高度的各向异性, 节理间距、方位角及其蠕变特性都对整个岩体的蠕变有着显著影响。应该指出, 式(14)是在不考虑节理剪切膨胀的情况下得出的, 当不能忽略节理剪胀时, 节理蠕变柔量矩阵 $D_{pq}(t)$ 将不再对称, 从而导致节理岩体的蠕变柔量

张量 $C_{ijkl}(t)$ 也失去对称性, 使得这种节理岩体蠕变模型不能应用于有限元数值分析方法, 也就失去了其工程应用价值。

然而, 受单轴应力 σ_z 作用并考虑节理剪胀的情况下节理岩体的单轴蠕变柔量可以推导出来, 即为

$$J(t)=\frac{J_2+2J_1(t)}{3}+2\cos^2\theta\left(\frac{\lambda_n}{d}\sin^2\frac{\theta}{2}+\frac{\lambda_s(t)}{d}\cos^2\frac{\theta}{2}\right)-\frac{\lambda_s(t)}{d}\alpha\sin\theta \quad (15)$$

5 节理岩体蠕变特性的计算分析

笔者曾经对某工程中的泥板岩及其粗糙节理做过详细地蠕变实验研究, 通过反演实验资料, 分别得到了其蠕变模型。对于泥板岩的畸变变形有:

$$J_1(t)=\frac{1}{G_1}+\frac{1}{G_2}\left[1-\exp\left(-\frac{G_2}{\eta}t\right)\right] \quad (16)$$

式中 $G_1=1.1\times 10^4 \text{ MPa}$, $G_2=1.9\times 10^4 \text{ MPa}$, $\eta=2.2\times 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{d}$ 。而对于岩石的体积应变, 其相应的参数为 $J_2=0.25\times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ 。

节理的剪切蠕变模型为

$$\lambda_s(t)=\frac{1}{\tau_n\mu_1}+\frac{1}{\tau_n\mu_2}\left[1-\exp\left(-\frac{\mu_2}{\eta_2}t\right)\right] \quad (17)$$

式中 τ_n 为节理的法向应力。 $\mu_1=0.2 \text{ mm}^{-1}$, $\mu_2=0.6 \text{ mm}^{-1}$, $\eta_2=30 \text{ d}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。对于节理的法向压缩变形, 其相应的参数为 $\lambda_n=0.12 \text{ mm}\cdot\text{MPa}^{-1}$ 。

利用所反演出的岩石和节理蠕变模型, 对如图1所示的含三组节理的岩体, 沿 z 轴方向施加单轴压应力为 10 MPa , 根据式(15)~(17)可以计算节理岩体的单轴蠕变变形。图2表示了前两组节理的间距 $d=2, 3, 4 \text{ m}$ 时岩体单轴蠕变随时间的变化情况。计算表明: 节理间距越大, 单轴蠕变柔量越小, 蠕变变形也就越小。图3表明, 前两组节理的剪胀系数 $\alpha=0, 0.2, 0.4$ 时岩体单轴蠕变规律的变化。分析表明: 剪胀系数越小, 单轴蠕变柔量就越大, 岩体也就越容易产生蠕变变形。这是因为节理剪胀系数越大, 节理剪切滑移产生的法向膨胀变形在 z 轴方向上的分量也越大, 从而导致了节理岩体单轴蠕变变形的减小。图4表示前两组节理的夹角 $\theta=10^\circ, 40^\circ, 70^\circ$ 时, 节理岩体单轴蠕变规律的不同。两组节理的夹角越大, 意味着两组节理的倾角越大。计算表明: 节理夹角对岩体单轴蠕变变形的影响比较明显。两组节理的夹角越大, 单轴蠕变柔量也越大, 岩体越容易产生蠕变变形。

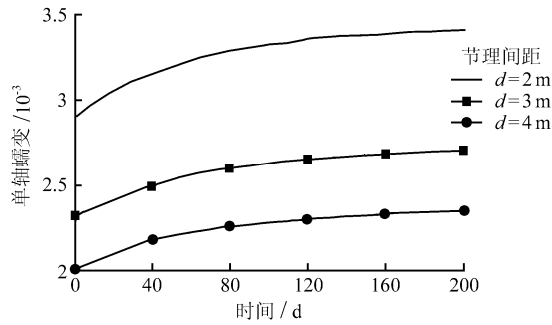


图2 不同节理间距时岩体的单轴蠕变

Fig.2 Uniaxial creep of rock mass at different joint intervals

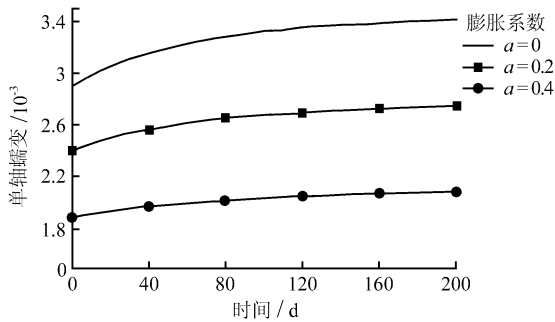


图3 不同膨胀系数时岩体的单轴蠕变

Fig.3 Uniaxial creep of rock mass at different shear swelling indexes of joints

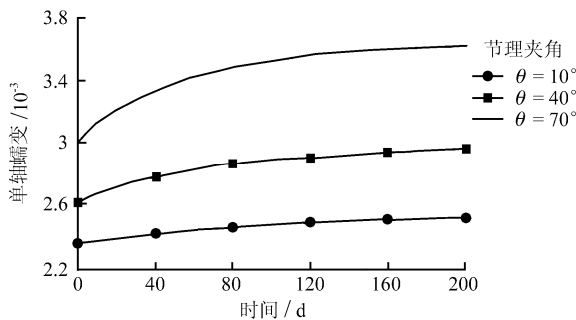


图4 不同节理夹角时岩体的单轴蠕变

Fig.4 Uniaxial creep of rock mass at different angles between two sets of joints

6 结 语

在假定岩石体积变形为弹性变形和已知节理蠕变规律的前提下,推导了节理岩体蠕变模型的一般表达式。假定岩石体积变形和节理法向压缩变形为弹性变形,只有岩石畸变和节理剪切滑移与时间有关的情形下,推导了含三组相交节理的岩体蠕变模型及其参数。在推导过程中没有考虑节理的剪胀现象。最后计算了含三组相交节理的岩体在单轴应力作用下,一些节理参数对岩体单轴蠕变的影响。分析表明,节理间距、剪胀系数以及节理夹角都对岩体的单轴蠕变变形有明显影响,节理间距越大,剪胀系数越大,节理夹角越小,节理岩体的单轴蠕变柔量也就越小,岩体的蠕变变形也就越小。

参 考 文 献

- [1] Huang T H. Elastic moduli for fractured rock mass[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 1995, 28(3): 135—144.
- [2] 杨松林, 朱焕春, 刘祖德. 加锚层状岩体的本构模型[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 427—430.
YANG Song-lin, ZHU Huan-chun, LIU Zhu-de. Intrinsic model of bolt-reinforced bedded rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 427—430.
- [3] 高安泽, 张宪宏. 各向异性节理岩体的应力应变关系[J]. 水力发电学报, 1983, 2, 23—43.
GAO An-zhe, ZHANG Xian-hong. Relationship between stress and strain for anisotropic jointed rock[J]. **Chinese Journal of HydroPower**, 1983, 2, 23—43.
- [4] 张武, 张宪宏. 节理岩体的弹性模型[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(4): 33—44.
ZHANG Wu, ZHANG Xian-hong. Elastic model of jointed rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 9(4): 33—44.
- [5] 方理刚. 岩石节理弹塑性本构关系[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 91—95.
FANG Li-gang. Elastoplastic model of rock joint[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(3): 91—95.
- [6] Malan D F. Simulating the time-dependent behavior of excavations in hard rock[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 2002, 35(4): 225—254.
- [7] 陈胜宏, 熊文林. 加锚节理岩体流变模型及三维弹粘塑性有限元分析[J]. 水利学报, 1998, (9): 41—47.
CHENG Sheng-hong, XIONG Wen-lin. Rheological model of bolt-reinforced jointed rock and elastoplastic 3D finite element analysis[J]. **Chinese Journal of hydraulics**, 1998, (9): 41—47.
- [8] 朱珍德, 徐卫亚. 岩体粘弹性本构模型辨识及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1 605—1 609.
ZHU Zhen-de, XU Wei-ya. Rock rheological model back-analysis and its application in engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(11): 1 605—1 609.
- [9] 宋德彰, 孙钧. 岩质材料非线性流变属性及其力学模型[J]. 同济大学学报, 1991, 19(4): 395—401.
SONG De-zhang, SUN Jun. Rock nonlinear rheological characteristics and its mechanical model[J]. **Journal of Tongji University**, 1991, 19(4): 395—401.
- [10] 金丰年. 岩石的非线性流变[M]. 南京: 河海大学出版社, 1998.
- [11] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [12] 何满潮, 薛廷河, 彭延飞. 工程岩体力学参数确定方法的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 225—229.
HE Man-chao, XIE Ting-he, PENG Yan-fei. Analysis of the method to determine mechanical parameters of rock mass in engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(2): 225—229.