

## 会东县大弯腰树电站取水枢纽区

### ——过坝公路边坡土层抗剪指标试验参数与反演参数对比研究

胡军

四川清和水利水电工程设计有限公司, 四川 成都 610000

[摘要] 通过对土质边坡饱和黏土室内直剪试验, 按照相关规范进行取值, 然后在直剪试验饱和抗剪指标范围值的基础上, 通过边坡稳定反演分析, 做内聚力与内摩擦角的敏感性分析, 先确定敏感性较弱的内聚力, 然后反演出内摩擦角。通过对两种成果的对比, 最终确定饱和黏土的抗剪指标。

[关键词] 黏土; 室内试验成果; 直剪; 反演; 对比研究; 抗剪指标。

DOI: 10.33142/hst.v5i4.6605

中图分类号: TU457

文献标识码: A

## Water Intake Hub Area of Dawanyaoshu Hydropower Station in Huidong County ——Comparative Study on Test Parameters and Inversion Parameters of Soil Shear Resistance Index of Dam Crossing Highway Slope

HU Jun

Sichuan Qinghe Water Resources and Hydropower Engineering Design Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

**Abstract:** Through the indoor direct shear test of saturated clay of soil slope, the value is taken according to relevant specifications, and then based on the range value of saturated shear resistance index of direct shear test, the sensitivity analysis of cohesion and internal friction angle is carried out through the inverse analysis of slope stability. Firstly, the cohesion with weak sensitivity is determined, and then the internal friction angle is inverted. Through the comparison of the two results, the shear resistance index of saturated clay is finally determined.

**Keywords:** clay; indoor test results; direct shear; inversion; comparative study; shear resistance index

### 1 工程概况

大弯腰树水电站位于四川省会东县境内, 是鲹鱼河干流水电规划“一库四级”电站中的第三级电站。电站取水枢纽距会东县城公路距离为 8.5km, 闸址最大坝高 16.5m, 正常蓄水位 1644.00m, 总库容 84.8 万 m<sup>3</sup>。该电站装机容量 54MW。取水枢纽区过坝公路位于右坝肩, 为会淌公路大弯腰树电站取水枢纽区改建段, 路面宽度 9m, 改建段长度 706.31m。



图 1 过坝公路开挖面



图 2 黏土坡面

过坝公路于 2021 年 12 月份临时边坡开挖施工, 受限于征地等因素, 开挖坡比较陡, 均为 1: 0.5, 开挖面高度 10~15m。根据开挖揭示, 该边坡按照组成物质分类, 分为上游侧的岩质边坡(白云岩)和下游侧的土质边坡(黏土), 详见图 1 和图 2。由于土质边坡坡度较陡, 作为永

久性边坡需要进行支护, 本次主要通过开挖边坡土层室内试验成果与土坡反演土层抗剪指标进行对比, 综合确定黏土的抗剪指标参数, 为设计提供可靠的边坡支护地质依据。

### 2 黏土野外特征

根据现场勘察, 黏土呈红色、黄褐色, 其成因为第四系全新统坡残积堆积, 从开挖坡面目估, 块、碎石粗粒含量约 5~20%, 粒径一般 10~30cm, 个别达 50cm, 块、碎石分布极不均匀, 岩性为白云岩, 弱风化, 棱角状; 其余为细粒土。黏土典型特征为天然状态下呈硬塑~坚硬, 边坡开挖时比普通黏土困难得多(见图 3), 该土层中含有少量的钙质结核。此外, 该黏土中裂隙较为发育(见图 4)。



图 3 坚硬的黏土



图 4 黏土中的裂隙

### 3 室内试验成果分析

本次于 2022 年 1 月 13 日从野外坡面共取了 9 组土样

进行室内试验，由于该土层中块、碎石含量较低，不足25%，其对该土层整体的力学性质影响不大<sup>[1]</sup>，因此本次采取主要不含块、碎石的黏土样品。其成果如下：

### 3.1 试验成果

#### 3.1.1 级配特征

本次在开挖坡面取样3组扰动土样进行筛分试验，其成果见表1。

**表1 黏土筛分成果表**

样品编号	各粒径 (mm) 百分含量 (%)						
	2.0~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	<0.005
TY01	2.5	2.3	5.5	9.6	6.3	10.6	63.2
TY02	1.4	4.6	3.2	5.8	11.4	16.1	57.5
TY03	0	2.1	6.7	6.9	7.4	12.1	64.8
平均值	1.3	3.0	5.1	7.4	8.4	12.9	61.8

从筛分成果表可看出，黏土样品黏粒含量57.5~64.8%，平均值为61.8%，含量较高，粉粒含量26.4~33.3%，平均值为28.7%，砂粒含量8.8~10.3%，平均值为9.4%，含量较低。

#### 3.1.2 物理力学特征

本次取样为开挖坡面取样，先用刀剥离受开挖施工影响的扰动土体，取6组原状土样（或扰动较小的土样）进行室内试验，其成果见表2。

从室内常规物理力学性质试验成果表可看出，粉质黏土样品天然含水率32.2~34.6%，含量较高；孔隙比较大，

达到0.941~0.980；饱和度高，达到94.10~98.53%；土粒比重2.77~2.79，数据较普通黏土大得多；液限、塑性及塑性指数均较大，液性指数较小，显示出土体主要呈坚硬状态，少部分呈硬塑状态；抗剪强度指标中内摩擦角普遍较小，粘聚力普遍较大；压缩模量较大，土层属中等压缩性土。从6组样品各指标数据离散性较小来看，该边坡黏土可以归为同一类型土。根据筛分试验成果、室内物理力学试验成果，结合黏土野外特征，该黏土显示出碳酸盐岩地区红黏土的典型的黏粒含量高、含水率高、孔隙比较大、塑性高、塑性指数高、液性指数低、天然土硬度大、力学性质较好，且土层中裂隙发育的特征<sup>[2]</sup>。因此判断，该黏土为红黏土。

### 3.2 抗剪指标分析

本次主要研究边坡土饱和状态下的抗剪指标，根据《水电水利工程边坡设计规范 DL-T 5353-2006》附录G2.1.1规定，抗剪强度指标标准值应取试验资料的小值平均值<sup>[3]</sup>，即饱和状态下，黏土的内摩擦角 $\phi$ 取 $12.1^\circ$ ，粘聚力C取75.0kPa。与边坡稳定计算相关的参数饱和重度取平均值 $18.7\text{kN/m}^3$ 。

### 4 土坡反演成果分析

由于试验成果受取样（尤其是原状土样）影响较大，不能完全反映土层抗剪强度的实际情况，因此本次采用土坡稳定性反演分析来复核其参数。过坝公路边坡坡脚处原会淌公路已经修建多年，经历过很多次雨季持续性集中暴雨，边坡未出现过变形迹象；目前改建公路于2021年12月底开挖完成，截止日前（2022年4月17日），经历过数次持续

**表2 黏土室内常规物理力学性质试验成果表**

试样编号	取样深度	含水率	密度		孔隙比	饱和度	土粒比重	液限	塑限	塑性指数	液性指数	天然快剪 (Q快剪)		饱和快剪 (Q快剪)		固结试验
			天然密度	饱和密度								凝聚力	内摩擦角	凝聚力	内摩擦角	
			$\rho$	$\rho_d$								C	$\phi$	C	$\phi$	
土样编号	m	$\omega$	$\rho$	$\rho_d$	e	$S_r$	$G_s$	$\omega_L$	$\omega_p$	$I_p$	$I_L$	C	$\phi$	C	$\phi$	$E_s$
		%	$\text{g/cm}^3$	$\text{g/cm}^3$		%		%	%			kPa	( $^\circ$ )	kPa	( $^\circ$ )	MPa
TY04	1.6	34.6	1.89	1.90	0.973	98.53	2.77	62.3	35.7	26.6	-0.04	79.5	13.3	77.4	13.2	11.2
TY05	3.2	32.9	1.91	1.92	0.941	97.51	2.79	57.5	33.6	23.9	-0.03	86.1	11.5	83.5	11.2	10.1
TY06	4.7	32.2	1.88	1.91	0.948	94.10	2.77	56.1	34.7	21.4	-0.12	78.4	13.7	76.8	13.1	10.5
TY07	6.3	34.6	1.89	1.90	0.980	98.17	2.78	62.4	35.1	27.3	-0.02	81.3	13.1	80.8	12.9	9.9
TY08	7.8	33.3	1.87	1.90	0.975	94.65	2.77	55.8	34.2	21.6	-0.04	75.0	14.5	71.3	13.8	10.2
TY09	9.1	32.7	1.89	1.91	0.952	95.50	2.78	60.5	32.5	28.0	0.01	77.7	13.7	74.5	13.3	10.6
组数		6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
最小值		32.2	1.87	1.90	0.941	94.10	2.77	55.8	32.5	21.4	-0.12	75.0	11.5	71.3	11.2	9.9
最大值		34.6	1.91	1.92	0.980	98.53	2.79	62.4	35.7	28.0	0.01	86.1	14.5	83.5	13.8	11.2
平均值		33.4	1.89	1.91	0.961	96.41	2.78	59.1	34.3	24.8	-0.04	79.3	13.3	77.4	12.9	10.4
小值平均值		32.8	1.88	1.90	0.947	94.75	2.78	56.5	33.4	22.3	-0.07	77.0	12.6	75.0	12.1	10.1
大值平均值		34.6	1.90	1.91	0.976	98.07	2.78	61.7	35.2	27.3	-0.02	81.6	13.8	80.6	13.3	10.8

性小雨,天然土原本饱和度已经非常高(平均值为96.41%),在持续性小雨的影响下,能够达到完全饱和,但边坡未见变形迹象。因此本次反演分析采用饱和土体进行计算。

#### 4.1 计算模型

过坝公路边坡属黏性土边坡,由于本次拟通过反演分析来复核土层的抗剪参数,故本次采用相对严谨的简布法来进行反演计算。本文采用 Slide 软件进行建模计算,选取的计算剖面为过坝公路桩号 K0+376m 处地质剖面(见图 5)。由于该边坡地下水埋深较深,因此不考虑地下水情况。不考虑地震加载情况。

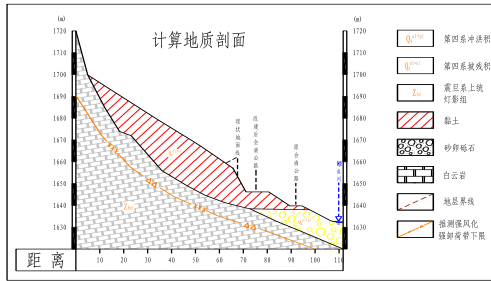


图 5 计算地质剖面

#### 4.2 土层计算参数及敏感性分析

从室内试验成果可知,黏土饱和容重为  $18.7\text{kN/m}^3$ ,抗剪指标中,粘聚力  $C$  值的范围为  $71.3\sim 83.5\text{kPa}$ ,内摩擦角  $\Phi$  值的范围为  $11.2\sim 13.5^\circ$ 。故本次敏感性分析计算的数据选择饱和黏土的内摩擦角  $\Phi$  值分列 5 组,分别为  $11.2^\circ$ 、 $11.8^\circ$ 、 $12.4^\circ$ 、 $13.0^\circ$  和  $13.5^\circ$ ,粘聚力  $C$  值分列 8 组,分别为  $71\text{kPa}$ 、 $73\text{kPa}$ 、 $75\text{kPa}$ 、 $77\text{kPa}$ 、 $79\text{kPa}$ 、 $81\text{kPa}$ 、 $83\text{kPa}$  和  $85\text{kPa}$ 。同时说明,由于原状土样品受取样影响,一般情况下,粘聚力  $C$  试验值往往比实际情况偏小,故本次将粘聚力  $C$  值的敏感性分析扩大至  $85\text{kPa}$ 。敏感性计算结果如下表 5。

从图 6 和图 7 可以看出,黏土的粘聚力  $C$  值和内摩擦角  $\Phi$  值对边坡稳定系数  $F_s$  影响均较大,但图 7 中线条斜率明显大于图 6,说明内摩擦角  $\Phi$  值对稳定系数  $F_s$  影响更显著,内摩擦角  $\Phi$  值对稳定系数  $F_s$  敏感性相对较强。

表 3 计算成果表

内摩擦角 ( $^\circ$ )	11.2	11.8	12.4	13	13.5
粘聚力 kPa	Fs (简布法)				
71	0.999	1.015	1.027	1.041	1.055
73	1.019	1.030	1.044	1.061	1.073
75	1.033	1.050	1.064	1.078	1.090
77	1.053	1.068	1.082	1.096	1.108
79	1.071	1.083	1.097	1.112	1.123
81	1.087	1.101	1.115	1.129	1.141
83	1.104	1.118	1.132	1.146	1.158
85	1.121	1.135	1.149	1.164	1.175

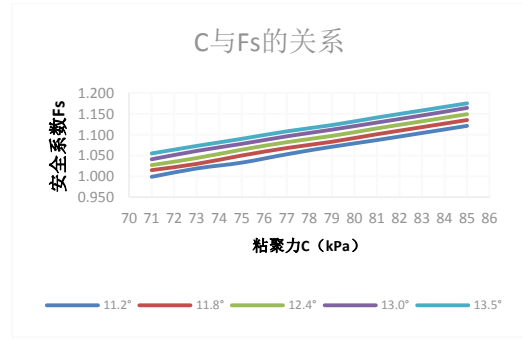


图 6 C 值与安全系数  $F_s$  的关系

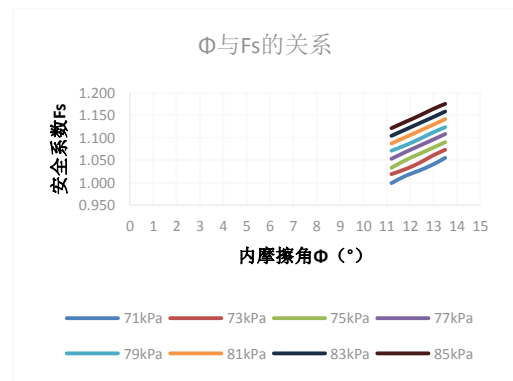


图 7  $\Phi$  值与安全系数  $F_s$  的关系

#### 4.3 反演成果

反演分析中,考虑到坡脚经过两次的公路修建开挖,虽然现状仍然稳定,未见变形迹象,但相比原状边坡安全系数已经有所下降。根据《水电水利工程边坡工程地质勘察技术规程》(DLT 5337-2006)中 7.2.2“反分析中稳定系数  $F_s$  的取值建议:蠕动挤压阶段宜采用  $F_s=1.0\sim 1.05$ ”<sup>[3]</sup>以及《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864-2016)中表 7 规定<sup>[4]</sup>(详见下表 4),结合本工程边坡实际情况,本次安全系数  $F_s$  取 1.05。根据敏感性分析,粘聚力  $C$  值对稳定系数  $F_s$  敏感性相对较弱,因此反演分析计算先确定粘聚力  $C$  值。

表 4 安全系数与稳定状态关系表

滑坡稳定系数 $F_s$	$F_s < 1.00$	$1.00 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < 1.15$	$F_s \geq 1.15$
滑坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

本工程室内试验成果推荐饱和黏土粘聚力  $C$  值为  $75\text{kPa}$ ,鉴于土样完全不受扰动的可能性很小,因此本次反演计算将粘聚力  $C$  值提高一档至  $77\text{kPa}$ 。将相关参数输入 Slide 后,反算得内摩擦角  $\Phi$  值为  $11.1^\circ$ 。即反演求得饱和黏土抗剪强度指标为(粘聚力  $C=77\text{kPa}$ ,内摩擦角  $\Phi=11.1^\circ$ )。

#### 5 对比分析及抗剪指标确定

对于试验成果推荐抗剪指标参数(粘聚力  $C=75\text{kPa}$ ,

内摩擦角 $\Phi$ 值 $=12.1^\circ$ )而言,考虑到边坡试验取样点的数量较少,样品代表性等缺陷,同时原状土样品不可避免会受到一定程度地取样扰动影响,试样样品土层结构受到减弱,抗剪强度试验值可能偏低,尤其是粘聚力。故根据试验成果而来的饱和黏土抗剪强度指标存在偏小的可能性,尤其是粘聚力偏小的可能性较大。

对于反演分析抗剪指标参数(粘聚力 $C=77\text{kPa}$ ,内摩擦角 $\Phi$ 值 $=11.1^\circ$ )而言,反演时取的安全系数 $F_s$ 为1.05,由于边坡从未产生过变形迹象,故1.05的取值可能偏小,反演出的饱和黏土抗剪强度指标可能偏小,考虑到安全系数 $F_s$ 对粘聚力的敏感性较弱,对内摩擦角的敏感性较强,故反演参数内摩擦角 $\Phi$ 值偏小的可能性较大。

由于本地区此种类别的黏土分布范围较小,邻近工程资料均未对该土层进行较为详细的研究,故无法采用工程地质类比的方法。本次对试验成果与反演分析成果综合比较后,建议边坡饱和黏土粘聚力取反演成果参数 $77\text{kPa}$ ,内摩擦角取试验成果值与反演成果值的平均值,即 $11.6^\circ$ 。

## 6 结论

本文通过对大弯腰树电站过坝公路土质边坡饱和黏

土抗剪指标试验成果与反演分析成果进行对比分析,认为试验成果值中粘聚力 $C$ 值偏小的可能性较大,反演分析成果中内摩擦角 $\Phi$ 值偏小的可能性较大,建议饱和黏土抗剪指标最终取值:粘聚力 $C$ 值为 $77\text{kPa}$ ,内摩擦角 $\Phi$ 值为 $11.6^\circ$ 。

## [参考文献]

- [1] 李广信,张丙印,于玉贞.土力学(Soil Mechanics Second Edition)第2版[D].北京:清华大学出版社,2013.
  - [2] 杨智毅,杨裕云.工程地质学概论[D].北京:中国地质大学出版社,2012.
  - [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.水电水利工程边坡设计规范:DL-T 5353-2006[S].北京:中华人民共和国电力行业标准,2006:1-2.
  - [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.滑坡防治工程勘察规范:GB/T 32864-2016[S].北京:中华人民共和国电力行业标准,2016:1-2.
- 作者简介:胡军(1987.10-)男,籍贯:四川渠县,学历:本科,大学所学专业:地质工程,目前职称:工程师,主要从事工作内容:水利水电工程地质专业技术,完成过的工程包括、水电站工程、水库工程、堤防工程等。