

文章编号: 1008-2786(2000)增-0060-05

# 强度再生效应在大型滑坡稳定性评价中的应用

任光明, 聂德新, 韩爱果

(地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 四川 成都 610059)

**摘 要:** 通过大量现场调查、室内外试验及计算等研究的基础上, 揭示了只要具有一定滑体厚度的滑带土, 沿滑面具有强度再生效应。利用该观点, 结合滑坡破坏特征, 滑带土的物质组成及其赋存环境条件, 对滑面强度参数的选取及其对稳定性的影响进行了详细探讨, 该研究为滑坡滑面强度参数的选取提供了重要的理论依据。

**关键词:** 强度再生效应; 大型滑坡; 强度参数; 稳定性评价

中图分类号: P642.22, TU441.4

文献标识码: A

滑坡是常见的地质灾害之一。滑坡稳定性评价通常包括成因机制、滑面强度参数及稳定性计算等方面, 其中滑面强度参数的正确选取是滑坡稳定性评价和抗滑工程设计的关键问题。由于滑坡的形成机制以及滑带土所赋存的环境条件的差异, 其强度参数也有差别。滑带土, 尤其是大型滑坡滑带土, 在滑坡形成后长期赋存于滑体之下, 必然要受到其上覆滑体自重引起的压应力的作用, 这是当前在评价和研究滑坡滑面强度参数中一直被忽视的问题, 针对这一问题, 作者从滑带土赋存的环境条件出发, 对黄河上游某电站坝前一大型滑坡的大量勘探平洞的调查、取样试验发现, 滑带土沿滑面相互嵌合、粘结很紧密, 沿滑面的强度存在峰值强度, 而不是早期的残余强度<sup>[1]</sup>。本文以该大型滑坡为例, 应用强度再生效应的观点, 对滑带土的强度特征及其对稳定性的影响进行探讨。

## 1 滑坡的基本特征

滑坡位于电站的库首区, 滑坡面积 0.32 km<sup>2</sup>, 滑体最大铅直厚度达 110 m, 总体积 1 845 万 m<sup>3</sup>。自 1981 年大暴雨导致滑坡复活后, 滑体在水库蓄水前一直呈缓慢的蠕滑变形。滑坡区的地质主要为前震旦系中一薄层状混合岩、片岩及其穿插的伟晶花岗岩, 在片岩、混合岩中层间挤压带发育, 岩层倾角 40°~60°。通过现场调查、勘探及室内模拟试验等研究表明, 该滑坡为一大型顺层滑移弯曲变形、根部折断剪出型的岩质滑坡(图 1, 2)<sup>[2]</sup>。滑坡的破坏及滑带土的组成表现为上部沿含大量泥质的层间弱面发生大位移的顺层滑移, 滑带土以泥质物为主; 下部则是与岩层成大角度的切层剪出段, 其位移有限, 滑带土则为微含细粒的砾石组成。

## 2 滑带土的物理力学特征

由于滑带土的物质组成具有分段特征, 滑体的重力压密作用对泥质物远比砂、砾石土显著<sup>[3]</sup>。在采用分段对滑带土物理力学特征进行研究的基础上, 重点研究了天然条件下顺层段富含泥质物的滑带土的物理力学特征。

收稿日期: 1999-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助研究项目(49672166)

作者简介: 任光明(1964-), 男(汉族), 四川西充人, 博士, 副教授, 主要从事工程地质及岩土工程方向的科研与教学工作, 在国内外发表论文 20 余篇。

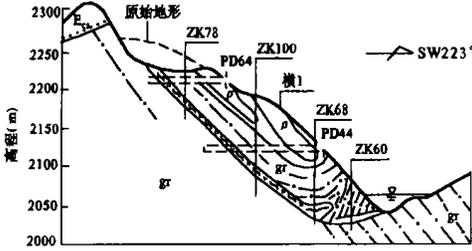


图1 滑坡纵剖面图

Fig. 1 Geological section of landslide

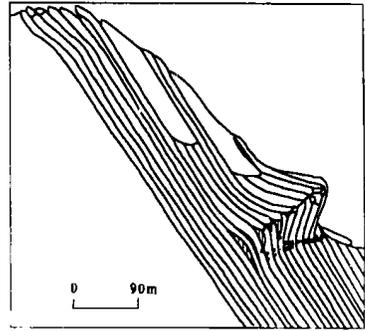


图2 滑坡形成机制物理模拟结果

Fig. 2 The result of physical simulation for the formation mechanism of landslide

### 2.1 切层段滑带土的物理力学特征

为了研究切层段滑带土的物理力学特征, 在现场分别完成了两组天然状态及饱水状态土样的大剪试验, 经整理的结果如表 1。

表 1 切层段滑带土的物理力学特征

Table 1 Physical and mechanical properties of slip zone soil in cut-bedding part

天然状态				饱水状态			
含水量 (%)	密度 (kN/m <sup>3</sup> )	摩擦系数 (f)	内聚力 C (100K Pa)	含水量 (%)	密度 (kN/m <sup>3</sup> )	摩擦系数 (f)	内聚力 C (100K Pa)
3.28	19.3	0.795	0.10	15.6	21.2	0.71	0.10

### 2.2 顺层段滑带土的物理力学特征

为获得天然状态下的原状样, 防止试样在围压解除后发生松弛及地下水对其的影响, 采取了一系列特殊的取样、试验方法<sup>[4]</sup>, 通过对滑带土沿滑面进行的大量中型剪及直剪试验, 代表性结果如表 2。从表 2 可见: 天然条件下滑带土的含水量、孔隙比都较低, 而密度、干密度较高, 均呈固态状态, 具有较好的物理性质; 滑带土沿原有滑面的峰值强度中均存在一定量值的内聚力, 而且峰值摩擦系数均比残余值大。

表 2 顺层段滑带土的物理力学特征

Table 2 Physical and mechanical properties of slip zone soil in bedding glide part

编号	密度 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	含水量 $w$ (%)	比重 $G$	干密度 $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	孔隙比 $e$	塑限 $W_p$ (%)	液限 $W_L$ (%)	$W/W_p$	峰值强度		残余强度		试验方法
									$f$	$C$ (MPa)	$f_r$	$C_r$ (MPa)	
66-2	21.12	13.23	2.77	18.82	0.472	23.0	34.1	0.575	0.454	0.165	0.422	0.0	中剪
66-4	21.2	12.9	2.77	18.78	0.475	23.0	34.1	0.561	0.422	0.13	0.333	0.0	
S52	21.3	15.3	2.90	18.47	0.57	23.5	41.0	0.65	0.47	0.22	0.27	0.0	直剪
42-2	20.6	13.4	2.77	18.17	0.525	22.8	34.0	0.588	0.423	0.267			

根据强度再生效应的观点, 上述新的峰值强度即为滑带土在滑体自重引起的压应力作用下形成的再生强度, 为了建立强度参数的预测式, 利用原状样中型剪及直剪的强度参数 ( $f, f_r, C, C_r$ ) 与表征滑带土状态特征的  $W/W_p$  ( $W$  为含水量,  $W_p$  为塑限含水量) 进行相关分析, 结果表明, 内聚力较分散, 而摩擦系数具有较好的相关性, 其代表性的相关方程如表 3。典型的曲线如图 3。

表 3 顺层段滑带土强度参数与  $W/W_p$  相关方程

试验方法	相 关 方 程	相关系数	备 注
中型剪	$f = 0.726 - 0.508(W/W_p)$	-0.94	峰值
	$f_r = 0.758 - 0.632(W/W_p)$	-0.91	残余值
中型剪、 直剪	$f = 0.683 - 0.426(W/W_p)$	-0.89	峰值群中线
	$f_m = 0.607 - 0.414(W/W_p)$		峰值群下线

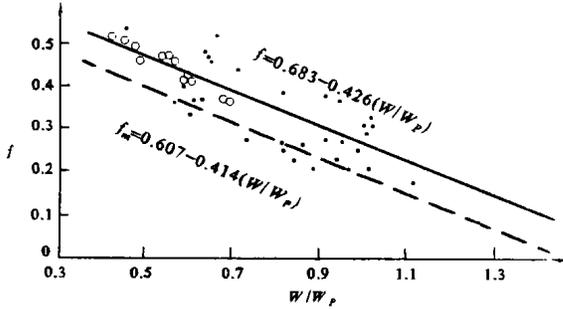


图 3 顺层段滑带土原状样中型剪、直剪  $f - W/W_p$  关系曲线  
Fig. 3  $f - W/W_p$  curve of medium-size and direct shear tests of slip zone soil's undisturbed samples in bedding glide part

物理学参数后,利用有限元法求得滑面上的应力特征后,建立物理学参数与滑面压应力(或滑体厚度)的关系来获得整个滑面上的积分强度。但在工程实践中,很难系统获得不同高程的物理学指标。因此,多采用该段滑面中点的参数代替整个滑面的平均强度。

根据上述分析,为了获得滑面上压应力的分布特征,选取过取样的 PD42 平洞的代表性剖面进行弹性有限元分析,获得顺层滑移段滑面压应力( $\sigma_n$ )与滑体厚度( $H$ )的关系为

$$\sigma_n = 9.184LgH - 6.98 \quad (r = 0.94) \quad (1)$$

式中  $\sigma_n$  为滑面承受的压应力(100 KPa);  $H$  为滑体厚度(m),  $r$  为相关系数。这说明滑坡形成后,滑体自重引起的压应力是存在的。因此,在该压应力作用下,原已遭到剪切滑动破坏的滑带土将发生与之对应的物理学性质的改变。为了验证该结论,利用 PD42 平洞的 PD42-90 扰动样调至液限状态,在高压固结仪中进行仿真研究<sup>[1]</sup>,结果表明,压应力与滑带土的孔隙比及干密度具有良好的相关性,其相关方程分别为

$$e = 0.7377 - 0.2937Lg\sigma \quad (r = -0.994) \quad (2)$$

$$r_d = 16.44 + 3.079Lg\sigma \quad (r = 0.996) \quad (3)$$

式中  $e$  为孔隙比;  $r_d$  为干密度( $\text{kN}/\text{m}^3$ );  $\sigma$  为压应力(100 KPa);  $r$  为相关系数。根据前面有限元分析获得该点的压应力为 1.12 MPa,代入式(2)、式(3)中,得到仿真条件下的孔隙比、干密度,将其与天然条件下的实测值相比(表 4)可见,二者非常一致,说明式(2)、式(3)可信。

表 4 顺层段滑带土天然物理指标与室内仿真值对照表

Table 4 Physical indexes of slip zone soil in bedding glide part under natural and in lab. simulation test

编 号	压应力 (100 KPa)	孔 隙 比		干密度( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	
		天然状态	仿真状态	天然状态	仿真状态
PD42-90	11.2	0.429	0.4295	19.45	19.676

利用式(1)及式(2)可得滑带土孔隙比( $e$ )与滑体厚度( $H$ )的关系,再由含水量( $W$ )与孔隙比( $e$ )的

### 3 强度再生效应在滑坡稳定性评价中的应用

#### 3.1 滑带土强度参数取值

所研究的滑坡顺层段滑面从滑体后缘至弯曲段的上覆滑体厚度是逐渐增大的(图 1)。因此,滑面所承受的由滑体自重引起的压应力也随厚度的增大而增大,在该环境条件下滑带土的孔隙比、含水量等也随之改变,因而整个顺层段滑面上的再生强度在不同地点也不相同。要评价该滑面的强度参数应当通过一定的勘探平洞,在获取不同地点的物

关系式:  $W = \frac{Sr \cdot e}{G}$  及表征整个滑体滑带土平均值的比重 ( $G$ )、饱和度 ( $S_r$ )、塑限含水量 ( $W_p$ ) 的数值代入表 3 的各相关方程式中  $W/W_p$  后, 可获得滑带土在天然状态及饱水状态下各强度参数 ( $f, f_r, f_m$ ) 与滑体厚度 ( $H$ ) 之间的预测方程, 然后利用积分中值定理对顺层段滑面强度值在滑体厚度范围内进行积分, 得到不同条件下滑面强度参数如表 5。而内聚力主要以中型剪试验结果综合给定, 其值列于表 5。

4.2 滑坡稳定性评价

根据滑坡滑体形态及变形特征, 选择传递系数法来计算滑体的稳定性。图 4 是稳定性计算剖面及条分图, 用传递系数法分别按表 5 及表 1 选取顺层段及切层段滑面强度参数, 其计算结果如表 6。

表 5 顺层段滑面强度参数

Table 5 Strength parameters of slip plane in bedding glide part

取值方案编号	取值依据	地下水位以上		地下水位以下	
		$f$	$C(\text{MPa})$	$f$	$C(\text{MPa})$
I	中型剪峰值	0.399	0.019	0.362	0.019
II	中型剪残余值	0.35	0.0	0.319	0.0
III	中剪、直剪峰值群中线	0.41	0.019	0.378	0.019
IV	中剪、直剪峰值群下线	0.34	0.019	0.31	0.019

表 6 滑坡稳定性计算成果

Table 6 Stability calculation results of landslide

取值方案编号	I	II	III	IV
稳定性系数	1.05	0.98	1.06	1.00

从表 6 可见, 针对不同取值方法获得的稳定性系数为 0.98~1.06, 其中仅当顺层段滑面强度参数按残余值选取时, 稳定性系数为 0.98, 而目前滑坡在水库蓄水前仅呈缓慢蠕变, 说明早期达到残余值的泥质滑面在滑体的长期作用下, 滑面的强度并不是残余强度而是再生强度。

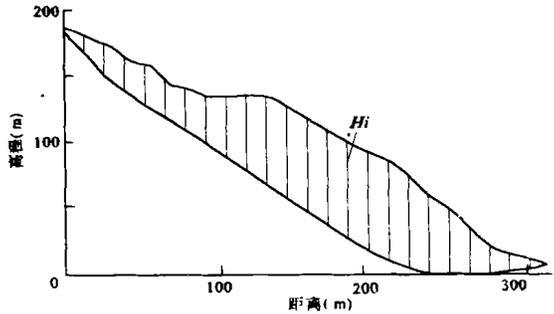


图 4 稳定性计算剖面及条分图 (x 是顺层段与切层段的分界点)

Fig. 4 Slices of landslide for stability analysis

4 结 论

通过上述研究可得到如下认识与结论:

1. 对大型滑坡, 只要具有一定滑体厚度, 在上覆滑体自重所产生的压应力作用下, 土粒将沿滑面发生相互渗透、粘结和嵌合, 发生强度再生效应, 形成新的峰值强度(即再生强度), 达到残余值的泥质剪切面在上述压应力作用下, 其残余强度是一种瞬时效应。

2. 强度参数评价时, 不仅充分考虑了滑面所处的环境条件, 而且在滑坡成因机制研究的基础上, 按滑坡破坏方式及滑带土物质组成分段给定强度参数, 对滑坡稳定性作出了正确评价, 这不仅为滑坡滑面强度参数的选取与评价提供了理论依据, 而且对同类滑坡的稳定性评价也具有指导作用。

参考文献:

[1] 任光明, 聂德新, 等. 大型滑坡滑带土结构强度再生特征及其机理探讨[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(3), 28~33

- [2] 任光明, 李树森, 聂德新等. 顺层坡滑坡形成机制的物理模拟及力学分析[J]. 山地研究. 1998, 16(3), 182~187
- [3] H. H. Rieke, G. V. Chilingrian. 泥质沉积物的压实[M]. 徐大怀译. 北京: 地质出版社, 1982, 5~9
- [4] 聂德新, 赵其华, 彭社琴. 黄河公伯峡水电站古风化岩及砾砂岩工程地质特性研究[M]. 成都科技大学出版社, 1994, 44~47

## APPLICATION OF STRENGTH RESTORATION EFFECT ON EVALUATION OF STABILITY OF LARGE-SCALE LANDSLIDES

REN Guang-ming, NIE De-xin, HAN Ai-guo

(*National Laboratory of Geological Hazard Prevention, Chengdu 610059*)

**Abstract:** On the basis of the field investigation, laboratory and in-situ tests and calculations, authors discovered that strength restoration effect along slide planes would happen if the thickness of upper sliding mass reaches a certain value. In this opinion, together with failure property, grain composition, and the environmental condition that slip zone soil existed, the selection of strength parameters along slide planes was detailed studied. The stability of the landslide was also analyzed and evaluated. The method provides an important theoretical basis for choosing and evaluating strength parameters of slip zone soil.

**Key words:** Strength restoration effect; Large-scale landslide; Strength parameters; Stability evaluation