

基于有限元修正节理岩质边坡稳定性计算的解析解

熊 炜¹, 范 文^{1,2,3}, 邓龙胜¹, 闫芙蓉¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 国土资源部岩土工程开放研究实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 采用有限元方法探讨在人工开挖或自然侵蚀环境下, 岩质边坡体内应力场的变化及节理发育形成机理, 并采用有限元强度折减法对后缘具有张节理边坡的稳定性影响因素进行敏感性对比分析, 进而得出具有非贯通节理边坡稳定性计算的修正解析解。结果表明: 卸荷及风化作用导致边坡体由表及里出现应力重分布及应力集中的现象, 使边坡后缘由顶部向下发育一簇垂直向下或略向临空面倾斜的张节理, 当张节理与下部的缓倾剪节理贯通时, 边坡发生破坏; 边坡稳定性最敏感的影响因素为受剪节理的倾角及贯通度, 其次是节理的强度参数; 可将工程中较难调查的节理贯通度转化为节理的强度参数来等效表达, 并根据 Mohr-Coulomb 强度准则推导得到适用于具有非贯通节理的岩质边坡稳定性的修正解析解。

关键词: 边坡工程; 岩质边坡; 非贯通节理; 边坡稳定性; 解析解; 有限元强度折减法

中图分类号: P642; TU457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)03-0306-05

Amendment of Analytical Solution on Stability of Joint Rock Slope Based on Finite Element Method

XIONG Wei¹, FAN Wen^{1,2,3}, DENG Long-sheng¹, YAN Fu-rong¹

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Open Laboratory of Geotechnical Engineering of Ministry of Land and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The changes of stress field and formation mechanism of joint development of rock slope under the condition of man-made or natural environment were studied by finite element method; the sensitivity of factor of slope stability with tension joints was comparatively analyzed by strength reduction finite element method; the analytical solution on stability of non-through joint rock slope was amended. The results showed that the unloading and weathering resulted in stress redistribution and concentration of slope and tension joints development down vertical or tilts to the free face slightly, and the slope would damage when tension joint connected with gently inclined joint; next to the inclination and through degree of shear joint, the most sensitive factors of slope stability were strength parameters of joint; the through degree of joint investigated difficultly could be equivalent replaced by strength parameters of joint, and the analytical solution on stability of non-through joint rock slope was amended according to Mohr-Coulomb strength criterion.

Key words: slope engineering; rock slope; non-through joint; stability of slope; analytical solution; strength reduction finite element method

0 引言

岩质边坡由岩石和节理面组成, 完整岩石本身具有较高的强度, 边坡破坏主要决定于节理面的强度^[1-2]。然而工程实际中众多边坡的节理并不是完全贯通, 其破坏模式也不是理想中仅仅沿某一缓倾

节理面发生整体破坏, 而是受后缘张节理和缓倾节理共同控制而导致局部失稳。

这类岩质边坡稳定性计算结果常常和实际情况存在一定差别, 一方面由于边坡岩土体在自然条件下其节理的分布和贯通度具有随机性, 并且节理还会随着各种条件的变化不断发展变化, 很难将边坡

收稿日期: 2010-10-15

基金项目: 交通部国家西部交通建设科技项目(200631800006); 国家自然科学基金项目(40972181)

作者简介: 熊 炜(1984-), 男, 陕西汉中, 工学博士研究生, 从事地质灾害及防治研究。E-mail: s06260056@163.com

节理完全调查清楚;另一方面,即使将边坡节理调查清楚,将其概化成数学和力学模型又是一个极其繁琐复杂的过程。工程上对于贯通节理边坡常采用极限平衡法分析计算^[3-7],而更多非贯通节理边坡的稳定性如何求解?为此,郑颖人等采用有限元(ANSYS)进行了岩体节理扩展的研究^[8-10];龚文慧采用弹塑性有限元对岩质边坡稳定性进行了研究^[11];李录贤就扩展有限元(XFEM)应用于节理边坡进行了详细研究^[12]。这些方法的共同点是依然摆脱不了对岩体节理的准确调查,导致其实用性大大降低。有的学者干脆避开计算边坡稳定性的精确解,采用概率方法评价边坡的可靠度,其结果主观影响较大,并且由于引入了新的参数,使其计算过程反而变得复杂^[13-16]。因此,工程中对边坡评价治理多直接采用经验值,而经验值的选取一般是按照多个边坡的统计结果给出的,且其值域也是一个范围,这样无异于是靠经验来判断边坡稳定性,若稳定性判断过大,则可能带来安全隐患;若判断过小,又可能会造成财力物力的浪费。

近年来,由于强度折减法在边坡计算中的应用,尤其是与有限元的结合,使得边坡稳定性分析变得容易^[17]。笔者在采用有限元模拟揭示边坡后缘张节理形成机理的基础上,对影响边坡稳定性的因素进行对比研究,进而对原有的极限平衡法进行修正,从而提高计算的准确度。

1 边坡节理的形成机理

边坡的缓倾节理通常是层理面或构造节理。而后缘张节理主要是在开挖卸荷、风化侵蚀作用下形成的张性或卸荷裂隙,坡体内张应力集中部位由表及里渐进式扩展,节理发育通常竖直向下或略向临空面倾斜,倾角一般为 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$,当陡倾节理与下部缓倾节理逐渐连通时边坡即会发生失稳破坏。例如,2009年6月5日重庆武隆滑坡即是沿后缘陡倾节理和底部缓倾层理发生的破坏(图1)。

笔者采用韩国 MIDAS Information Technology 公司开发的岩土有限元分析软件 MIDAS GTS 进行数值计算,主要分析边坡体内的位移、应力、应变及稳定系数。本研究的边坡变形采用二维平面应变模型,材料满足 Mohr-Coulomb 强度准则。

1.1 形成机理

1.1.1 应力重分布

在重力场条件下,开挖导致边坡面附近主应力迹线发生明显偏转,应力重分布。其特征表现为:最



图1 2009年6月5日重庆武隆滑坡

大主应力在边坡临空面附近为平行于坡面分布,越往深处又逐渐变化为竖直方向;中间主应力在坡体内为沿走向分布(迹线空白处),深层部位逐渐变化为边坡断面的水平向;最小主应力在坡体内为水平向,越靠近临空面逐渐为垂直于坡面方向,其他部位均沿边坡走向分布(迹线空白处)(图2)。

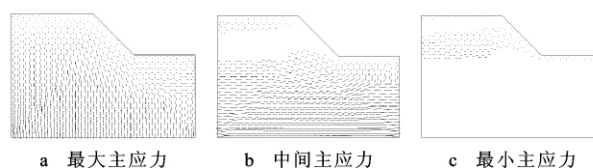


图2 边坡的应力迹线分布

Fig. 2 Stress Trajectory of Slope

1.1.2 应力集中

由于坡面形状突变引起临空面附近形成应力集中带,但坡脚区和坡缘(坡面与坡顶的交线)区情况有所不同。坡脚附近最大剪应力显著增高,且愈近表面愈高,在坡顶靠近坡缘附近也有一个剪应力增高的部位(图3)。

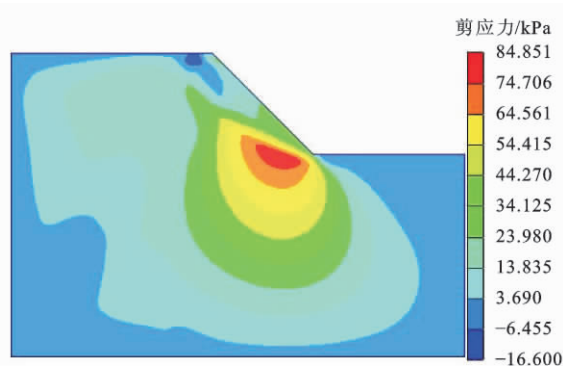


图3 边坡剪应力云图

Fig. 3 Shear Stress Contour of Slope

图4表明,最小主应力显著降低,在表面处降为零,甚至在坡顶变为拉应力,形成一张力带。因而,这一带是边坡应力差及剪应力变化最大和最集中的部位,通常是边坡中最容易发生变形和破坏的部位,

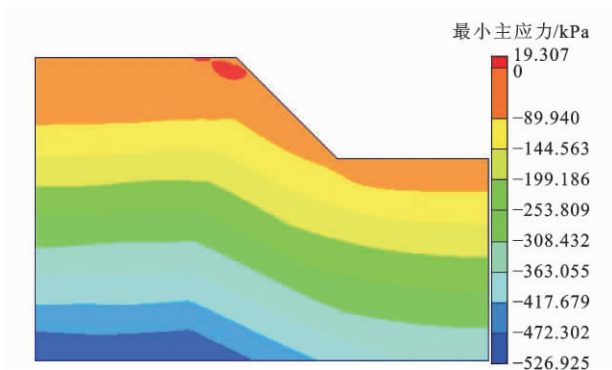


图 4 边坡最小主应力云图

Fig. 4 Minimum Principal Stress Contour of Slope

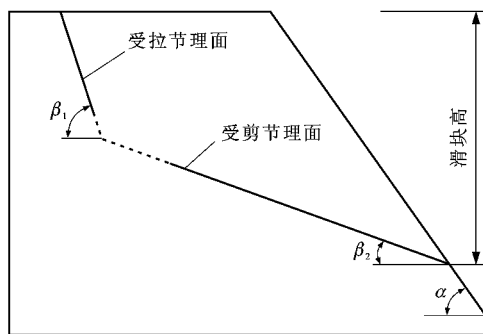
往往产生与坡面近于平行的张节理。

1.2 形成条件

节理的形成条件从成因上分为内部(自身)条件和外部条件。内部条件主要包括边坡的结构特征、岩土体强度参数。外部条件包括自然条件下的构造运动、地震、温度变化、雨旱交替及人类活动等;边坡受到众多不利因素的耦合作用,加速了边坡体内节理的发育、贯通。外部条件属于边坡的个性条件,不同边坡差异较大,而内部条件属于边坡的共性条件。因此,笔者将主要针对内部条件研究影响边坡稳定性的因素。

2 边坡稳定性影响因素

边坡岩体的受力形式包括拉、压、剪、弯、扭,而导致边坡失稳破坏最主要的形式是拉、剪组合,为此专门研究具有受拉节理和受剪节理边坡的稳定性影响因素。计算模型如图 5,其中节理贯通度为 80%,采用强度折减法进行计算。



注: α 为坡角; β_1 、 β_2 分别为受拉节理和受剪节理的倾角。

图 5 边坡计算模型

Fig. 5 Calculation Model of Slope

模型参数根据经验取自《工程地质手册》^[18](表 1)。通过试算,岩石参数对边坡稳定性的影响较小,这里主要研究节理参数的影响。

表 1 模型材料参数

Tab. 1 Material Parameters of Model

| 岩石参数 | 重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 弹性模量/ MPa | 泊松比 | 内聚力/ MPa | 内摩擦角/ ($^\circ$) |
|------|---|---|-------------|-----------------------|-----------------------|
| | 25 | 20 000 | 0.2 | 0.2 | 40 |
| 节理参数 | 法向刚度模量/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$) | 剪切刚度模量/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$) | 内聚力/ MPa | 内摩擦角/ ($^\circ$) | |
| | 4 500 | 2 000 | 0.03 | 27 | |

2.1 边坡结构特征

通过试算得出在岩体强度范围内坡高并不影响边坡稳定系数,但滑块垂直高度对稳定系数有一定影响,随滑块高度增加,稳定系数呈略下凸的曲线并逐渐降低。在常见的坡度范围内,可以看到随坡度增加稳定系数呈线性减小。从图 6 可看出,滑块高度对边坡稳定系数影响的敏感程度略大于坡度。

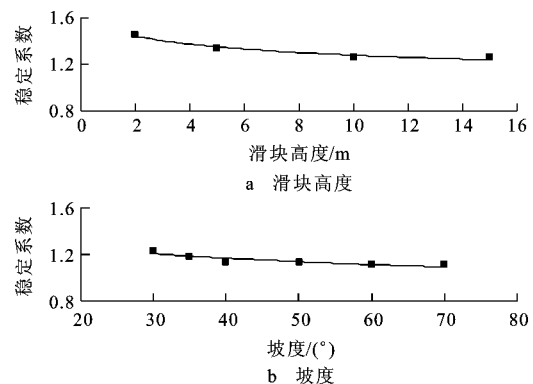


图 6 坡形对边坡稳定性的影响

Fig. 6 Effects of Slope Shape on Slope Stability

2.2 节理特征

2.2.1 参数

图 7 为节理参数对稳定系数的影响。刚度模量对稳定系数影响较小,扩大纵坐标后近似呈对数分布。内摩擦角和内聚力对稳定系数的影响呈线性分布;随受剪节理内聚力和内摩擦角增大,稳定系数增大,受拉节理参数的影响则较小。从数值上看,刚度模量、内聚力、内摩擦角对稳定系数影响的敏感程度依次增大。

2.2.2 倾角

根据实际统计情况,受剪节理倾角主要研究 $10^\circ \sim 30^\circ$ 的范围,受拉节理研究 $75^\circ \sim 90^\circ$ 的范围,结果如图 8。从图 8 节理角度对边坡稳定性的影响结果来看,受剪节理倾角对边坡稳定性的影响非常大,随受剪节理倾角增加,边坡稳定性逐渐降低。当节理角度小于 15° 时,稳定性降低比较缓慢;节理在 $15^\circ \sim 25^\circ$ 时,随节理倾角增加稳定性迅速降低,这是

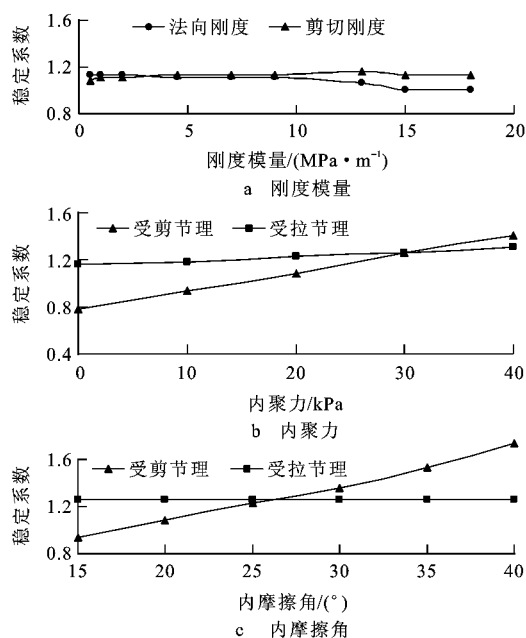


图7 节理参数对边坡稳定性的影响

Fig. 7 Effects of Joint Parameters on Slope Stability

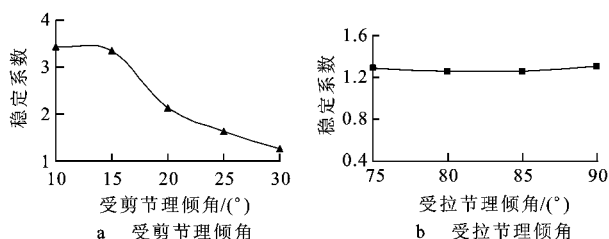


图8 节理角度对边坡稳定性的影响

Fig. 8 Effects of Joint Angel on Slope Stability

因为节理的内摩擦角多集中在这个范围内,而这个范围是决定边坡是否稳定的转折点;当节理大于25°时,稳定系数降低程度逐渐趋缓,此时边坡多已发生破坏。受拉节理倾角对边坡稳定性的影响较小,随倾角增大略减小,但在倾角为90°时稳定系数反而增大,主要因为受拉节理倾角小于90°时滑块体上向后缘突出的岩块有向后倾倒的趋势,造成受剪节理的法向压力减小,即抗滑作用降低。

2.2.3 贯通度

节理的发展均是由表及里,因此贯通度越高越向坡体内部扩展。图9给出了受拉、受剪节理贯通度对边坡稳定系数的影响。

图9可看出,受剪节理的贯通度对稳定系数影响很大,整体呈现随贯通度增加稳定性降低的趋势。当贯通度小于20%时,边坡稳定性降低较缓慢;当贯通度在20%~40%时,边坡稳定性迅速降低;贯通度大于40%以后,边坡稳定性降低趋势又逐渐趋缓,接近于完全贯通时的稳定性。由此可以认为,当

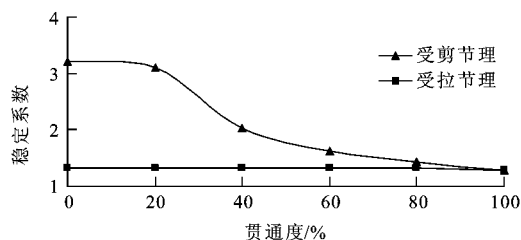


图9 节理贯通度对边坡稳定性的影响

Fig. 9 Effect of Joint Through Degree on Slope Stability

受剪节理贯通度大于40%时可按节理完全贯通进行计算。受拉节理的贯通度对边坡稳定性影响较小,主要因为岩体的抗拉强度非常小,并且边坡中存在的微裂隙在受拉时迅速扩展。在计算受剪节理面贯通度对稳定系数的影响时,发现岩体联结位置越靠近前缘剪出口,其稳定系数越大,因此工程防护时应尽量从前缘支护,以节省工程费用。

2.2.4 粗糙程度

节理的粗糙程度包括接触面自身及填充物质的粗糙度。节理自身越粗糙,边坡的稳定性就相对越好,相当于增加了节理的内摩擦角。充填物质的粗糙度与充填物质地、大小、形状、密实度等相关,鲜学福等对其做过详细研究,大致可认为充填物越硬、越大、越光圆、越稀松,边坡稳定性越差,反之稳定性越好^[19]。

3 边坡稳定性的修正解析解

研究认为,对后缘具有张节理的边坡稳定性影响最大的是受剪节理的倾角和贯通度,其次是节理的强度参数(内摩擦角 c 、内聚力 φ)。由于边坡节理贯通度具有较强的隐蔽性,使用现阶段的勘察方法很难将其调查清楚,并且节理随时间逐渐发展、贯通。因此可以调整计算思路:假设节理完全贯通,贯通度对坡体稳定性的影响可以通过改变节理强度来表现。根据研究结果,受剪节理贯通度大于40%的,按照节理强度进行计算;贯通度小于20%的,设贯通度为 k ,根据汪小刚等的研究,其节理等效抗剪强度取值公式为^[20]

$$\tau = \tau_j k + \tau_R (1 - k) \quad (1)$$

式中: τ 为节理等效抗剪强度; τ_j 、 τ_R 分别为节理和岩石的抗剪强度; k 为节理贯通度。

贯通度20%~40%是稳定系数变化最快的区间。考虑到贯通度随时间逐渐增加的特性,为安全起见节理等效抗剪强度也按节理完全贯通时的强度取值计算。由此得到强度修正公式

$$\tau = \begin{cases} \tau_j k + \tau_R(1-k) & k \leq 20\% \\ \tau_j & k > 20\% \end{cases} \quad (2)$$

根据 Mohr-Coulomb 强度准则推导,将式(2)中 τ 替换为 c 或 $\tan \varphi$ 即是对强度参数的修正公式。

通过这种修正可以相对降低对节理贯通度的依赖程度,只要确定节理贯通度范围即可用简单的极限平衡方法较为准确地求得边坡的稳定性。图 10 将滑块分为①、②,稳定系数 K 的计算公式为

$$K = \frac{N_2 f_2 + c_2 l_2 + (T_1 - N_1 f_1 - c_1 l_1) \sin(\beta_1 - \beta_2) f_2}{T_2 + (T_1 - N_1 f_1 - c_1 l_1) \cos(\beta_1 - \beta_2)} \quad (3)$$

式中: N_1 、 N_2 分别为滑块①、②节理上的法向力; T_1 、 T_2 分别为滑块①、②节理上的切向力; l_1 、 l_2 分别为滑块①、②修正后节理全长度; c_1 、 c_2 分别为滑块①、②修正后节理的内聚力; f_1 、 f_2 分别为滑块①、②修正后节理的摩擦系数。

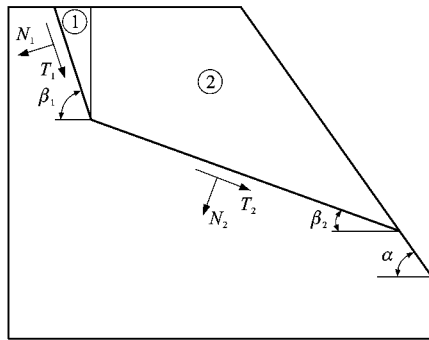


图 10 极限平衡法计算模型

Fig. 10 Model of Limit Equilibrium Method

4 结语

(1)岩质边坡中缓倾节理多是已存在的层理面或构造节理,后缘张节理是由于卸荷、风化作用引起边坡体内应力重分布和应力集中等效效应产生的,其形成与边坡结构特征、岩土体参数等内部条件有关,还与边坡所在区域内构造运动、地震、温度变化、雨旱交替及人类活动等外部条件相关。

(2)在边坡内部条件中,对稳定性影响最敏感的因素是受剪节理的倾角和贯通度,其次是节理的强度参数,边坡的坡角和滑块高度对稳定性也有一定影响,影响最小的是坡高(岩体强度范围内)和岩体参数。

(3)众多边坡岩体节理并非完全贯通,且随时间变化贯通度逐渐增加,因此计算边坡稳定性可以假设节理完全贯通,采用修正的节理强度参数代入极限平衡公式,得到边坡的稳定系数,其实质相当于将贯通度用节理强度等效表达。

参考文献:

- [1] 龚文惠,王平,陈峰. 顺层岩质路堑边坡稳定性的敏感性因素分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 812-816.
- [2] 郝生跃,张清,田盛丰,等. 专家系统在结构性岩质边坡稳定性分析中的应用研究[J]. 中国公路学报, 1995, 8(2): 9-13.
- [3] 陈祖煜,弥宏亮,汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 525-529.
- [4] 舒继森,才庆祥,王成龙,等. 岩石边坡平面滑动时的临界滑面倾角的探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(4): 437-440.
- [5] 冯树荣,赵海斌,蒋中明. 节理岩体边坡稳定性分析新方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1639-1642.
- [6] Chen Z Y. A Generalized Solution for Tetrahedral Rock Wedge Stability Analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(4): 613-628.
- [7] Haswanto W A, Abd-Ghani R. Kinematic and Block Theory Applications to Rock Slope Stability Analysis at Fraser's Hill Pahang Malaysia[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 13: 1-8.
- [8] 郑颖人,赵尚毅,邓卫东. 岩质边坡破坏机制有限元数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 1943-1952.
- [9] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等. 用有限元强度折减法求边坡稳定的安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.
- [10] 赵尚毅,郑颖人,邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 254-260.
- [11] 龚文惠,王平. 顺层岩体路堑边坡稳定性的弹塑性有限元模拟分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1114-1118.
- [12] 李录贤,王铁军. 扩展有限元法(XFEM)及其应用[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 5-20.
- [13] 李亮,刘宝琛. 边坡极限承载力的下限分析及可靠度理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 508-513.
- [14] 谭晓慧. 多滑面边坡的可靠性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 822-825.
- [15] Li W X, Mei S H. Fuzzy System Method for the Design of a Jointed Rock Slope[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 467.
- [16] Düzgün H S B, Bhasin R K. Affect of Shear Strength Criteria Selection in Probabilistic Rock Slope Stability Analyses: a Case Study for a Jointed Rock Slope in Norway[C] // Eberhardt E, Stead D, Morrison T. Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium: Rock Mechanics Meeting Society's Challenges and Demands. London: Taylor and Francis Group, 2007: 951-957.
- [17] 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): 407-411.
- [18] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 第4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [19] 鲜学福,谭学术. 层状岩体破坏机理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
- [20] 汪小刚,陈祖煜,刘文松. 应用蒙特卡洛法确定节理岩体的连通率和综合抗剪强度指标[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(4): 345-355.