

巫峡神女溪滑坡土体特性试验研究

赵先涛, 向杰, 唐红梅, 梁学战, 胡君

(重庆交通大学岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要: 滑坡土体各指标参数的准确获取是进行滑坡稳定性评价和工程治理的关键环节。文章以重庆巫山县神女溪滑坡为例, 对其不同高程的土样进行了X射线衍射矿物成分分析和不固结不排水直剪试验, 实施了库岸滑坡土体各指标对水位变化的敏感性试验。研究表明, 滑坡土体所含矿物主要为方解石、石英和粘土矿物, 粘土矿物中亲水性矿物对滑坡稳定性具有极大影响; 含水量主要通过影响土体的粘结力, 来降低抗剪强度; 粘结力与含水量近似成二次曲线关系急剧降低, 当含水量达到约18.21%时, 其变化趋于稳定, 而内摩擦角与含水量近似成线性关系小幅度递减。研究成果对类似滑坡土体强度参数的合理取值具有一定的参考价值。

关键词: 神女溪滑坡; X射线衍射; 直剪试验; 抗剪强度参数; 含水量

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S2-0033-06

Experiment Study on Soil Properties of Shennv Stream Landslide in Wu Gorge

ZHAO Xiantao, XIANG Jie, TANG Hongmei, LIANG Xuezhan, HU Jun

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: Accurate obtaining soil parameters of landslide is the key links for landslide stability evaluation and project management. This article takes Shennv Stream landslide in Chongqing Wushan County as an example, implementing unconsolidated and undrained shear test and mineral composition analysis by X ray diffraction for soil in different elevations of landslide, conducting sensitivity test for various soil parameters of reservoir landslide change with different water level. Study shows that: Mineral composition of soil mainly contains Calcite, Quartz and clay mineral. Hydrophilic minerals in clay mineral have great effect on stability of landslide. Shear strength decreases by influence of water content on cohesion. Cohesion decreases sharply in a quadratic function relation with water content increasing. When water content comes to 18.21%, change of cohesion tends to be stable. But the internal friction angle of landslide soil decreases linearly in small amplitude with an increase of water content. Research results may provide some important references for rationally choosing strength parameters of soil in similar landslide.

Key words: Shennv Stream landslide; X ray diffraction; direct shear test; parameters of shear strength; water content

从2008年9月28日三峡水库进行175 m蓄水试验至2009年3月18日, 受试验性蓄水和退水的影响, 仅重庆库区发生了166处地质灾害(险)情, 其中以滑坡为主, 崩滑体总体积约6 024万立方米, 影响人数11 535人, 经济损失约5亿元。

滑坡的形成是水地质条件、地质构造以及人类活动等诸多致灾因子耦合作用的结果。其中水是影响滑坡失稳破坏的最主要因素之一, 相关科学问题已经引起了学术界的高度关注。李建华等基于非饱和和三轴试验系统, 对不同含水量的非饱和膨胀土的强度特性进行了研究^[1]。王洪兴等通过对滑带土粘土矿物X射线衍射分析, 发现粘土矿物本身的胀缩性导致滑带土抗剪强度降低, 影响滑坡稳定性^[2]。SEYYED MOHAMMAD MOUSAVI等基于非线性遗传算法, 研究了土的抗剪强度参数与其影响因素的敏感性关系^[3]。ChongShi Gu等基于三维非稳定饱和-非饱和渗流场的有限元模型, 揭示了边坡岩土体稳定性随降雨入渗过程的变化规律^[4]。Jian-hua Deng等采用GDS三轴试验系统研究

不同含水量条件下的角砾岩力学性能, 发现含水量对其影响显著^[5]。张存根和张怀静采用常规直剪仪研究含水量对粉质粘土的抗剪强度指标的影响, 得出了粘结力随含水量呈现幂指数增长, 然后呈线性降低, 而内摩擦角随含水量呈线性降低^[6]。赵慧丽等基于室内三轴试验对含水量变化对非饱和土体抗剪强度变化进行了深入研究, 认为含水量对其强度影响很大^[7]。边加敏和王保田研究了含水量随非饱和土抗剪强度参数的影响, 构建了非饱和土强度计算式^[8]。Wei-Min Ye等基于双变量强度理论研究非饱和土的抗剪强度特性, 揭示了非饱和土粘聚力和吸力存在线性关系^[9]。C. Malaya和S. Sreedeeep深入研究了土体吸力和含水量的关系, 得到不同参数影响的曲线^[10]。

文献分析表明, 滑坡土体抗剪强度特性与粘土土体含水量、矿物成分之间存在响应关系。本文针对神女溪滑坡, 基于X射线衍射试验和应变控制式直剪试验探讨其土体特性, 对于实现类似滑坡迅速而准确的分析具有积极意义。

1 神女溪滑坡概况

神女溪滑坡位于长江三峡巫峡神女溪南岸, 滑坡平面呈蚌壳状, 后缘高程 312~322 m, 前缘高程 135 m 左右。滑体平均宽度约 325 m, 纵长约 225 m, 滑体厚度 50 m 左右, 面积(斜面积)约 $7.31 \times 10^4 \text{ m}^2$, 体积约 $366 \times 10^4 \text{ m}^3$, 主滑方向 26° , 属大型深层牵引式土质滑坡(见图 1)。滑坡区地形南高北低, 斜坡陡峻, 为单面斜坡; 为老崩滑堆积体构成的斜坡地形, 东西两侧发育冲沟。滑坡土层为第四系崩滑堆积 (Q_4^{col}) 的碎石土, 下伏基岩由三叠系下统大冶组灰白色泥质灰岩 (T_1d) 和嘉陵江灰岩 (T_1j) 组成(见图 2)。构造上处于官渡向斜北西翼, 次级构造发育。

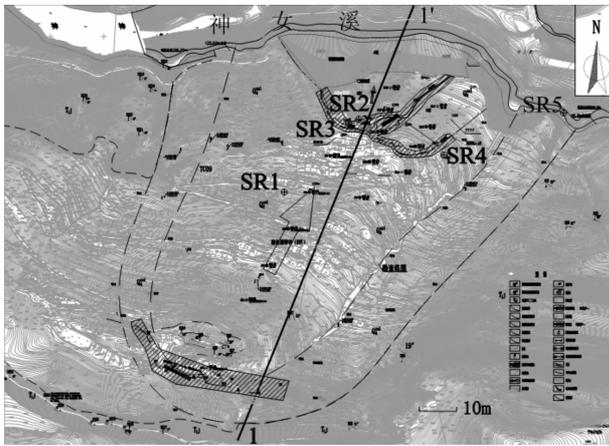
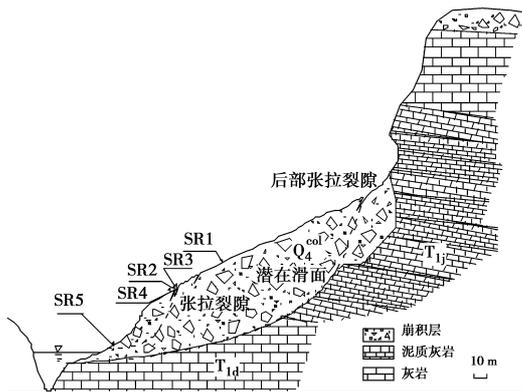


图 1 神女溪滑坡平面图



1. SR1: 第一取样点(高程 367 m); 2. SR2: 第二取样点(高程 306 m);
3. SR3: 第三取样点(高程 312 m); 4. SR4: 第四取样点(高程 299 m);
5. SR5: 第五取样点(高程 167 m)

图 2 神女溪滑坡 1-1' 剖面图

2 滑坡土体物理矿物学特征

从神女溪滑坡不同高程表层土中取样 4 组(见图 2), 因第二和第三取样点位置较近, 故仅取第二取样点土体进行试验, 对样品按照《公路土工试验规程》(JTGE40-2007)进行液、塑限联合测定(见表 1), 并对各土样进行粒度分析试验和矿物成分分析的 X 射线粉晶衍射分析试验。

表 1 试验土样特性

土样名称	SR1	SR2	SR4	SR5
$w_p/\%$	29.52	32.18	30.22	17.39
$w_L/\%$	41.25	46.93	39.40	35.59
$\rho_d/\text{g}/\text{cm}^3$	1.71	1.55	1.71	2.04

2.1 土体粒度成分分析

试验土样为碎石土, 土表颜色呈橙黄色, 属于第四系崩滑堆积物。陆源碎屑颗粒的粒度成分和它的分布情况受流水能量的控制, 与崩塌沉积物形成环境极为密切^[11]。本试验采用筛分法测定土体的颗粒粒度成分, 揭示神女溪滑坡土体粒度分布规律及粒度参数特征, 为反演其形成环境提供重要佐证。

由图 3 可以清楚地看到, 神女溪滑坡碎屑土的粒度成分累计曲线呈“低斜多段式”, 其总体斜率较低, 无确定粗细截点, 由多条不同斜率的较短折线段组成, 包括: 低斜率 ($15^\circ \sim 30^\circ$)、含量低(低于 15%)的滚动总体, 相对较高斜率(约 65°)、较高含量(60%)的跳跃总体和低斜率 ($5^\circ \sim 20^\circ$) 的悬浮总体, 粒度分布范围较广(d 值为 $0.075 \sim 40 \text{ mm}$), 显示其分选性较差, 反映动荡环境中能量不稳定的重力流特点。

从土样的粒度成分累计曲线(图 3), 可以进一步求得土的不均匀系数和曲率系数, 判别土体的均一性。

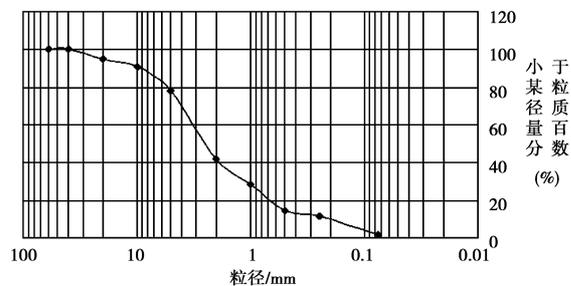


图 3 土体粒度成分累计曲线

$$\text{不均匀系数: } C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{3.12}{0.24} = 13 \quad (1)$$

$$\text{曲率系数: } C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} d_{60}} = \frac{(1.22)^2}{0.24 \times 3.12} = 1.99 \quad (2)$$

式中: d_{60} , d_{30} , d_{10} 表示相应于累计百分含量分别为 60%, 30%, 10% 的粒径, mm。

则该土样粒径属于 $C_c = 1 \sim 3$, $C_u > 5$ 范围, 为级配良好的土, 根据土工试验规范, 对于含碎石的粗粒土, 土和石的分界粒径为 2 mm, 则该土样土石比为 2:3。

2.2 土体矿物成分分析

2.2.1 试验原理 任何结晶物质都有其特定的化学组成成分和结构特点。由于晶体结构质点的排列的重复周期与 X 射线波长属于同一量级, 故当 X 射线通过晶体时, 可以产生特定的衍射图形, 对应一系列特定的面间距 d 和相对强度 I/I_1 值。所以任何一种结晶物质的衍射数据 d 和 I/I_1 是其晶体结构的必然反映。不同物相混在一起时, 它们各自的衍射数据将同时出现, 互不干扰地叠加在一起, 因此可根据各自的衍射数据来鉴定各自不同的物相^[12]。

2.2.2 试验设备 本试验采用的设备是 X 射线粉晶衍射仪,是利用辐射探测器自动测量和记录衍射线的仪器,依据布拉格方程,利用已知波长的 X 射线照射在样品表面,获得衍射图谱,从而得到所要信息。该衍射仪的主要性能参数如下:

- 靶:Cu 靶,36 kV,20 mA,石墨弯晶单色器;
- 狭缝:发散,决定于扫描始角,防散射,接收:常用 0.3 mm;
- 扫描范围:5°~65°;采数步宽:0.01;
- 扫描方式:连续;扫描速度:8°/min ;
- 满足规定要求。

2.2.3 试验结果分析 1)定性分析

物相分析法是根据 X 射线照射到晶体所产生的可用衍射线的方向及强度表征的衍射特征来鉴定晶体物相的方法。

通过对滑坡土样进行 X 射线粉晶衍射扫描,得到未经分析的粗略图谱;然后通过 Jade5 分析软件在衍射仪扫描图谱的基础上进行试验数据的初步处理,继 PDF 卡片库对 X 射线粉晶衍射图谱进行图谱的平滑和背底扣除之后^[13]。根据衍射角度的大小、对应衍射波峰的位置和矿物含量高低,分析得到试验土样的衍射图谱(见图 4)。

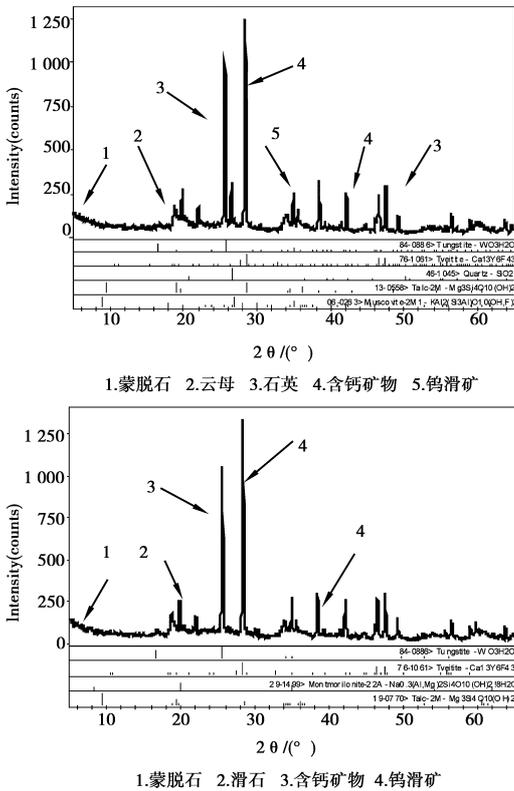


图 4 天然状态下土体 X 射线粉晶衍射图谱

经过多次土样 X 射线粉晶衍射扫描,对比分析和物相检索之后,得到了神女溪滑坡土体所含主要矿物成分。

- 陆源碎屑物况物:石英、方解石等矿物;
- 粘土矿物:蒙脱石和云母类矿物。

2)定量分析

物相定量分析的原理是根据每种矿物的衍射线强度随其含量的增加而提高,由强度值计算可以确定各矿物组分的含量。定量分析采取内标法进行计算:

$$X_i = \frac{I_i / K_i}{\sum_{j=1}^n I_j / K_j} \quad (3)$$

式中, I_i 为各衍射峰强度; K_i 为各物相的最强线与刚玉的最强线的比强度,即所谓的“参考比强度”(RIR); I_i 和 K_i 的值均可从物相分析后的卡片库里获取。

根据式(3)的内标法计算矿物成分含量,可得天然状态下神女溪滑坡土体的矿物组成含量(见表 2)。

表 2 矿物成分定量分析

组别	矿物名	钨华矿	含钙矿物	石英	云母	滑石
第一组	K	12.81	2.68	1.10	1.10	
	I	62.91	60.548	26.63	59.98	63.68
	I/K	4.91	22.59	7.81	166.60	57.90
	X%	1.89	8.69	3.01	64.13	22.28
第二组	K	12.81	2.68	3.41	0.36	
	I	63.45	59.57	7.00	0.19	
	I/K	4.95	22.23	6.36	0.17	
	X%	14.69	65.93	18.88	0.51	

通过定量分析知,亲水性矿物如钨华矿,蒙脱石含量较高,在神女溪蓄水期间,亲水性矿物具有胀缩性,滑带土体胀缩具有可逆性和循环性,不断降低滑带土的强度^[14]。同时胀缩的往返进行,易在土体内部形成裂缝,裂缝一旦贯通,会使水渗入滑带,降低滑带土体的强度,更易诱发滑坡失稳破坏。

3 含水量对土体抗剪强度参数的影响

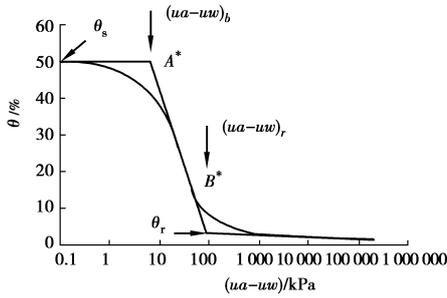
3.1 试样分析及试验方法设计

3.1.1 取样与制样 ①取取自神女溪滑坡 4 个不同高程的表层土样;②风干、研磨、过筛、加水、搅拌、保湿、密封;③击实器击实土样,采用分层击实法,试验中共分三层击实,每层按照规定次数击实;④采用环刀制样,环刀高为 20 mm,直径为 61.8 mm。

3.1.2 试验工况 图 5 是一种粉质黏土的典型水土特征曲线,曲线上有两个特征点 A^* 和 B^* 。按 Fredlund 等人分析^[15], A^* 点称为进气值,即当吸力增大到一定值时,空气开始进入土体中。 B^* 点称为残余含水率,当土中含水量低到该值以后,吸力会随含水量的微小变化而剧烈地增大,但这时其工程意义已不再突出,因为土体在含水量趋近或达到缩限时,水的作用面积在土体中所占的比例已很小,因此土体的体积变化甚微,而强度则因土体较大的吸力而具有很高的值。所以,上述两特征点之间的状态是关键所在。

故试验的含水量控制在 10%~35%。神女溪滑坡土体在不同含水量条件下的抗剪强度参数的敏感性试验中含水量设计为:12%,14%,16%,18%,分别模拟库岸滑坡土体随库水位上升过程中的含水量。

为了能够只研究含水量这一单因素对滑坡土体抗剪强度参数的影响,本次试验中将影响土体抗剪强度的其他主要因素如干密度、试验方法等均设定同组土样相同。



A* :进气值;B* :残余含水率;θ:体积含水量;
θ_s:饱和体积含水量;θ_r:残余体积含水量;(u_a-u_w):基质吸力
图 5 一种粉质黏土的典型水土特征曲线

根据所采用土样的试验特点,为最大限度模拟神女溪滑坡现场情况下的实际环境,决定采用不固结不排水条件下的直接剪切试验研究土体抗剪强度指标与含水量的响应关系。试验共取 4 个高程的土样分别在设计的含水量下进行直剪试验,共计 64 组。

3.1.3 试验过程 首先从制备好的 4 种土样中分别取出 10~30 g,放入质量为 m₀ 的称量盒,称量加湿土质量 m₁。然后将试样放入烘箱烘干,称量烘干后的试样和盒的质量 m₂。可按下式计算试样含水量:

$$w = \frac{(m_1 - m_0) - (m_2 - m_0)}{(m_2 - m_0)} \times 100\% \quad (4)$$

式中:w 为含水量,%;m₀ 为称量盒质量,g;m₁ 为盒加湿土质量,g;m₂ 为盒加干土质量,g。

试验使用的直剪仪为 ZJ 型应变控制式直剪仪,将制备好的试样装入剪切盒中,试样上下两面均放上滤纸和透水石。同一含水量中,每种土样取 4 个分别在正应力为 100 kPa, 200 kPa,300 kPa,400 kPa 条件下,获取最大剪应力。

3.2 试验结果分析

为了能够使得试验数据更清晰、更具条理性,笔者将试验中四种土样的含水量与抗剪强度各参数详细列出,并归纳列于表 3 中。

表 3 不同含水量条件下的土体强度参数

土样名称	含水量/%	c/kPa	φ/°
SR1	12.09	119.2	27.5
	14.05	84.5	26.1
	16.15	58.2	23.3
	18.61	40.2	20.3
SR2	13.91	77.3	27.0
	14.75	60.0	24.7
	15.87	50.0	23.0
	18.60	25.5	19.8
SR4	12.63	126.0	26.6
	14.07	106.8	23.0
	16.26	79.3	21.8
	18.21	66.8	17.7
SR5	12.10	108.9	27.9

续表

土样名称	含水量/%	c/kPa	φ/°
SR5	16.25	40.3	17.2
	14.71	55.5	18.8
	18.50	26.8	14.6

3.2.1 含水量与抗剪强度包线的关系 为了定性地分析神女溪滑坡土体的抗剪强度对含水量的敏感性响应关系,笔者首先对 4 种土样按照不同含水量的抗剪强度进行了数据处理,整理在同一个图表内,其相互关系见图 6~图 9。

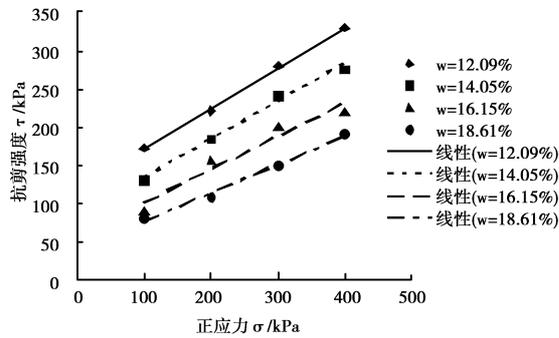


图 6 SR1 土样含水量与抗剪强度关系曲线

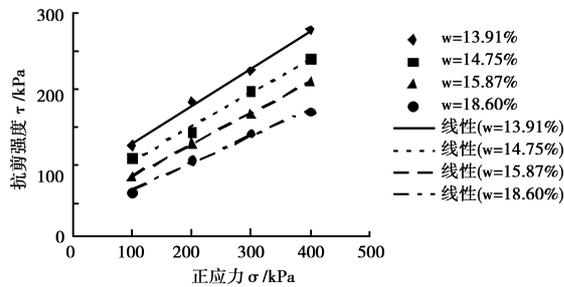


图 7 SR2 土样含水量与抗剪强度关系曲线

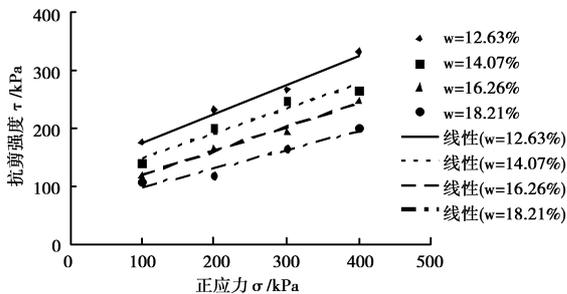


图 8 SR4 土样含水量与抗剪强度关系曲线

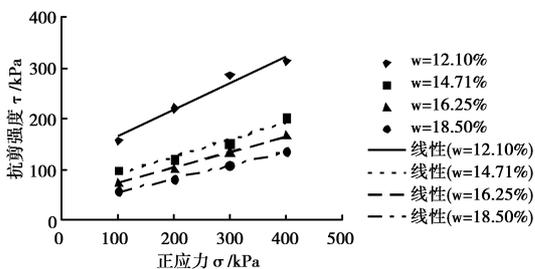


图 9 SR5 土样含水量与抗剪强度关系曲线

上图给出了土样 SR1 至 SR5 的抗剪强度与含水量关系曲线,从中可以发现以下规律:

1)抗剪强度随着含水量的增大而减小,但减小的幅度随着含水量的不同存在一定差异。

当土体的含水量较高时,土粒周围的水化膜厚度比较大,土颗粒间的水分主要为外层结合水,甚至自由水,扩散层对土颗粒之间的吸力有削弱作用,使得粒间的分子引力减弱,土体处于可塑状态,压缩性增强,抗剪强度减小;随着土体含水量的减小,土体的可塑性逐渐呈现减弱趋势,当含水量约为 12.09%时,土体粘结性较好,颗粒之间的水分主要是强结合水,并且土颗粒之间距离较小,颗粒间存在较大分子引力,要使土体破坏,必须克服很大的分子引力,此时土体破坏是结构的破坏,因此土体具有较高的抗剪强度。

2)含水量对抗剪强度参数的影响主要集中在对土体粘结力 c 及内摩擦角 φ 的影响上,从上面图中可以清楚地发现,含水量越大粘结力越小,但随含水量的增大不成比例减小,含水量越大,粘结力减小越慢;而内摩擦角呈递减趋势,但变化不显著。

3.2.2 含水量与抗剪强度指标之间的关系 为了深入探究含水量对神女溪滑坡土体抗剪强度参数的影响,在初步得到含水量与抗剪强度定性关系的基础上,笔者分别对含水量与粘结力和内摩擦角之间的定量关系开展了进一步的研究。结果见图 10,11。

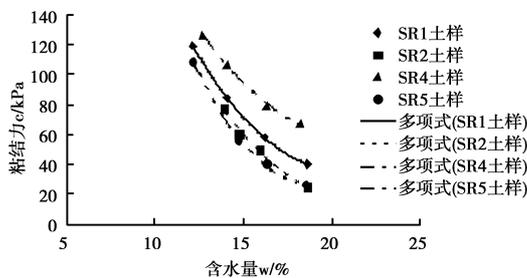


图 10 含水量与粘结力的关系曲线

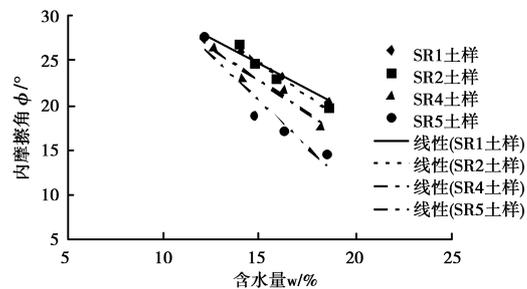


图 11 含水量与内摩擦角的关系曲线

含水量与抗剪强度指标之间的拟合公式及相关系数见表 4。

表 4 含水量与粘聚力及内摩擦角拟合公式

抗剪强度参数	土样名称	拟合公式	相关系数
粘聚力 c	SR1	$c=1.20w_2 - 48.94w + 535.37$	0.999
	SR2	$c=1.25w_2 - 51.42w + 548.91$	0.991

续表

抗剪强度参数	土样名称	拟合公式	相关系数
粘聚力 c	SR4	$c=0.97w_2 - 40.80w + 486.83$	0.997
	SR5	$c=1.85w_2 - 69.23w + 675.72$	0.998
内摩擦角 φ	SR1	$\varphi=-1.13w + 41.53$	0.987
	SR2	$\varphi=-1.40w + 45.6$	0.980
	SR4	$\varphi=-1.45w + 44.5$	0.943
	SR5	$\varphi=-2.05w + 51.10$	0.905

从表格统计结果可以看到含水量 w 与粘聚力 c 和内摩擦角 φ 之间的关系进行拟合是满足要求的,相关系数较高,达到 0.905 以上。

综合 c 与 w 的拟合曲线关系可以表达为:

$$c = aw^2 + bw + d \quad (5)$$

φ 与 w 之间呈线性关系,即:

$$\varphi = mw + n \quad (6)$$

式(5)、(6)中 a, b, d, m, n 均为函数的系数。

试验结果表明神女溪滑坡土体的抗剪强度指标与含水量存在一定响应关系:

1)粘聚力与含水量近似成二次曲线关系,随含水量增加迅速降低,当含水量达到约 18.21%时,粘聚力变化趋于稳定。由库伦定律可知,粘聚力是土体抗剪强度的重要组成部分。它是由粘土颗粒粒子间通过离子键相互连接而形成的。由于土颗粒粒径较小,比表面积大,且粒间距离小,颗粒表面具有较强的分子引力;分布于粒子外层的具有较强粘结性的结合水,使土体颗粒之间通过这种具有粘性的结合水胶结在一起,从而为土体的剪切破坏提供抗力。研究表明,在设计含水量范围内,随着含水量的增加,粒子外层水化膜厚度也增加,结合水的粘滞性减弱,土颗粒的粘聚力减小即土体剪切抗力削弱。

2)内摩擦角与含水量近似成线性关系,但随含水量增加而减小的幅度不显著。内摩擦角也是土体抗剪强度的重要组成部分,主要来自于颗粒间的相互挤压和咬合作用,从而形成摩擦阻力,抵抗土体变形破坏。在含水量较低时,土粒表面扩散层厚度较小,结合力强,实际颗粒表面变成密接,嵌合作用强烈,内摩擦角较大;当含水量增大时,土粒表面扩散层厚度增大,水分在土粒表面起到润滑剂作用,使内摩擦角 φ 减小。

4 结论

1)神女溪滑坡土体矿物成分主要含有方解石、石英和粘土矿物,粘土矿物中亲水性矿物对滑坡稳定性产生极大影响。

2)在设计含水量范围内,神女溪滑坡土体的抗剪强度在不同含水量条件下存在一定关系,即含水量越高,抗剪强度越低,降低的幅度随着含水量的不同存在一定差异。

3)粘聚力与含水量关系近似二次曲线关系;而内摩擦角与含水量近似线性关系,即

$$c = aw^2 + bw + d; \varphi = mw + n$$

4)含水量对抗剪强度的影响,主要通过影响土体的粘聚力降低抗剪强度。

参考文献:

- [1] 李建华, 祝方才, 陈春鸣, 等. 非饱和膨胀土抗剪强度的三轴试验研究 [J]. 公路工程, 2011, 36(2): 31-33.
LI Jianguhua, ZHU Fangcai, CHEN Chunming, et al. Experimental study of triaxial test of unsaturated expansive soil shear strength [J]. Highway Engineering, 2011, 36(2): 31-33.
- [2] 王洪兴, 唐辉明, 陈聪. 滑带土粘土矿物定向性的 x 射线衍射及其对滑坡的作用 [J]. 水文地质工程地质, 2003, (S1): 79-81.
WANG Hongxing, TANG Huiming, CHEN Cong. Study on x-ray diffraction for the orientability of clay minerals in sliding-soil [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, (S1): 79-81.
- [3] SEYYED MOHAMMAD MOUSAVI, AMIR HOSSEIN ALAVI, AMIR HOSSEIN GANDOMI, ALI MOLLAHASANI. Nonlinear genetic-based simulation of soil shear strength parameters [J]. Earth System Science, 2011, 120(6): 1001-1022.
- [4] CHONGSHI GU, HAI ZHEN WU, HUAIZHI SU. Research on stability of the accumulated rock-soil body of reservoir bank under rainfall condition [J]. Science in China Series E: Technological Sciences 2009, 52 (9): 2528-2535.
- [5] JIAN-HUA DENG, XING-CHUN HUANG, YOU-JIA LI. Experimental research on the mechanical properties of gypsum breccia with different water content [J]. Shanghai Jiaotong University (Science), 2010, 15(2): 250-256.
- [6] 张存根, 张怀静. 粉质粘土含水量与抗剪强度参数关系的试验研究 [J]. 华北科技学院学报, 2011, 8(2): 27-29.
ZHANG Cungen, ZHANG Huaijing. Experiment study on the relationship between water content and shear strength parameters of silty clay [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2011, 8(2): 27-29.
- [7] 赵慧丽, 张弥, 李兆平. 含水量对北京地区非饱和土抗剪强度影响的试验研究 [J]. 石家庄铁道学院学报, 2001, 14(4): 30-33.
ZHAO Huili, ZHANG Mi, LI Zhaoping. The study of water content influence on unsaturated soil shear strength by test [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2001, 14(4): 30-33.
- [8] 边加敏, 王保田. 含水量对非饱和土抗剪强度参数的影响研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(1): 17-21.
BIAN Jiamin, WANG Baotian. Research on influence of water contents on the shear strength behavior of unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(1): 17-21.
- [9] Wei-Min Ye, Ya-Wei Zhang, Bao Chen, Shi-Fang Zhang. Advances in environmental geotechnics [M]. 2010: 505-510.
- [10] C. Malaya and S. Sreedeeep. Critical Review on the Parameters influencing soil-water characteristic curve [J]. J. Irrig. Drain Eng, 2011, 4.
- [11] 曹高社, 杨启浩, 林玉祥, 等. 河南留山盆地上三叠统沉积粒度分析 [J]. 沉积与特提斯地质, 2009, 29(3): 9-14.
CAO Gaoshe, YANG Qihao, LIN Yuxiang, et al. Grain size analysis of the upper triassic deposits in the Liushan basin, Henan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2009, 29(3): 9-14.
- [12] 刘粤惠, 刘平安. X 射线衍射分析原理与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
LIU Yuehui, LIU Pingan. X-ray diffraction analysis principle and application [M]. Bei Jing: Chemical Industry Press, 2003.
- [13] 何晓英, 唐红梅, 陈洪凯等. 周期性浸泡下三峡库区松散土体微观特性分析 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 445-449.
HE Xiaoying, TANG Hongmei, CHEN Hongkai, et al. Macroscopic characteristics of loose earth in cyclic soak at three gorges reservoir area [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010, 29(3): 445-449.
- [14] 湛刚, 严春杰, 寿瑾枫, 等. 蒙脱石 X 射线衍射定量分析方法影响因素研究 [J]. 非金属矿, 2011, 34(1): 60-62.
CHEN Gang, YAN Chunjie, SHOU Jinfeng, et al. Research on influencing factors of x-ray diffraction quantitative analysis in montmorillonite [J]. Non-Metallic Mines, 2011, 34(1): 60-62.
- [15] Fredlund D G, Xing A. Equation for the soil-water characteristic curve [J]. Can Geotech J, 1994, 31: 521-532.

(编辑 周沫)