

典型库岸土质边坡的物理特性研究

刘颖¹, 吴海真², 陈芳¹, 胡强¹

(1. 江西省水利科学研究院, 江西 南昌 330029; 2. 江西省水利厅, 江西 南昌 330009)

摘要: 本文以江西省典型库岸土质边坡为例, 结合库岸的地形地貌、发育地层、岩性、坡体结构和物质组成等, 分析其工程地质特征, 并利用室内外试验成果, 研究其抗剪强度特性和渗透特性, 得出典型库岸土质边坡的物质组成及结构特征, 为实现对库岸边坡稳定性进行有效监控、科学预报, 并采取合理的处治措施提供科学依据。

关键词: 库岸土质边坡; 稳定; 土石混合堆积体; 物质组成; 结构特征

中图分类号: TV223 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2017)06-0398-06

0 引言

库岸边坡因其特殊的边界条件、物质组成、变形特性以及对水作用的敏感性, 使得人们较难把握其稳定性及其变化发展趋势, 故在国内水电建设工程中发生滑坡并酿成重大灾害的情况时有发生。据统计^[1-4], 我国三峡库区已发生的滑坡地质灾害中, 第四系松散堆积层滑坡占滑坡总数的42.85%, 滑坡总体积达 $2.35 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占滑坡总体积的17.73%。

库岸土质边坡的物质组成最为常见的是崩、滑堆积体和第四系松散堆积层(本文称之为土石混合堆积体), 这是许多库区岸线的重要组成部分, 也是一种介于土体与碎裂岩体之间、具粘弹塑性性质的特殊地质介质, 目前国内对该类土体研究较少, 有必要立足于原位或室内试验, 对其物质组成、物理力学特性等进行研究。

1 典型库岸土质边坡物理力学特性

江西省是我国的水利大省, 其库岸土质边坡占总数的85.6%, 其中的“土质”大多数为第四系松散堆积层, 为土石混合物, 一般称之为土石混合堆积体。土石混合堆积体是一个依据成因和岩土体性状界定的概念, 指的是第四系堆积作用形成的地质体, 属于斜坡变形破坏后继续运动阶段的产物^[5]。从成因上可将库岸堆积体分

为滑坡堆积体、崩塌堆积体及残坡积体等几类。

1.1 典型滑坡1——枫渡水电站左岸滑坡体

1.1.1 滑坡体概况

枫渡水电站大坝为混凝土重力坝, 坝址河谷呈U型。在左岸坝肩下游约450.00 m范围内有一滑坡群。其中, I号滑坡体是一弧形滑壁, 后缘在高程265.00 m(黄海高程, 下同)以下, 在180.00 m高程有明显的山坡隆起现象, 体积约 $2.00 \times 10^4 \text{ m}^3$; II号滑坡体后缘在高程245.00 m以下, 见有一长约百米连续环状裂缝, 前沿坍塌成 $55^\circ \sim 60^\circ$ 陡壁现象, 体积约 $3.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ (见图1)。

1.1.2 物理力学特性分析

根据工程地质勘察并经过室内及现场试验发现, 该滑坡体主要由碎石土组成, 为典型的第四系松散堆积层。其中, 大于2 mm的粗粒含量约为36%, 大于0.1 mm的粗粒含量约为60%, 而小于0.005 mm的粘粒含量不到15%。I号滑坡体滑动带渗透系数自上而下逐渐增大, 总体呈较强透水性, 排水情况良好, 处于缓慢固结过程。根据轴固结快剪试验结果和直剪饱和快剪试验结果, 滑动带上部抗剪强度内摩擦角变化范围为 $20.2^\circ \sim 27.2^\circ$, 凝聚力变化范围为23.5 ~ 43.1 kPa; 中下部滑动带渗透系数为 $5.01 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, 排水条件较差, 内摩擦角变化范围为 $10.9^\circ \sim 22.6^\circ$, 凝聚力约为12.7 kPa; II号滑坡体滑动面渗透系数自上而下逐渐增大, 总体属较强~弱透水性, 渗透系数为 $6.80 \times 10^{-3} \sim$

收稿日期: 2017-07-25

项目来源: 江西省水利厅科技计划项目(KT201005)。

作者简介: 刘颖(1979-), 女, 工程硕士, 高级工程师。

7.30 × 10⁻⁴ cm/s,呈碎块、碎屑状及少部分强~全风化砂岩夹板岩,根据三轴固结快剪试验结果,参考现场剪

切试验及直剪饱和快剪试验结果,内摩擦角变化范围为17.0°~19.0°,凝聚力变化范围为18.0~30.0 kPa。

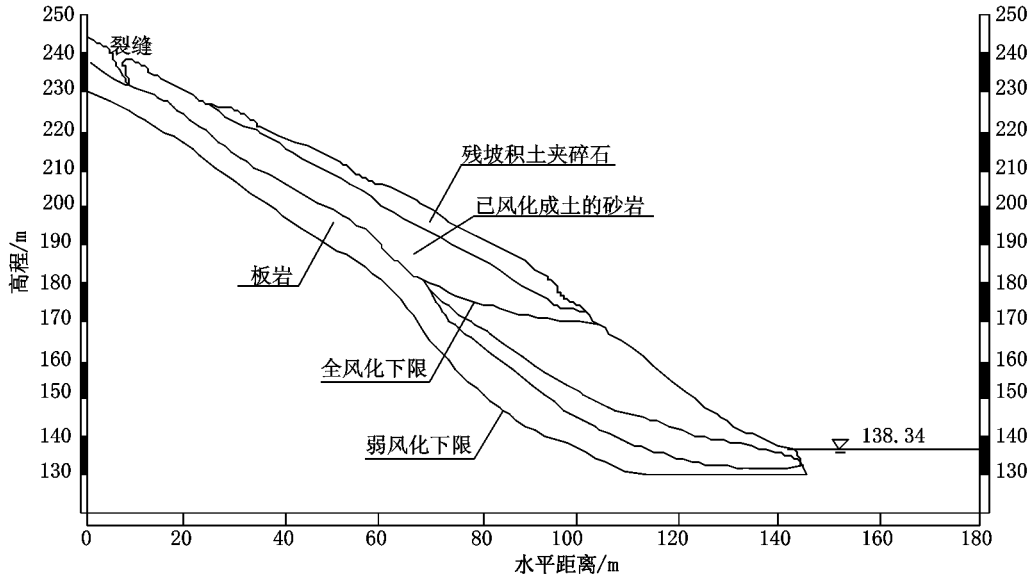


图1 枫渡水电站左岸II号滑坡体典型剖面图

1.2 典型滑坡2——白云山水库左岸滑坡体

1.2.1 滑坡体概况

白云山水库坝址属构造剥蚀中低山地貌,两岸山坡较陡,坡度一般30°~45°,河谷以“U”型谷为主,坝址下游较宽阔。库岸滑坡体为典型的土石混合堆积体,位于大坝左岸上游70.00~300.00 m范围。该滑坡体底部

横向宽度约220 m,纵向最大高度120.00 m,包括崩坡积层体和残坡积体两部分,其中崩坡积层最厚处近20.00 m,总体积约30.00 × 10⁴ m³,平均坡度为25.0°~30.0°。白云山水库左岸滑坡体剖面图见图2~3。

由工程地质勘察和试验结果可知,该滑坡体主要由崩坡积体和残坡积体两个区域组成。

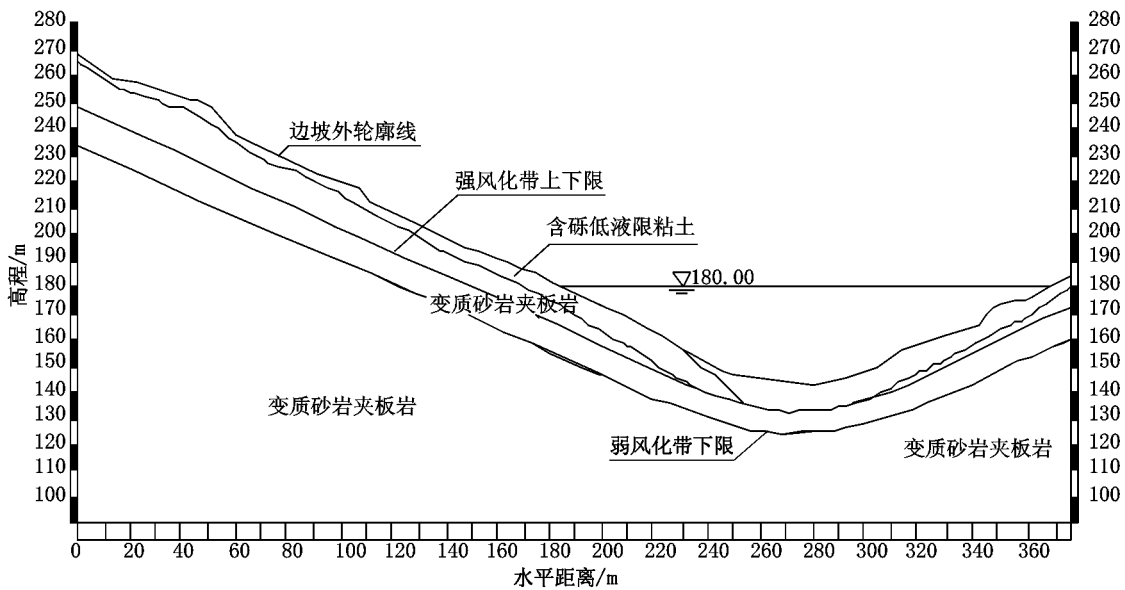


图2 白云山水库左岸滑坡体剖面图(残坡积区)

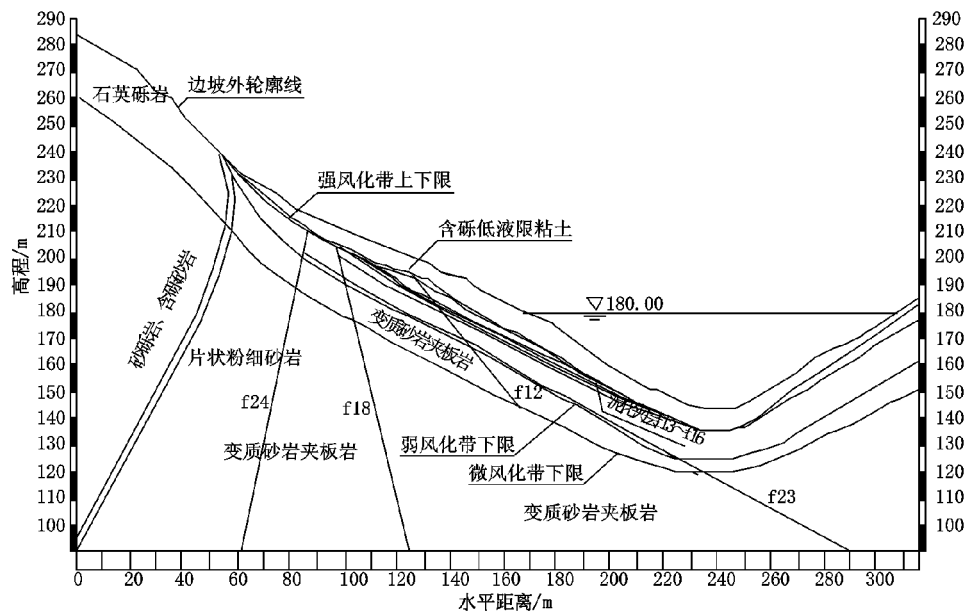


图3 白云山水库左岸滑坡体剖面图(崩塌积区)

(1) 残坡积体:位于坝上游左岸 300.00 m 以上地段,地形平缓,走向北东 50.0° ,倾北西,倾角约 25.0° 。上覆盖层厚 5.00 ~ 10.00 m,岩性为含砾低液限粘土,结构较紧密,土质较均匀。下伏震旦系岩层,走向 $N30^\circ \sim 40^\circ E/NW \angle 25.0^\circ \sim 35.0^\circ$,强风化带厚度一般 5.00 ~ 15.00 m,岩性软弱,较破碎,断层不甚发育,但层面节理发育,面充填泥质薄膜。边坡内控制滑移的结构面为层面及层面节理,其走向基本与边坡走向平行,倾角稍大于坡角,未见其它不利组合的切割面。

(2) 崩塌积体:顶部为石炭系岩层(石英砾岩、砂砾岩和含砾砂岩),一般为弱~新鲜岩体,岩层反倾;中下部为震旦系变余细砂岩夹板岩,岩层走向 $N10^\circ \sim 21^\circ E/NW \angle 32^\circ \sim 41^\circ$;强风化岩体厚度一般 1.00 ~ 2.00 m,弱风化岩体一般厚 10 m 左右。下部(顺坡倾向)基岩面较平缓,且起伏不平。在物质组成上以碎(块)石为骨架,内充填粘性土,其中碎(块)石、砾含量达 40% ~ 50%,渗透系数为 $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ cm/s}$ 量级,属中等透水性。崩塌积体下伏震旦系岩层构造发育,主要有三组软弱结构面:a. 顺坡向层间挤压带(泥化夹层):构造岩为岩屑、次生泥等,粉粘粒含量 41% ~ 44%,塑性指数 8.8 ~ 9.1,是边坡稳定的控制性结构面;b. 北东东~近东西向断层:倾北西或南西,倾角 $65^\circ \sim 80^\circ$;c. 御荷张裂隙:走向 $N45^\circ E$,近直立,与山坡走向近一致,裂隙宽 5 ~ 20 cm,无充填。上述 3 组结构面形成崩塌积体边坡稳定的不利组合面。

1.2.2 物理力学特性分析

据勘探试验成果,崩塌积体及残坡积体的主要物理力学参数如下:

(1) 残坡积体:含水量 21.9% ~ 25.2%, 平均 22.8%;湿密度 $1.91 \sim 2.06 \text{ g/cm}^3$, 平均 1.97 g/cm^3 ;干密度 $1.53 \sim 1.70 \text{ g/cm}^3$, 平均 1.61 g/cm^3 ;孔隙比 0.60 ~ 0.78, 平均 0.70 (中密);比重 2.72 ~ 2.75, 平均 2.73;塑性指数 10.3 ~ 14.7。滑坡体各土层渗透系数及物理力学参数成果见表 1 ~ 2。

(2) 崩塌积体:含水量 19.2% ~ 22.0%, 平均 19.9%;湿密度 $1.86 \sim 2.19 \text{ g/cm}^3$, 平均 1.99 g/cm^3 ;干密度 $1.53 \sim 1.83 \text{ g/cm}^3$, 平均 1.66 g/cm^3 ;孔隙比 0.53 ~ 0.77, 平均 0.66 (中密);塑性指数 10.5 ~ 13.1。

由表 1 和表 2 可见,该滑坡体崩塌积层呈中等透水性,残坡积层呈弱透水性,断层破碎带和构造夹泥层呈强透水性。在抗剪强度方面,崩塌积层要较残坡积层小,构造夹泥层的抗剪强度参数离散性最大。根据类似库岸边坡的蠕滑特性,并结合该滑坡体的变形监测成果可知,白云山水库库岸滑坡体处于缓慢蠕滑状态,没有滑动势能的聚集,故滑动面上的剪应力一般不会超过峰值抗剪强度。

1.3 双溪电站库岸滑坡体

1.3.1 滑坡体概况

双溪电站滑坡体为侵蚀剥蚀山丘陵地形,沟谷地面标高 150.00 ~ 260.00 m,山顶高程 250.00 ~ 510.00 m,

表1 白云山水库库岸滑坡体综合饱和和渗透系数成果表

土层分区	崩坡积土	残坡积土	断层破碎带	构造夹泥层	基岩(石英砂岩夹板岩)		
					强风化带	弱风化带	微新岩体
综合饱和渗透系数/(cm/s)	5.45×10^{-4}	5.50×10^{-5}	1.84×10^{-2}	3.50×10^{-2}	2.85×10^{-4}	4.30×10^{-5}	1.00×10^{-6}

表2 白云山水库库岸滑坡体物理力学参数成果表

土层名称	统计结果		
	平均值	小值平均值	各级压力下的小值平均
崩坡积土	$c' = 16.71 \text{ kPa}, \varphi' = 28.18^\circ$	$c' = 11.00 \text{ kPa}, \varphi' = 25.78^\circ$	$c' = 38.00 \text{ kPa}, \varphi' = 25.08^\circ$
残坡积土	$c' = 23.50 \text{ kPa}, \varphi' = 30.25^\circ$	$c' = 20.00 \text{ kPa}, \varphi' = 28.33^\circ$	$c' = 22.00 \text{ kPa}, \varphi' = 28.50^\circ$
构造夹泥层	$c' = 13.88 \text{ kPa}, \varphi' = 29.39^\circ$	$c' = 0.50 \text{ kPa}, \varphi' = 26.82^\circ$	$c' = 0, \varphi' = 26.99^\circ$

相对高差 100.00 ~ 250.00 m, 山坡坡度一般为 $15^\circ \sim 30^\circ$, 地层岩性为变质砂岩, 残坡积层为粉质粘土含块石。滑坡体长约 180 m, 宽 90 m, 厚 2 ~ 6 m (平均约 4 m), 体积约为 $64\ 800 \text{ m}^3$, 总体坡度为 15° , 滑动面为残坡积粉质粘土层剪切带, 埋深 2.00 ~ 6.00 m, 呈可塑至软塑状(凝聚力为 8.5 ~ 11.0 kPa, 内摩擦角 $14.0^\circ \sim 16.5^\circ$), 坡面呈凹形, 汇水面积约 $3\ 600 \text{ m}^2$ 。该滑体前缘有切坡, 高 3.80 m, 坡度约 80° , 坡脚下有泉水出露。1989 年曾出现滑坡迹象, 顶部拉裂缝宽 6 cm, 深约 2 m, 呈弧状, 滑坡前缘挡土墙及房屋开裂、外凸, 房内地面隆起, 后

经采取坡面排水和在坡脚增设挡土墙后, 滑坡体滑移速度有所减缓, 但前缘挡土墙仍有缓慢蠕滑现象。

1.3.2 物理力学特性分析

该滑坡体主要由变质砂岩风化石组成, 滑坡体表层为残坡积层粉质粘土, 灰黄色, 软塑状, 含棱角状块石, 其母岩成分为变质砂岩; 坡体为残坡积粉质粘土, 块石含量约 25%, 孔隙比达 1.20 以上, 层底埋深大于 8.00 m。各土层的物理力学参数见表 3。图 4 为双溪电站库岸滑坡体典型剖面图。

表3 双溪电站库岸滑坡体物理力学参数表

土层 分层	含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	孔隙比	天然容重 /(kN/m^3)	饱和容重 /(kN/m^3)	凝聚力 /kPa	内摩擦角 $\varphi'/\phi^b(^\circ)$	渗透系数 /(cm/s)
残坡积层	37.7	47.6	29.8	1.202	16.87	17.56	5.00	16.50/8.50	2.36×10^{-3}
变质砂岩	46.9	51.9	33.1	1.425	25.48	25.75	145.00	30.50	5.50×10^{-5}

由表 3 可知, 该滑坡体主要由变质砂岩风化石组成, 坡体为残坡积粉质粘土, 碎、块石含量高, 孔隙比达 1.20 以上, 结构松散、密实度和抗剪强度低是这一类型滑坡体的突出特性, 也是牵引式库岸滑坡体的典型代表。

2 库岸土质边坡的物质组成及结构特征

2.1 物质组成

通过对典型工程实例的调查发现, 库岸土质边坡的物质组成以土石混合松散堆积层或残坡积层为主, 其特点为: 以碎(块)石为骨架, 内充填少量粘性土, 其中粘粒含量一般较低, 而碎(块)石、砾含量则高达 40% ~ 50%, 有的甚至达到 70% 以上, 且总体呈现松散无分选、局部架空现象较普遍以及透水性较强等规律^[6-11]。

另一方面, 库岸滑坡体因经历了斜坡的继续运动过程, 显现出特殊的空间结构, 这与传统岩体结构分类中的散体结构有明显不同, 其空间结构有以下特征:

(1) 堆积层滑坡体与下伏基岩明确分离, 基覆界面清晰, 而其它类型散状结构岩体多为主观界面(如风化卸荷带等)。

(2) 一般散状结构岩体内各岩块独立, 岩块之间以面-面接触为主, 而土石混合堆积体内不存在岩体结构面, 多具架空结构, 不同岩块单元多以点-面接触或点-点接触为主。

(3) 堆积层滑坡体可能存在似层状结构面、夹杂有机质层等构成具有稳定性控制意义的结构面。这就决定了堆积体不仅具有整体稳定、分段稳定和局部稳定等特征, 而且有表层稳定和深层稳定之区分。

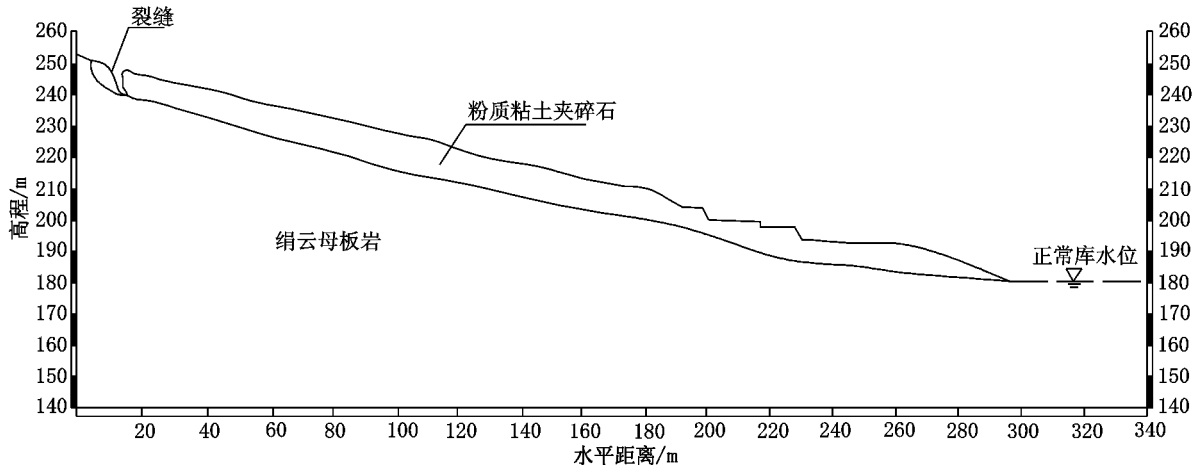


图4 双溪电站库岸滑坡体工程地质剖面图

2.2 结构特征

典型库岸滑坡体的结构特征主要表现在以下几个方面:

(1)多集中分布于宽谷缓坡地段,特别是在有多级台阶状谷坡地段。受软硬相间地层的影响,或受新构造活动间歇性抬升以及外动力作用的影响而形成多级平台,每级平台都有利于岸坡能量积累,为大型、特大型滑坡创造了有利的地形地貌条件,当岸坡物质累积到一定

程度时即以滑坡的形式向河谷卸荷。

(2)从地形看,一般后缘破裂壁陡立,表部较平缓,并发育多级平台、陡坎、鼓丘和冲沟。

(3)从土层结构上看,坡体组成除崩坡积层或残坡积层和基岩外,在滑坡体底部由于运动过程中的摩擦等动力作用,常分布有一定厚度的滑动带(软弱带),其力学性质一般较差,但透水性较小,常常成为斜坡的不透水边界。

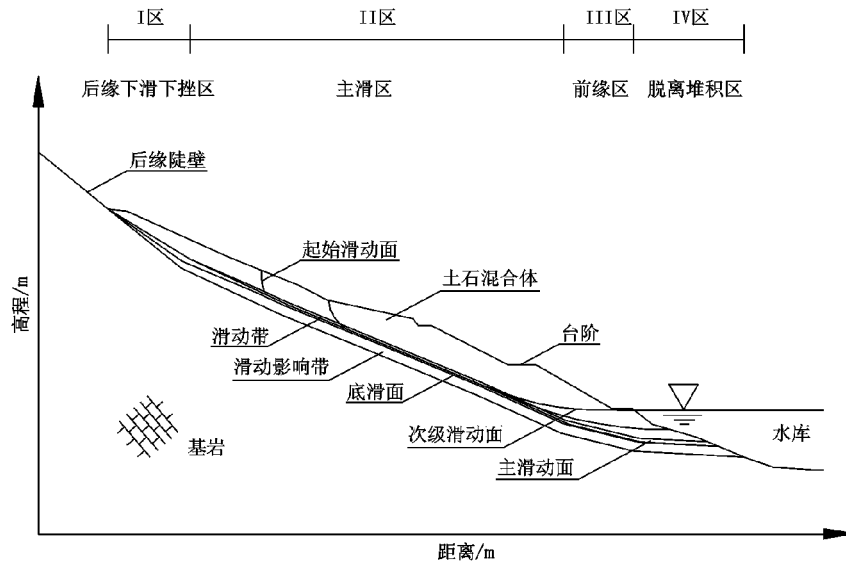


图5 典型库岸滑坡体土层结构基本特征图

(4)由于经历了漫长的物理风化、水的软化等作用,在物质组成上一般为结构松散的块石、块碎石、碎石土等,透水性强,且前缘常发育有次级滑坡。而滑动面(带)物质多由易滑地层组成,多数是由圆弧和直线组

合成的复合型滑动面。

2.3 典型库岸滑坡体特征

根据对典型滑坡体空间、结构上的分析,可得出典型库岸滑坡体土层结构基本特征图(如图5所示)。在

平面上自后缘向前缘一般可分为四个区:I区为后缘下滑下挫区,由于长期地质作用,常覆盖有后期崩坡积物;II区为主滑区,该区一般仍保留原有地层关系和构造特点,组成物为块碎石和泥土质混杂堆积物,或称为块石土、碎石土,其中岩块棱角明显,无分选;III区为滑坡前缘区;IV区为脱离滑床的堆积区,滑体物质层序紊乱,碎块石块径小,碎屑物质较多。

3 结论

本文通过对典型工程实例的调查发现,易发生滑坡的库岸边坡多集中分布于宽谷缓坡地段,特别是在有多级台阶状谷坡地段,其物质组成以土石混合松散堆积层或残坡积层为主,一般为结构松散的块石、块碎石、碎石土等,透水性强,因经历了斜坡的继续运动过程,滑坡体显现出特殊的空间结构。该类库岸滑坡体后缘破裂壁陡立,表部较平缓,并发育多级平台、陡坎等,底部常分布有一定厚度的滑动带(软弱带),滑动面(带)多是圆弧和直线组合成的复合型滑动面,物质多由易滑地层组成。典型库岸滑坡体土层结构在平面上自后缘向前缘一般可分为四个区:后缘下滑下挫区、主滑区、滑坡前缘区及脱离滑床的堆积区。

该研究成果为避免或尽可能降低库岸边坡稳定问题对人民生命财产的危害及对工程建设的影响,提高对

滑坡地质类型及其变形破坏规律的认识,对滑坡变形和稳定性的发展趋势作出可靠的预测预报提供科学依据。

参考文献:

- [1] 田陵君,王兰生,刘世凯.长江三峡工程库岸稳定性[M].北京:中国科学技术出版社,1992.
- [2] 欧正东,何儒平,等.长江三峡工程库区环境工程地质[M].成都:成都科技大学出版社,1992.7.
- [3] 王尚庆.长江三峡滑坡监测预测预报[M].北京:地质出版社,1999.
- [4] 杜榕桓,刘新民,袁建模,等.长江三峡库区滑坡与泥石流研究[M].成都:四川科学技术出版社,1990.
- [5] 张倬元,王兰生,王士天,等.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1997.
- [6] 油新华.土石混合体随机结构模型及其应用研究[D].北京:北方交通大学博士学位论文,2001.
- [7] 周中,傅鹤林,等.土石混合体渗透性能的试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2006,(33)6:25~28.
- [8] 徐文杰,胡瑞林,等.土石混合体细观结构及力学特性数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2007,(26)2:300~311.
- [9] 魏进兵,邓建辉,谭国焕,等.泄滩滑坡碎块石土饱和与非饱和水力学参数的现场试验研究[J].岩土力学,2007,28(2):327~335.
- [10] 殷坤龙,姜清辉,汪洋.新滩滑坡运动全过程的非连续变形分析与仿真模拟[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):959~962.
- [11] 李树武,聂德新,刘惠军.大型碎屑堆积体工程特性及稳定性评价[J].岩石力学与工程学报,2006,25(增2):4126~4131.

编辑:张绍付

Study on physical properties of typical soil bank slope

LIU Ying¹, WU Haizhen², CHEN Fang¹, HU Qiang¹

(1. Jiangxi Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China;

2. Jiangxi Provincial Department of Water Resources, Nanchang 330009, China)

Abstract: In this paper, taking the typical bank slope of Jiangxi Province as an example, combining with the topography, development stratum and lithologic character, slope structure and material composition of the reservoir bank, this paper analyzes the engineering geological features and uses the indoor and outdoor test results to study the effect of its resistance shear strength characteristics and permeability characteristics, the material composition and structural characteristics of typical soil bank slope are obtained, which provide scientific basis for the effective monitoring and scientific prediction of bank slope stability and taking reasonable treatment measures.

Key words: Typical soil bank slop; Stability; Earth - stone mixture body; Material composition; Structural characteristics

翻译:郭庆冰