

基于概率方法的土质边坡稳定性分析*

冉昌国^{1,2}, 尹小涛³, 吴长富⁴

(1. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074 2. 中交第二公路勘察设计研究院, 湖北 武汉 430056 3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 4. 浙江理工大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:以某公路路堑边坡为例, 设计了强度参数最小值组合、最大值组合、平均值组合的边坡确定性方法的计算方案, 用其检验了概率方法的合理性, 分析了两者的异同。设计了 Monte-Carlo 循环次数为 5 000 10 000 100 000 1 000 000 和 5 000 000 等 5 种计算工况。发现随着循环次数的增加, 安全系数的分布范围逼近最小值组合及最大值组合情况下确定值方法计算的安全系数值; 安全系数的平均值与平均值组合时, 确定性方法计算的结果差别不大; 失效概率随循环次数的增加没有稳定趋势, 可靠性指数、安全系数则逐步趋稳。

关键词:边坡稳定性; 概率方法; 确定性方法; 失效概率; 可靠性指数

中图分类号: TT854.6 文献标识码: A

文章编号: 1005-2763(2007)04-0021-04

Stability Analysis of Soil Slope based
on Probabilistic Method

Ran Changguo², Yin Xiaotao³, Wu Changfu⁴

(1. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. China Communications Second Survey

Design and Research Institute, Wuhan, Hubei 430056, China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy

of Science, Wuhan, Hubei 430071, China; 4. College of

Architecture & Engineering, Zhejiang Sci-Tech

University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: A soil cut slope of highway is studied under conditions of minimum, maximum and average combinations of soil strength parameters by means of deterministic method of slope stability. The result is used to test the reasonability of probabilistic method and the difference between these two kinds of method. Simultaneously, the influence of Monte-Carlo cyclic times is studied under condition of 5 000 10 000 100 000 1 000 000 and 5 000 000 cyclic times. It is found that the distributing scope of safety factor is approaching that of deterministic method under conditions of minimum and maximum combinations of soil

strength parameters step by step that the difference between the average of safety factor and the result of deterministic method under condition of average combination of soil strength parameters is very small that with the increasing of cyclic times, the failure probability doesn't appear stable but the reliability index and factor of safety respectively reaches a stable value.

Key words: Slope stability; Probabilistic method; Deterministic method; Failure probability; Reliability index

边坡问题是一个古老的工程问题, 边坡稳定性计算的方法, 可归为极限平衡和强度折减两类。安全系数是边坡稳定性评价中的常用指标。确定性方法使用最广, 但其缺点是不能反映岩土材料性质的不确定性。可靠性理论可有效地考虑边坡系统存在的不确定性和相关性。近年来基于可靠度理论的边坡稳定性分析得到了极大发展^[2-9]。

本文以某公路路堑边坡为研究对象, 基于极限平衡方法, 用 Monte-Carlo 法计算可靠性指标和失效概率。为检验随机方法计算结果的合理性, 设计了强度参数的最小值组合、最大值组合和平均值组合下的确定性计算方案; 同时设定循环次数为 5 000 10 000 100 000 1 000 000 和 5 000 000 的不同情况, 考察了循环次数对于稳定性指标的影响。

1 计算模型和方案

1.1 物理模型和计算参数

某公路典型路堑边坡表层为残积土层, 底座为风化泥岩, 限于篇幅这里连同最危险滑弧一起给出, 具体地层空间形态见图 1, 计算所用的残积土层土性参数和统计指标列于表 1。

可靠性指标^[10]: $\beta = \frac{\mu - 1.0}{\sigma}$, μ 和 σ 为安全系

* 收稿日期: 2006-07-06

作者简介: 冉昌国 (1974-) 男, 湖北松滋人, 高级工程师, 主要从事公路工程勘察设计工作, E-mail: yx9406@163.com
©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

数均值和标准差, 计算参数的概率分布函数选用正态分布, 以内摩擦角为例说明随机取值需要用到概率函数和取样函数, 具体形态见图 2。

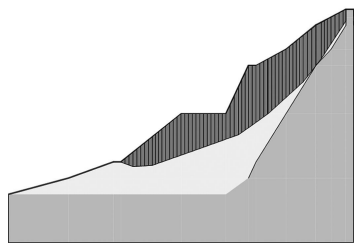
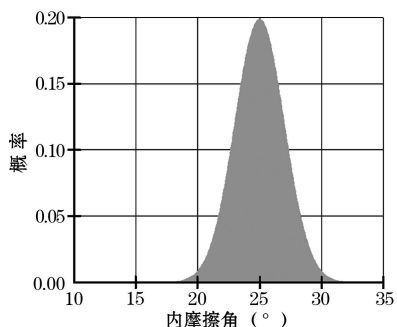


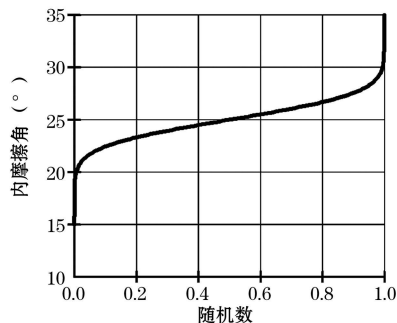
图 1 边坡物理模型及最危险滑弧条分图

表 1 计算采用土性参数表

项目	容重 (kN m^{-3})	内聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^{\circ}$)	项目	容重 (kN m^{-3})	内聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^{\circ}$)
最大值	30.0	35.0		平均值	19.0	20.0	25.0
最小值	10.0	15.0		标准差		1.8	1.4



(a) 内摩擦角概率函数



(b) 内摩擦角取样函数

图 2 Monte-Carlo法所用正态分布函数和取样函数曲线

1.2 计算方案

设计强度参数最小值组合及最大值组合下的确定性计算方案, 以检验 Monte-Carlo法计算结果的分布范围的代表性; 设计强度参数平均值组合下的确定性计算方案, 以检验概率方法计算结果是否稳定, 分别用 Mongenstem-Price、Ordinary Bishop和 Janbu法进行概率和确定性计算。具体计算方案见表 2。

表 2 计算方案

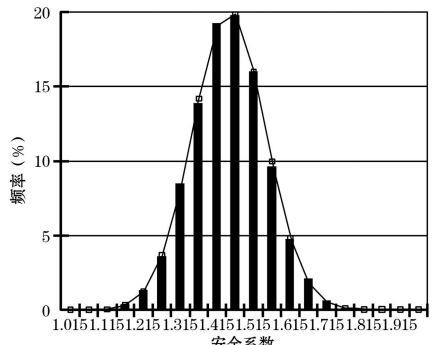
计算方案	1 最小值 组合	2 最大值 组合	3 平均值 组合	4 概率 方法
Mongenstem-Price法	✓	✓	✓	✓
Ordinary法	✓	✓	✓	✓
Bishop法	✓	✓	✓	✓
Janbu法	✓	✓	✓	✓

2 结果分析

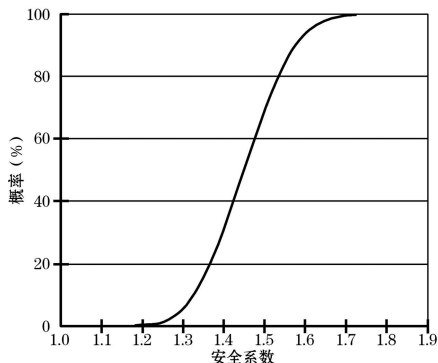
2.1 坡体安全系数

2.1.1 概率方法下安全系数分布情况

根据表 2 计算方案, 基于可靠度理论, 利用 4 种极限平衡方法对边坡稳定性进行了计算, 同时, 按传统的确定值方法进行了计算, 以方便对比检验, 限于篇幅仅以循环次数为 5 000 时的 Mongenstem-Price 法为例, 给出概率方法计算结果 (见图 3)。



(a) 概率密度函数



(b) 概率分布函数

图 3 Mongenstem-Price法的安全系数概率密度及概率分布函数

从图 3(a)可以看出强度参数不是一个确定值时对于安全系数计算结果所带来的影响。从 4 种极限平衡方法计算安全系数的概率密度图形可以看出 Mongenstem-Price 和 Bishop法计算的安全系数概率密度函数形态比较高瘦, Ordinary和 Janbu法计算得到的安全系数概率密度函数形态比较矮胖。图形

形态高矮反映在数字上就是概率值的大小, 瘦胖则表现了安全系数谱的宽窄。从安全系数的概率分布函数形态可以看出 4 种方法的曲线形态整体差别不大, 其中 Mongenstem—Price 和 Bishop 法计算的安全系数概率分布函数起始于 1.0 谱宽 0.9 失效概率几乎为 0, Ordinary 和 Janbu 法计算得到的安全系数概率分布函数始于 0.9 谱宽 0.9 所以失效概率分别为 0.06% 和 0.08%, 说明存在小概率失稳的可能。

2.1.2 安全系数计算结果

在 1.2 节所设计的计算方案的基础上, 4 种极限平衡方法计算的安全系数结果列于表 3 其中各方法搜索的最危险滑弧的位置基本一样, 空间位置见图 1。

从表 3 可以看出, 概率方法在循环 5 000 次的情况下, 在选取参数极值的组合时存在一定的困难, 这可以从概率法计算得到的安全系数最大、最小值与最小值组合和最大值组合下确定性方法计算所得安全系数的差异上可以看出来。概率法所得安全系数平均值与平均值组合下确定方法计算所得安全系

数的差异, Mongenstem—Price 和 Janbu 法反映在千分位, 而 Ordinary 和 Bishop 法反映在百分位, 说明概率方法计算结果中包含了确定性方法所没有的信息。

表 3 各计算方案下的安全系数

安全系数 Fs	Mongenstem—Price 法	Ordinary 法	Bishop 法	Janbu 法
最小值组合	0.797	0.772	0.804	0.763
最大值组合	2.208	2.135	2.205	2.097
平均值组合	1.443	1.354	1.495	1.354
概率法				
最小值	1.042	0.974	1.050	0.970
最大值	1.842	1.730	1.856	1.721
平均值	1.448	1.365	1.458	1.355

注: 概率方法是在 Monte—Carlo 法循环 5 000 次的条件下所得结果。

2.2 循环次数对概率方法计算结果的影响

由 2.1.2 节的分析可知, 概率方法中随机取值次数对安全系数的分布范围是有影响的。为考察 Monte—Carlo 法循环次数对边坡稳定性计算结果的影响, 设计了循环次数分别为 5 000 10 000 100 000 1 000 000 和 5 000 000 次等 5 种情况, 计算结果列于表 4。

表 4 不同 Monte—Carlo 循环次数下概率法的安全系数变化值

循环次数	安全系数 Fs	Mongenstem—Price 法	Ordinary 法	Bishop 法	Janbu 法
5×10 ³	范围值	1.012~1.935	0.959~1.820	1.020~1.952	0.950~1.810
	平均值	1.446	1.366	1.458	1.356
	可靠性指数	4.424	3.857	4.504	3.773
	失稳概率 (%)	0.000	0.060	0.000	0.080
1×10 ⁴	范围值	1.012~1.935	0.959~1.820	1.020~1.952	0.950~1.810
	平均值	1.446	1.366	1.458	1.356
	可靠性指数	4.451	3.882	4.531	3.797
	失稳概率 (%)	0.000	0.050	0.000	0.060
1×10 ⁵	范围值	0.921~1.950	0.875~1.827	0.928~1.965	0.866~1.820
	平均值	1.447	1.365	1.457	1.355
	可靠性指数	4.494	3.920	4.575	3.833
	失稳概率 (%)	0.003	0.030	0.002	0.035
1×10 ⁶	范围值	0.907~1.976	0.851~1.853	0.915~1.990	0.846~1.844
	平均值	1.447	1.365	1.457	1.355
	可靠性指数	4.500	3.925	4.581	3.838
	失稳概率 (%)	0.004	0.027	0.003	0.034
5×10 ⁷	范围值	0.850~2.006	0.800~1.916	0.858~2.023	0.794~1.877
	平均值	1.445	1.365	1.457	1.355
	可靠性指数	4.500	3.925	4.581	3.838
	失稳概率 (%)	0.005	0.027	0.003	0.034

从表 4 中的安全系数范围值可以看出, 在循环次数大于 5 000 000 次以后, 安全系数均值受循环次数影响不大, 变化均在千分位; 在循环次数大于 1 000 000 次以后, 4 种方法的可靠性指数均达到了稳定, 其中 Mongenstem—Price 法为 4.500, Ordinary

法为 3.925, Bishop 法为 4.581, Janbu 法为 3.838, 失稳概率受循环次数影响较大, 该值也受计算参数的概率分布函数类型的影响, 本文只研究了前者的影响, 结果发现在 Mongenstem—Price 和 Bishop 方法下该值随循环次数的增加呈单调增加的趋势, 这与

前人的研究成果相印证, Ordinar和 Janbu方法下该值随循环次数的增加呈单调递减趋势。这说明用抗干扰性较差的失效概率评价边坡稳定性是存在问题的, 而性质稳定的可靠性指数可以辅助传统的安全系数用来描述边坡稳定性。

3 结论与建议

本文用边坡稳定计算的确定性方法计算了强度参数不同组合下的安全系数, 利用计算结果对比分析了概率方法的不同之处, 分析所得主要结论如下:

(1) 概率方法所得的安全系数的概率密度和分布函数较好地反映了强度参数不是一个确定值时对于安全系数计算结果带来的影响;

(2) 安全系数的概率密度函数形态的高矮反映了不同安全系数的概率值大小, 瘦胖则表现了安全系数谱的宽窄。安全系数概率分布函数可以看出不同安全系数的累积概率值, 从中可以看出失效概率的大小;

(3) 概率法所得安全系数平均值与平均值组合下确定方法计算所得安全系数的差异, Morgenstem—Price和 Janbu法反映在千分位, Ordinar和 Bishop法反映在百分位, 说明概率方法计算结果中包含了确定性方法所没有的信息;

(4) 在循环 5 000 000次以后, 安全系数均值受循环次数影响不大, 变化均在千分位; 在循环次数大

于 1 000 000次以后, 4种方法的可靠性指数值均达到了稳定; 失效概率则依然没有稳定趋势。这说明失效概率的抗干扰性较差, 可靠性指数的抗干扰性较好, 可用可靠性指数辅助传统的安全系数来描述边坡稳定性。

参考文献:

- [1] 黄昌乾, 丁恩保. 边坡稳定性评价结果的表达与边坡稳定判别 [J]. 工程地质学报, 1997 5(4): 375 ~ 380
- [2] 罗文强 王亮清, 龚 珏. 正态分布下边坡稳定性二元指标体系研究 [J]. 岩石力学与工程学报 2005 24(13): 2287 ~ 2292
- [3] 杨建贵, 蔡 新, 张永乐. 边坡稳定的模糊随机可靠性分析 [J]. 河海大学学报, 2002 30(1): 58 ~ 62
- [4] 谭晓慧. 边坡稳定可靠度分析方法的探讨 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2001 24(6): 40 ~ 44
- [5] 周育峰. 边坡稳定性的可靠度分析 [J]. 公路, 2003(9): 80 ~ 83
- [6] 王亚军. 基于模糊随机理论的广义可靠度在边坡稳定性分析中的应用 [J]. 岩土工程技术 2004 18(5): 217 ~ 223
- [7] 郭长宝, 张永双. 陕北砂黄土高边坡可靠度分析及边坡优化设计 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005 16(4): 5 ~ 10
- [8] 韩玉芳, 刘德辅, 董 胜. 边坡整体稳定的可靠性分析方法 [J]. 海岸工程, 2001 20(4): 7 ~ 14
- [9] 姜 彤, 马 莎, 李永新. 抗剪强度 φ 值概率分布对边坡可靠性分析的影响 [J]. 华北水利水电学院学报, 2004 25(3): 46 ~ 49
- [10] John Krahm. Stability Modeling with Slope/W[R]. Geo- slope/W International Ltd 2004.

(上接第 13页)

基于熵权的组合预测模型的预测结果见表 4

表 3 预测方法评价结果与归一化结果

结果	4维	5维	6维	7维	8维	9维
评价结果	0.6597	0.9764	0.7682	0.6651	0.5437	0.5901
归一化结果	0.1570	0.2323	0.1828	0.1582	0.1294	0.1404

表 4 组合预测模型的预测结果 单位: cm

时间	实测值	组合预测值	时间	实测值	组合预测值
140	2.40	2.40	190	10.10	10.53
145	3.50	4.13	195	10.30	10.69
150	5.00	4.97	200	10.60	10.85
155	6.30	6.00	205	10.80	11.12
160	7.50	7.14	210	11.20	11.30
165	8.00	8.05	215	11.50	11.45
170	8.80	8.88		MAE	0.2356
175	9.60	9.69		MAPE	0.0308
180	9.80	10.14		RMSE	0.0867
185	10.00	10.35			

从表 4可以看出, 组合预测模型的预测值与实测值十分接近。对比表 2和表 4的数据可以发现, 组合预测的效果较单独模型都有所提高, 精度高达 96.92%。基于熵权的灰色沉降预测模型可以充分挖掘各单独模型的有用信息, 提高模型的预测精度。组合模型集结了多个单一模型所包含的信息, 是一种有效的科学建模方法, 在大多数情况下各单个模型通过科学的组合, 可以提高建模精度。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 高等土力学 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996
- [2] 谢正文, 胡汉华, 胡毅夫. 改进 GM(1,1)模型在路基沉降预测中的应用 [J]. 岩土力学, 2005 26(2): 227 ~ 230
- [3] 杨惠敏, 付 萍. 基于熵权的多级模糊综合评价的应用 [J]. 华北电力大学学报, 2005 32(5): 104 ~ 107
- [4] 郑贤斌, 陈国明. 基于烟技术的石化企业安全模糊综合评价方法研究 [J]. 中国安全科学学报, 2004 4(2): 109 ~ 112