

隧道及地下工程围岩的屈服接近度分析

周 辉¹, 张传庆¹, 冯夏庭^{1,2}, 茹忠亮²

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 根据围岩中接近屈服面区域的安全程度的差异, 对非塑性区的危险程度进行定量研究具有重要的理论意义和工程应用价值。通过分析 Mohr-Coulomb 准则以及其他屈服准则在主应力空间中非屈服应力点和屈服面的关系, 在经典塑性理论框架内定义了屈服接近度指标, 并建立了相应于各种不同类型的屈服准则的屈服接近度求解函数。通过对一受单断层影响的城门洞形隧道算例的分析, 表明破坏接近度的定义是合理的, 这一分析方法可以使得工程师以定量的概念来把握和判断围岩中不同区域的危险性程度, 便于相互比较和相似工程间的比较, 对于分析隧道及地下工程围岩破坏区的演化及安全度评价具有重要的实用价值。

关键词: 地下工程; 隧道; 围岩稳定性分析; 屈服准则

中图分类号: U 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)17-3083-05

ANALYSIS OF ROCK MASS STABILITY IN TUNNEL AND UNDERGROUND ENGINEERING BASED ON YIELD APPROACH INDEX

ZHOU Hui¹, ZHANG Chuan-qing¹, FENG Xia-ting^{1,2}, RU Zhong-liang²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: In many cases, it is necessary to realize the importance of the stability discrepancy among the points which are all close to the yield state in the principal stresses space. So the YAI(yield approach index) concept is presented, which denotes the yield approach degree or the difference of the stability of some points in the Haigh-Westergaard space compared with the relative safe point; and the method and rule are provided for the choice of relative safe point. The whole analysis is limited in the frame of plastic theory. This concept allows the possibility of describing the stability state and the progressing transition between stability and instability state of each element or point. So evolution of the stability state of surrounding rock mass in the process of loading can be simulated. The yield approach function is derived out based on the Mohr-Coulomb yield criterion. Finally, a case study is presented to which YAI is applied.

Key words: underground engineering; tunnel; stability analysis of surrounding rock; yield criterion

1 引言

隧道及地下工程的围岩安全性评价所关注的是围岩中破坏区和危险区的范围、深度、形成的机理以及危险性状态在施工过程中的演化特性。在这

个状态恶化直至破坏的过程中, 需要不断地根据应力或变形信息来评价围岩的稳定性状态。

关于这方面的研究, 前人做出了大量的卓有成效的工作, 如围岩稳定性分类分区方法、基于强度的应力判别准则和基于变形的临界应变或位移判别准则^[1], 另外, 还有位移速率判别法及能量法等^[2]。

收稿日期: 2005-02-24; **修回日期:** 2005-06-01

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412708); 国家自然科学基金资助项目(50204009, 50334060)

作者简介: 周 辉(1972-), 男, 博士, 2000 年于东北大学工程力学专业获博士学位, 现任副研究员, 主要从事岩土力学数值计算方法、智能分析方法及岩石力学与工程的非线性动力学等方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn.

在这几种方法中，强度判据和位移判据是工程中最常用且相辅相成的两种方法^[2-4]。强度分析及相应的强度判据对认识围岩的破坏机理和强度破坏^[5,6]现象以及支护设计有着至关重要的作用，但是，以单轴抗拉或抗压强度作为稳定性评价指标的经典材料力学方法对于处于复杂应力状态下的隧道围岩来说是不太适合的。由于岩体的复杂性和强烈的变异性，应力空间上的强度破坏准则也遇到了破坏区大小与实际差别较大的问题，所以仅仅依靠强度准则划分出的破坏区来评价围岩的稳定性状态是不够的。但是，在此基础上的危险性评价却很有意义，通过描述围岩的损伤程度和破坏程度来定义危险性指标对于工程上评价稳定性具有重要的参考价值。

基于以上的想法，本文在对主应力空间中屈服面与未屈服应力点的相互关系分析的基础上，提出了屈服接近度的新概念来处理这一问题，通过此概念来描述非塑性区的危险程度。

2 屈服接近度函数的建立

2.1 围岩力学分析中的强度方法

围岩的强度稳定性评价指标数量虽多，但总结起来可归结为两大类：单向强度指标和复杂应力状态下的强度指标。

文[1]的典型类比法中以边界单元的应力强度比来判断稳定性，满足下式，则围岩稳定：

$$\left. \begin{matrix} |\sigma_{1\max}| & [R_c] \\ |\sigma_{3\min}| & [R_t] \end{matrix} \right\} \quad (1)$$

式中： R_c 为岩石的单轴抗压强度， R_t 为岩石的单轴抗拉强度。

文[2]在凌子口隧道围岩稳定性分析评价中采用下式判断：

$$S = \sigma_c / \sigma_v \quad (2)$$

式中： $\sigma_c = R_b K_v / \sigma_v$ 为围岩岩体的抗压强度， R_b 为岩石饱和单轴抗压强度， K_v 为岩体完整性系数， σ_v 为岩体内最大主应力。《岩土工程勘察规范》(GB50021-94)认为 $S \geq 2$ 时隧洞稳定。

另外，还有强度应力比^[3]等方法来评价围岩的稳定性状态。

以上的判别方法基本上是沿袭了材料力学中经典的强度分析理论及相应的强度储备计算方法。但是，这种以单轴应力强度来评价稳定性的方法对于

处于复杂应力状态的地下工程围岩来说不太合适。

而建立在复杂应力状态下的强度理论能够较为准确地表达岩石破坏的机理，通过它可以对破坏区的范围和演化过程进行分析，但它本身无法表达非破坏区的危险程度和破坏区的破坏程度。

针对这一问题，文[4]参照 Mohr-Coulomb 准则来计算高斯点的强度发挥系数 $S.M.F.$ ，如下：

$$S.M.F. = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2c \cos \varphi + |\sigma_1 + \sigma_3| \sin \varphi} \quad (3)$$

当 $S.M.F. = 1$ 时，表示该高斯点已进入塑性状态。

文[7]在反映单元材料的非线性特征时引入了破坏接近度的概念，并由此计算相应的弹性模量和泊松比来反映材料的非线性特征。其假定围岩遵循 Mohr-Coulomb 直线破坏准则，通过应力圆与破坏包络线的关系引进破坏接近度指标 R ，定义如下：

$$R = \min(d_1 / D_1, d_2 / D_2) \quad (4)$$

式中： D_1, D_2, d_1 和 d_2 的意义如图 1 所示。

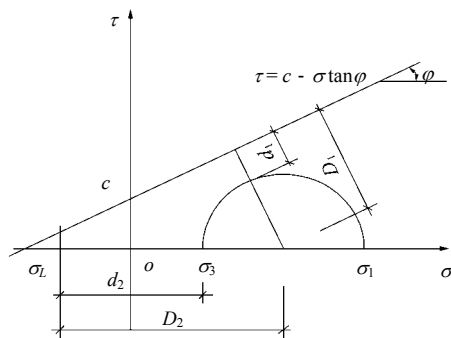


图 1 破坏接近度的 Mohr 圆示意图

Fig.1 Sketch of the failure approach degree by the method of Mohr circle

式(4)中， d_2 / D_2 由材料的抗拉强度决定，如果忽略这一项，则 R 完全由 Mohr 圆的大小和圆心位置决定。其中暗含两条假定：一是与这一应力状态相对应的最安全参考点是圆心；二是这一点的破坏方式是圆心不变，圆的大小均匀扩大。对于第一条假定，圆心的位置为 $(\sigma_1 + \sigma_3) / 2$ ，在常规三轴应力状态下，这可以表示各向等压状态和应力水平的大小，但在三向不等压状态下，由于中间主应力的存在，这一假定有失全面性。由图 1 可知，一点的最不利破坏方式为圆心左移的同时 Mohr 圆扩大，因此，很明显第二个假定也存在局限性。另外，当考

考虑中间主应力效应时, 这种方法是无法利用的。

2.2 屈服接近度函数的建立

针对以上分析中涉及的问题, 本文提出了屈服接近度(YAI : yield approach index)的概念, 可广义地表述为: 描述一点的现时状态与相对最安全状态的参量的比, $YAI \in [0, 1]$ 。相对于某一强度理论则可以定义为: 空间应力状态下的一点沿最不利应力路径到屈服面的距离与相应的最稳定参考点在相同罗德角方向上沿最不利应力路径到屈服面的距离之比。下面针对 Mohr-Coulomb 准则来推导屈服接近度的计算函数^[8-11]。

为了简化分析且不失代表性, 本文研究理想弹塑性问题, 假设岩石的强度准则为莫尔-库仑准则, 其表达式如下:

$$F(\sigma) = 1/3I_1 \sin \varphi + (\cos \theta_\sigma - 1/\sqrt{3} \sin \theta_\sigma \sin \varphi) \sqrt{J_2} - c \cos \varphi \quad (5)$$

式中: I_1 为第一主应力不变量, J_2 为第二偏应力不变量, φ 为内摩擦角, θ_σ 为应力罗德角^[8]。

式(5)可用 π 平面上的正应力 σ_π 和剪应力 τ_π 表示为

$$F(\sigma_\pi, \tau_\pi, \theta_\sigma) = 1/\sqrt{3} \sigma_\pi \sin \varphi + 1/\sqrt{2} (\cos \theta_\sigma - 1/\sqrt{3} \sin \theta_\sigma \sin \varphi) \tau_\pi \quad (6a)$$

其中,

$$\tau_\pi = \sqrt{2J_2}$$

$$\sigma_\pi = I_1 / \sqrt{3}$$

令

$$A = 1/\sqrt{3} \sin \varphi \quad (6b)$$

$$B(\theta_\sigma) = 1/\sqrt{2} (\cos \theta_\sigma - 1/\sqrt{3} \sin \theta_\sigma \sin \varphi) \quad (6c)$$

$$D = -c \cos \varphi \quad (6d)$$

将式(6b), (6c), (6d)代入式(6a)得

$$F(\sigma_\pi, \tau_\pi, \theta_\sigma) = A\sigma_\pi + B(\theta_\sigma)\tau_\pi + D \quad (7)$$

主应力空间中, 一点 A 的应力状态可以表示为子午面和 π 平面上的一点, 如图 2, 3 所示。

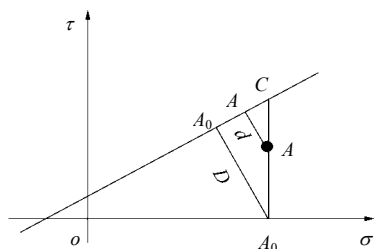


图 2 子午面上一点的应力状态

Fig.2 Stress state of a point on the meridian plane

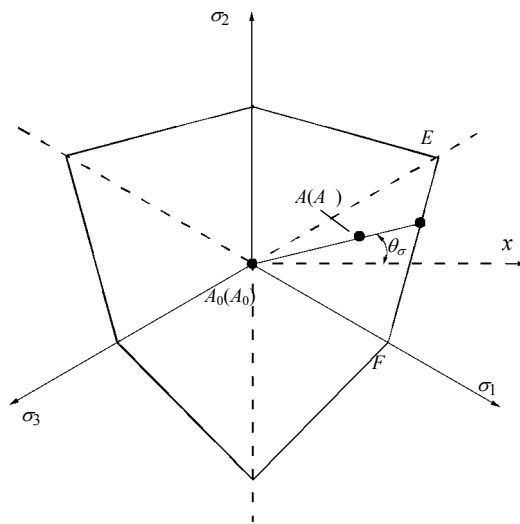


图 3 π 平面上一点的应力状态

Fig.3 Stress state of a point on the π plane

图 2, 3 中, 设 AA' , $A_0A'_0$ 均垂直于 EFA_0 面, d, D 分别为二者的长度, 而点 A 在子午面上的坐标为 (σ_π, τ_π) , 点 C 坐标为 (σ_π, τ'_π) , 假定点 A 总在子午面内, 点 A_0 总在等倾线上, 点 C 坐标满足式(5)或(7)。

由三角关系易得

$$\frac{d}{D} = \frac{AA'}{A_0A'_0} = \frac{AC}{A_0C} = \frac{\tau'_\pi - \tau_\pi}{\tau'_\pi} = 1 - \frac{\tau_\pi}{\tau'_\pi} \quad (8)$$

因此, 本文将屈服接近度函数定义为

$$f(\sigma_\pi, \tau_\pi, \theta_\sigma) = 1 - \tau_\pi / \tau'_\pi \quad (9)$$

由于点 C 坐标满足式(7), 则

$$\tau'_\pi = (-A\sigma_\pi - D) / B(\theta_\sigma) \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)中, 得

$$f(\sigma_\pi, \tau_\pi, \theta_\sigma) = (A\sigma_\pi + B\tau_\pi + D) / (A\sigma_\pi + D) = [1/3I_1 \sin \varphi + (\cos \theta_\sigma - 1/\sqrt{3} \sin \theta_\sigma \sin \varphi) \sqrt{J_2} - c \cos \varphi] / (1/3I_1 \sin \varphi - c \cos \varphi) \quad (11)$$

式(11)便为 Mohr-Coulomb 强度准则所对应的屈服接近度函数的表达式。当应力点在屈服面上时 YAI 的值为 0, 在等倾线上时为 1。

如果子午面上的屈服线为曲线, 则式(4)的三角关系近似成立。对于式(11), 需要说明两点: 一是与所研究点在同一应力水平上的等倾线上的点为相对最稳定参考点, 若参考点取非相同应力水平的点, D 值将失去参考意义, 式(4)也将无意义可循; 二是此点沿最不利应力路径破坏。

在工程中, 应力点的应力路径较为复杂, 很难说就一定沿最不利路径破坏, 但作为一种稳定性评价指标, 必须要关心它的最不利状况。也就是

说，接近屈服强度的围岩在开挖卸荷等扰动的作用下，进入塑性屈服的可能性非常大，所以必须也只有研究最不利状态才能对这种可能性作出安全评价，这同极限分析理论中安全系数的定义道理是相似的。

对于与其他类型的屈服函数相对应的屈服接近度函数的表达式如表 1 所示。对于同时考虑剪切和拉伸破坏的情况，分析图 4 $\sigma - \tau$ 平面内的 Mohr 圆与剪切包络线和拉伸包络线的关系。圆 1 与直线 BC 和 BD 同时相切，圆心为点 P，当圆 2 的圆心位于点 P 左侧时只考虑剪切屈服，在右侧时只考虑拉伸屈服，此时屈服接近度的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} f &= (\sigma_L - \sigma_1) / (\sigma_L - \sigma_R) (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 > \sigma_R \\ \sigma_R &= \frac{\sigma_1 (2 - \sin \varphi) - 2c \cos \varphi}{2(1 - \sin \varphi)} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

表 1 屈服接近度函数

Table 1 Yield approach functions

屈服准则	破坏接近度函数
Tresca	$(\sqrt{J_2} \cos \theta - k) / k$
广义 Von Mises	$(\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k) / (\alpha I_1 - k)$
Mohr-Coulomb	$\left[\frac{1}{3} I_1 \sin \varphi + \left(\cos \theta_\sigma - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_\sigma \sin \varphi \right) \sqrt{J_2} - c \cos \varphi \right] / \left(\frac{1}{3} I_1 \sin \varphi - c \cos \varphi \right)$
Drucker-Prager	$(\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k) / (\alpha I_1 - k)$

注：k 值根据相应的屈服面与 Mohr-Coulomb 屈服面之间的关系来决定。

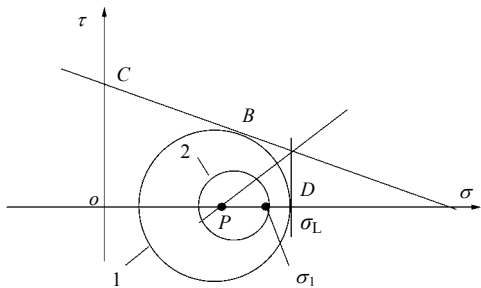


图 4 拉伸-剪切破坏的分析图
Fig.4 Plot of tension-shear failure

同时考虑剪切和拉伸的屈服接近度函数为

$$f = \begin{cases} 1 - \tau_\pi / \tau'_\pi & (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 > \sigma_R \\ (\sigma_L - \sigma_1) / (\sigma_L - \sigma_R) (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 > \sigma_R \end{cases} \quad (13)$$

式中： σ_R 为图 4 中点 P 的正应力。

3 算例分析

问题的描述：单孔直墙拱形隧道，墙高为 3.0 m，拱高为 3.0 m，宽度为 6.0 m。一断裂带横切过隧道，断层中充填有 1 m 厚的软弱岩屑。根据规范规定和计算经验，影响范围取长 100 m，宽和高各为 60 m，地质模型见图 5，各层的岩体力学参数如表 2 所示。

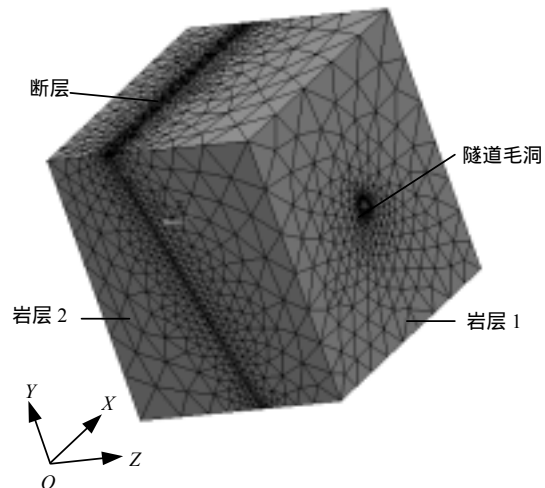


图 5 隧道的三维拉格朗日元计算网格
Fig.5 3D mesh for the tunnel

表 2 计算参数

Table 2 Parameters for computation

岩层	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	密度 ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角 φ ($^\circ$)	粘聚力 c/kPa
1	2.26×10^3	0.198	2 200	30.0	5.0×10^2
断层	5.00×10^2	0.340	1 700	21.2	2.6×10^2
2	5.00×10^3	0.270	2 750	45.0	9.8×10^2

岩体采用弹塑性本构关系，屈服准则为直线型 Mohr-Coulomb 准则。不考虑工程开挖效应的影响，在平衡完初始地应力场后全断面一次性开挖，计算得到应力场的重新分布，并对此计算结果进行屈服接近度的计算。

本文利用 FLAC^{3D} 内置 Fish 语言按式(7)计算各单元的屈服接近度，深度为 25 m 处横断面的屈服接近度分布如图 6 所示。

在图 6 中可以清晰而直观地看到，屈服接近度为 1.0 的区域为塑性区，之外区域相应的危险程度由高到低逐渐变化。屈服接近度为 0.95 ~ 1.0 的区

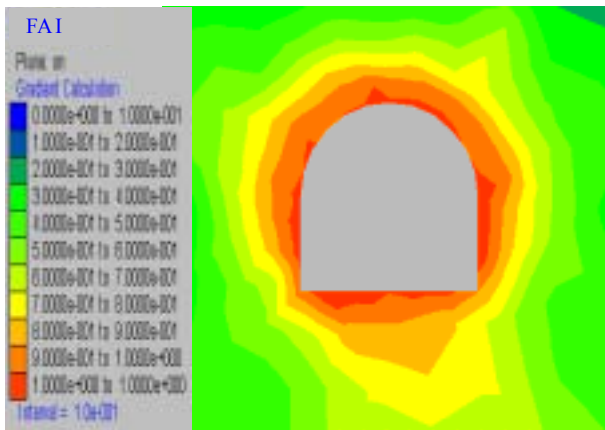


图6 隧道的某横断面屈服接近度的等值线图

Fig.6 Contour diagram of the yield approach degree of a cross-section of the tunnel

域, 由于临近屈服状态, 工程开挖扰动很容易造成屈服, 因此, 在支护设计时必须引起重视。同时, 在开挖过程中可进行塑性区的演化预测和相应的安全性评价。

4 结 语

本文在力学强度分析的基础上所定义的屈服接近度指标能够比较全面客观地表述围岩的危险性程度。这一定义主要有以下几个特点:

- (1) 利用了复杂应力状态下的所有应力分量, 可以较全面客观地反映围岩的实际状态。
- (2) 将力学概念与几何特点结合起来, 表述清晰, 简单实用。
- (3) 围岩中未发生屈服的点并不表示其安全程度是一样的, 相同的应力水平(即在同一 π 平面内)下, 近屈服面点的安全程度也是有差别的, 而屈服接近度则可以合理地表达这种差别, 所以这种分析比较接近实际情况。

屈服接近度这一概念对于认识破坏区到安全区的渐进变化、围岩损伤演化分析等具有重要的理论意义和工程应用价值。它可以使工程师以定量的概念来直观地把握和判断围岩中不同区域的危险性程度, 便于相互比较和相似工程间的比较。对于分析地下工程围岩破坏区的演化及安全度评价具有重要的实用价值。而且, 在岩石破裂过程的模拟中, 利用其对单元接近屈服破坏程度进行评价, 对于研究其渐进破坏演化特性具有重要的意义。

参考文献(References):

- [1] 李世辉. 典型类比分析法的理论与实践[J]. 铁道建筑技术, 1990, (3): 8-11.(Li Shihui. Theory and practice on typical analogical analysis method[J]. Railway Construction Technology, 1990, (3): 8-11.(in Chinese))
- [2] 王 宇, 罗 毅. 凌子口隧道围岩稳定性分析评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(3): 40-42.(Wang Yu, Luo Yi. The adjoining rock stability analysis and evolution[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2002, 13(3): 40-42.(in Chinese))
- [3] 王 薇, 王连捷, 王红才, 等. 青藏铁路昆仑山隧道稳定性分析[J]. 地球学报, 2002, 23(4): 359-362.(Wang Wei, Wang Lianjie, Wang Hongcai, et al. Stability analysis of Kunlun Mountain tunnel for Qinghai-Tibet railway[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(4): 359-362.(in Chinese))
- [4] 潘昌实, 张 弥, 吴鸿庆. 隧道力学数值方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.(Pan Changshi, Zhang Mi, Wu Hongqing. Numerical Analysis Method for Tunnels[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1995.(in Chinese))
- [5] 周国林, 谭国焕, 李启光, 等. 剪切破坏模式下岩石的强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 753-762.(Zhou Guolin, Tham L G, Lee P K K, et al. New strength criterion for rock with shear failure mode[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 753-762.(in Chinese))
- [6] 杨米加, 贺永年. 试论破坏后岩石的强度[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(4): 379-385.(Yang Mijia, He Yongnian. On the strength of broken rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(4): 379-385.(in Chinese))
- [7] 杜丽惠, 黄丽清. 考虑围岩蠕变特性的轴对称有限元非线性分析[J]. 水利学报, 2001, (1): 85-89.(Du Lihui, Huang Liqing. The nonlinear axisymmetric finite element method for analysis of surrounding rock in consideration of creeping[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (1): 85-89.(in Chinese))
- [8] 郑颖人, 沈珠江. 岩土塑性力学原理[M]. 重庆: 后勤工程学院出版社, 1998.(Zheng Yingren, Shen Zhujiang. Theory of Plastic Mechanics for Geo-material[M]. Chongqing: Logistical Engineering University Press, 1998.(in Chinese))
- [9] 徐秉业, 刘信声. 应用弹塑性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.(Xu Bingye, Liu Xinsong. Applied Elastic and Plastic Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.(in Chinese))
- [10] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001.(Gong Xiaonan. Soil Plastic Mechanics[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2001.(in Chinese))
- [11] Maier G, Hueckel T. Nonassociated and coupled flow rules of elastoplasticity for rock-like materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1979, 16(2): 77-92.