

文章编号: 1000-7598-(2008) 06-1551-06

基于可靠度理论的滑坡稳定性及其影响因素分析

尹小涛, 王水林

(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: 基于可靠度理论, 利用 Morgenstern-Price 法、Ordinary 法、Bishop 法和 Janbu 法等 4 类极限平衡方法对台州市北水南调工程朱溪引水段Ⅷ号滑坡的稳定性进行了分析, 设计了最不利组合、最有利组合、平均值组合的确定性分析方案, 目的是为可靠度计算结果提供对比基准; 设计了 Monte-Carlo 循环次数为 5 000, 50 000, 500 000, 5 000 000 次等 4 种计算工况, 岩土参数的概率分布函数为正态分布、三角形分布和均匀分布等 3 种情况, 方差等于 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 倍初始实验方差等 6 种计算方案, 岩土参数间相关性在 -1.0~1.0 间按 0.25 等幅变化的 9 种情况。研究发现, 循环次数仅对安全系数有较大影响, 对可靠度指标影响不大; 分布函数和数据离散性均会对结果精度造成影响; 参数相关性仅对失效概率造成较大影响。

关 键 词: Monte-Carlo; 可靠性指标; 失效概率

中图分类号: TU 457; O 213

文献标识码: A

Stability and its influential factors analysis of landslides based on reliability theory

YIN Xiao-tao, WANG Shui-lin

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

Abstract: Utilizing four kinds of limit equilibrium methods such as Morgenstern-Price, Ordinary, Bishop and Janbu, stability of the landslide No. 8 in Zhuxi sector of Taizhou North-to-South Water Transfer Project is studied on basis of reliability theory. Determined analysis schemes of most harmful, most favorable and mean constitutions are designed to set reference points for probabilistic method. The influence of cyclic number on Mento-Carlo method is discussed under condition of cyclic numbers of 5 000, 50 000, 500 000, 5 000 000. Then, the effect of probability distribution function such as normal, triangular and uniform is analyzed and tested. Furthermore, the effect of variance is reviewed on condition that standard deviation respectively equals 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 and 5.0 times of experimental value. Finally, sensitivity analysis and correlative coefficient between strength parameters from -1.0 to 1.0 change at intervals of 0.25 is considered. It is found that cyclic number only imposes great effect on extreme values of Fs, that different probabilistic distribution function and variance can do great harm to reliability indexes, and that correlative coefficient only exerts effect on failure probability.

Key words: Monte-Carlo; reliability index; failure probability; factor of safety

1 引 言

滑坡是一种常见的地质灾害, 也是一个一直困扰人类的工程问题。工程界一直饱受如何科学准确地描述和评价滑坡稳定问题的困扰。基于此的数值分析被形容为“garbage in, garbage out”。事实上这是一个认识误区, 计算误差源自人们对实际问题的认识不清, 从而导致具有严密数学力学基础的评价方法不能有效评价滑坡稳定问题。当前对于滑坡稳定性计算的方法, 大致可以归为极限平衡和强度折减两类方法, 稳定性的判定标准有安全系数、可靠度

或破坏概率等几个指标^[1-13]。当前确定方法的缺点是不能考虑实际存在的岩土参数的时间空间变异性。可靠度理论^[1,2]可有效地解决边坡系统内存在的众多不确定因素对计算结果的影响问题。

20 世纪以来, 随着计算机技术的发展, 基于可靠度理论的滑坡稳定性计算方法和评价体系得到了迅猛发展, 传统的确定方法和安全系数单一指标评价体系的缺陷也日益凸显, 概率设计已成为一种趋势。可靠度理论的判定标准包括安全系数、可靠性指数和失效概率等^[1,2]。研究表明, 基于概率的计算

收稿日期: 2007-07-23

作者简介: 尹小涛, 男, 1975 年生, 博士研究生, 主要从事岩土细观力学及数值计算方面的研究。E-mail: yxt9406@163.com

和设计更符合工程实际,也更科学,并能较好地反映客观存在的参数的空间离散性、时间变异性。可靠度理论中岩土体的重度 γ 、内摩擦角 φ 、凝聚力 c 等输入参数均作为随机变量,其概率分布函数、概率分布特征值、参数间的相关性带来的影响不可忽略^[1-13]。

本文以台州市北水南调工程朱溪引水段Ⅷ号滑坡为研究对象,利用可靠度滑坡稳定性计算理论,在极限平衡方法的基础上,设计了确定性方法和可靠度计算方案,其中确定方法为分析提供对比基准,确定性计算方案包括:最不利组合、最有利组合和平均值组合;可靠度计算方案包括:不同 Monte-Carlo 循环次数、不同输入参数的概率分布函数、不同计算参数概率分布特征值和不同岩土参数相关性等计算方案。在此基础上,对该滑坡的稳定性进行系统分析,也分析了各因素对可靠度计算精度的影响程度。

2 计算模型和分析方案

2.1 滑坡工程地质剖面 and 岩土计算参数

台州市北水南调工程朱溪引水段Ⅷ号滑坡工程地质剖面图见图 1,表层为残积土层,中间一层为强风化泥岩,底座为中风化泥岩,坡底有地表水。

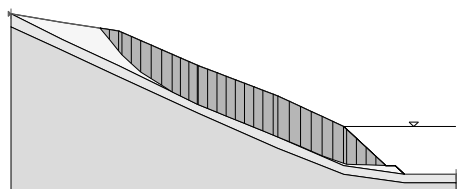


图 1 滑坡模型和最危险滑弧条分图
Fig.1 Model of coast and slice picture of the critical slip surface

经过对该滑坡地段进行工程勘察,通过室内土工试验资料获取了残积土层的重度、凝聚力和内摩擦角等岩土计算参数的统计特征值,结果列于表 1。

表 1 计算采用土性参数表
Table 1 Soil parameters used in calculation

地层	参数值	重度 /kN·m ⁻³	凝聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
残积土	最大值	28.8	23.4	26.2
	最小值	8.8	3.4	6.2
	平均值	18.8	13.4	16.2
	标准差	1.3	1.4	1.8
强风化泥岩	平均值	20.6	45.0	25.0
中风化泥岩	平均值	24.7	300.0	45.0

2.2 计算方案

计算的目的是全面系统地评价台州市北水南调

工程朱溪引水段Ⅷ号滑坡的稳定性,同时也为了对比确定性方法和可靠度方法的优缺点及定量分析影响概率方法计算精度的各因素。具体计算方案设计见表 2。

表 2 计算方案
Table 2 Computing schemes

方法	计算子项
确定性方法	最不利组合, 最有利组合, 均值组合
Monte-Carlo 循环次数	5×10^3 , 5×10^4 , 5×10^5 , 5×10^6
概率分布函数	正态, 三角形, 均匀
正态分布不同倍数方差	0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0
凝聚力和内摩擦角相关性	-1.0~1.0, 0.25 等间距

3 确定性方法计算结果

设计确定性计算方案的目的是为可靠度方法计算结果提供对比基准,共涉及 4 类条分法,其中最不利组合为:重度最大值、凝聚力最小值和内摩擦角最小值组合;最有利组合为:重度最小值、凝聚力最大值和内摩擦角最大值组合;平均值组合顾名思义,就是 3 个岩土计算参数平均值的组合,具体计算结果列于表 3。为了表述方便,将 Morgenstern-Price 法简称为 M-P 法。

表 3 确定性方法安全系数计算结果
Table 3 Computing results of safety factor on determined method

计算工况	M-P 法	Ordinary 法	Bishop 法	Janbu 法	平均值
最不利组合	0.358	0.345	0.359	0.345	0.352
最有利组合	3.265	3.105	3.282	3.041	3.173
平均值组合	1.326	1.287	1.324	1.276	1.303

从表 3 计算结果可以看到,最不利情况下该滑坡的安全系数平均值为 0.352,不同方法的绝对误差最大为 0.014,相对误差不超过 4.0%,提供了安全系数最小参考值;最有利组合安全系数平均值为 3.173,不同方法绝对误差最大为 0.224,相对误差不超过 7.1%,提供了安全系数最大参考值;平均值组合安全系数为 1.303,不同方法绝对误差最大为 0.05,相对误差不超过 3.8%,提供了安全系数平均参考值。总体而言,计算结果离散性不大,这样为可靠度计算方法提供了安全系数的相对范围值和稳定基线。

4 可靠度方法计算结果

4.1 Monte-Carlo 循环次数敏感性分析

由于文中设计的计算方案较多,计算量较大,所以为了优化计算条件,首先考虑了 Monte-Carlo 循环次数的影响,分别计算了循环次数为 5×10^3 , 5×10^4 , 5×10^5 和 5×10^6 等 4 类工况,岩土参数概

率分布函数为正态分布, 统计特征值见表 1, 计算结果整理成图 2。

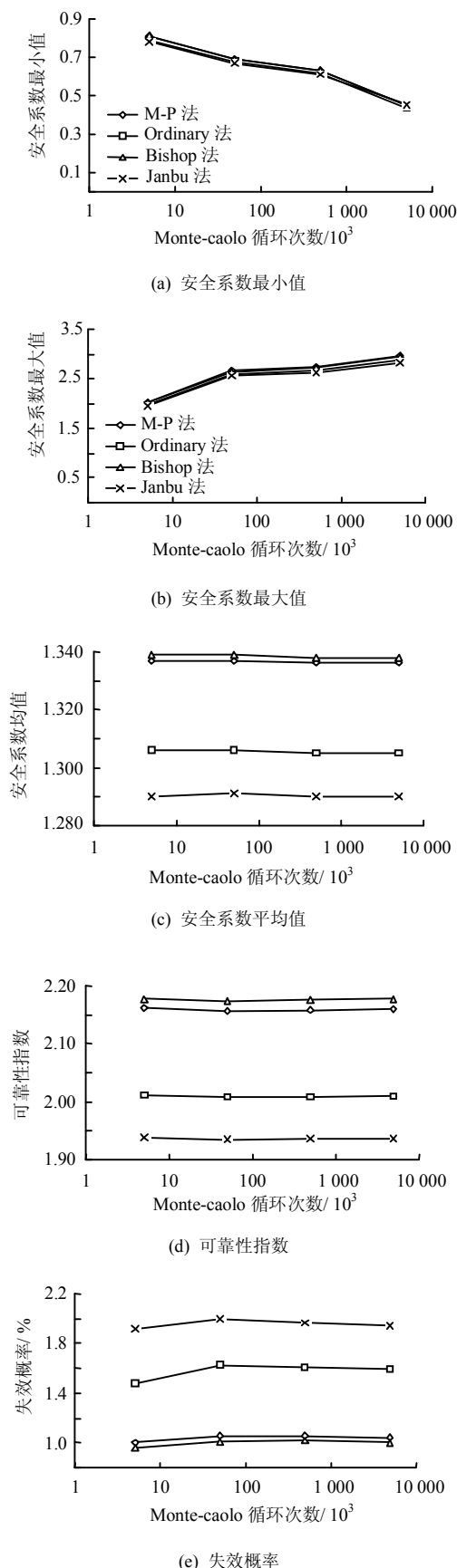


图2 循环次数对可靠度计算结果的影响
Fig.2 Computing results of reliability affected by cyclic number

从图 2(a)可知, 安全系数最小值代表的不利组合随着循环次数的提高安全系数最小值呈下降趋势, 但在文中试验的最大循环数下也没有达到最不利组合的 0.352; 图 2(b)安全系数最大值随着循环次数的增加呈上升趋势, 最大循环数下也没有达到最有利组合的 3.173。这说明随着循环次数的增加, 随机取值并组合才有可能取到最不利和最有利组合两个极端, 也说明 Monte-Carlo 法需要对随机取值组合进行干预, 才能提高计算效率, 不可能一味通过提高计算数量来达到目的。从图 2(c)~(e)可知, 安全系数均值、可靠性指数和失效概率对循环次数的影响不敏感, 曲线基本保持水平, 说明可靠度指标性质稳定。各指标在 $5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^5$ 之间都有一个相对较缓的阶段, 这在两种极端情况的单调趋势情况下更明显, 所以后面计算均选定循环次数等于 5×10^4 。

4.2 不同概率分布函数的影响

在考察了 Monte-Carlo 循环次数对计算结果的影响之后, 发现随机取值对极端情况的影响较大, 因此, 分析了不同概率分布函数对可靠度计算结果的影响, 整理结果见图 3。

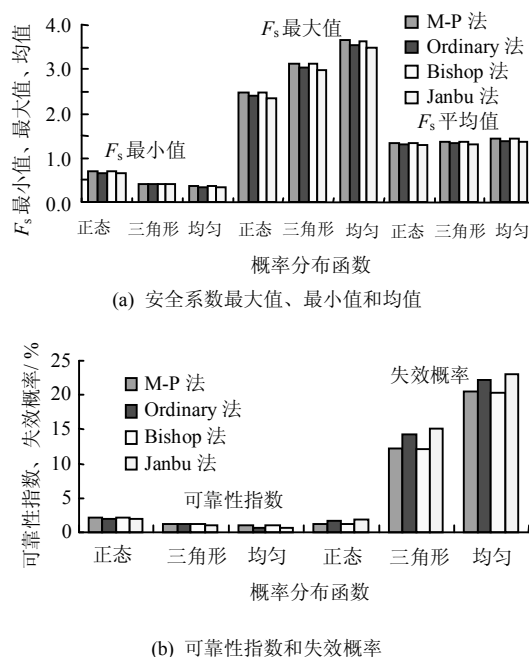


图3 不同概率分布函数对可靠度计算结果的影响
Fig.3 Computing results of reliability affected by probabilistic distribution function

从图 3(a)可知, 安全系数最小值依次为: 正态分布 (0.683) > 三角形分布 (0.435) > 均匀分布 (0.367); 安全系数最大值为: 正态分布 (2.425) < 三角形分布 (3.059) < 均匀分布 (3.576); 安全系数均值为: 正态分布 (1.317) < 三角形分布 (1.351)

<均匀分布 (1.401), 这说明均匀分布在考虑极端情况时最具有优势, 但也要看到均匀分布安全系数均值偏离确定方法计算的 1.303 最远, 对于均匀分布安全系数最大值大于确定方法最有利组合的问题, 说明文中最不利假设没有问题。从图 3(b)可知, 可靠性指数为: 正态分布 (2.076) > 三角形分布 (1.069) > 均匀分布 (0.809); 失效概率为: 正态分布 (1.394 %) < 三角形分布 (13.374 %) < 均匀分布 (21.59 %)。经分析各分布函数下可靠性指标, 发现三角形分布的失稳概率是正态分布的 10 倍, 均匀分布是三角形分布的近 1.6 倍, 这说明随着小值和大值等极端情况的随机获取概率的增大, 其组合下的不利情况概率也相应增大, 对应于安全系数频谱变宽, 离散性也增大, 所以可靠性指标变小。由此可见, 计算参数概率分布对可靠度计算结果影响较大, 在计算前应先确定参数的概率分布函数类型, 具体计算中可以通过用户自定义函数实现。

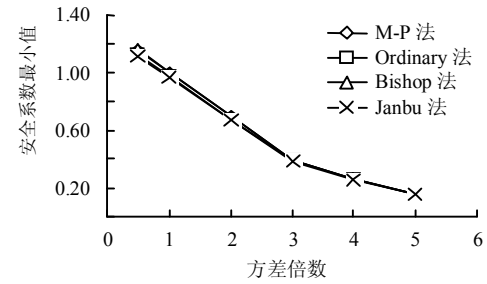
4.3 正态分布条件下不同方差倍数的影响

自然界很多事物的统计特征满足正态分布, 正态分布条件下的计算结果基本上较好地反映了该滑坡的安全状态, 因此, 笔者在正态分布函数条件下设计了 6 种不同方差计算方案检验了数据离散性对计算结果的影响, 结果整理成图 4。

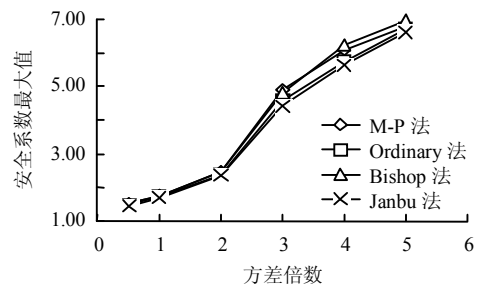
从图 4(a)~(c)可以看出, 随着岩土参数原有方差成倍增加安全系数最小值急剧减小, 最小达 0.15; 最大值急剧增加, 最大达 6.80; 平均值逐步增加, 其中方差倍数在 2 倍之前平缓, 之后增加较快, 说明数据离散性造成安全系数的离散性也增大, 原本比较稳定的安全系数均值也产生较大变化。从图 4(d)、图 4 (e)可以看出, 可靠性指数随方差增加呈现下降趋势, 最低只有 0.4; 失效概率随方差增加呈增加趋势, 最大达 18 %, 这说明数据离散性带来原本比较稳定的可靠性指标, 波动较大, 所以应该提高试验精度, 减小试验误差, 尽可能控制人为误差。在输入参数没有精度保证的前提下, 再好的计算方法也很难保持结果的稳定及合理。从侧面也说明了现行安全系数单一评价指标体系的局限性。

4.4 岩土参数相关性

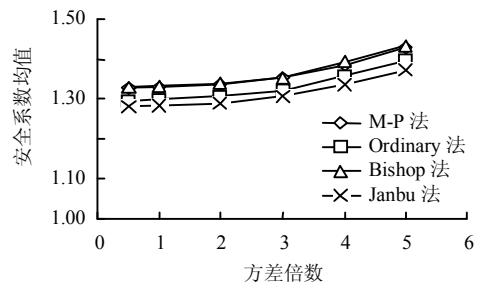
上述计算均是在没有考虑输入岩土参数相关性的基础上取得。研究表明, 岩土参数间是存在相关性的, 一般情况下考虑较多的是凝聚力和内摩擦角的相关性。在此设计了 c 和 φ 相关系数在 -1.0~1.0 之间以 0.25 步长变化的 9 种计算方案, 计算结果整理成图 5。限于篇幅仅以 Janbu 法和 M-P 法计算结果为例进行说明。



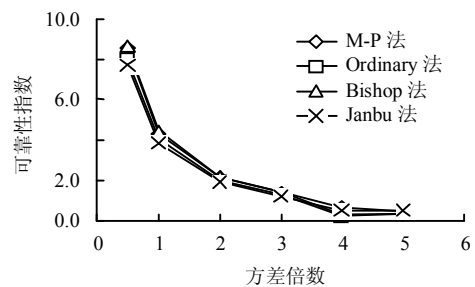
(a) 安全系数最小值



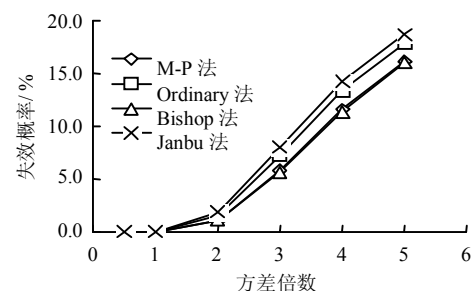
(b) 安全系数最大值



(c) 安全系数平均值



(d) 可靠性指数



(e) 失效概率

图 4 方差对可靠度计算结果的影响

Fig.4 Computing results of reliability affected by deviation

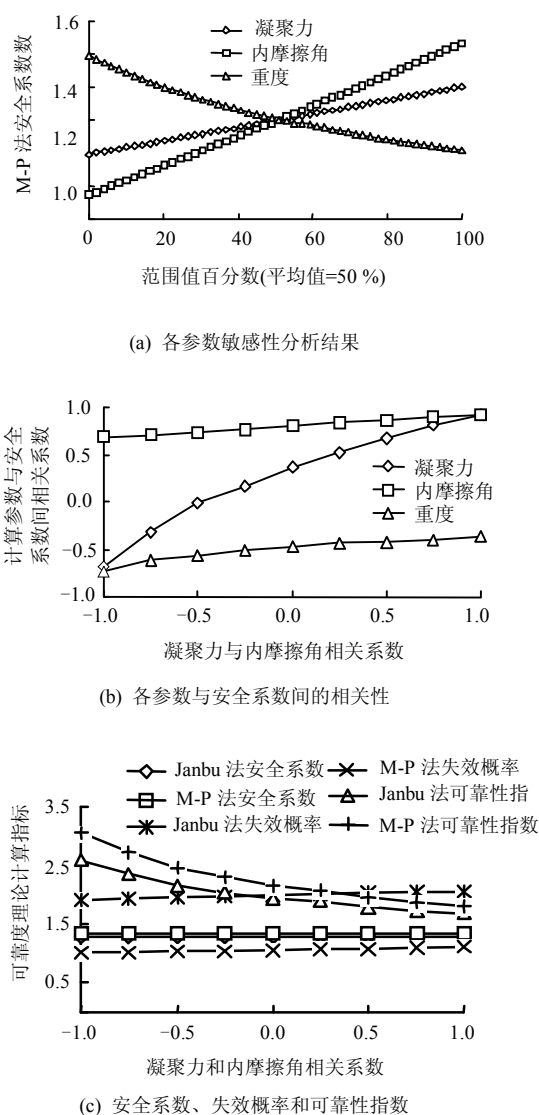


图5 强度参数的相关性对稳定性评价指标计算结果的影响

Fig.5 computing results of stability evaluating indexes affected by correlative coefficient between strength parameter

由图 5(a)参数敏感性分析发现, 滑坡安全系数随重度成反比关系, 与强度参数成正比, 其中内摩擦角在小于均值时, 没有凝聚力的变化对安全系数产生的影响大, 但在大于均值之后, 内摩擦角的变化比凝聚力变化引起的安全系数的波动显著。重度与安全系数斜率为 -0.0027 , 呈负相关, 凝聚力斜率为 0.002 , 内摩擦角斜率为 0.0046 , 强度参数安全系数正相关, 其中内摩擦角对安全系数的影响比凝聚力显著。从图 5(b)可知, 重度与安全系数的相关系数随强度参数间相关系数的变化在 $-0.7280 \sim -0.3691$ 间单调增加, 整体呈现负相关特性, 这与敏感性分析结论相契合; 内摩擦角与安全系数的相关系数随强度参数相关系数的变化在 $0.6870 \sim 0.9233$ 间呈单调增加趋势, 整体为正相关; 凝聚力

则在 $-0.6870 \sim 0.9233$ 间呈单调增加, 其中 c 和 φ 相关系数为 -1.0 , 和 1.0 时分别与重度及安全系数的相关系数相等, 图中表现为“Z”字两个角。这与 Lumb^[14]、Grivas^[15]和 Wolff^[16]大量室内试验得出的 c 和 φ 相关性在 $-0.72 \sim 0.35$ 之间的结论基本吻合。从图 5(c)可知, 安全系数均值随强度参数相关性的变化不大; 可靠性指数也随之波动不大, 基本呈水平直线关系; 失效概率随相关系数的增加呈递减趋势, 且 Janbu 法和 M-P 法的离差随之减小, 从负相关到正相关失效概率的减小趋势逐步减弱, 图中表现为曲线斜率减小。这说明强度参数的相关性对可靠度计算结果也有影响, 特别是对失效概率影响较大。因此, 需要通过试验测定岩土参数的相关性。

5 结 语

从可靠度计算结果和影响因素分析可以得出如下结论: 根据张倬元等《工程地质分析原理》^[16]中的划分标准, 该滑坡失效概率小于 5% , 状态稳定。在数据离散性较大时, 基本稳定。分析发现, 岩土参数的概率分布函数形式、统计特征值、参数间相关性会影响可靠度评价指标的计算精度, 这些在勘察获取岩土参数时应充分重视, 文中所有计算均是在 Geo-slope 软件下完成。

参 考 文 献

- [1] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [2] 王家臣. 边坡工程随机分析原理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [3] 夏元友, 熊海丰. 边坡稳定性影响因素敏感性人工神经网络分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 123(16): 2703—2707.
XIA Yuan-you, XIONG Hai-feng. Sensibility analysis of slope stability based on artificial neural network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2703—2707.
- [4] 张旭辉, 龚晓南, 徐日庆. 边坡稳定影响因素敏感性的正交法计算分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 36—39.
ZHANG Xu-hui, GONG Xiao-nan, XU Ri-qing. Orthogonality analysis method of sensibility on factor of slope stability[J]. China Journal of Highway and Transport,

- 2003, 16(1):36—39.
- [5] 郑惠峰, 汪卫明, 陈胜宏. 弹粘塑性块体单元法在龙滩水电站右坝肩边坡稳定分析中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27 (1): 107—111.
- ZHENG Hui-feng, WANG Wei-ming, CHEN Sheng-hong. Application of elasto-viscoplastic block element method to stability analysis of right abutment slope in Longtan Hydropower Project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27 (1): 107—111.
- [6] 张少宏. 黄土边坡稳定计算中参数的敏感性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2003, 1(3):40—42.
- ZHANG Shao-hong. Analysis sensitivity of parameter in stability calculation of loess slope[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2003, 1(3): 40—42.
- [7] 李强, 管昌生. 库岸滑坡稳定可靠性分析中若干规律的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 999—1 002.
- LI Qiang, GUAN Chang-sheng. Discussion about some regularities of reliability analysis of landslide stability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(7): 999—1 002.
- [8] 史贵才, 葛修润, 姜清辉, 等. 水布垭水利枢纽古树包滑坡三维稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(5): 58—61.
- SHI Gui-cai, GE Xiu-run, JIANG Qing-hui, et al. 3D stability analysis in Gushubao Landslide in Shuibuya Hydropower Project[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2005, 22(5): 58—61.
- [9] 姚爱军, 易武, 王尚庆. 杨家岭 1[#]滑坡稳定性影响因素及敏感性分析[J]. 工程地质学报, 2004, 12(4): 390—395.
- YAO Ai-jun, YI Wu, WANG Shang-qing. Factors for in stability of the landslide No.1 in Yangjialing and their sensitivity analysis[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2004, 12(4): 390—395.
- [10] 周建普, 李献民, 王永和. 黏土边坡可靠性分析方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2002, 29(5): 92—103.
- ZHOU Jian-pu, LI Xian-min, WANG Yong-he. Research for method of reliability analysis of clayey soil slope[J]. **Journal of Hunan University(Natural Sciences Edition)**, 2002, 29(5): 92—103.
- [11] JOHN KARHA. Geo-slope User reference[M]. Alberta: Leonard Lam and Lori Newman, 2004.
- [12] 陈立宏, 陈祖煜. 刘金梅. 土体抗剪强度指标的概率分布类型研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 37—40.
- CHEN Li-hong, CHEN Zu-yu, LIU Jin-mei. Probability distribution of soil strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(1): 37—40.
- [13] 郑荣跃, 梧松. 基于 Spencer 法的边坡稳定性可靠度指标分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 147—150.
- ZHENG Rong-yue, WU Song. Reliability index analysis of slope stability based on Spencer's method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 147—150.
- [14] LUMB P. Safety factors and the probability distribution of soil strength[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1970, 7(3): 225—242.
- [15] GRIVAS D A. How reliable are the present slope failure prediction methods[C]// Proceedings of the Tenth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sweden: Stockholm, 1981, 3: 427—430.
- [16] WOLFF T F. Analysis and design of embankment dams: a probabilistic approach[D]. West Lafayette: Purdue University, 1985.
- [17] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社, 1994.