

文章编号: 1000-7598(2009)08-2483-06

基于强度折减原理的地下洞室群 整体安全系数计算方法探讨

江 权, 冯夏庭, 向天兵

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 为解决大型地下洞室群的整体稳定性评价这一难题, 吸收边坡强度折减有限元的优点, 提出了基于强度折减技术的地下洞室群整体安全系数求解方法。该方法采用 Mohr-Coulomb 屈服准则, 以洞室之间的等效塑性应变贯通作为洞室群整体失稳的临界判据。洞群整体安全系数计算是通过搜索折减系数 F , 将岩土材料的力学强度参数(黏聚力 c 和内摩擦角 φ) 按 F 值折减代入数值计算中, 使计算模型的洞室间正好出现明显的贯通性等效塑性应变来实现。拉西瓦水电站地下发电枢纽洞室群和锦屏二级水电站 A、B 辅助洞两个典型工程实例的整体安全系数计算表明, 该方法可以便捷、客观地获得洞室群的整体安全系数, 可为大型地下多洞室的稳定性评价和开挖与支护设计提供定量指标和科学依据。

关 键 词: 岩石力学; 地下洞室群; 安全系数; 强度折减; 稳定性分析

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Discussion on method for calculating general safety factor of underground caverns based on strength reduction theory

JIANG Quan, FENG Xia-ting, XIANG Tian-bing

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The safety of underground caverns is a key problem of large substructure work for designer. A new method to calculate the general safety factor of underground multi-cavern is put forward, which is based on the strength reduction technique. The method adopts the Mohr-Coulomb rule as the strength yield criterion and takes the transfixion of equivalent plastic strain in wall rock between caverns as the critical failure criterion of caverns. By reducing rock material strength parameters (cohesion c and friction angle φ) step by step, the general safety of caverns is obtained when the result of simulated excavation shows that the equivalent plastic strain of wall rock becomes transfixion, which is the critical state of caverns destabilization. In the course, the calculation program trends to emanate and the deformation of wall rock also tends to rise suddenly and sharply also. The Laxiwa underground hydropower plant, a large cavern group in the northwest China, consists of main powerhouse, auxiliary powerhouse, main transformer chamber, caudal shiplock chamber, tailrace tunnels, and so on. The high geostress and interaction of caverns lead to very serious stability problem. Using the underground caverns strength reduction technique, the general safety factor of Laxiwa underground caverns is gained, which is 1.45. The assistant tunnels of Jinping II hydropower plant are important tunnels also. The general safety factor, calculated by the method, is 1.73. Both of them prove that the method of underground caverns strength reduction technique is very useful for analyzing the general stability of caverns and design of substructure quantitatively.

Key words: rock mechanics; underground caverns; safety factor; strength reduction theory; stability analysis

1 引 言

由于可以客观和定量地给出坡体的安全系数, 基于强度折减原理的边坡稳定性分析方法得到了广

泛的应用, 取得了良好的经济效益^[1-4]。然而大型地下洞室群或隧洞群的稳定性评价却一直缺少合理的定量评价指标。通常有限元法或有限差分法虽可以通过变形、应力、塑性区等定性地评价洞群

收稿日期: 2008-10-22

基金项目: 国家科技支撑计划项目(No. 2006BAB04A06); 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室开放基金(No. Z000701); 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(No. 50539090)。

第一作者简介: 江权, 男, 1978 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事地下工程数值模拟、大型洞室群稳定性分析、工程地质灾害治理等方面的研究工作。E-mail: qjiang@whrsm.ac.cn

的稳定性,但仍旧无法定量地给出洞群的整体安全裕度。随着我国西部大开发战略的进一步深化,今后几十年内我国还将兴建许多大型地下工程。如何客观地、定量地评价这些地下工程的整体安全稳定性^[5-6],特别是由多个洞室或隧洞构成的相互影响的洞群的安全稳定性是亟待解决的关键问题。

本文基于强度折减原理,提出大型地下洞群的整体安全系数计算方法。该方法采用等效塑性应变作为判断洞室群整体失稳的临界标准,通过搜索折减系数 F ,将岩土材料的力学强度参数(黏聚力和内摩擦角)按 F 值折减后代入数值计算中,使计算模型的洞室间正好出现明显的贯通性等效塑性应变,从而定量地给出洞群整体的安全系数。拉西瓦水电地下洞室群安全系数的计算和锦屏二级深埋 A、B 辅助洞两个工程实例分析表明,该方法可以相对客观、有效地评价地下洞室群的整体安全性,可为地下工程支护设计提供科学依据。

2 地下洞室群强度折减计算基本原理

2.1 安全系数与地下洞群整体失稳定义

自1975年,Zienkiewicz等首次提出了抗剪强度折减系数概念以来,由此确定的强度储备安全系数得到了岩土工作者的广泛认同,并在边坡稳定性分析中得到普遍采用。抗剪强度折减系数通常定义为:在外荷载保持不变的情况下,岩土材料所能发挥的最大抗剪强度与外荷载在岩土体内所产生的实际剪应力之比,其公式如下^[7]:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (1)$$

式中: τ_f 为岩土材料的最大抗剪强度; τ 为实际剪应力。

外荷载所能产生的实际剪应力应与抵御外荷载所发挥的最大抗剪强度相等,即按照实际强度计算所确定的、实际中得以发挥的抗剪强度相等。当假定岩土材料各部分抗剪强度的发挥程度相同时,这种抗剪储备安全系数通常就称之为评价工程的整体稳定的安全系数 F_s 。因此,该方法所确定的安全系数实际上反映的是岩体结构的强度裕度。

在地下工程中,多个洞室开挖卸荷的交叉影响使得围岩反复进行应力调整,形成一种在洞周表层岩体径向应力相对较小而切向应力相对较大的二次应力状态,在洞室间围岩内部形成一个与洞室空间结构密切相关的应力场。洞室群开挖实践表明,洞室围岩失稳最直观的体现是洞周岩体出现大变形并发展成岩体垮落,其力学机制常是不利应力状态使得岩体发生剪切屈服并出现塑性流动^[8-14]。故式(1)

给出的强度储备安全系数同样可适用于描述地下洞室群的整体稳定性。如同边坡强度折减法中常采用表征岩体塑性程度的指标作为边坡整体失稳判据那样^[15-17],可定义地下洞群整体失稳的临界状态判断标准为洞群间岩体中的等效塑性应变相互贯通,即计算模型中各洞室围岩之间的等效塑性应变连成一片。

$$\bar{\varepsilon}^p = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_1^p \varepsilon_1^p + \varepsilon_2^p \varepsilon_2^p + \varepsilon_3^p \varepsilon_3^p)} \quad (2)$$

式中: $\bar{\varepsilon}^p$ 为等效塑性应变; ε_1^p 、 ε_2^p 、 ε_3^p 分别为第 1、2、3 塑性主应变。

2.2 数值计算软件与屈服准则

由于地下洞室群强度折减计算中会不可避免地遇到大变形和计算不收敛的情形,故求解洞室群整体安全系数的数值计算软件应该满足大变形计算和运算过程稳定的要求。有限差分软件 FLAC 采用动态松弛方法,应用质点运动方程求解,通过阻尼使系统运动衰减至平衡状态,避免了通常有限元计算中易出现高维病态刚度矩阵的情况。这使得该软件可以较好地处理大变形、计算不收敛等问题^[18],适合求解复杂的地下洞室群整体安全系数这一问题。

屈服准则描述了不同应力状态下材料某点进入塑性状态,并使塑性变形继续发展所必须满足的条件。Mohr-Coulomb 准则作为一种描述摩擦类岩土体的剪切强度准则,是目前岩土力学研究中应用最为广泛的屈服准则,其表达式为

$$f = \frac{1}{3}I_1 \sin \varphi - c \cos \varphi + \sqrt{J_2} \left(\cos \theta_\sigma + \frac{\sin \theta_\sigma \sin \varphi}{\sqrt{3}} \right) = 0 \quad (3)$$

式中: I_1 、 J_2 分别为应力张量第 1 不变量和应力偏量第 2 不变量; θ_σ 为应力罗德角; c 、 φ 分别为黏聚力和内摩擦角。在应用 FLAC 地下洞群整体安全系数计算时,可采用 Mohr-Coulomb 准则作为弹塑性计算中的屈服准则。

2.3 地下洞群整体安全系数计算方法

在采用 FLAC 弹塑性模型计算地下洞室群安全系数计算时,首先依据折减系数 F 对岩土材料的力学强度参数(黏聚力 c 和内摩擦角 φ)进行折减^[19],即

$$\left. \begin{aligned} c' &= \frac{c}{F} \\ \varphi' &= \arctan \frac{\tan \varphi}{F} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: F 为折减系数; c 为岩土材料的黏聚力; φ 为岩土材料的内摩擦角; c' 为按 F 值折减后的黏聚力,

φ' 为按 F 值折减后的内摩擦角。将折减后所得出的强度参数作为岩土体力学参数, 代入数值计算程序进行地下洞室群开挖模拟计算。通过分析计算结果的等效塑性应变特征判断计算终止时刻, 整个计算过程流程如图 1 所示。在安全系数求解计算过程中, 如果计算结果显示洞室间的等效塑性应变带没有贯通, 则认为洞群仍处于相对稳定状态, F 值需增大, 并按增大后的 F 值折减岩土体强度参数; 如果计算结果显示洞室间的等效塑性应变出现大面积的贯通, 则认为洞群处于失稳状态, F 值需减小, 并按减小后的 F 值折减岩土体强度参数。通过对折减系数 F 的反复搜索(实践中常采用二分法搜索), 直至数值计算结果显示洞室群之间正好出现明显的贯通性塑性应变带时, 表明洞群已基本处于临界失稳状态。实际上, 该时刻也是计算程序趋于发散、洞室围岩变形出现突增的时刻。因此, 此时获得的折减系数 F 值即为评价洞室群稳定性的整体安全系数 F_s 。

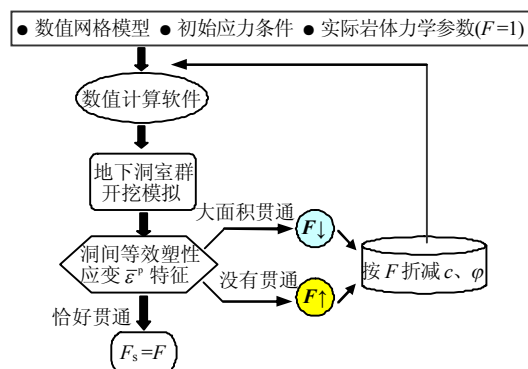


图 1 洞室群整体安全系数搜索流程图
Fig.1 Flow chart of searching general safety factor in multi-cavern

3 工程实例分析

3.1 拉西瓦水电站地下洞室群整体安全系数计算

拉西瓦水电站是黄河流域装机容量最大、发电量最多的水电站, 采用右岸全地下厂房方案, 垂直埋深约 225~429 m。水电站地下厂房从上游至下游依次为主副厂房、主变开关室、条形尾闸室和 2 个独立的圆形尾水调压室, 4 大洞室平行布置(见图 2)。厂房开挖尺寸约为 311.8 m×30.0 m×74.9 m, 主变室开挖尺寸约 232.6 m×29.0 m×51.5 m, 主厂房与主变室之间岩墙厚度为 50.0 m。工程岩体大部分为干燥的 III 类花岗岩。由于该工程的社会影响巨大, 又处于不利的高地应力环境下, 多洞室交叉相互影响使得洞室稳定性问题较为突出, 虽然通常的稳定性分析较详细地分析了洞室开挖过程围岩的变形、应力、塑性区等, 但都无法定量地给出该洞室

群的整体安全裕度。为此, 本文基于强度折减系数法研究了该大型地下洞群的整体安全系数。

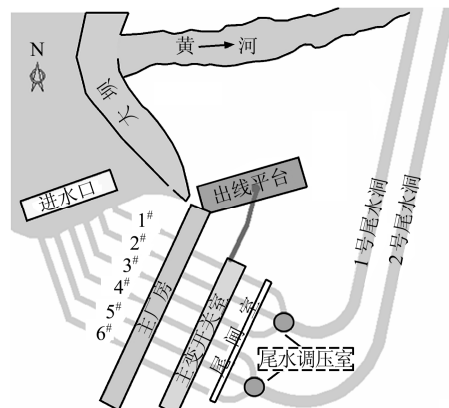


图 2 拉西瓦水电站地下洞室群布置示意图
Fig.2 Layout of Laxiwa hydropower station caverns

选取拉西瓦水电站地下洞室群最典型的 4[#] 机组剖面作为分析对象并建立数值计算模型。实测地应力和地应力反演分析表明^[20], 计算剖面上最大主应力 σ_1 约为 20~24 MPa, 最小主应力 σ_3 约为 8~13 MPa。洞室群安全系数求解过程的岩体力学参数采用设计推荐值^[21], 如表 1 所示。由于表中岩体力学参数取值时一定程度考虑了节理裂隙因素, 故洞群整体稳定性计算时简化了结构面对洞群整体稳定性的影响。

表 1 拉西瓦水电站地下洞室群围岩力学参数
Table 1 Parameters of wall rock in Laxiwa hydropower plant underground caverns

参数	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
数值	20	0.22	2.5	54	0.5

采用洞群强度折减计算方法, 在按折减系数 F 值逐步折减岩体强度参数的过程中, 洞室群之间的等效塑性应变带逐渐扩展并趋于贯通。当折减系数 F 从 1.41 变化到 1.45 时, 主厂房与主变室之间的岩墙的塑性应变逐渐增大并贯通(图 3(a)→图 3(b)→图 3(c)), 主变室与尾闸室之间的岩墙的塑性应变带也表现出同样的规律。当折减系数 F 进一步增大时, 洞室之间的等效塑性应变带贯通性进一步增大(图 3(d))。另外, 当折减系数 $F > 1.45$ 后, 洞室典型位置的围岩变形表现出明显的突增(如图 4), 计算程序趋于发散, 表明等效塑性应变贯通、关键部位变形突增、计算不收敛三者是协调一致的, 故在拉西瓦水电站地下洞室群安全稳定性分析中, 可将洞群围岩之间的等效塑性贯通作为判断洞室群

临界失稳的标志,认为拉西瓦水电站地下厂房洞室群的整体安全系数 F_s 约为 1.45。

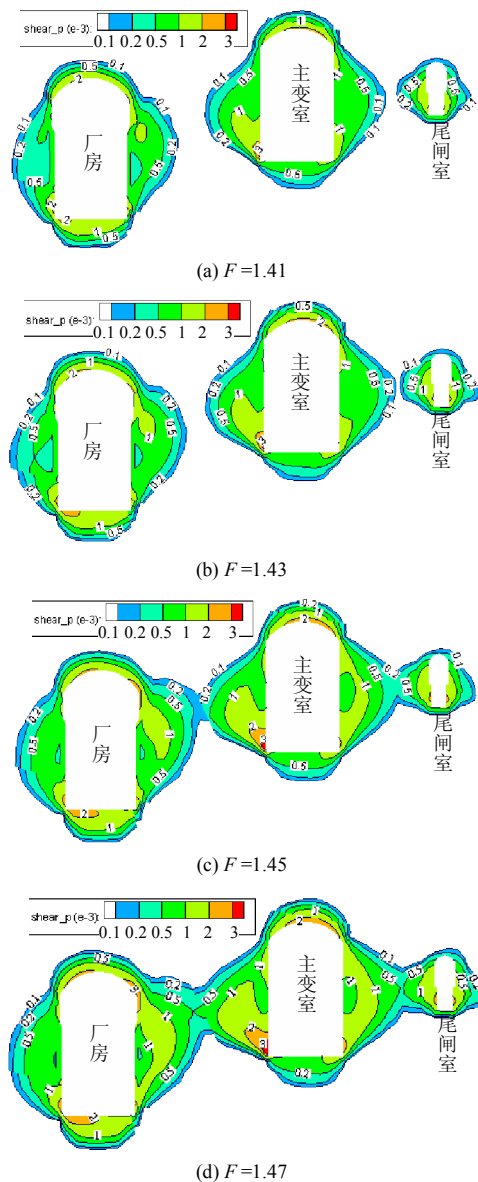


图3 不同折减系数下洞室群的等效塑性应变等色图
Fig.3 General plastic strain contours of Laxiwa caverns in different reduction factors

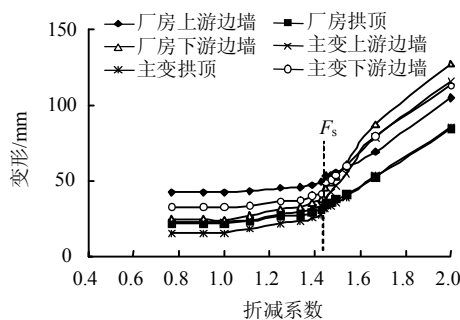


图4 洞室关键点变形随折减系数的变化
Fig.4 Curve between deformation of key points in Laxiwa caverns and reduction factor

3.2 锦屏二级水电站A、B辅助洞整体安全系数计算

位于四川省凉山彝族自治州的锦屏二级水电站是我国目前正在兴建的巨型水电工程。为深入了解该工程引水隧洞全线的地质条件并为引水隧洞的设计、施工积累经验,建设单位首先在4条引水隧洞南侧进行了间距为35 m的A、B辅助洞开挖。目前,辅助洞已经穿越了两端局部岩性较差的IV类地层和埋深超过2 000 m的III类大理岩地层,于2008年6月实现了单洞贯通。在引水隧洞开始动工之际,定量地反分析辅助洞洞群安全裕度,对同一工程地质条件下的引水隧洞开挖与支护设计具有重要的指导意义。

为此,选择埋深约2 000 m的AK13区域作为研究对象,建立辅助洞整体安全系数计算的数值模型。计算中综合该区域3个地应力的实测数值作为计算模型的初始应力条件,转换到计算剖面上的应力分量分别是 $\sigma_h = 32$ MPa, $\sigma_v = 47$ MPa。数值中的力学参数采用设计推荐值^[22],如表2所示。

表2 锦屏二级水电站辅助AK13段围岩力学参数
Table 2 Wall rock parameters at AK 13 of Jinping II hydropower plant assistant tunnels

参数	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
数值	16	0.24	1.5	48	0.5

通过对辅助洞整体安全系数计算可知,当折减系数 F 从 1.72 增大到 1.75 时,两隧洞围岩之间的等效塑性应变由原来的分离扩展到连通(如图5所示)。实际上,数值计算结果表明:当折减系数 $F = 1.73$ 时,两隧洞间的塑性应变出现明显贯通,故可认为辅助洞群的整体安全系数 $F_s = 1.73$ 。另外,分析强度折减过程中隧洞典型部位的变形特征曲线可以看出,当折减系数 $F > 1.73$ 后,围岩变形也出现急剧增长(如图6所示)。但同时也可以看出,围岩变形突变过程并没有边坡临滑时变形突变那样剧烈。

自辅助洞开挖至今,虽然隧洞不同洞段不同程度上都发生过岩爆和局部垮塌,但隧洞群并未出现大范围的垮塌和灾难性的岩爆而使得隧洞群整体失稳。这实际上表明了A、B辅助洞具有较高的整体安全裕度,与本文计算结果显示隧洞群整体安全系数较高($F_s = 1.73$)是一致的。

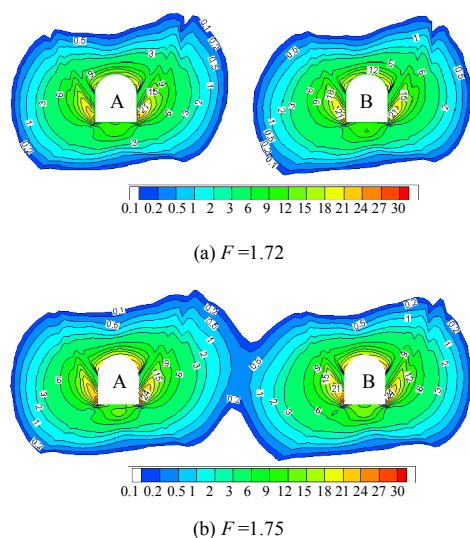


图5 不同折减系数下辅助洞群的等效塑性应变等色图
Fig.5 General plastic strain contours of assistant tunnels in different reduction factors

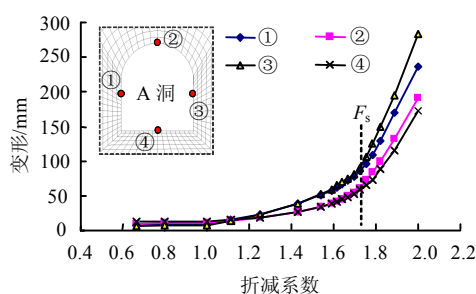


图6 辅助洞A洞壁关键点变形随折减系数的变化
Fig.6 Curve between deformation of key points in assistant tunnels and reduction factor

4 结 论

(1) 基于强度折减法原理计算地下多洞室的整体安全系数是可行的, 其计算方法便捷客观, 计算结果可用于定量评价洞室群的整体安全裕度。

(2) 在地下洞室群整体安全系数计算过程中, 可以采用洞室之间的等效塑性应变贯通作为判别地下洞室群整体失稳的临界判据。实际上, 当洞室间等效塑性应变连片时, 洞室围岩变形也表现出突然性的增大, 计算过程也具有趋于发散的特点, 即三轴者具有同步一致性。

(3) 拉西瓦水电地下洞室群和锦屏二级工程A、B辅助洞2个典型工程的安全系数计算表明, 该方法可以定量地评价洞室群的整体安全稳定性, 可为大型地下多洞室的枢纽布置优化、洞室开挖与支护设计提供科学依据。

(4) 正如边坡强度折减法中如何判断数值计算的临界失稳状态存在多种看法一样, 地下洞室群整

体安全系数计算的临界失稳判据的界定还有待进一步深入研究, 且整体安全系数的计算途径也可能存在多种方式。

参 考 文 献

- [1] MATSUI T, SAN K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. *Soils and Foundations*, 1992, 32(1): 59—70.
- [2] GRIFFITHS D V, IANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(3): 387—403.
- [3] 郑颖人, 张玉芳, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减法在元磨高速公路高边坡工程中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(21): 3812—3817.
- ZHENG Ying-ren, ZHANG Yu-fang, ZHAO Shang-yi, et al. Application of strength reduction FEM to Yuanjiang-Mohei expressway cut slope stability analysis [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(21): 3812—3817.
- [4] 郑颖人, 赵尚毅, 孔位学, 等. 极限分析有限元法讲座 (I) 岩土工程极限分析有限元法[J]. *岩土力学*, 2005, 26(1): 163—168.
- ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, KONG Wei-xue, et al. Geotechnical engineering limit analysis using finite element method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(1): 163—168.
- [5] 张黎明, 郑颖人, 王在泉, 等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. *岩土力学*, 2007, 28(1): 97—102.
- ZHANG Li-ming, ZHENG Ying-ren, WANG Zai-quan, et al. Application of strength reduction finite element method to road tunnels[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 97—102.
- [6] 李树忱, 李术才, 徐帮树. 隧道围岩稳定分析的最小安全系数法[J]. *岩土力学*, 2007, 28(3): 549—554.
- LI Shu-chen, LI Shu-cai, XU Bang-shu. Minimum safety method for stability analysis of surrounding rockmass of tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(3): 549—554.
- [7] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. *Geotechnique*, 1975, 25(4): 671—689.
- [8] RAJMENY P K, SINGH U K, SINHA B K P. Predicting

- rock failure around boreholes and drivers adjacent to stops in Indian mines in high stress regions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(2): 151—164.
- [9] LU Ming. Finite element analysis of a pilot gas storage in rock cavern under high pressure[J]. **Engineering Geology**, 1998, 49(3): 353—361.
- [10] 邵国建, 卓家寿, 章青. 岩体稳定性分析与评判准则研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 691—690.
- SHAO Guo-jian, ZHUO Jia-shou, ZHANG Qing. Research on analysis method and criterion of rockmass stability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(5): 691—690.
- [11] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚健, 等. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12): 39—61.
- ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, DENG Chu-jian, et al. **Engineering Science**, 2006, 8(12): 39—61.
- [12] XIA YULI, PENG SHOUZHUO, GU ZHAOQI, et al. Stability analysis of an underground power cavern in a bedded rock formation[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2007, 22(2): 161—165.
- [13] 王自高. 天生桥一级水电站导流隧洞围岩失稳分析与塌方处理[J]. 红水河, 14(4): 62—66.
- WANG Zi-gao. Destabilization analysis and disposal of landslide of diversion tunnel in Tianshengqiao I hydropower plant[J]. **Hongshui River**, 14(4): 62—66.
- [14] 曹林, 胡居义, 黎冬林. 小净距公路(双洞)隧道围岩破坏模式研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 65—69.
- CAO Lin, HU Ju-yi, LI Dong-lin. Failure modes of wall rocks of adjoining tunnels[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2007, 18(3): 65—69.
- [15] 连镇营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 406—411.
- LIAN Zhen-ying, HAN Guo-cheng, KONG Xian-jing. Stability analysis of excavation by strength reduction FEM [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 406—411.
- [16] 郑宏, 李春光, 李焯芬, 等. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 323—328.
- ZHENG Hong, LI Chun-guang, LI Zhuo-fen, et al. Finite element method for solving the factor of safety[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 323—328.
- [17] 栾茂田, 武亚军, 年廷凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 1—8.
- LUAN Mao-tian, WU Ya-jun, NIAN Ting-kai. A Criterion for evaluating slope stability based on development of plastic zone by shear strength reduction FEM[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2003, 23(3): 1—8.
- [18] Itasca Consulting Group Inc. FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) (version 3.1)[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2007.
- [19] 刘明维, 郑颖人. 基于有限元强度折减法确定滑坡多滑动面方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1544—1549.
- LIU Ming-wei, ZHENG Yin-ren. Determination methods of multi-slip surfaces landslide based on strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(8): 1544—1549.
- [20] 袁风波, 刘建, 李蒲健. 拉西瓦工程河谷区高地应力场反演与形成机理[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 836—842.
- YUAN Feng-bo, LIU Jian, LI Pu-jian, et al. Back analysis and multiple-factor influencing mechanism of high geostress field for river valley region of Laxiwa hydropower engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(4): 836—842.
- [21] 刘钊, 万宗礼, 杨永明. 黄河拉西瓦水电站工程可行性研究报告——工程地质[R]. 西安: 国家电力公司西北勘测设计研究院, 2001.
- [22] 周春宏, 曹强, 张升峰. 雅砻江锦屏二级水电站可行性研究报告[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2005.