

泾河南塬小型水库除险加固工程 坝体土的抗剪强度指标特征分析

孙云博,杨聚利

(陕西省水利电力勘测设计研究院,陕西 西安 710001)

[摘 要] 本文以百顷沟水库及芋子沟水库实际工程为例,现场取样并进行室内试验,根据试验成果,对坝体土从颗粒级成、抗剪强度(水上、水下、快剪及慢剪等)等方面进行了数理统计,对此进行定量分析。在上述分析基础上,对抗剪强度的取值方法进行了分析讨论,并分析不同试验方法对抗剪强度取值的影响,综合分析,确保获取可信的抗剪试验指标值,从而避免因误用土的抗剪强度指标造成工程事故。本文研究对实际工程参数的取值具有重要的指导意义。

[关键词] 坝体土;颗粒级成;抗剪强度;数理统计;定量分析

[中图分类号] TV698.2⁺3 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1004-1184(2020)06-0251-04

1 工程概况

随着西咸新区的开发建设,对水环境和水安全提出新的定位要求,最近有 2 座小水库进行勘察设计工作。百顷沟水库位于空港新城太平镇程家村,是一座以灌溉为主的Ⅳ等小(1)型水库。水库总库容为 120 万 m³,主要建筑物由大坝、溢洪道、放水设施、坝后抽水站等建筑物组成。芋子沟水库位于秦汉新城东部高庄镇境内,水库枢纽工程由均质土坝、放水设施、坝后抽水站等建筑物组成,设计坝高 22.77 m,水库总库容 106 万 m³,是一座以灌溉为主的Ⅴ等小(1)型工程。2 座水库修建于二十世纪七十年代,坝体碾压质量不满足要求,存在安全隐患,被列为Ⅲ类坝,需要进行除险加固工作。

2 问题的提出

在 2020 年上半年作的除险加固初设审查过程中,专家对坝体土的抗剪强度提出:饱和快剪抗剪强度指标偏低,接近欠固结的软土,设计采用计算坝体的稳定,在常规的坝坡比下不易稳定。针对这一问题,对 2 座小水库坝体土的取样过程,试验方法及试验资料的整理过程,筑坝土料的来源,击实特性,进行了系统的收集整理和分析,着重从土样的代表性,坝体土的颗粒组成和级配,不同试验方法的影响,资料的整理及取值方法分析。认为试验的成果能够代表坝体土的真实状态,饱和快剪抗剪强度指标偏低的原因是土性所决定的,地质提出的建议值可以作为坝体稳定复核计算的参数。若要坝坡稳定可从以下两方面考虑:1)采用较缓的坡比或采用结构措施;2)从土性改良上采取措施,如采用砂等颗粒较粗,强度较高的掺合料。

3 问题的分析

3.1 坝体土的取样方法及代表性

《中小型水利水电工程地质勘察规范》(SL55-2005)第七

章病险水库除险加固工程勘察,7.2.3 土石坝安全鉴定勘察中要求:对湿陷土层分布地区,调查坝基土体和运行水位浸润线以上的坝体的湿陷情况;7.2.4 第七章病险水库除险加固工程勘察方法中要求:坝体填筑土应按坝体上游坡、下游坡分区取样进行室内物理力学性质和渗透性试验,每区试验组数不宜少于 6 组。

2 座小坝均为均质土坝,坝体土的质检测取样考虑了坝体的填筑分区及运行状态,如水上水下,迎水坡背水坡。坝体土的取样水上部分采用探坑及钻孔,水下部分采用钻孔取样,为了解土体的填筑质量还作了孔内标准贯入原位测试。探坑取样采用坑壁刻槽法取方块样,样品的尺寸不小于 15 cm,为了解坝体土的湿陷性,取样间距 1 m;水下部分坝体采用取土器取样,取样间距 2 m,原则不漏层,每层有效组数不少于 6 组,1 组 3 筒,每筒高度 20 cm,筒径不小于 89 mm。坝体土的质检测取样方法可靠,部位选择分配合理,数量、质量满足规范要求,具有代表性。

3.2 坝体土的颗粒级成

2 座小水库坝体土的颗分成果统计如下表 1,芋子沟坝体土的颗粒级成:砂粒占 24.6%,粉粒占 58.2%,粘粒占 17.2%;百顷沟坝体土的颗粒级成:砂粒占 0.3%,粉粒占 96.4.2%,粘粒占 3.4%。根据《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》(SL251-2015)附录 B 图 B.2.3 土的三角座标分类,芋子沟坝体土为中粉质粘土,百顷沟坝体土为砂壤土。按土的塑性指数分类:2 座坝体土均为壤土。根据《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)附录 C 图 C.0.6 细粒土的分类,芋子沟坝体土及百顷沟坝体土均为低液限粘土(CL)。根据《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)3.3.4 条的分类,2 座小坝坝体土均为粉土,按粘粒含量可进一步细分:芋子沟坝体土为粘质粉土,百顷沟坝体土为砂质粉土。

粉土具有特殊的工程性质,取土、试验与评价时要注意,既不同于砂土,又不同于粘性土,而是介于砂土和粘性土之

[收稿日期] 2020-07-04

[作者简介] 孙云博(1966-),男,陕西长安人,教授级高工,主要从事水利水电工程地质勘察技术工作。

间。粉土在不饱水状态下有一定的强度及硬实性,在饱水状态下易散化和结构软化,使强度降低,压缩性增大。

表 1 坝体土的颗分试验汇总表

地 层 时 代	地层 岩性	探坑 编号	土 粒 组 成							
			土 的 粒 径/mm				有效	限制	不均匀	曲率
			砾粒	砂粒	粉粒	粘粒	粒径	粒径	系数	系数
			0.5/0.25	0.25/0.0	0.075/0.00	<0.005	d10	d60	Cu	Cc
			%	%	%	%	mm	mm	- -	- -
坝 体 壤 土	芋子沟	统计组数	4	4	4	4	4	4	4	4
		平均值	2.73	21.90	58.17	17.20	0.0031	0.038	12.26	0.789
	百倾沟	统计组数	4	4	4	4	4	4	4	4
		平均值	0	0.3	96.4	3.4	0.0069	0.025	3.682	0.893

3.3 坝体土的抗剪强度试验成果

2 座小水库坝体土的抗剪强度试验成果统计如表 2 及表 3,试验方法采用直剪试验,执行现行的《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019),作坝体土的饱和快剪和慢剪试验。从成果统计分析 2 种试验抗剪强度有如下规律:

(1) 百倾沟坝体土饱和快剪粘聚力范围值 $C = 4 \sim 13$ Kpa,平均值为 $6.3 \sim 8.2$ Kpa,内摩角范围值 $\varphi = 7.3^\circ \sim 13.3^\circ$,平均值为 $6.3^\circ \sim 8.2^\circ$;慢剪粘聚力范围值 $C = 9 \sim 35$ Kpa,平均值为 $13.5 \sim 28.5$ Kpa,内摩角范围值 $\varphi = 13.5^\circ \sim 25.7^\circ$,平均值为 $19^\circ \sim 22.3^\circ$ 。

从 2 种试验方法各自分析:饱和快剪强度指标水上、水下样品的差异小,符合基本规律,内摩角水上较水下平均值高 1.4° ;慢剪强度指标水上、水下样品的差异较大,主要表现在粘聚力的差异,水上部分 $C = 16 \sim 35$ Kpa,平均值为 28.5 Kpa,水下部分 $C = 9 \sim 18$ Kpa,平均值为 13.7 Kpa,水上部分平均值较水下高 14.8 Kpa,分析认为与坝体土的湿陷软化有关。

从 2 种方法试验成果对比分析看:水上部分比水下部分高的多,慢剪粘聚力平均值较饱和快剪高 22.2 Kpa,慢剪内摩擦角平均值高 16.9° 。水下部分相差较小,慢剪粘聚力平均值较饱和快剪高 5.5 Kpa,慢剪内摩擦角平均值高 8.8° 。

(2) 芋子沟坝体土饱和快剪粘聚力范围值 $C = 16 \sim 39$ Kpa,平均值为 $24.7 \sim 28.8$ Kpa,内摩角范围值 $\varphi = 5.1^\circ \sim 17.5^\circ$,平均值为 $11.1^\circ \sim 13.4^\circ$;慢剪粘聚力范围值 $C = 32 \sim 52$ Kpa,平均值为 $37.2 \sim 40.3$ Kpa,内摩角范围值 $\varphi = 21.1^\circ \sim 33.9^\circ$,平均值为 $25.7^\circ \sim 27.9^\circ$ 。

从 2 种试验方法各自分析:抗剪强度指标水上、水下部分的差异小,规律性不强,分析认为与坝体土含砂量高,湿陷性轻有关。

从 2 种方法试验成果对比分析看:水上部分比水下部分高的多,慢剪粘聚力平均值较饱和快剪高 15.6 Kpa,慢剪内摩擦角平均值高 14.6° 。水下部分相差较小,慢剪粘聚力平均值较饱和快剪高 8.4 Kpa,慢剪内摩擦角平均值高 14.5° 。

(3) 综合 2 座小水库坝体土的抗剪强度试验成果总的统计规律表现为:水上部分强度高于水下部分,慢剪指标高于饱和快剪。

3.4 坝体土的抗剪强度的取值方法讨论

根据《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487-2008)附录 E 岩土物理力学参数取值中 E.0.1 要求:试验成果整理可按

相关岩土试验规程进行,抗剪强度参数可采用最小二乘法、优定斜率法或小值平均值,分别按峰值、屈服值、比例极限、残余强度值、长期强度等进行整理。按岩土体的类别、岩体质量级别、工程地质单元、区段或层位,可采用数理统计法整理试验成果,在充分论证的基础上舍支不合理的离散值。E.0.2 规定土的抗剪强度标准值可采用直剪试验峰值强度的小值平均值。

《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)附录 A 先按 3 倍标准差($\pm 3s$)作为舍弃标准对试验资料中明显不合理的数据取舍,即舍弃在 $\pm 3s$ 范围以外的测定值。对一般特性指标通常采用算术平均值,并计算标准差 s 和变异系数 C_v ,反映实际测定值对算术平均值的变化程度,判别其可靠性。对于主要计算指标测定组数较多时,仍可采用算术平均值,通常考虑各种影响,为了安全对于初步设计和次要建筑物宜采用标准差平均值,即对算术平均值加或减一个标准差的绝对值 $\pm s$ 。对于抗剪强度可采用图解法或最小二乘法确定。

《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)14 岩土工程分析评价和成果报告中 14.2 岩土参数的分析和选定要求根据数据的分布情况说明数据的取舍标准,并给出了计算平均值、标准差、变异系数、标准值的计算公式。岩土参数标准值是岩土参数的可靠性估值,采用学生氏函数分布,相当于置信概率 95% 的单侧置信估计值。

3 种规范对抗剪强度参数的试验成果整理统计方法及标准值的取值方法都作了具体的规定。对抗剪强度参数的试验成果可采用小值均值、图解法或最小二乘法按直剪试验峰值强度确定外,多考虑参数的分布,先进行离散值(异常值)的取舍,各种规范的取舍标准不同,《土工试验方法标准》按 3 倍标准差($\pm 3s$)作为舍弃标准,《水利水电工程地质勘察规范》要求可按极限误差法(样本容量 > 10)或格拉布斯法(样本容量 ≤ 10)舍去不合理的离散值,《岩土工程勘察规范》没有规定取舍标准。土的抗剪强度标准值《土工试验方法标准》对于初步设计和次要建筑物宜采用标准差平均值,相应的置信概率 68.3%,《水利水电工程地质勘察规范》可采用直剪试验峰值强度的小值平均值,《岩土工程勘察规范》采用学生氏函数分布,相当于置信概率 95% 的单侧置信估计值。从离散值(异常值)的取舍标准及标准值的置信概率设置大小对比分析:根据《土工试验方法标准》确定的标准值应较《岩土工程勘察规范》确定的标准值小。根据工程经验小值平均值通常接近置信概率 95% 的单侧置信估计值,即根据《水利水电工程地质勘察规范》确定的标准值和《岩土工程勘

察规范》确定的标准值相近。

表 2 百倾沟坝体土的直剪试验统计表

坝体 部位	统计 项目	饱和快剪		慢剪	
		粘聚力	内摩擦角	粘聚力	内摩擦角
		c kPa	φ 度	c kPa	φ 度
浸润 线 以上 坝 体 土	统计组数	6	6	6	6
	平均值	6.3	11.6	28.5	22.3
	最大值	9	13.3	35.0	25.7
	最小值	4	9.3	16.0	13.5
	大值均值	8	12.8	32.5	24.6
	小值均值	6	10.5	20.5	17.6
	标准差	2	1.5	7.2	4.5
	变异系数	0	0.1	0.3	0.2
	修正系数	1	1	1	1
	平均值	4.3	10.1	21.3	17.8
浸润 线 以下 坝 体 土	标准值	5	10.4	22.6	18.5
	统计组数	6	6	6	6
	平均值	8.2	10.2	13.7	19.0
	最大值	13.0	15.3	18.0	23.7
	最小值	4.0	7.3	9.0	15.1
	大值均值	11.0	12.0	16.3	21.1
	小值均值	5.3	8.4	11.0	17.0
	标准差	3.5	2.8	3.4	2.9
	变异系数	0.4	0.3	0.3	0.2
	修正系数	0.6	0.8	0.8	0.9
	平均值	4.7	7.4	10.3	16.1
	标准值	5.3	7.9	10.8	16.6

2 座小水库坝体土的直剪试验成果整理统计如表 2 和表 3,坝体土的直剪试验分水上和水下 2 部分整理统计,统计的项目有平均值、小值平均值、标准差、变异系数、标准值等。百倾沟坝体土饱和快剪粘聚力变异系数水上部分 $\delta=0$,水下部分 $\delta=0.4$,内摩擦角变异系数 $\delta=0.1\sim0.3$;慢剪粘聚力变异系数 $\delta=0.3$,内摩擦角变异系数 $\delta=0.2$;芋子沟坝体土饱和快剪粘聚力变异系数水上部分 $\delta=0.3$,水下部分 $\delta=0.1$,内摩擦角变异系数 $\delta=0.3\sim0.4$;慢剪粘聚力变异系数 $\delta=0.1\sim0.2$,内摩擦角变异系数 $\delta=0.1\sim0.2$ 。坝体土水上部分的变异性较水下部分大,饱和快剪的变异性较慢剪大。说明坝体土的含水量及直剪试验方法对试验的结果都有影响。小值平均值一般接近标准值或略小于标准值,作为抗剪强度的标准值是可信的。

3.5 坝体土的颗料组成对抗剪强度的影响

土的颗粒组成及级配决定了土的工程性质及力学性能,对土的抗剪强度有很大的影响,还有土的含水量、土的应力状态、土的固结程度、受力的形式、方式及速度有关。一般粘

聚力与粘粒含量有关,内摩擦角与砂料含量有关。

表 3 芋子沟坝体土直剪试验统计表

坝体 部位	统计 项目	饱和快剪		慢剪	
		粘聚力	内摩擦角	粘聚力	内摩擦角
		c kPa	φ 度	c kPa	φ 度
浸 润 线 以 上 坝 体 土	统计组数	6	6	6	6
	平均值	24.7	11.1	40.3	25.7
	最大值	39.0	14.6	52.0	33.9
	最小值	16.0	5.1	32.0	21.1
	大值均值	33.5	14.2	46.0	30.9
	小值均值	20.3	8.0	34.7	23.1
	标准差	8.0	3.9	7.3	4.6
	变异系数	0.3	0.4	0.2	0.2
	修正系数	0.7	0.7	0.9	0.9
	平均值	16.7	7.2	33	21.1
浸 润 线 以 下 坝 体 土	标准值	18.1	7.9	34.3	21.9
	统计组数	6	6	6	6
	平均值	28.8	13.4	37.2	27.9
	最大值	35.0	17.5	41.0	31.0
	最小值	24.0	6.7	33.0	22.4
	大值均值	32.3	15.6	39.7	30.5
	小值均值	25.3	9.0	34.7	22.6
	标准差	4.3	3.9	3.1	4.1
	变异系数	0.1	0.3	0.1	0.1
	修正系数	0.9	0.8	0.9	0.9
	平均值	24.5	9.5	34.1	23.8
	标准值	25.3	10.2	34.6	24.4

4 不同试验方法对抗剪强度的影响

工程上土体的破坏通常都是剪切破坏,土体中滑裂面的产生是因为滑裂面上剪应力达到了土体的抗剪强度产生的。土体的抗剪强度是土体抵抗土体颗粒间产生相互滑动的极限能力。根据 Mohr - Coulomb 强度理论和有效应力原理,土的抗剪强度既可以用有效应力表示,也可以用总应力来表示。土体的抗剪强度指标通常由粘聚力 C 和内摩擦角 Φ 组成。土体是摩擦型材料,其抗剪强度与土体中的应力状态有关,一般情况下,人们用抗剪强度指标值来描述土体抗剪强度随着土中应力大小变化的规律。

工程上常用的测定土体抗剪强度的试验方法主要有:三轴压缩试验、直剪试验、十字板剪切试验 3 种。十字板剪切试验属于钻孔内的原位测试。三轴压缩试验和直剪试验均为室内试验,由于直剪试验不能控制排水条件,只能用加荷速度模拟不同工况下土的性状,而三轴试验可以控制排水过程,能很好地模拟工程实际排水固结过程,所以三轴试验的

成果可靠性较高。但直剪试验设备简单,易于操作,经济实用。

同一种土体,采用不同的试验方法得到的试验结果有时差别会很大,这是土体区别于其它材料的一个显著特点。为了获取可信的抗剪试验指标值,应该深刻理解土体不同剪切强度指标的物理意义,尤其应理解不同指标对应的排水固结条件,选取适合工程实际工作状态的试验方法和正确的分析方法,避免因误用土的抗剪强度指标造成工程事故。

5 结语

(1) 根据试验分析:饱和快剪强度指标水上、水下样品的差异小,符合基本规律,内摩擦角水上较水下平均值高;慢剪强度指标水上、水下样品的差异较大,主要表现在粘聚力的差异,水上较水下高约1倍,分析认为与坝体土的湿陷软化有关。

(2) 坝体土的抗剪强度试验成果总的统计规律表现为:水上部分强度高于水下部分,慢剪指标高于饱和快剪。

(3) 坝体土水上部分的变异性较水下部分大,饱和快剪的变异性较慢剪大。说明坝体土的含水量及直剪试验方法

对试验的结果都有影响。小值平均值一般接近标准值或略小于标准值,作为抗剪强度的标准值是可信的。

(4) 同一种土体,采用不同的试验方法得到的试验结果有时差别会很大,加之水上水下的抗剪试验指标值相差较大,因此应充分考虑不同指标对应的排水固结条件,选取适合工程实际工作状态的试验方法和正确的分析方法,确保获取可信的抗剪试验指标值,从而避免因误用土的抗剪强度指标造成工程事故。

参考文献

[1] GB 50487-2008, 水利水电工程地质勘察规范[S].
[2] GB50021-2001, 岩土工程勘察规范[S].
[3] SL55-2005, 中小型水利水电工程地质勘察规范[S].
[4] GB/T50123-2019, 土工试验方法标准[S].
[5] 西咸新区百顷沟水库除险加固工程地质勘察报告[R]. 咸阳: 陕西省水电勘察分院. 2019.
[6] 西咸新区李子沟水库提升改造工程初设报告[R]. 咸阳: 咸阳市水利水电规划勘测设计研究院. 2019.

(上接第238页)

度的影响最大,达0.147,其次是降雨强度,达到0.135,表明其水土流失风险的首要防控因素。LAI是描述植被空间结构性的植被指数,其权重达到0.127,可以发现NDVI的权重小于前者,为0.087,这也说明了LAI在描述水土流失过程中的敏感性高于NDVI。其他因子的权重依次为:坡度坡长(0.117) > 降雨集中性(0.099) > 降雨量(0.096) > 地形曲率(0.073) > SAVI(0.065)。

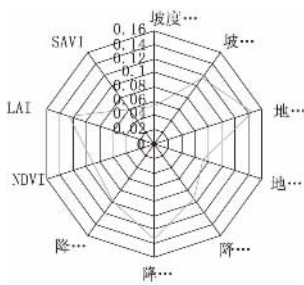


图4 水土流失风险风险指标因子的权重

2.2 水土流失风险评价与区划

依据前述熵权综合指数模型得到研究区水土流失风险综合指数空间分布(图5)。统计显示,30 m像素条件下区域水土流失风险指数介于数介于0.29~0.87之间,其空间平均值为0.52,变异系数达63.54%,表明研究区水土流失风险极具空间差异性。

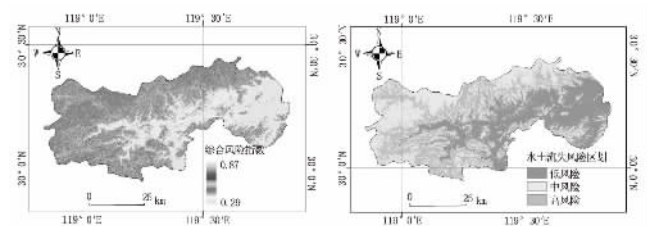


图5 水土流失风险风险综合指数与风险区划

为更好地地区分研究区水土流失风险强度差异,采用自然裂点法按照风险综合指数将其划分为3个等级:低风险,中

度风险和高风险。基于 ArcGIS 平台的几何统计工具,计算得到各风险强度所占面积依次为:低风险(43.37%),中风险(29.75%) 高风险(26.88%)。可知,该地水土流失风险不甚可观,高风险区域面积约占1/4,且主要分布在稀疏灌丛、耕地等农用地地类,这种地类缺乏人为合理的植被结构培植,长此以往会引起土壤层次结构侵蚀。中度风险地区主要集中在缓坡,局部呈斑点状、空间分布离散,这反映了区域水土流失空间异质性强,需要指出的是这种不连续分布的斑块易受到邻近水土流失风险较高的斑块影响,特别是流失冲刷将剥离土壤引起局部片蚀发育。

3 结语

本研究采用区域气象观测数据与DEM与Sentinel2卫星数据,提取了10个描述水土流失风险的环境因子,运用熵权综合指数法建立水土流失风险综合评价模型,并利用GIS技术对风险要素、风险综合指数进行空间可视化,结果表明:区内地形差异引起水热资源、植被等环境要素空间变异性较大,提取的水土流失风险因子亦存在空间分布不均衡;熵权法客观识别了区域水土流失风险因子重要性,熵权信息显示,地形湿度、降雨强度的权重较大,分别为0.147、0.135,是区域水土流失质量需要防范的首要风险因素。区域水土流失风险综合指数极具空间差异性,全区属于低风险、中风险、高风险的区域分别占43.37%、29.75%、26.88%。本研究运用GIS技术与多元统计分析方法,将水土流失风险因子与综合风险指数进行空间可视化表达,该过程可操作性强,可为区域水土流失治理与风险防御提供技术参考。

参考文献

[1] 徐萍. 基于GIS和RULSE模型对龙江县的水土流失敏感性分析[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报. 2019. 35(03): 101-105.
[2] 钱庆欢,白晓永,周德全,等. 基于RULSE模型的北盘江流域土壤侵蚀研究[J]. 人民珠江. 2018. 39(02): 19-25.
[3] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning[J]. Agriculture Handbook. 1978.