

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2011.03.015

基于土性相关蒙特卡罗法的争岗滑坡堆积体可靠性分析

李德亮^{1,2}, 石 崇^{1,2}, 聂卫平^{1,2}, 刘 和^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对澜沧江古水水电站争岗滑坡堆积体工程地质条件, 在室内剪切试验、工程类比、参数反演基础上综合确定了岩土体力学参数及其统计分布规律. 采用基于黏聚力 c 与内摩擦角 φ 相关抽样下的蒙特卡罗法对堆积体典型剖面进行了多种工况下的可靠性分析, 预测了其未来的变形失稳特征. 研究表明: 当前堆积体 B—B' 剖面在正常运行工况下的破坏概率为 23.4%, 暴雨工况下为 55.2%, 若不加治理堆积体极有可能产生失稳, 这与现场勘探成果表明的堆积体在正常运行工况下稳定、暴雨工况下处于蠕变变形状态相吻合. 在此基础上根据工程稳定性要求, 提出了相应的防护、加固措施, 使堆积体支护后在暴雨工况下的破坏概率降低至 6.2%.

关键词: 边坡稳定; 滑坡堆积体; 可靠性分析; 蒙特卡罗法; 争岗滑坡堆积体; 古水水电站

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)03-0317-06

我国西南地区高山峡谷地貌发育, 河谷发育过程中的强烈下切使得河谷边坡经历了复杂的表生改造, 边坡大规模崩塌, 形成了大量的滑坡堆积体^[1]. 近年来, 随着我国水利水电工程不断朝着西南方向发展, 堆积体边坡的稳定性问题对工程建设的影响越来越大. 例如 1996 年 10 月 28 日两家人堆积体因地震和降雨作用发生了 13.5 万 m^3 松散堆积体滑坡, 导致金沙江断流超过 40 min. 目前, 许多学者对堆积体进行了深入的研究: 李健等^[2-3]针对堆积体的力学参数进行了研究; 胡小军等^[4]研究了堆积体的加固措施; 安彦勇等^[5]对堆积体的稳定性和变形特征进行了分析; Sanchez^[6]研究了堆积体的形成过程; Caballero 等^[7-8]分析了堆积体在不同水文情况下的稳定性. 在这些研究中, 针对堆积体的失效概率和可靠性的研究很少, 同时在对堆积体稳定性进行分析时, 通常采用确定性的安全系数指标, 忽略了岩土体中实际存在的不确定因素. 可靠性理论是一种建立在不确定性概念上的概率分析方法, 它在一定程度弥补了安全系数法中不能考虑参数不确定性的缺点. 岩土在形成过程中, 由于生成环境、矿物成分、颗粒组成及应力历史等因素, 使得同一土层不同土性参数黏聚力 c 与内摩擦角 φ 之间具有相关关系, 称之 c, φ 的相关性. 忽略参数之间的相关性会给可靠性计算带来误差, 有的误差甚至高达 40%. 洪昌华等^[9-10]针对随机变量之间的相关性进行了类似的研究, 但结合随机变量之间的相关性对堆积体进行可靠性研究的较少, 有待进一步的深入探讨.

本文根据澜沧江古水水电站争岗滑坡堆积体工程地质条件的特殊性, 利用极限平衡法和结合 c, φ 相关抽样下的蒙特卡罗法建立了滑坡堆积体可靠性计算模型, 并针对目前滑坡堆积体失稳破坏模式, 提出了相应的防护、加固处理措施. 通过将建立在不确定性概念基础上的概率分析法与建立在确定性基础上的安全系数法结合起来, 相互补充, 使得边坡的稳定性评价更为科学.

1 争岗滑坡堆积体工程地质特性

1.1 工程简介

古水水电站坝址位于云南省德钦县北西方向佛山乡溜筒江行政村澜沧江上游河段, 是云南省境内澜沧江上游水电规划梯级“一库七级开发方案”的第一级, 属龙头水库. 古水水电站争岗滑坡堆积体区域如图 1 所示, 目前整个堆积体已经处于沿底滑面蠕动变形阶段. 考虑到工程地质条件、工程投资等因素, 争岗滑坡堆积

收稿日期: 2010-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(50911130366)

作者简介: 李德亮(1986—)男, 福建福州人, 硕士研究生, 主要从事岩土力学与边坡工程研究. E-mail: lderanlee@163.com.

体稳定性问题对上下坝址的选择起到至关重要的作用,滑坡体一旦失稳,对工程的影响将非常巨大,不但会堵塞河道形成堰塞湖,影响古水水电站的建设和枢纽区的布置,而且极大地威胁当地人民的生命安全.因此,对争岗滑坡堆积体进行深入研究具有十分重要的意义.

1.2 堆积体组成特征

地质测绘与勘探工程揭露情况显示,争岗滑坡堆积体物质组成与成因复杂,表层物质多为后期改造堆积而成,出露的主要为有机质土、块碎石土及砂砾石土等,其下为滑坡体.按地质成因可分为残、坡积层,冰水堆积层,崩、坡积层,地滑堆积层,按结构又可大致分为上下两大部分,即上部松散块碎石土堆积体,下部滑坡破碎岩体.

堆积体下部 2 300 ~ 2 500 m 高程部位堆积体最厚达 110 m.平硐、钻孔资料揭示,争岗滑坡堆积体底部分布有一层厚度在 20 ~ 200 cm 之间的滑带土,滑带土覆盖 I、II 区,并基本形成了贯穿的底滑面,是稳定性分析控制性滑面.深层滑带土主要位于破碎岩体与基岩接触面附近,为老滑坡形成时期的产物,其物质成分以黏土夹碎石为主,岩屑及含泥量较大(一般大于 35%).角砾粒径细小,一般小于 1 cm,极少量 2 ~ 3 cm,结构混杂,排列紊乱,局部发育挤压性结构面,角砾局部有明显挤压镜面、擦痕.浅层滑动土主要位于堆积体内部,为老滑坡堆积体后期改造时期形成的产物,其物质成分主要为钻孔中揭露的黏土含砾石,含泥量较大,砾石颗粒一般很小.

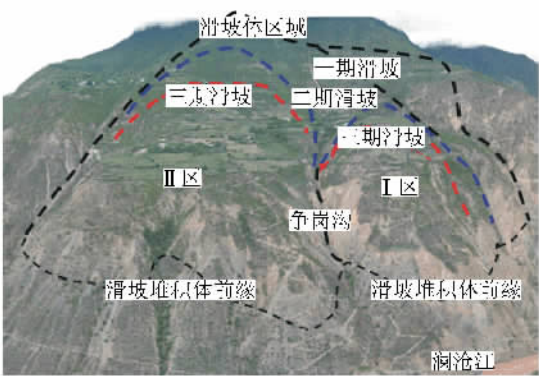


图 1 争岗滑坡堆积体地貌及分区
Fig. 1 Landform and zoning of Zhenggang landslide deposit

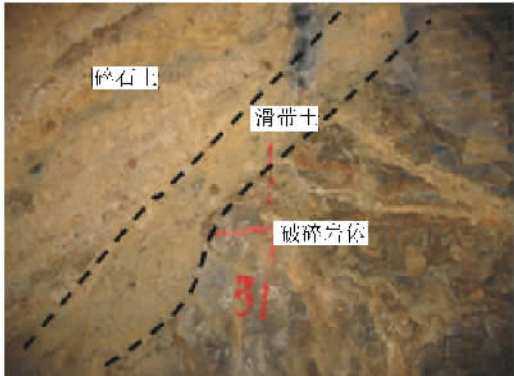


图 2 争岗滑坡堆积体底滑面与滑带土
Fig. 2 Control slip plane and sliding soil of Zhenggang landslide deposit

2 滑坡堆积体的可靠性计算模型

2.1 蒙特卡罗法

蒙特卡罗法^[11]是从频率的角度来求解结构的破坏概率,其设结构系统有 n 个独立的随机变量,则功能函数为

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = F - 1 \tag{1}$$

式中: $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ——已知概率分布的随机变量,如黏聚力、内摩擦角等不确定参数; F ——安全系数.

蒙特卡罗法计算破坏概率及可靠性指标的步骤如下:

- a. 首先用随机抽样分别获得各随机变量的分位值 $x_1, x_2, \dots, x_n$.
- b. 将随机变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 代入式(1)计算功能函数值 Z_i .
- c. 假设抽样数为 M ,每组抽样变量分位值对应的功能函数为 $Z_i, Z_i < 0$ 的次数为 L ,则结构的破坏概率可定义为

$$P_f = P\{g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0\} = L/M \tag{2}$$

- d. 安全系数的分布是满足一定规律的,当假定安全系数的分布满足正态分布时,可靠性指标可通过式(3)进行计算:

$$\beta = \frac{\mu_f - 1}{\sigma_f} \tag{3}$$

其中
$$\mu_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N F_j \quad \sigma_f = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (F_j - \mu_f)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中： β ——可靠性指标； μ_f ——安全系数均值； σ_f ——安全系数标准差。则破坏概率为

$$P_f = 1 - \varphi(\beta) \tag{4}$$

式中 $\varphi(\beta)$ 为标准正态分布。 P_f 与 β 一一对应, 为衡量边坡可靠性的 2 个重要指标。 可靠性指标与破坏概率的关系可参考 DL/T 5353—2006《水电水利工程边坡设计规范》中的规定。

2.2 c ,φ 相关性分析方法

在对滑坡堆积体进行可靠性分析过程中, 不仅基本随机变量存在着自相关性, 而且基本变量 c ,φ 之间也存在着强烈的互相关性。 不少学者针对基本变量之间的相关性进行了研究^[12], 经总结并推导出 c ,φ 相关系数的求解步骤如下：

抗剪强度 c 和 φ 通常是通过多组剪切试验结果采用线性回归方法得出的, 那么就必须要考虑到参数 c 和 φ 之间的相关性。 若有 m 组、 每组有 k 个试样在不同的垂直压力作用下进行剪切试验, 有 n 对数据, $n = mk$, 则有

$$\tau_i = c + p_i \tan \varphi + \varepsilon_i \tag{5}$$

式中： τ_i ——剪应力； p_i ——第 i 个试样的正应力； ε_i ——随机扰动值, 是相对于回归直线的误差值。

根据 2 个未知量最小二乘法解的误差传递理论, 得 c 和 $\tan \varphi$ 的协方差为

$$C_{ov}(c, \tan \varphi) = - \bar{n} p (s^2 / \Delta) \tag{6}$$

其中
$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \quad \Delta = n \sum_{i=1}^n p_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n p_i \right)^2$$

为了得到 c 与 φ 的相关性, 将 $\tan \varphi$ 在平均值 $\bar{\varphi}$ 处作泰勒级数展开, 并且忽略高次项, 取线性项, 得

$$\tan \varphi \approx \tan \bar{\varphi} + (\varphi - \bar{\varphi}) \sec^2 \bar{\varphi} \tag{7}$$

将式(7)代入式(6), 整理得到

$$C_{ov}(c, \tan \varphi) = \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})(\tan \varphi_i - \tan \bar{\varphi}) / n = C_{ov}(c, \varphi) \sec^2 \bar{\varphi} \tag{8}$$

则相关系数为

$$\rho_{c, \varphi} = C_{ov}(c, \varphi) / \sigma_c \sigma_\varphi \tag{9}$$

式中： $C_{ov}(c, \varphi)$ ——c 和 φ 的协方差； σ_c 、 σ_φ ——c ,φ 的标准差。

3 滑坡堆积体可靠性分析

3.1 计算参数的选取

根据古水争岗土料场前期进行的勘探和试验工作, 对堆积体进行了 23 组剪切试验^[13], 对黏聚力和内摩擦角的统计分布曲线见图 3 及图 4。

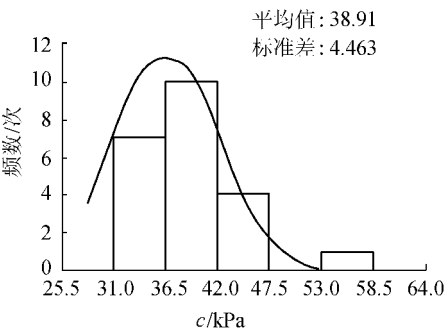


图 3 堆积体黏聚力值统计分布曲线

Fig. 3 Statistical distribution curve of cohesion for landslide deposit

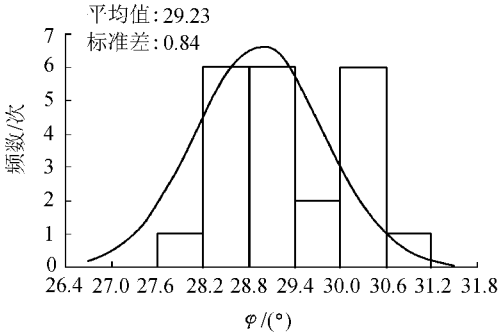


图 4 堆积体内摩擦角统计分布曲线

Fig. 4 Statistical distribution curve of internal friction angle for landslide deposit

地质调查表明, 争岗滑坡堆积体在暴雨工况下已经处于蠕滑状态, 可认为滑坡堆积体处于极限平衡状态。

因此,在争岗滑坡堆积体Ⅰ区、Ⅱ区分别选取典型剖面(图5)采用二维极限平衡方法反演滑带土的力学参数。

反演假设2个剖面同时达到安全系数1.05,通过图6可以看出:内摩擦角采用不同方案反演均比较稳定,表明反演出的内摩擦角可信度较高,滑带土的黏聚力对安全系数极度敏感,内摩擦角的微小变动也可能导致滑带土强度的巨大变化,因此结合滑坡堆积体变形破坏特征以及现场调查反映的稳定性状况,固定滑带土黏聚力取试验均值20 kPa后,多次试算,发现 $\varphi=27.9^\circ$ 时Ⅰ区暴雨工况处于极限平衡状态,而Ⅱ区二期滑坡体亦处于极限平衡状态,与调查结果相符。

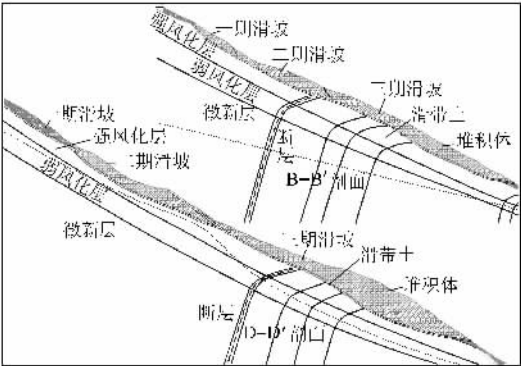


图5 B—B'与D—D'剖面

Fig. 5 Profiles of sections B-B' and D-D'

争岗滑坡堆积体的底滑面位于堆积体和滑带土内,故不考虑基岩参数的随机性。综合现场勘探、剪切试验和参数反演确定堆积体、滑带土以及下伏基岩的物理力学参数,并且根据对堆积体和滑带土分别进行的多组剪切试验,经拟合得出,堆积土和滑带土的 c, φ 的相关系数分别为-0.52和-0.46, c, φ 表现出负相关性。力学参数见表1。

3.2 可靠性分析结果

争岗滑坡堆积体历史上共经历了3次大的滑动变形,此次稳定性分析选择沿主滑方向且涵盖三期滑动的剖面作为典型计算剖面。Ⅰ区、Ⅱ区计算剖面分别选取B—B'剖面和D—D'剖面(图5)。

在稳定性计算中考虑了降雨对堆积体的影响,且暴雨工况采用滑面加5 m水头模拟,根据区域地震资料可知,研究区抗震设防烈度为Ⅶ度,Ⅰ区、Ⅱ区分别取50 a超越概率为5%和10%,设计水平地震加速度分别为0.168g和0.126g,均考虑地震作用效应折减系数为0.25,动态分布系数为2.0,使用极限平衡法计算争岗滑坡堆积体的安全系数,并在堆积体和滑带土的 c, φ 的相关系数分别为-0.52和-0.46情况下进行蒙特卡罗法抽样模拟,经5000次模拟后最终计算得出的可靠性指标见表2。

表2 不同工况下的安全系数及可靠性指标

Table 2 Safety factors and reliability indices under different working conditions

计算工况	滑动期次	B—B'剖面			D—D'剖面		
		安全系数	可靠性指标	破坏概率/%	安全系数	可靠性指标	破坏概率/%
正常运行工况	一期	1.075	0.683	23.4	1.050	0.465	31.5
	二期	1.096	0.841	19.3	1.100	0.852	19.1
	三期	1.041	0.410	34.2	1.144	1.160	11.2
暴雨工况	一期	0.988	-0.076	55.2	1.000	0.041	50.4
	二期	1.009	0.123	46.7	1.051	0.470	31.4
	三期	0.957	-0.373	66.7	1.093	0.797	21.0
地震工况	一期	0.935	-0.596	74.6	0.945	-0.487	71.3
	二期	0.952	-0.423	68.2	0.988	-0.076	55.6
	三期	0.910	-0.869	81.2	1.025	0.262	40.2

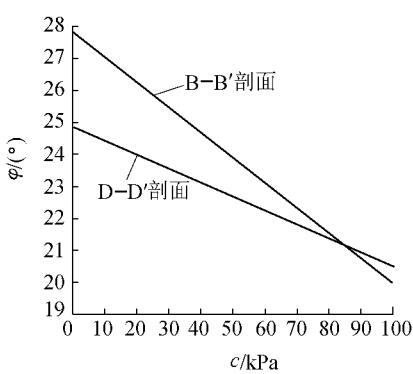


图6 安全系数为1.05时的 c, φ 关系曲线

Fig. 6 Curves for relation between c and φ when $F=1.05$

表1 争岗滑坡堆积体力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of Zhenggang landslide deposit

岩土体分区	$\rho_{c, \varphi}$	c/MPa		$\varphi/(^\circ)$	
		平均值	标准差	平均值	标准差
堆积体	-0.52	0.04	4.46	30.0	1.84
滑带土	-0.46	0.02	2.37	27.9	2.80
基岩		0.18		34.0	

由表 2 可知,争岗滑坡堆积体在暴雨与地震工况下均存在失稳破坏的可能性,需要对其进行相应的防护和加固处理.经综合比选确定争岗滑坡堆积体的整治处理方案如下:Ⅰ区为整体开挖,开挖基面沿着滑带土与强风化分界线,坡顶残余堆积体采用 100 kN 级预应力锚拉板支护.Ⅱ区滑坡堆积体治理措施以局部开挖减载和抗滑桩支护为主,同时在坡顶残余堆积体和坡脚剪出口处分别采用 100 kN 级的预应力锚拉板支护.综合治理措施见图 7.

采取治理措施后,暴雨工况同样采用滑面加 5 m 水头模拟,堆积体力学参数见表 1.堆积体边坡最危险滑面在各工况下的安全系数和可靠性指标如表 3 所示,计算结果表明 B—B'剖面在暴雨工况下的安全系数为 1.175,破坏概率为 6.2%;D—D'剖面安全系数达 1.182,破坏概率为 3.9%,防护、加固措施效果显著.

表 3 典型剖面加固后安全系数及可靠性指标

计算工况		B—B'剖面			D—D'剖面		
		安全系数	可靠性指标	破坏概率/%	安全系数	可靠性指标	破坏概率/%
正常运行工况	最危险滑面	1.256	2.042	2.2	1.242	2.285	1.1
暴雨工况	最危险滑面	1.175	1.537	6.2	1.182	1.820	3.9
地震工况	最危险滑面	1.094	0.911	16.6	1.112	1.212	10.0

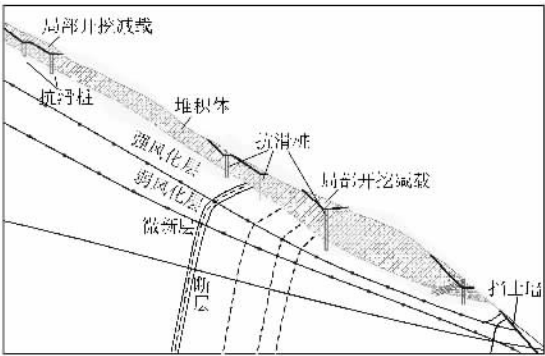


图 7 综合治理典型剖面布置

Fig. 7 Layout of typical sections under integrated design

4 结 论

- a. 采用极限平衡法和蒙特卡罗法对争岗滑坡堆积体进行稳定性和可靠性分析,并考虑黏聚力和内摩擦角之间的相关性,可提高堆积体可靠性计算的准确性,更加符合工程实际情况.
- b. 根据对争岗滑坡堆积体进行的剪切试验,并结合工程类比以及参数反演综合确定争岗滑坡堆积体的力学参数及其统计分布规律,在此基础上进行堆积体的可靠性和稳定性分析,结果表明,堆积体在正常运行工况下稳定,在暴雨工况下进入蠕滑变形状态,其结果与现场勘探成果相吻合.
- c. 根据可靠性和稳定性分析结果的要求,提出了相应的支护、加固治理措施,使滑坡堆积体的破坏概率显著降低.

参考文献:

[1] 刘昌明,钱易,邵益生,等.中国城市水资源可持续开发利用[M].北京:中国水利水电出版社,2002.

[2] 李健,谢守益,巫德斌,等.兰右山边坡岩体力学参数研究[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(4):459-462.(LI Jian, XIE Shou-yi, WU De-bin, et al. Study on rockmass mechanical parameters for Lanyoushan slope[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(4): 459-462.(in Chinese))

[3] 景卫华,王克东,朱俊高.变形参数对土坡稳定安全系数的影响[J].水利水电科技进展,2010,30(2):17-20.(JING Wei-hua, WANG Ke-dong, ZHU Jun-gao. Effect of deformation parameters on safety factor of slope stability[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(2): 17-20.(in Chinese))

[4] 胡晓军,王建国.边坡加固工程中抗滑桩间距的确定[J].河海大学学报:自然科学版,2009,35(3):330-333.(HU Xiao-jun, WANG Jian-guo. Determination of anti-slide pile spacing in side slope consolidation projects[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 35(3): 330-333.(in Chinese))

[5] 安彦勇,王保田,汪莹鹤.梨园水电站下咱日堆积体稳定性分析[J].水利水电科技进展,2008,28(5):45-48.(AN Yan-yong, WANG Bao-tian, WANG Ying-he. Stability analysis of Xiazanri deposits in the Liyuan Hydropower Station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(5): 45-48.(in Chinese))

[6] SANCHEZ M J. Slope deposits in the upper Nalón River basin(NW Spain):an approach to a quantitative comparison[J]. Geomorphology, 2002, 43(1/2):165-178.

- [7] CABALLERO Y ,JOMELLI V ,CHEVALLIER P ,et al. Hydrological characteristics of slope deposits in high tropical mountains (Cordillera Real ,Bolivia) [J]. Catena 2002 ,47(2) :101-116.
- [8] 张玉 ,张方方. 变水位多工况下大型渠道土质边坡的稳定分析 [J]. 水利水电科技进展 ,2010 ,30(1) :56-60.(ZHANG Yu , ZHANG Fang-fang. Stability analysis of soil slopes for large-scale canals considering variable water levels and various working conditons [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources ,2010 ,30(1) :56-60.(in Chinese))
- [9] 洪昌华 ,龚晓南. 相关情况下 Hasofer-Lind 可靠度指标的求解 [J]. 岩土力学 ,2000 ,21(1) :68-71.(HONG Chang-hua. Hasofer-Lind reliability index calculation under correlation condition [J]. Rock and Soil Mechanics ,2000 ,21(1) :68-71.(in Chinese))
- [10] 涂帆 ,常方强. 土性参数的互相关性对加筋土挡墙可靠度的研究 [J]. 岩石力学与工程学报 ,2005 ,24(15) :2654-2658.(TU Fan ,CHANG Fang-qiang. Effect of cross-correlations among soil parameters on reliability of reinforced retaining walls [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2005 ,24(15) :2654-2658.(in Chinese))
- [11] 吴世伟. 结构可靠度分析 [M]. 北京 :人民交通出版社 ,1990.
- [12] 徐建平 ,胡厚田 ,张安松 ,等. 边坡岩体物理力学参数的统计特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报 ,1999 ,18(4) :382-386.(XU Jian-ping ,HU Hou-tian ,ZHANG An-song ,et al. On statistical characteristics of physical and mechanical parameters in slope rockmass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,1999 ,18(4) :382-386.(in Chinese))
- [13] 徐卫亚. 澜沧江古水水电站争岗滑坡堆积体稳定性及防治研究 [R]. 南京 :河海大学 ,2009.

Reliability analysis of Zhenggang landslide deposit based on Monte-Carlo method with relevant parameters of c and φ

LI De-liang^{1,2} , SHI Chong^{1,2} , NIE Wei-ping^{1,2} , LIU He^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. Geotechnical Research Institute , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : According to the special engineering geological conditions of Zhenggang landslide deposit in Gushui Hydropower Station on Lancang River , the mechanical parameters and their statistical distribution were determined based on the laboratory direct shear tests , engineering analogy and back analysis of parameters . The reliability analysis of typical sections of the landslide deposit under various working conditions were performed by means of the Monte-Carlo method combined with the relevant parameters of cohesion c and internal friction angle φ . The potential instability modes and deformation characteristics were predicated . The results indicate that the failure probability of the B-B section is 23.4% under the normal operating conditions , and it is 55.2% under the rainstorm conditions . If the landslide deposit is not treated , it may be unstable . It is consistent with the field investigations under the above two conditions , that is , slow sliding deformation . On such a basis , the corresponding protection and reinforcement measures are proposed according to the engineering stability requirements . The failure probability of the landslide deposit is reduced to be 6.2% under the rainstorm condition .

Key words : slope stability ; landslide deposit ; reliability ; Monte-Carlo method ; Zhenggang landslide deposit ; Gushui Hydropower Station