

# 强度指标对滑坡稳定性的影响

刘祖典 党发宁

(西安理工大学岩土工程研究所, 西安 710048)

**【摘要】** 讨论了粘性土在不同固结状态下的强度指标变化规律, 阐述了土的强度指标对滑坡稳定性的影响, 以及雨水对滑坡崩塌滑动的诱发作用。

**【关键词】** 强度指标; 动员强度; 滑坡稳定; 雨水的诱发作用

**【中图分类号】** TU413.62

## the Effect of Soil Shearing strength Index on Slope Stability

**【Abstract】** The various rules of the shearing strength index due to different consolidation state of clayey soil is discussed. The influence of the soil shearing strength index on slope stability is recommended, and the inducing factor of rainfall on formation cracking and slip failure in the surface of slope is presented.

**【Key words】** strength index; mobilized strength; slope stability; inducing factor of rainfall

### 1 概述

滑坡(边坡)的稳定性一般受地貌单元形状、坡高、坡型、坡比和土的有效应力抗剪强度指标及水湿因素等的影响。以下将有效应力抗剪强度指标( $c'$ ,  $\varphi'$ )简称强度指标。对一个具体滑坡假若前几个因素(滑动力)基本不变, 强度指标( $c'$ ,  $\varphi'$ )的变异性较大, 也是影响滑坡稳定性的主要因素, 现就强度问题作简要分析。

我们熟知有效粘聚力  $c'$  值是土的有效强度包线在纵轴上的截距,  $\varphi'$  值是该线的斜率,  $c'$  和  $\varphi'$  值一般随土的起始含水量( $w_0$ )干重度( $\gamma_d$ )和塑性指数( $I_p$ )而变。 $w_0$  小,  $\gamma_d$  和  $I_p$  大时,  $c'$  值特别高, 反之, 当  $w_0$  大,  $\gamma_d$  和  $I_p$  小时,  $c'$  值大幅度下降,  $\varphi'$  值在两种情况下变化较小。

据实践与分析研究对于超固结粘性土质滑坡(边坡)在滑动破坏瞬间, 土体结构软化, 随着渐进破坏(Progressive failure)导致土体强

度降低, 其值基本居于峰值与残余强度之间, 该值被称之为动员强度(Mobilized Strength)。峰值强度只能控制滑动面之形成与发展, 但它不能在全体滑动面上起作用, 因此, 在确定滑坡的稳定安全系数( $F_s$ )时, 应采用略小于峰值强度的动员强度较符合实际。对于低塑性软粘土, 其折减系数  $\beta$ (动员强度与峰值强度之比)值略小于 1; 对于高塑性的硬粘土折减系数  $\beta \approx 0.6 \sim 0.85$ 。因此, 对于边坡的稳定性分析, 可以先用峰值强度确定临界滑动面的位置, 然后以临界滑动面上的动员强度指标求安全系数, 这样做既安全又合理。

### 2 土的不同固结状态的有效强度指标

对于正常压密土, 在正常压力作用下强度包线一般通过坐标原点, 其强度破坏准则为<sup>[1, 2]</sup>

$$\tau_f = \sigma' \tan \varphi' \quad (1)$$

式中:  $\varphi'$  为土的有效内摩擦角, 其值决定于土的矿物成份、密度和湿度等, 随土的塑性指数

( $I_p$ )的增大而减小(见图1)。

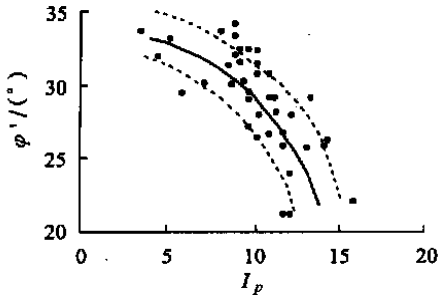
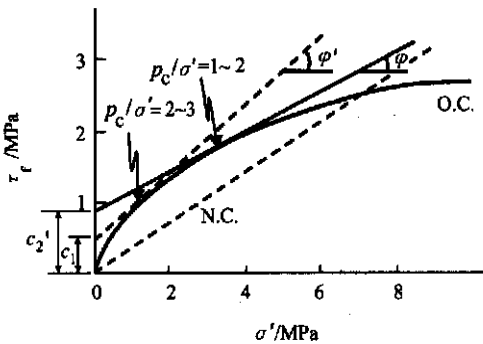


图1 正常压密土排水剪试验的  $\varphi'$ - $I_p$  关系

对于强超固结粘性土, 如龙羊峡石化黄土,  $I_p > 18$ , 强度包线为非线性曲线, 其有效强度指标  $c'$  和  $\varphi'$  值为变量, 在不同有效法向应力点的强度包线为通过该点的切线, 其模式为

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (2)$$

式中:  $\varphi'$  为曲线包线在其法线应力,  $\sigma'$  点切线的倾角,  $c'$  值为切线的截距(见图2)。



( $p_c = 4 \text{ MPa}$ ,  $w = 6.8\%$ ,  $\gamma_d = 18 \text{ kN/m}^3$ )

图2 硬粘性土的  $\tau_f$ - $\sigma'$  曲线

有效强度指标  $c'$  和  $\varphi'$  的取值范围与切线位置或比值  $p_c/\sigma'$  有密切关系, 其中  $p_c$  为先期固结压力, 见图2中相应于  $p_c/\sigma' = 2 \sim 3$  与  $p_c/\sigma' = 1 \sim 2$  的  $c'$ 、 $\varphi'$  值相差很大。说明相同的先期固结压力 ( $p_c = 4 \text{ MPa}$ ) 曲线上不同法向应力点切线的  $c'$ 、 $\varphi'$  值各异, 因此强度指标的取值应结合坡体滑动面上的应力状态确定。

残余强度指标  $\varphi'_r$  由粘土矿物成分(蒙脱土、伊里土、高岭土)和粘土矿物含量控制, 其值比较稳定, 不受结构强度、基质吸力和先期

固结压力 ( $p_c$ ) 的影响, 但与土的液限 ( $w_L$ ) 有密切关系<sup>[1]</sup>。

坚硬粘土和具有结构强度的黄土, 在湿度较小、重度较大时, 土的峰值强度特别高, 但它的动员强度却很低, 甚至接近残余强度, 峰残强度比值也很高, 滑坡多属脆性破坏, 滑速也高; 当湿度大时为塑性破坏, 峰残强度比值较低, 滑速也较缓慢, 一般为蠕滑。

根据室内试验确定的  $c'$ 、 $\varphi'$  值发现, 同一种土在同一物理状态和应力条件下,  $c'$ 、 $\varphi'$  值随剪应变  $\epsilon_s$  增大的发展规律(见图3),  $c'$  值的发挥度早于  $\varphi'$  值, 而摩擦角  $\varphi'$  值在较大剪应变时才能达到其最大值。因此, 在土体强度稳定分析中应考虑用建筑物允许应变值估计  $\varphi'$  值的大小, 较能符合实际。

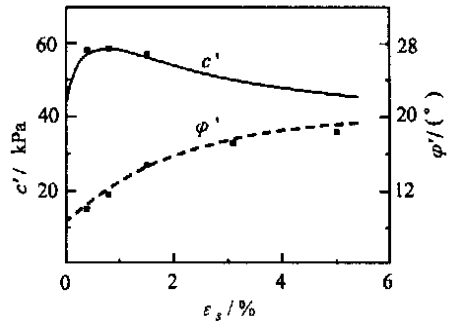


图3  $c'$ 、 $\varphi'$  值随剪应变的变化关系<sup>[2]</sup>

土的峰值强度受先期固结压力(结构强度)的控制, 一旦结构强度遭到破坏, 强度大幅降低, 主要为  $c'$  值的降低,  $\varphi'$  值发挥主要作用, 动员强度接近重塑土的峰值强度。

从图4 强超固结粘性土的强度位移曲线 ( $\tau_f$ - $\delta$ ) 可以看出, 土的强度随位移的发展有三个明显变化阶段:

1) 土的峰值强度 ( $\tau_p$ ) 反映了土的结构初始软化, 滑动面将要起动的强度, 它决定土坡临界滑动面的形状和位置;

2) 土软化强度, 即土的动员强度 ( $\tau_m$ ) 表示土的结构部分或全部破坏的强度。  $c'$  值衰减,  $\varphi'$  值发挥, 接近正常压密土的峰值强度;

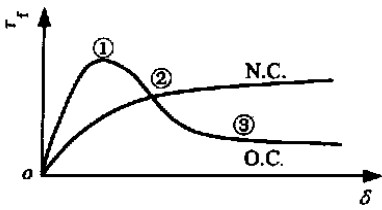


图4 超固结粘性土的  $\tau_f - \delta$  曲线<sup>[3]</sup>

3) 残余强度, 为土的最小强度, 其值与土的先期固结压力、结构强度和基质吸力无关, 与土的物质组成含量和定向排列有关。

非饱和土的  $c'$  值是由土粒分子引力与胶结物所形成的凝聚力 ( $c'$ ) 和基质吸力引起的吸附凝聚力  $x(u_a - u_w) \tan \varphi'$  两部分组成, 但吸附粘聚力受含水量的影响较大, 在干、湿情况下最小, 在最优含水量时其值最大;  $\varphi'$  值受基质吸力影响较小, 且随饱和度的增加略有降低, 所以非饱和土坡稳定性受含水量的变化影响较大。

### 3 强度指标对滑坡稳定性的影响

根据有限元法对滑动土体的稳定性分析发现,  $c'$  和  $\varphi'$  与临界滑动面发生的深浅有下列关系<sup>[3]</sup>:

1) 低  $c'$  值, 高  $\varphi'$  值, 土的抗剪强度一般较小, 临界滑动面发生在浅层, 滑弧通过坡脚(图5曲线①)。

2) 高  $c'$  值, 低  $\varphi'$  值, 由于土的抗剪强度大, 临界滑动面一般发生在深层, 滑弧移出点在坡脚以外一定距离, 为坡基式滑坡(图5曲线②)。

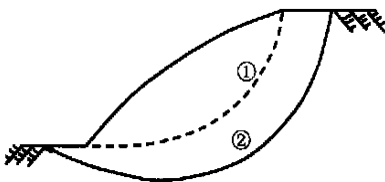


图5 不同情况的临界滑动面

此外, 还有地震烈度 (Seismic intensity) ( $c_s=7, 8, 9$ ) 和孔隙水压力系数 ( $A=0, 0.25$  和  $0.5$ ) 也是影响土坡稳定性的重要因素。按文献[1, 3] 通过电算所得结果, 对于黄土边坡,

其临界滑动面随着地震烈度和孔隙水压力系数的增大, 也相应向深层发展, 滑动规模扩大; 另一方面, 坡面愈陡两端约束力影响小, 多发生浅层突发性滑坡, 如人工开挖边坡。当土的粘聚力  $c'$  值较大, 坡面平缓常受两端约束力的影响, 多发生深层滑动, 如常见的天然滑坡, 为渐进、间断性滑坡。

### 4 降水对滑坡的诱发作用

降水是引起滑坡的重要诱发因素, 它使土的  $c'$ 、 $\varphi'$  值大幅度降低。例如黄土当含水量小于 15% 时,  $c'$  值和  $\varphi'$  值均较大 ( $c' = 57 \text{ kPa}$ ,  $\varphi' = 28.4^\circ$ ), 但当含水量接近饱和状态时,  $c'$  值和  $\varphi'$  值均降低 ( $c' = 26 \text{ kPa}$ ,  $\varphi' = 18.9^\circ$ ), 这是造成突发性滑坡的重要原因, 一般发生在降雨之后。主要原因是雨水入渗引起非饱和土的基质吸力 ( $u_a - u_w$ ) 减小, 土粒间胶结软化, 吸附凝聚力减小。降雨强度愈均匀, 持续时间愈长, 滑坡的稳定安全系数愈低 (见图6)。据宝鸡峡工程实测, 雨水入渗深度约为 20 m, 坡表面 10 m 内为雨水敏感区, 干湿变化显著, 10~20 m 为湿度动态过渡区, 20 m 以下接近天然含水稳定区。坡脚一般为应力与含水集中区, 常发生较大水平与垂直变形的压碎带, 是引起坡面和坡肩裂缝的重要原因, 形成雨水下渗通道, 引起突发性滑坡。因此在滑坡监测时, 应重视坡角变形和坡肩裂缝发生发展情况, 采取预防措施特别重要。

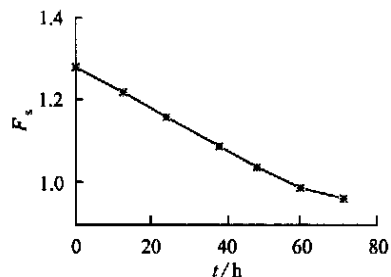


图6 安全系数与降雨持续时间的关系<sup>[4]</sup>

### 5 结论

由上所述可以得出如下结论:

1) 土质边坡或滑坡的稳定性分析, 除了考虑

地貌单元、坡型、坡高和坡比外, 强度指标的选用也极为重要, 涉及到滑动规模、范围及滑速等。

2) 渐进破坏对滑坡的影响。超固结粘性土或有结构强度的黄土在滑动破坏的瞬间, 由于土体软化特性和渐进破坏过程的影响, 强度降低, 其值基本居于峰值强度与残余强度之间, 是滑坡发生滑动的实际强度, 被称为动员强度。

3) 滑动面上的应力与应变分布有差异, 当存在软弱夹层、裂隙和固有滑动面等时, 均会使土体的强度降低。

4) 降水的诱发作用, 尤其当土的渗透系数  $k > 10^{-4}$  cm/s 时, 土的胶结软化, 强度降低特别显著。

#### 参 考 资 料

- 1 刘祖典. 黄土力学与工程. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. 41~54
- 2 屈智炯. 土的塑性力学. 成都: 成都科技大学出版社, 1987, 99~104
- 3 CHEN R H, CHAMEAU J L. Three Dimensional limit Equilibrium Analysis of slope. Geotechnical, 1983, 33(1): 65~75
- 4 姚海林, 郑少河, 陈守义. 考虑裂隙及雨水渗入影响的膨胀土坡稳定性分析. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 606~609.

收稿日期: 2002-03-08

(上接第 130 页)

件, 两者缺一就不可能形成泥化夹层。至于后期地下水活动等因素, 只是对泥化夹层的改造恶化的因素, 而不是产生的条件<sup>1)</sup>。

2) 岩性组合和构造形迹, 对泥化夹层的分布有控制作用。软岩的性质对泥化夹层的发育程度及类型有一定的影响。

3) 坝址区泥化夹层的粒度成分和一般物理性质分别见表 5 和表 6。

4) 对于同一类型的泥化夹层, 由于采用的试验方法不同, 所测得的抗剪强度将会有所差

别。进行试验时, 应选择建筑物运转时与泥化夹层受力条件相似的试验条件和方法。

#### 参 考 文 献

- 1 马国彦, 高广礼. 黄河小浪底坝区泥化夹层分布及其抗剪强度试验方法的分析. 工程地质学报, 2000, 8(1): 94~99.
- 2 肖树芳, 杨淑碧. 岩体力学. 北京: 地质出版社, 1987. 49~58

收稿日期: 2002-03-12

### 《科技论文撰稿指南》涉及本刊各期有售

最近, 有读者打电话询问, 《岩土工程技术》2002 年第一期封 3 刊载的《科技论文撰稿指南》涉及到《岩土工程技术》2000 年第二期(封 3《关于文稿作者署名问题的重要约定》)、第三期(第 129 页《参考文献的著录格式及示例》)和第 173 页《论文摘要的编写规则及示例》)、第四期(封 3《表格的规范化及示例》), 2001 年第一期(封 3《插图的规范化及示例》), 2002 年第一期(封 3《科技论文撰稿指南》), 现在是否可以买到? 一共要多少钱(含邮寄费)? 《岩土工程技术》编辑部诚告各位读者和作者, 《科技论文撰稿指南》涉及本刊共 5 期, 共计 35 元(含挂号邮寄费), 现有售。欲购买者, 请通过邮局将汇款寄“100053 北京 573 信箱《岩土工程技术》编辑部刘荣先收”, 并注明“《科技论文撰稿指南》涉及《岩土工程技术》各期”字样。

《岩土工程技术》编辑部

2002-04-09