

文章编号: 1000-7598-(2006)06-0880-05

大型地下洞室复杂地质断层数值模拟分析方法

肖 明, 陈俊涛

(武汉大学 水资源与水电工程国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 根据大型地下洞室中复杂断层对围岩稳定的影响, 提出了隐含断层单元的数值模拟计算方法。该方法将复杂断层单元隐含在岩体单元中, 使得岩体单元的剖分不受断层切割的影响。使用这种隐含的断层单元, 不但将受复杂断层切割的大型复杂地下洞室群的有限单元离散简单化, 加快分析计算周期, 而且能够有效地反映断层对复杂地下洞室围岩稳定的影响。通过对三峡地下厂房复杂断层结构的分析计算, 证明该方法为复杂断层结构的分析提供了一种十分有效的计算方法和思路。

关 键 词: 复杂地质; 隐含断层; 数值分析

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

Numerical simulation and analysis method of complex geologic faults in large underground chamber

XIAO Ming, CHEN Jun-tao

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to reflect the influence of complex geologic faults in large underground chamber, the authors put forward a numerical simulation and analysis method for the connotative fault element. The method establishes an equivalent element comprising both rock material and fault material, which can decrease the influence of faults incision. By this way, not only the mesh generation of large underground chambers becomes relatively convenient and feasible, but also the influence of complex geologic faults on stability of surrounding rocks is reflected effectively. At last, a sample about underground chamber of Three Gorges Project is given, which testifies that the method is reasonable and provides an effective computation method and train of thought for the analysis of complex geologic faults structure.

Key words: complex geology; connotative fault; numerical analysis

1 前 言

随着国民经济建设和水电建设规模的扩大, 出现了一大批正在规划设计和建设的大型和特大型地下水电站。例如溪洛渡、小湾、龙滩、水布垭、西龙池、向家坝、张河湾等水电站。受地形和地质条件的限制, 这些水电站所处的地质环境非常复杂, 地下洞室群被众多的断层所切割。大型地下洞室通常都是洞室纵横交错, 遇到复杂断层与洞室结构相交后, 由于断层与地下洞室相交的任意性, 很难正确模拟断层对洞室围岩稳定的影响。在数值分析中目前都是将断层进行一定的简化后, 用长而薄的有限单元模拟断层, 然后用有限元方法进行分析计算。但这种方法很难直接模拟断层的厚度、倾角、走向对复杂地下洞室群的影响, 而且长而薄的

有限单元数学模型随着长宽比的加大, 其误差越来越大, 因此, 对复杂的断层影响只能进行一些定性分析。本文采用隐含断层单元的数值模拟计算方法将复杂断层单元隐含在岩体单元中, 使得岩体单元的剖分不受断层切割的影响。这种方法不但使受复杂断层切割的大型复杂地下洞室群的有限单元离散简单化, 而且能够有效地反应断层对复杂地下洞室围岩稳定的影响, 为复杂断层结构的分析提供了一种十分有效的计算方法和思路。

2 隐含断层的力学参数确定

假定断层穿过如图 1 所示的岩体单元, 将该单元变成一个垂直和平行于断层面的各向异性岩体单元 (图 2), 可以用一个均质各向异性的岩体当量单元模拟断层的结构效应。如果有多条断层穿过岩

收稿日期: 2004-12-08

基金项目: 湖北省环境岩土工程重点实验室开放课题支持课题 (No. T110304)。

作者简介: 肖明, 男, 教授, 主要从事地下工程结构稳定和水利发电结构研究。Email: xm2003@whu.edu.cn

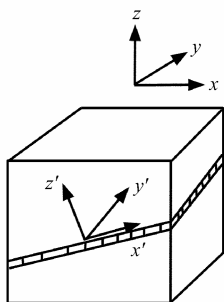


图1 岩体单元
Fig.1 Rock element

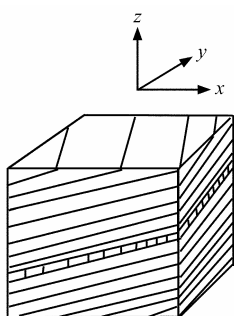


图2 当量单元
Fig.2 Equivalent element

体单元, 该单元可视为由多条岩层和断层相间组成的复合单元, 设第 j 层的岩体厚度为 H_j , 则该层的层厚系数为:

$$\phi_j = H_j / H, \text{ 且 } \sum \phi_j = 1 \quad (1)$$

将断层穿过的复合岩体单元用当量单元替换, 该单元应该满足下列几个条件:

(1) 当量单元的应力 $\bar{\sigma}_i$ 和应变 $\bar{\varepsilon}_i$ ($i=1, 2, \dots, 6$) 与实际的岩体单元的应力 σ_i 和应变 ε_i 满足

$$\bar{\sigma}_i = \frac{1}{V} \iiint_V (\sigma_i)_j dv, \quad \bar{\varepsilon}_i = \frac{1}{V} \iiint_V (\varepsilon_i)_j dv \quad (2)$$

式中 V 为岩体单元的体积, $i=1, 2, \dots, 6$, $(\sigma_i)_j, (\varepsilon_i)_j$ 表示第 j 层岩体应力和应变。

(2) 当量单元的变形能 U_e 和实际岩体单元的变形能 U_r 相等。即:

$$U_r = U_e \quad (3)$$

$$U_r = \frac{1}{2} \iiint_V (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \dots + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dv$$

$$U_e = \frac{1}{2} \iiint_V (\bar{\sigma}_x \bar{\varepsilon}_x + \bar{\sigma}_y \bar{\varepsilon}_y + \dots + \bar{\tau}_{xy} \bar{\gamma}_{xy}) dv$$

(3) 当量单元和实际岩体单元在断层面边界上的应力连续和变形协调。即:

应力连续:

$$(\sigma_x)_j = \bar{\sigma}_x + t_{xj}, \quad (\sigma_y)_j = \bar{\sigma}_y + t_{yj}, \quad (\sigma_z)_j = \bar{\sigma}_z,$$

$$(\tau_{xy})_j = \bar{\tau}_{xy} + t_{xyj}, \quad (\tau_{yz})_j = \bar{\tau}_{yz}, \quad (\tau_{zx})_j = \bar{\tau}_{zx} \quad (4)$$

应变协调:

$$(\varepsilon_x)_j = \bar{\varepsilon}_x, \quad (\varepsilon_y)_j = \bar{\varepsilon}_y, \quad (\varepsilon_z)_j = \bar{\varepsilon}_z + e_{zj}, \quad (\gamma_{xy})_j = \bar{\gamma}_{xy},$$

$$(\gamma_{yz})_j = \bar{\gamma}_{yz} + e_{yzj}, \quad (\gamma_{zx})_j = \bar{\gamma}_{zx} + e_{zxj} \quad (5)$$

其中 t_{xj}, e_{zj} 表示在第 j 层断面上的附加应力和应变。

将式(4)和(5)代入式(2)积分后, 进行整理可得到:

$$\sum \phi_j t_{xj} = 0, \quad \sum \phi_j t_{yj} = 0, \quad \sum \phi_j t_{xyj} = 0,$$

$$\sum \phi_j e_{zj} = 0, \quad \sum \phi_j e_{yzj} = 0, \quad \sum \phi_j e_{zxj} = 0 \quad (6)$$

假定岩体单元本身为各向异性岩体, 第 j 层的平行向弹模和泊松比为 E_{1j}, μ_{1j} , 垂直向弹模和泊松比为 E_{2j}, μ_{2j} , 根据层状各向异性岩体的应力和应变关系^[1, 2], 依据式(4)和(5), 则可用当量单元应力表示出岩体单元第 j 层的应变值:

$$(\varepsilon_x)_j = \bar{\varepsilon}_x = [(\bar{\sigma}_x + t_{xj}) - \mu_{1j}(\bar{\sigma}_y + t_{yj}) - \mu_{2j}\bar{\sigma}_z] / E_{1j}$$

$$(\varepsilon_y)_j = \bar{\varepsilon}_y = [(\bar{\sigma}_y + t_{yj}) - \mu_{1j}(\bar{\sigma}_x + t_{xj}) - \mu_{2j}\bar{\sigma}_z] / E_{1j}$$

$$(\varepsilon_z)_j = \bar{\varepsilon}_z + e_{zj} = \bar{\sigma}_z / E_{2j} - \mu_{1j}[\bar{\sigma}_x + t_{xj} + \bar{\sigma}_y + t_{yj}] / E_{1j}$$

$$(\gamma_{xy})_j = \bar{\gamma}_{xy} = (\bar{\tau}_{xy} + t_{xyj}) / G_{1j}$$

$$(\gamma_{yz})_j = \bar{\gamma}_{yz} + e_{yzj} = \bar{\tau}_{yz} / G_{2j} \quad (7)$$

$$(\gamma_{zx})_j = \bar{\gamma}_{zx} + e_{zxj} = \bar{\tau}_{zx} / G_{2j}$$

根据能量等效, 将式(7)代入式(3), 可求出附加应力 t_{xj}, t_{yj}, t_{xyj} , 再代入式(7)进行整理, 与层状各向异性岩体的应力和应变关系式相比较, 则可得出当量单元平行于断层面的弹模和泊松比 E_1, μ_1 , 垂直于断层面的弹模和泊松比 E_2, μ_2 , 即:

$$\bar{E}_1 = \left[\left(\sum \frac{\phi_j E_{1j}}{1 - \mu_{1j}^2} \right)^2 - \left(\sum \frac{\mu_{1j} \phi_j E_{1j}}{1 - \mu_{1j}^2} \right)^2 \right] / \left(\sum \frac{\phi_j E_{1j}}{1 - \mu_{1j}^2} \right)$$

$$\begin{aligned}\bar{\mu}_1 &= \left(\sum \frac{\mu_{1j} \phi_j E_{1j}}{1 - \mu_{1j}^2} \right) / \left[\left(\sum \frac{\phi_j E_{1j}}{1 - \mu_{1j}^2} \right)^2 - \left(\sum \frac{\mu_{1j} \phi_j E_{1j}}{1 - \mu_{1j}^2} \right)^2 \right] \\ \bar{E}_2 &= 1 / \left[\sum \phi_j \left(\frac{1}{E_{2j}} - \frac{2\mu_{2j}^2}{E_{1j}(1 - \mu_{1j})} \right) + \frac{2\mu_{2j}^2}{E_{1j}(1 - \mu_{1j})} \right] \\ \bar{\mu}_2 &= \sum \left(\frac{\mu_{2j} \phi_j}{1 - \mu_{1j}^2} \right) \left(\sum \frac{\phi_j E_{1j}}{1 - \mu_{1j}^2} - \sum \frac{\mu_{1j} \phi_j E_{1j}}{1 - \mu_{1j}^2} \right) / \frac{\phi_j E_{1j}}{1 - \mu_{1j}^2}\end{aligned}\quad (8)$$

按照上式计算当量单元的等效参数, 采用各向异性有限元进行结构分析, 则可计算出当量岩体的应力。

3 隐含断层应力计算和非线性分析

假定断层的走向为 α' , 倾角为 β' (向上倾为正), 有限元整体坐标轴 X, Y, Z 的 Y 轴方向角为 φ , 设断层面的局部坐标 Z' 为断层面法向矢量, Y' 为断层面走向, X' 垂直于 $Y' Z'$ 平面。按下式则可求出断层面局部坐标 $X' Y' Z'$ 的方向余弦:

$$\begin{aligned}Z' \text{ 轴: } l_3 &= \cos \beta \sin(\alpha - \varphi), \\ m_3 &= \cos \beta \cos(\alpha - \varphi), \quad n_3 = \sin \beta \\ Y' \text{ 轴: } l_2 &= \cos(\varphi - \alpha), \\ m_2 &= \cos(90 + \alpha - \varphi), \\ n_2 &= \cos 90 = 0\end{aligned}\quad (9)$$

$$X' \text{ 轴: } l_1 = m_2 n_3, \quad m_1 = -n_3 l_2, \quad n_1 = l_2 m_3 - l_3 m_2$$

式中 $\alpha = \alpha' \pm 90$ (断层倾向南取正号, 倾向北取负号), 法向矢量的倾角: $\beta = 90 - \beta'$ 。

根据局部坐标 $X' Y' Z'$ 的方向余弦式 (9) 和应力转换关系^[3], 可以求出断层面坐标的应力转换矩阵 $[S]$, 根据有限元计算的当量单元应力 $\{\sigma\}$, 按下式可计算沿断层面的法向应力 σ'_z 和平行断层面的剪应力 τ'_{yz}, τ'_{zx} 分量:

$$\{\sigma^n\} = [S]^T \{\sigma\} \quad (10)$$

当垂直于断层面的正应力 σ'_z 大于断层的抗拉强度 R_l 时, 即:

$$\sigma'_z > R_l \quad (11)$$

说明断层出现拉裂破坏, 此时必须将超出断层面抗拉强度的应力 $\Delta\sigma'_z = \sigma'_z - R_l$ 转化成节点荷载, 并将其转移。当平行于断层面的阻滑力小于滑动力, 即:

$$(f\sigma'_z + c) / \sqrt{\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2} < K \quad (12)$$

式中 f, c, R_l 为沿断层面的摩擦系数, 凝聚力和抗拉强度, K 为沿断层面滑动的安全系数。此时应将超出抗剪强度的剪力:

$$\Delta\tau = \sqrt{\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2} - (f\sigma'_z + c) \quad (13)$$

转化成节点荷载, 并将其转移后进入下一步迭代计算。迭代计算方法采用三维弹塑性损伤有限元迭代计算^[4]。

4 工程实例分析

本文针对三峡地下厂房断层结构, 采用隐含地质断层方法对地下厂房洞室开挖的围岩稳定进行了分析。三峡右岸地下厂房装机 6×70 万 kW, 地下厂房由主厂房、出线洞、尾水调压井、引水洞、尾水洞等洞室群组成, 厂房洞室尺寸为 $328 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 88 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高), 地下厂房的规模较大, 开挖于闪长斜长花岗岩之中, 岩体弹性模量为 30 GPa, 泊松比为 0.2, 凝聚力 1.7 MPa, 摩擦系数为 1.5。有 6 条断层穿过地下厂房, 断层参数为: F20 产状为 $250^\circ \angle 70^\circ$, 厚度 1.5 m; F32 产状为 $250^\circ \angle 69^\circ$, 厚度 0.4 m; F22 产状为 $250^\circ \angle 70^\circ$, 厚度 0.6 m; F84 产状为 $350^\circ \angle 60^\circ$, 厚度 1.0 m; F100 产状为 $354^\circ \angle 84^\circ$, 厚度 0.4 m; F205 产状为 $10^\circ \angle 78^\circ$, 厚度 0.6 m。三维有限元分析计算网格包括了主厂房洞室、出线洞、尾水洞、引水洞和尾水调压井等洞室, 共剖分了 8 860 个 20 节点空间等参单元 (见图 3)。

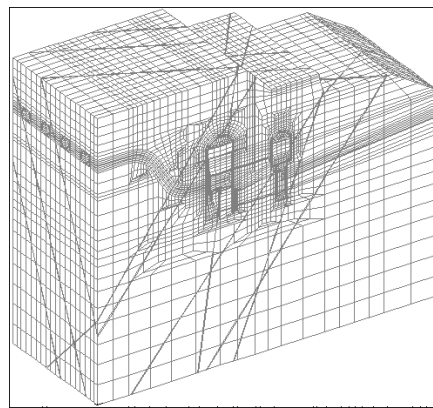


图3 三维有限元计算网格剖分图
Fig.3 3D FEM mesh

对地下洞室进行了毛洞无支护和锚固支护两种不同工况的分析计算, 通过分析比较可看出以下特征:

(1) 在无支护条件下, 主厂房洞周的破坏区较大, 开挖完毕围岩的总破坏体积达到 $57.94 \times 10^4 \text{ m}^3$, 塑性耗散能达到 $70.9 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。说明在无支护条件下, 断层对围岩稳定影响较大。采用锚固支护后, 整个洞周的塑性开裂破坏区都发展较慢, 围岩的总破坏体积减到 $10.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 塑性耗散能减到 4.02

$\times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 主厂房顶拱的破坏范围很小, 基本都集中在断层出入部位, 边墙的破坏区基本限制在 3 m 范围内, 只是在断层穿过的部位出现了局部开裂区 (见图 4)。说明采用隐含断层网格, 能够充分反应断层对围岩稳定的影响。

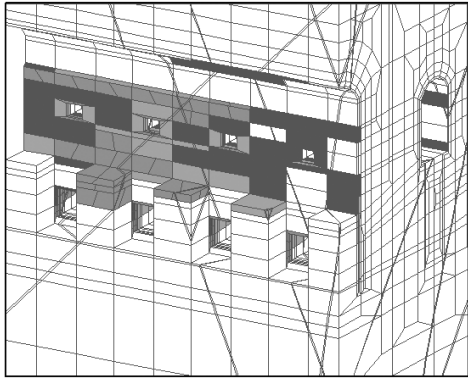


图4 洞室开挖完毕后主厂房洞周破坏区分布
Fig.4 Failure zone distribution

(2) 从洞周的应力分布规律看, 由于断层的切割, 使得在断层处的围岩应力有较大突变, 特别是在断层与洞室交叉口处的应力集中较为明显 (见图 5)。在无支护条件下, 断层引起洞室交叉口处的最大压应力达到 88.2 MPa, 采用锚固支护后, 应力集中程度比无支护有较大减小, 但在断层与洞室交叉口处的最大压应力仍然达到 59.5 MPa。说明采用隐含断层较好地反应了地质断层对围岩应力分布的影响。

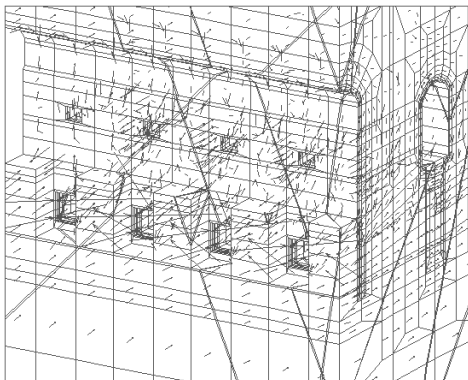


图5 洞室开挖完毕主厂房第一主应力矢量
Fig.5 First principal stress vector

(3) 从断层的正应力分布规律看, 垂直于断层的正应力基本为压应力, 其量值一般分布在 $-0.46 \sim -9.0 \text{ MPa}$, 在断层与洞室的交口处压应力值较小, 只有 -0.10 MPa , 在引水管与断层交口处局部出现了 0.08 MPa 的拉应力, 说明在该处断层可能张开, 对该处的断层支护应适量加强。位于厂房边墙的断层正应力值较大, 其值分布在 $-2.24 \sim -$

9.03 MPa ; 位于厂房顶拱的断层正应力值较小, 其值分布在 $-0.1 \sim -0.84 \text{ MPa}$ 之间 (见图 6)。由此看出, 顶拱断层受力条件较差。

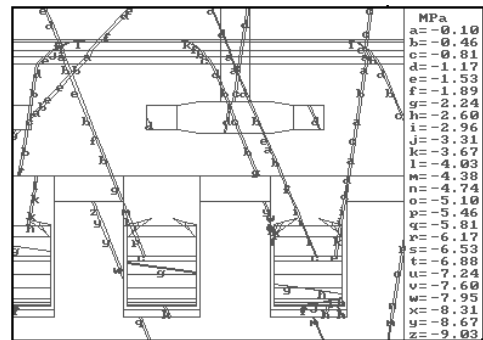


图6 洞室开挖完毕主厂房断层正应力大小
Fig.6 Normal stress of faults

(4) 从沿断层的滑动安全系数分布规律看, 在断层与洞室的交叉口处, 滑动安全系数一般都 < 1.0 , 其值分布在 $0.3 \sim 1.0$ 之间, 其他部位的安全系数都在 $2.0 \sim 16$ 之间 (见图 7), 厂房边墙断层的安全系数值都 > 1.0 , 厂房顶拱的断层安全系数较小, 其值在 $0.3 \sim 1.3$ 之间 (见图 7)。说明顶拱断层处的安全稳定条件较差, 对顶拱断层采用一些随机锚索支护加固是必要的。

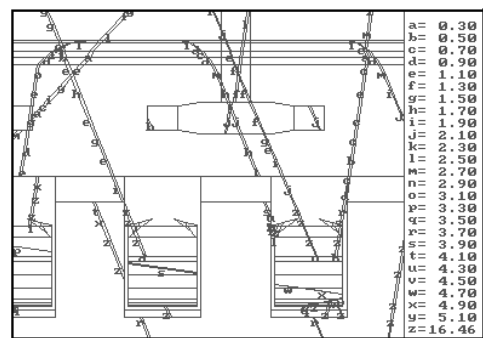


图7 洞室开挖完毕主厂房断层滑动系数
Fig.7 Slide-coefficient of faults

(5) 洞室开挖后, 顶拱的位移为 $0.3 \sim 0.47 \text{ cm}$, 但在断层处位移达到 0.68 cm , 开挖完毕后主厂房上下游边墙的最大位移为 1.88 cm 和 1.54 cm , 但在断层处达到 2.68 cm (见图 8)。说明断层对洞周位移分布有较大影响。

(6) 主厂房顶拱的锚杆应力一般为 $13 \sim 20 \text{ MPa}$, 但在断层处锚杆应力达到 $24 \sim 25 \text{ MPa}$; 洞室边墙的锚杆应力一般在 $20 \sim 67 \text{ MPa}$, 但在断层处锚杆应力达到 $90 \sim 185 \text{ MPa}$ (见图 8)。说明断层使洞周锚杆应力明显加大, 加强对断层的支护是必要的。

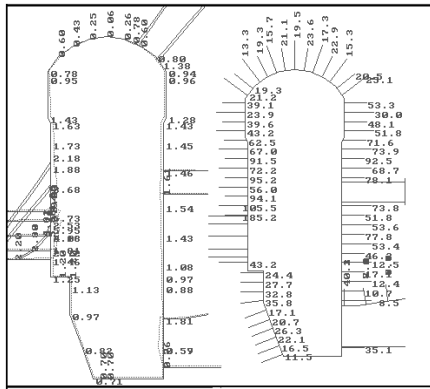


图8 洞室开挖完毕主厂房位移和锚杆应力

Fig.8 Displacement of workshop and stress of anchor bolts

综上所述可以看出,断层对围岩的破坏区、洞周应力、锚杆应力和洞周位移分布都有较大影响,采用隐含断层方法能够充分反映断层对地下洞室围岩稳定的影响,为对断层的支护处理提供了依据。

5 结 论

采用隐含断层单元模拟复杂的断层结构,使得复杂纵横交错的大型地下洞室群有限单元网格剖分,

不受复杂断层任意切割的影响,这种方法不但使复杂的地下洞室群建模简单快速化,而且能够有效地反应断层对复杂地下洞室围岩稳定的影响,缩短计算周期,为复杂断层结构的分析提供了一种十分有效的计算方法和思路。

参 考 文 献

- [1] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 2 版, 北京: 中国水利电力出版社, 1998.
- [2] 王勖成, 邵敏. 有限元基本方法原理与数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [3] 杨桂通. 弹性力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980.
- [4] 肖明. 西龙池抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定三维非线性分析[J]. 岩石力学和工程学报, 2000, 19(5): 557—561.
- XIAO Ming. Three dimensional stability analysis of surrounding rock of underground houses of Xilongchi Pumped Storage Hydropower Station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(5): 557—561.
- [5] Chijimatsu M, Fujita T, Kobayashi A. and Nakano M. Experiment and validation of numerical simulation of coupled thermal, hydraulic and mechanical behavior in engineering buffer material[J]. **Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 200, 24(4): 403—424.
- [6] Chijimatsu, M., Fujita, T., Sugita, Y., Amemiya, K. and Kobayashi A. Field experiment, results and THM behavior in the Kamishi Mine experiment[J]. **Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(1): 79—94.
- [7] Leiwis R W, Schrefler B A. The finite element method in the deformation and consolidation of porous media[M]. New York: John Wiley, 1987.
- [8] 张玉军. 热—水—应力耦合弹塑性二维有限元程序的开发与应用尝试[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 169—174.
- ZHANG Yu-jun. Development and use try of 2D FEM code for coupled thermo-hydro-mechanical elastoplastic analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 169—174.
- [9] 张玉军. 一种模拟热—水—应力耦合作用的节理单元及其数值分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 270—274.
- ZHANG Yu-jun. A kind of joint element simulating coupled thermo-hydro-mechanical phenomenon and relevant numerical analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(3): 270—274.

上接第 856 页