

抗滑桩加固边坡的稳定可靠度分析

杨令强¹, 马 静², 张社荣³

(1. 济南大学土木建筑学院, 山东 济南 250022; 2. 济南大学控制学院, 山东 济南 250022; 3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘 要:经常需要在试验资料不充分的条件下进行边坡工程设计, 故如何从搜集到的各方面信息中统计得到工程设计所需参数具有重要的理论和工程意义。某边坡工程以实测两断层实验数据为基础, 参照类似工程的实测资料分析结果, 利用岩石分类确定断层的内摩擦角, 利用反演分析和考虑残差的最小二乘拟合的方法确定断层的黏聚力; 抗滑桩是横向受力体系, 考虑抗滑桩 4 种失效模式的相关性, 利用反分析的方法确定出抗滑桩的抗力统计参数; 根据规范推荐的传递系数法确定出边坡滑动的功能函数, 利用离散化降维解法求得边坡稳定的可靠度指标。分析结果表明: 利用反演方法修正参数, 减少了认识的不确定性, 能够提高边坡工程设计的可靠性, 在统计数据不足的情况下按可靠度进行边坡工程设计是一种可行方法; 同时表明锚索抗滑桩加固边坡的效果是显著的。

关键词:边坡; 可靠度; 抗滑桩; 统计; 反演

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)08-1299-04

作者简介:杨令强(1972-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水工结构和岩土工程的研究。E-mail: ylq.tju@126.com。

Reliability analysis of stability for slopes reinforced by anti-slide piles

YANG Ling-qiang¹, MA Jing², ZHANG She-rong³

(1. Civil Engineering and Architecture Dept., University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. Control Engineering Dept., University of Jinan, Jinan 250022, China; 3. Civil Engineering Dept., Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Slope engineering is usually designed under the shortage of test data. So the design method, how to integrate all aspects of the collection of information using the statistical theory to obtain engineering design parameters, is of great theoretical and practical significance. Based on the experimental data of two faults of a slope project, in accordance with the large number of measured data analysis results of similar projects, the rock classification method is used to determine the internal friction angle of the fault, and the back analysis method and the least-square fitting method with consideration of the residuals are used to determine the cohesion of fault; the anti-slide piles are the lateral force system, the correlation of the four failure modes of the anti-slide piles is considered, and the back analysis method is used to determine the statistical parameters of resistance of the anti-slide piles; and according to the (norm) recommended coefficient transmission method, the function of random variables of slope sliding is determined, and the discretization dimension reduction method is utilized to obtain the reliability index of slope stability. The results show that using the back analysis method to modify the parameter can decrease the uncertainty and improve the reliability of engineering design, thus providing a feasible design method using reliability in small sample data. The effect of anchor anti-slide pile reinforcement slope is remarkable.

Key words: slope; reliability; anti-slide pile; statistic; back analysis

0 引 言

边坡稳定性分析是岩土工程中一个十分重要的问题, 由于岩土参数的随机性, 边坡稳定的可靠度分析日益受到重视^[1]。同时由于工程条件和经费的限制, 规范要求只对一级边坡进行测试^[2], 因此岩土工程的样本数量不足又成为限制可靠度理论应用的关键因素^[3]。为此本文在某水库边坡断层实测资料的基础上, 利用类似工程的统计数据和统计理论反演确定出断层统计参数, 同时利用反分析确定出抗滑桩的抗力统计

参数, 并对该边坡成功地进行了可靠度分析。

1 工程简介

某抽水蓄能电站以原水库为下池, 上池采用开挖和筑坝方式兴建。池顶高程 568 m, 池顶宽度 10 m, 正常蓄水位 566 m, 死水位 531 m, 工作水深 35 m,

基金项目: 山东省中青年科学家基金资助项目 (2008BS9025)

收稿日期: 2008-05-26

池坡坡比 1:1.5, 总库容 $445 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。上池于 1991 年 4 月施工, 经运用发现西坡多处存在蠕变, 有滑坡迹象。本文将对电站上池西坡外坡 1+178 断面(图 1)进行边坡稳定可靠度分析。可靠度分析中各随机变量, 以试验数据为基础进行统计。

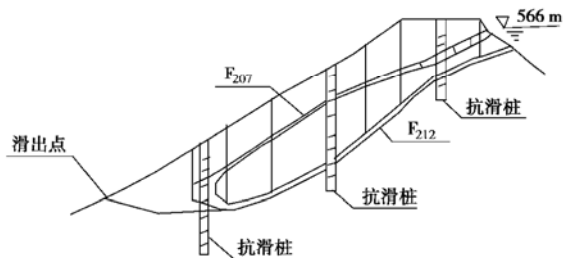


图 1 上池西坡 1+178 剖面示意图
Fig. 1 Section 1+178 of the west slope of Shangchi

2 滑动面随机参数的确定

选取滑动面上天然状态快剪强度指标(峰值强度)的黏聚力 c 、摩擦角 φ 进行统计, 试验数据及统计值如表 1。由表 1 中可见, 断层 F207 有试验数据 4 组, 断层 F212 有试验数据 1 组, 无法统计, 工程中认为 F207 和 F212 有很好的相关性, 利用 F207 断层 4 组试验的信息作为补充信息进行统计 F212。

表 1 断层强度指标统计值

Table 1 Statistical values of fault shear strength			
断层	试验组	天然状态(峰值强度)	
		黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
F207 断层 (n=4)	F207-n-2-1	55.000	11.900
	F207-n-5-1	54.000	16.200
	F207-1	63.000	11.000
	F207-3	70.000	9.900
	均值	60.500	12.250
	样本标准差	7.506	2.757
	分布类型	正态分布	正态分布
F212 断层	F212-n	40.000	7.100
	均值	40.000	7.100
	样本标准差	7.506	2.757

按现场实况反演推求的参数说服力最强, 但反演的特点是仅给出一个关键信息, 关于计算模型的准确性、空间随机场影响、现场与试验室差别等全部混在一起考虑。有 4 种处理方式^[4-5]可以提高分析的可信程度, 见图 2。

以稳定边坡右截尾为例, 原分布为正态 $N(\mu_0, \sigma_0)$, 反演值为 R : ①认为抗力取截尾分布, 见图 2(a), 用积分确定 μ_R 及 σ_R ; ②取为正态分布, $N(\mu_R, \sigma_R)$; ③仅调整均值, 取为 $N(\mu_R, \sigma_0)$; ④特别强调反演值 R , 取为 $N(R, \sigma_0)$ 。很明显, 4 种做法, 越来越趋于保守。因此本文取第④种, 偏于安全。

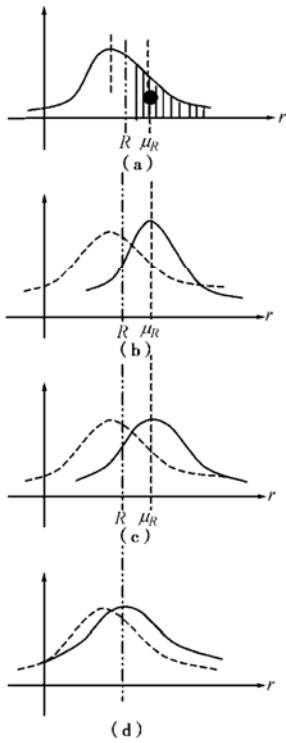


图 2 统计参数取值方法
Fig. 2 Values of statistical parameter

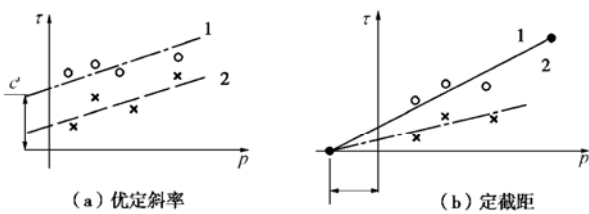


图 3 优定斜率法和定截距法
Fig. 3 Optimum slope method and intercept method

但是由于一条信息不可能同时修正多个参数。抗剪强度 φ, c 的统计量有 4 个参数, 如何取舍值得研究。即使取上述第④种方法, 也有二个参数。工程一般对岩石推荐优定斜率法, 因为对岩体的 φ 认为比较集中, 可以根据岩石分类由地质条件确定。分析中取 φ 为定值, 见图 3(a), 对 c 值进行单独统计。在分析的过程中也曾取截距为定值, 对 φ 进行统计, 见图 3(b), 但此方法明显表现为 c, φ 为正相关, 与经验相左^[6]。优定斜率后, 对任一组试件的值不是直接利用最小二乘的拟合, 因为拟合残差将有附加值, 见图 4, 即 $\sum \varepsilon'^2 \geq \sum \varepsilon^2$, 因此, 在计算 c 的统计值时, 在 σ_c^2 中补充计入 $(\sum \varepsilon'^2 - \sum \varepsilon^2)$ 的影响。

取优定摩擦角为 $\bar{\varphi}$ 。试验每组正压力为 p_i , 共 m 级, 平均值为 $\bar{p}$ 。推算每组黏结力 c' 值与该组原 φ, c 值的关系为

$$c' = (\tan \varphi - \tan \bar{\varphi}) \bar{p} + c \quad (1)$$

指定斜率的附加误差为

$$\varepsilon'^2 = \sum_{i=1}^m (\tan \varphi - \tan \bar{\varphi})^2 (p_i - \bar{p})^2 / m(m-1)。 \quad (2)$$

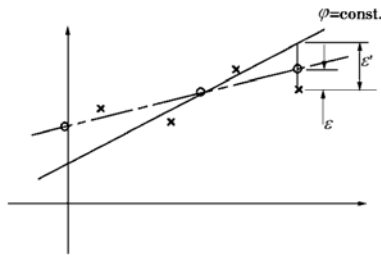


图4 拟合残差

Fig. 4 Least-square method with residuals

如此可得 F207 的 4 组试验的单值统计参数: 取优定摩擦角为 $\bar{\varphi}=13^\circ$, 则 c' 的均值和方差为 $\mu_{c'}=57.17$ kPa, $\sigma_{c'}=7.11$ kPa, 附加误差为 $\sum_{j=1}^n (\varepsilon'^2 - \varepsilon)^2 = 0.297^2$, 调整后变量 c' 的方差为 $\sigma_{c'}^2 = 8.9^2$ 。F212 只有一组试验值, 偏于安全地按第④种方法处理, F212 参数为 $\varphi' \equiv 13^\circ$, $\mu_{c'}=68.9$ kPa, $\sigma_{c'}=4.98$ kPa。

3 抗滑桩随机参数的确定

抗滑桩的组成包括桩身为 30 m 高钢轨混凝土结构, 上部用预应力锚索张拉, 下部嵌入基岩, 嵌入深度 10 m。计算中认为钢筋混凝土剖面符合一般设计标准, 取其强度的分布为正态分布, 变异系数为 0.2。设计抗力为 12000 kN, 剖面 2 m×3 m, 顶部 4 根锚索, 每根张力 1100 kN, 桩间距 8 m。据此, 每根桩根部(岩石处)内力: 弯矩 63030 kN·m, 剪力 8101 N。

桩的失效模式: ①钢筋混凝土截面强度不足, 据分析主要为正截面抗弯问题, 斜截面抗剪一般不起控制作用; ②基岩抗力不足, 使桩内弯矩超过设计值; ③锚索强度不足; ④锚索锚固段深度不够, 锚头被拔出。前 3 项因素相互可以认为是独立的, 是 1 个串联系统。分析中认为锚头混凝土与桩身混凝土质量相似, 统计参数为完全相关。对嵌入段基岩抗力变异性进行分析后, 发现其敏度系数很小。计算中取弯矩等效概念(图 5), 将桩身认为在岩面下 h 处嵌固。经对比分析, 当岩石的抗力系数 K 为 $\mu_K = 4.77 \times 10^5$ kN/m³, $\sigma_K = 1.19 \times 10^5$ kN/m³ 时, 取当量深度 h 为 $\mu_h = 0.106$ m, $\sigma_h = 0.035$ m。

桩身的极限状态方程为

$$[M] = P\left(\frac{30}{2} + h\right) - T(30 + h), \quad (3)$$

式中, $[M]$ 为截面抗力矩, 取 $\mu_M = 66000$ kN·m, $\sigma_M = 13200$ kN·m。 T 为锚索水平抗力, 取 $\mu_T = 3899$ kN, $\sigma_T = 780$ kN。由此可以推求桩抗力 P 为 $\mu_P = 12000$ kN, $\sigma_P = 2210$ kN。

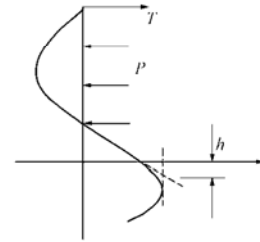


图5 锚索抗滑桩

Fig. 5 Anti-slide anchor pile

4 边坡稳定的可靠度分析

设结构的失效概率 $P_f = P(Z < 0)$, Z 为结构的功能函数, 简记为 $Z = g(\cdot)$, $x_1, x_2, \dots, x_m$ 为基本变量, 如果它们相互独立, 则

$$P_f = \int_{[g(\cdot) \geq 0]} \dots \int_{[g(\cdot) \geq 0]} f_{x_1}(x_1) f_{x_2}(x_2) \dots f_{x_m}(x_m) dx_1 dx_2 \dots dx_m$$

$$= \int_{[g(\cdot) \geq 0]} f_{x_1} \left[\int \dots \int f_{x_2}(x_2) \dots f_{x_m}(x_m) dx_2 \dots dx_m \right] dx_1, \quad (4)$$

式中, $f_{x_1}(x_1), f_{x_2}(x_2), \dots, f_{x_m}(x_m)$ 为随机变量 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 的概率密度函数。

离散化降维解法^[7]求可靠指标 β 的要点是将基本变量 x_i 离散为定值量 $x_{ik}(k=1, 2, \dots, m)$ 。将 x_{ik} 代入极限状态方程 $g(\cdot)$, 得到降维的方程 $g = (x_{1k}, x_2, \dots, x_m)$, 据此可求解条件可靠指标 β_{x1k} , 通过变换

$$x'_{1k} = \Phi^{-1} [F_{x_1}(x_{1k})], \quad (5)$$

$$x'_{2k} = \Phi^{-1} [1 - \Phi(\beta_{x1k})] = -\beta_{x1k}。 \quad (6)$$

将 $x_1 - \beta_{x1k}$ 曲线映射于标准正态坐标系(x'_1, x'_2)上, 此曲线可视为二维极限状态曲线。 x'_1 为荷载, x'_2 可视为广义抗力, 代表除 x_1 外所有其他基本变量对功能函数的综合性影响。如果离散化变量为抗力, 可取之为 x'_{2k} , 计算条件可靠指标 β_{x2k} , 取 $x_1 = \beta_{x2k}$ 为广义荷载。此曲线到标准坐标系原点的最小距离, 即是可靠指标 β :

$$\beta = \min \{ [\beta_{x1k}^2 + \{ \Phi^{-1} [F_{x_1}(x_{1k})] \}^2]^{1/2} \}, \quad (7)$$

递推下去, 可得多重降维求解可靠指标。

可靠度分析的极限状态, 以传递系数法为基础建立, 传递系数法适用于任意形状的滑裂面。假定条间力与上一土条的底面相平行, 根据力的平衡条件, 逐步向下推求, 直至最后一条土条的推力等于或小于零为止, 常采用下列简化公式^[8]:

$$P_{[i]} = P_{[i-1]} \psi_{[i-1]} + t_{[i]} - r_{[i]}. \quad (8)$$

式中 $P_{[i]}$ 为 i 块剩余下滑力; $t_{[i]}$ 为第 i 条块滑动面上的滑动分力; $r_{[i]}$ 为 i 块沿滑动面的抗滑分力; $\psi_{[i]}$ 为传递函数,

$$\psi_{[i-1]} = \cos(\vartheta_{[i-1]} - \vartheta_{[i]}) - \tan(\phi_{[i]}) \sin(\vartheta_{[i-1]} - \vartheta_{[i]}), \quad (9)$$

其中, $\vartheta_{[i]}$ 为 i 条块所在滑动面的倾角, $\phi_{[i]}$ 为 i 条块

表 2 边坡计算结果表
Table 2 Results of slope stability

滑动面		统计方法	滑动面随机变量取值						可靠度 指标
			抗滑桩抗力/kN		内摩擦角/(°)		黏聚力/kPa		
			μ_R	σ_R	μ_ϕ	σ_ϕ	μ_c	σ_c	
F207	加固前	确定			12.25	1.379	60.50	3.750	3.521
		本文			13.00	0.000	57.17	8.900	3.644
	加固后	经典	6870	1400	12.25	1.379	60.50	3.750	6.372
		本文	6870	1400	13.00	0.000	57.17	8.900	6.837
F212	加固前	确定			7.10	1.233	40.00	3.357	-2.754
		本文			13.00	0.000	68.90	4.980	-2.231
	加固后	经典	12000	2210	7.10	1.233	40.00	3.357	1.869
		本文	12000	2210	13.00	0.000	68.90	4.980	2.134

的内摩擦角。

验算边坡稳定性的功能函数^[9]为

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (r_i \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j) + r_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (t_i \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j) + t_n} - 1 \quad (10)$$

各随机变量取值及可靠度计算结果见表 2。表中分别给出以断层 F207 和断层 F212 为滑动面的边坡稳定可靠度指标。根据计算分析可见：边坡的稳定性原来存在疑虑，采取预应力锚索抗滑桩可以确保可靠指标达到规范要求。

西坡的最危险滑动体为 0+178 剖面沿 F212 剖面滑动。按常规资料、常规指标分析，失效概率大于 99%。设计中增设预应力锚索抗滑桩，预期可使失效概率降低到 3%，修正抗剪强度指标后，预期失效概率降为 0.006%。现在经过现场对锚索预张拉，并切实检查桩的质量及锚头，未发现破坏迹象后，可认为失效率将趋近于零。即边坡经过加固后是充分安全的。

5 结 语

为使结论偏安全，工作中选取的方法及参数都是偏于保守的。如概型取正态分析，反演取第④种图形，随机场的均化作用不过分考虑，有的相关性（φ，c 的负相关、桩的弯矩与剪力的不相关）没有把握即不考虑等。充分尊重现场状况资料，用反演方法修正参数，减少了认识的不确定性，能够提高工程可靠度。按岩石的分类先确定内摩擦角φ，然后再反演黏聚力 c，是一种可行的方法。采用抗滑桩加固岩质边坡可使稳定性得到大幅度的提高。

参考文献：

[1] 王家臣. 边坡工程随机分析原理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996. (WANG Jia-chen. The stochastic theory in slope[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996. (in Chinese))

[2] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (ZHENG Ying-ren, CHEN Zu-yu, WANG Gong-xian, et al. Engineering treatment of slope & landslide[M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese))

[3] 冷伍明. 基础工程可靠度分析与设计理论[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000. (LENG Wu-ming. Reliability analysis and theory of foundation engineer[M]. Changsha: Central South University Press, 2000. (in Chinese))

[4] SANG A H, TANG W H. 工程规划与设计中的概率概念(II)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991. (SANG A H, TANG W H. Probility concept in engineering planning and design[M]. Beijing: China Metallurgy Industry Press, 1991. (in Chinese))

[5] SACHS Lothar. Applied statistics, a handbook of techniques[M]. 2nd ed. New York: New York Berlin Heidelberg, 1982.

[6] 张社荣, 王海军, 郭怀志. 地基土抗剪强度设计值取值[J]. 水利水电技术, 2001, 32(12): 69 - 72. (ZHANG She-rong, WANG Hai-jun, GUO Huai-zhi. Acquiring design value of shear strength of foundation soil[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001, 32(12): 69 - 72. (in Chinese))

[7] 张社荣, 贾世军, 郭怀志. 岩质边坡的可靠度分析[J]. 岩土力学, 1999, 20(6): 57 - 63. (ZHANG She-rong, JIA Shi-jun, GUO Huai-zhi. The credibility analysis of rock slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(6): 57 - 61. (in Chinese))

[8] 顾宝和, 毛尚之. 滑坡稳定分析传递系数法的讨论[J]. 工程勘察, 2006(12): 8 - 12. (GU Bao-he, MAO Shang-zhi. Discussion of method of force transfer in slope stability[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006(12): 8 - 12. (in Chinese))

[9] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 2001. (GB50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2001. (in Chinese))