

# 滑坡滑动面抗剪强度指标的敏感性分析

张常亮<sup>1</sup>, 李同录<sup>1</sup>, 胡仁众<sup>2</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 沈阳市建筑设计院, 辽宁 沈阳 110031)

**摘要:** 以三峡库区左岸归州老城滑坡为例, 利用 Janbu 条分法和推力传递法, 分析了天然抗剪强度指标  $c_0$ 、 $\varphi_0$  值和饱和  $c_{sat}$ 、 $\varphi_{sat}$  值与滑坡推力和治理造价的关系。通过综合研究和比较, 发现  $\varphi$  值对稳定系数、剩余下滑力的影响要明显高于  $c$  值,  $\varphi$  值成为治理设计中保证治理安全和控制造价的关键因素。因此, 在滑坡稳定性分析和治理设计中, 选取合理的  $\varphi$  值具有重要意义。

**关键词:** 滑坡; 滑动面; 抗剪强度; Janbu 条分法; 推力传递法; 稳定性; 治理设计; 剩余下滑力

**中图分类号:** TU432 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2007)02-0188-04

## Sensibility Analysis of Shearing Strength Parameters of Sliding Surface of Landslide

ZHANG Chang-liang<sup>1</sup>, LI Tong-lu<sup>1</sup>, HU Ren-zhong<sup>2</sup>

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Institute of Shenyang Construction Design, Shenyang 110031, Liaoning, China)

**Abstract:** Taking the Guizhoulaocheng landslide on the left side of the Three Gorges Reservoir as an example, the relation between the intact  $c_0$ ,  $\varphi_0$  and the driving forces, the relation between the intact  $c_0$ ,  $\varphi_0$  and the treatment design, the saturated  $c_{sat}$ ,  $\varphi_{sat}$  and the driving forces, the saturated  $c_{sat}$ ,  $\varphi_{sat}$  and the treatment design are analyzed by the methods of Janbu Slices and driving force transfer. After the analysis and comparison of the computing results, it is suggested that influence of the  $\varphi$  value on the safety factor and the driving forces is much apparent than that of  $c$  value, and  $\varphi$  value is the most critical factor to ensure the safety and investment of the slide-controlling engineering. Therefore, it is significant to choose a reasonable  $\varphi$  value in the stability analysis and the controlling design of landslides.

**Key words:** landslide; sliding surface; shearing strength; Janbu Slices Method; driving force transfer Method; stability; controlling design; driving forces

## 0 引言

滑坡治理是一个复杂的岩土工程问题, 在治理设计中, 经常会出现支挡结构失效或设计过于保守而造成浪费的问题。该问题多是由于在对滑坡进行稳定性计算和治理设计时, 对滑坡机理认识不清, 选取设计参数随意, 凭经验或主观臆断确定治理方案等诸多原因造成的。工程中设计参数的选

取, 尤其是滑动面的抗剪强度指标 ( $c$ ) 和内摩擦角 ( $\varphi$ ) 值, 对稳定性评价结果和治理工程设计的影响尤为突出。

## 1 稳定系数对 $c$ 、 $\varphi$ 值的敏感性分析

稳定分析方法中, 极限平衡分析法简单易行, 是目前滑坡稳定分析最常用的方法, 其中包括 Fel-lenius 法、Bishop 法、Janbu 条分法、Spencer 法。这

收稿日期: 2006-07-28

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(D200116000110)

作者简介: 张常亮(1979), 男, 河南新乡人, 博士研究生, 从事边坡工程研究。E-mail: zcl790823@163.com

些方法中 Janbu 条分法对滑动面的形状没有限制, 适用范围较大, 笔者在滑坡稳定计算中采用 Janbu 法<sup>[1-2]</sup>, 计算如下

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{fi} l_i}{\sum_{i=1}^n (W_i + \Delta X_i) \sin \alpha_i} = \frac{\sum_{i=1}^n [c_i \Delta x + (W_i + \Delta X_i - u_i \Delta x) \tan \varphi_i]}{\sum_{i=1}^n (W_i + \Delta X_i) \tan \alpha} \frac{1}{m_{\alpha i} \cos \alpha_i}$$

$$m_{\alpha i} = \cos \alpha + \frac{\tan \varphi_i}{k} \sin \alpha$$

式中:  $k$  是稳定系数;  $c_i$  是第  $i$  条块滑动面上土体的粘聚力;  $\varphi_i$  是第  $i$  条块滑动面上土体的内摩擦角;  $\tau_{fi}$  是第  $i$  条块滑动面上土的抗剪强度;  $\alpha_i$  是第  $i$  条块滑动面与水平面夹角;  $l_i$  是第  $i$  条块滑动面的长度;  $W_i$  是第  $i$  条块土体的质量;  $u_i$  为第  $i$  条块底滑面上的孔隙水压力;  $\Delta X_i$  是第  $i$  条块土体侧面所受到的剪力增量。

对于滑坡来说, 当滑动面空间位置确定后, 影响稳定系数和治理设计的因素主要是滑动面的抗剪强度参数  $c$ 、 $\varphi$  值。水库库岸滑坡  $c$ 、 $\varphi$  值会受水位升降的影响, 现以三峡库区秭归县归州老城滑坡为例, 探讨抗剪强度参数  $c$ 、 $\varphi$  的变化对稳定系数影响。

归州老城滑坡是一个库岸滑坡, 按 175 m 静水位进行稳定性计算。水位以上取天然  $c_0$ 、 $\varphi_0$  值; 水位以下取饱和  $c_{sat}$ 、 $\varphi_{sat}$  值。给定不同的  $c_0$ 、 $\varphi_0$  值和  $c_{sat}$ 、 $\varphi_{sat}$  值, 求得各个与之对应的稳定系数(表 1、2)。将表 1、2 的数据绘成图则如图 1、2。

表 1  $c$  值对稳定系数的影响

$c_0$ /kPa	$k$	$c_{sat}$ /kPa	$k$
28	1.104	10.5	1.110
29	1.111	11.5	1.104
30	1.117	12.5	1.115
31	1.123	13.5	1.121
32	1.130	14.5	1.126
33	1.136	15.5	1.132
34	1.143	16.5	1.138
$c_{sat} = 10.5$ kPa $\varphi_0 = 18^\circ$ $\varphi_{sat} = 12.5^\circ$		$c_0 = 28$ kPa $\varphi_0 = 18^\circ$ $\varphi_{sat} = 12.5^\circ$	

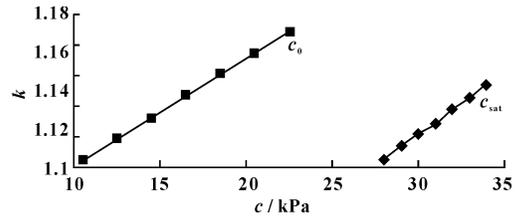


图 1  $c$  值对稳定系数的影响

Fig. 1 Influence of  $c$  Value on the Factor of Safety

由图 1 可见,  $c_0$  对稳定系数的影响与  $c_{sat}$  基本一致,  $c_0$  提高 1 kPa, 稳定系数增大约 0.006;  $c_{sat}$  增大 1 kPa, 稳定系数增大约 0.006。由图 2 可见,  $\varphi_0$  对稳定系数的影响比  $\varphi_{sat}$  高。 $\varphi_0$  提高  $1^\circ$ , 稳定系数增大约 0.039;  $\varphi_{sat}$  增大  $1^\circ$ , 稳定系数增大约 0.021。

表 2  $\varphi$  值对稳定系数的影响

Tab. 2 Influence of  $\varphi$  Value on the Factor of Safety

$\varphi_0$ /( $^\circ$ )	$k$	$\varphi_{sat}$ /( $^\circ$ )	$k$
18	1.104	12.5	1.104
19	1.142	13.5	1.125
20	1.181	14.5	1.145
21	1.220	15.5	1.166
22	1.260	16.5	1.187
23	1.300	17.5	1.209
24	1.342	18.0	1.219
$c_0 = 28$ kPa $c_{sat} = 10.5$ kPa $\varphi_{sat} = 12.5^\circ$		$c_0 = 28$ kPa $c_{sat} = 10.5$ kPa $\varphi_0 = 18^\circ$	

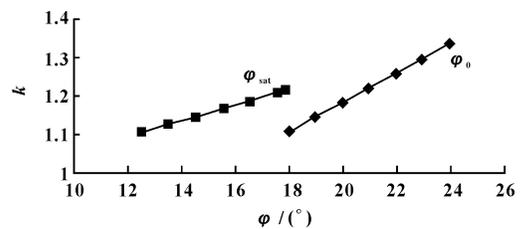


图 2  $\varphi$  值对稳定系数的影响

Fig. 2 Influence of  $\varphi$  Value on the Factor of Safety

将表 1、2 数据放在一起(图 3), 可以看出,  $\varphi$  值对稳定系数的影响明显高于  $c$  值。 $\varphi_0$  每增加  $1^\circ$ , 使稳定系数增加值是  $c$  值每增加 1 kPa 时稳定系数增

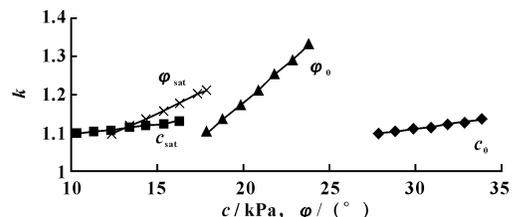


图 3  $c$ 、 $\varphi$  值对稳定系数的影响

Fig. 3 Influence of  $c$  and  $\varphi$  Value on the Factor of Safety

加值的 5 倍;  $\varphi_{sat}$  每增加  $1^\circ$  使稳定系数增加值是  $c$  值每增加 1 kPa 使稳定系数增加值的 2 倍。

## 2 下滑力对 $c$ 和 $\varphi$ 值的敏感性分析

下滑力的计算选用滑坡治理工程中最常用的传递系数法<sup>[3]</sup>来计算。在库岸滑坡坡外有水的情况下, 采用

$$E_i = F_s [(W_{i1} + W_{i2}) \sin \alpha_i + \Delta p_i \cos \alpha_i] - \{ \alpha l_i + [(W_{i1} + W_{i2}) \cos \alpha_i - u l_i - \Delta p_i \sin \alpha_i] \times \tan \varphi_i \} + E_{i-1} \psi_{i-1}$$

$$\psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \tan \varphi_i \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)$$

式中:  $\psi_{i-1}$  是推力传递系数;  $E_i$  是第  $i$  条块的剩余下滑力;  $E_{i-1}$  是第  $i-1$  条块的剩余下滑力;  $F$  是安全系数;  $W_{i1}$  是第  $i$  条块地下水位以上土体天然质量;  $W_{i2}$  是第  $i$  条块地下水位以下土体饱和质量;  $p_i$  是第  $i$  条块土体两侧静水压力的合力;  $p_{wi}$  是第  $i$  条块土体底部孔隙压力;  $l_i$  是第  $i$  条块滑动面的长度;  $\varphi_i$  是第  $i$  条块滑面上土体的内摩擦角;  $c_i$  是第  $i$  条块滑动面上土体的粘聚力;  $u_i$  是第  $i$  条块底滑面上的孔隙水压;  $\alpha_i$  是第  $i$  条块滑动面与水平面夹角。

计算条件和参数取值为给定安全系数  $F_s = 1.15$ , 求得与之相对应的下滑力( $E$ )如表 3、4。将表 3、4 的数据绘成图则为图 4、5。

表 3  $c$  值对剩余下滑力  $E$  的影响

Tab. 3 Influence of  $c$  Value on the Driving Forces

$c_0$ / kPa	$E$ / (kN · m <sup>-1</sup> )	$c_{sat}$ / kPa	$E$ / (kN · m <sup>-1</sup> )
28	1 463.9	10.5	1 463.9
29	1 259.3	11.5	1 288.7
30	1 054.7	12.5	1 105.9
31	850.2	13.5	930.1
32	648.8	14.5	754.3
33	441.0	15.5	575.3
34	239.7	16.5	399.5

$c_{sat} = 10.5$ kPa	$c_0 = 28$ kPa
$\varphi_0 = 18^\circ$	$\varphi_0 = 18^\circ$
$\varphi_{sat} = 12.5^\circ$	$\varphi_{sat} = 12.5^\circ$

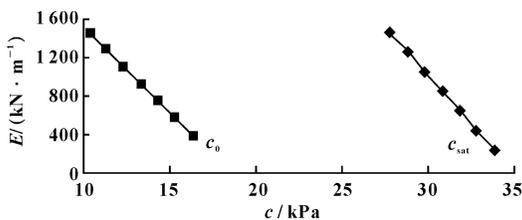


图 4  $c$  值对剩余下滑力  $E$  的影响

Fig. 4 Influence of  $c$  Value on the Driving Forces

由图 4 可见,  $c_0$  对下滑力的影响与  $c_{sat}$  基本一致。  $c_0$  提高 1 kPa, 剩余下滑力下降约 180 kN/m;  $c_{sat}$  增大 1 kPa, 剩余下滑力下降约 200 kN/m。由图 5 可见,  $\varphi_0$  对下滑力的影响比  $\varphi_{sat}$  高。  $\varphi_0$  提高  $1^\circ$ , 剩余下滑力减小约 1 220 kN/m;  $\varphi_{sat}$  增加  $1^\circ$ , 剩余下滑力减小约 650 kN/m。

将表 3、4 的数据放在一起(图 6), 可以看出,  $\varphi_0$  对下滑力的影响要明显高于  $c$  值。  $\varphi_0$  每增加  $1^\circ$ , 使下滑力的减少值是  $c$  值每增加 1 kPa 时下滑力的减少值的 5 倍;  $\varphi_{sat}$  每增加  $1^\circ$ , 则使剩余下滑力的减少值是  $c$  值每增加 1 kPa 使剩余下滑力的减少值的 2 倍。

表 4  $\varphi$  值对剩余下滑力  $E$  的影响

Tab. 4 Influence of  $\varphi$  Value on the Driving Forces

$\varphi_0$ / (°)	$E$ / (kN · m <sup>-1</sup> )	$\varphi_{sat}$ / (°)	$E$ / (kN · m <sup>-1</sup> )
28	1 463.9	10.5	1 463.9
29	244.8	11.5	814.9
30	0.0	12.5	159.7
31	0.0	13.5	0.0
32	0.0	14.5	0.0
33	0.0	15.5	0.0
34	0.0	16.5	0.0

$c_0 = 28$ kPa	$c_0 = 28$ kPa
$c_{sat} = 10.5$ kPa	$c_{sat} = 10.5$ kPa
$\varphi_{sat} = 12.5^\circ$	$\varphi_0 = 18^\circ$

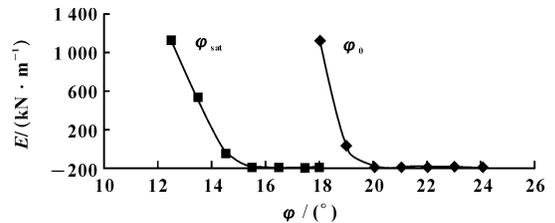


图 5  $\varphi$  值对剩余下滑力  $E$  的影响

Fig. 5 Influence of  $\varphi$  Value on the Driving Forces

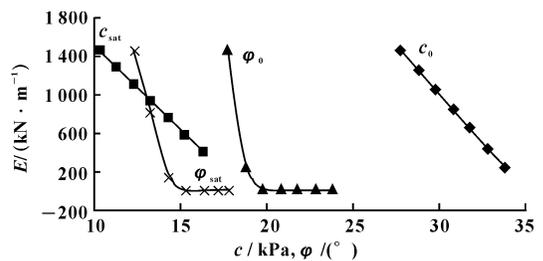


图 6  $c$ 、 $\varphi$  值对剩余下滑力  $E$  的影响

Fig. 6 Influence of  $c$  and  $\varphi$  Value on the Driving Forces

## 3 治理工程投资对 $c$ 、 $\varphi$ 值敏感性分析

根据三峡库区已建防护工程的经验和水电工程的有关定额估算, 用抗滑桩方案, 100 kN/m 的剩

余下滑力需要治理费用至少为 150 万元。由此,各参数每增加一个单位对治理设计造价的影响见表 5。可见,  $\varphi_0$  值的变化对设计造价的影响最大,  $c_0$ 、 $c_{sat}$  的影响最小, 且两者相差不大,  $\varphi_{sat}$  的影响中等。

表 5  $c$ 、 $\varphi$  值每增加 1 个单位对治理费用的影响

Tab. 5 Influence of Each Unit of  $c$  and  $\varphi$  Value on the Treatment Design

参 数	$c_0$ /kPa	$c_{sat}$ /kPa	$\varphi_0/(\circ)$	$\varphi_{sat}/(\circ)$
稳定系数 $k$	+0.006	+0.006	+0.039	+0.021
剩余下滑力 $E/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	-180	-200	-1220	-650
设计造价/万元	-270	-300	-1 830	-975

## 4 结语

通过工程实例表明,在其他参数不变的情况下,  $c_0$  对稳定系数以及下滑力的影响与与  $c_{sat}$  基本相近。 $\varphi_0$  对稳定系数及下滑力的影响比  $\varphi_{sat}$  显著。 $\varphi$  值对稳定系数以及下滑力的影响要明显高于  $c$  值。每单位  $\varphi_0$  的增量所产生的影响是每单位  $c$  值的增量所产生影响的 5 倍; 每单位  $\varphi_{sat}$  的增量所产生的影响是单位  $c$  值的增量所产生影响的 2 倍。这是由于  $c$  值所发挥的抗滑作用与滑动面形状和上覆荷载没有关系, 只与滑动面面积有关, 而  $\varphi$  值

产生的抗滑力与滑动面形状、上覆荷载和面积都有关系, 滑动面越缓, 上覆土层越厚, 面积越大,  $\varphi$  值发挥的抗滑力越大。水位线以下则由于水下浮力作用, 使滑体的有效重度减小, 因而使  $\varphi$  值的敏感性降低。

由此可见, 滑面抗剪强度参数的选取对滑坡稳定性的影响很大, 不同参数导致的稳定性分析结果以及需进行的防护设计是完全不同的。强度参数选取不仅影响治理工程的安全性, 还直接影响治理工程的造价。因此, 在参数的选择上一定要慎重, 应该根据室内试验<sup>[4]</sup>、大型原位剪切试验、已有工程经验及参数反演分析<sup>[5]</sup>综合确定。

### 参考文献:

(上接第 173 页)

### 参考文献:

- [1] Miall A D. Architectural Elements and Boundary Surfaces in Fluvial Deposits: Anatomy of the Kayenta Formation (lower Jurassic)[J]. Southwest Colorado, Sedimentary Geology, 1988, 55(6): 233-262.
- [2] 王国鹏, 何光玉. 双河油田厚油层内夹层分布特征[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(2): 55-59.
- [3] 张吉, 张烈辉. 陆相碎屑岩储层隔夹层成因、特征及其识别[J]. 测井技术, 2003, 27(3): 221-224.
- [4] 崔文富. 反韵律厚油层夹层分类及纵向剩余油分布模式[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(1): 52-56.
- [5] 于波, 付国民, 李永军, 等. 樊家川油田河流相储层高分辨率层序地层特征[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(1): 53-58.
- [6] 薛培华. 河流点坝相储层模式概论[M]. 第1版. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- [7] 党 伟, 赵 虹, 姜常义. 塔里木盆地东北部侏罗系烃源岩特征及初步评价[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 1-5.
- [8] 常象春, 王明镇, 韩作振. 试论适合叠合盆地的油源对比方法[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(4): 32-36.
- [9] 高兴军, 宋子齐, 谭成任. 真 12 块垛一段六油组隔夹层划分及描述[J]. 西安石油学院学报, 2000, 15(5): 10-14.
- [10] 吕晓光, 马福士, 田东辉. 隔层岩性、物性及分布特征研究[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(5): 80-88.
- [11] 蒲 军, 张金川, 王志欣, 等. 川西拗陷深盆气研究进展与问题讨论[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(2): 34-37.
- [12] 刘克奇, 杨喜峰, 杨春梅. 东濮凹陷卫城 81 断块沙四段第二砂层组储层非均质性研究[J]. 断块油气田, 2004, 11(4): 55-57.
- [13] 谭成任, 马娜蕊, 苏 超. 储层油气产能的预测模型和方法[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(2): 42-46.
- [14] Hearn C L, Ebanks W J. Geological Factors Influencing Reservoir Performance of the Hartaog Dra field[J]. Wyoming Petrol Tech, 1984, 36(8): 1335-1334.
- [15] Geehan G W. Geologic Prediction of Shale Continuity, Prudhoe Bay Field: Reservoir Characterization[M]. Academic Press, 1986.