

亭子口电站结构面抗剪强度试验及成果分析

肖本职

(长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室(重庆中心),重庆 400014)

摘要:亭子口水利枢纽工程坝址区位于红层沉积岩体内,存在较多的各类结构面。通过对21组各类结构面进行原位直剪试验,揭示了各结构面的抗剪强度特性。同时通过算术平均值以及图解2种方法对各类结构面抗剪强度参数分别进行统计,所得到的统计成果总体相近。成果除可供本工程设计取值外,对于其它类似工程也具有较好的参考价值。

关键词:亭子口电站;结构面;抗剪强度;直剪试验

中图分类号:TU45

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2013)11-0043-05

1 工程背景

亭子口电站是嘉陵江干流梯级开发中的控制性枢纽工程,下距四川省苍溪县城15 km,兼具防洪、灌溉、发电、航运等综合效益。枢纽工程主要包括大坝、厂房、升船机及灌渠首部等建筑物。设计为混凝土重力坝,坝顶高程466 m,坝轴线长1 108 m,最大坝高110 m^[1]。

亭子口电站坝址出露地层为白垩系下统苍溪组砂岩、粉砂岩、黏土岩,总厚度480 m,为软硬相间不等厚的红层岩体,岩体中分布有软弱夹层。坝区下卧基岩为砂岩与泥岩软硬相间的互层岩体,相变频繁,坝基岩体以砂岩为主。在坝轴线左岸坝肩部位存在一古滑坡堆积体——大圆包崩滑体。该崩滑体体积较大,土体厚度较深,目前处于整体稳定状态,仅前缘局部在暴雨时有少量滑移^[1]。

亭子口电站工程勘察设计中将主要面临4大岩土力学问题,即坝基抗滑稳定问题、变形稳定问题、高边坡稳定问题以及大圆包崩滑体的处理与利用问题^[2]。根据工程中需要解决的岩土力学问题,针对坝址区接露出的各种岩性及地质特征,对亭子口水利枢纽坝址区展开了一系列工程岩石(土)的物理力学性试验研究。在上述主要的4个岩土力学问题中,各类结构面的抗剪特性直接涉及到坝基抗滑稳定问题、高边坡稳定问题以及大圆包崩滑体的处理

与利用问题。因此,各类结构面的抗剪特性参数是该枢纽工程的关键性参数。

亭子口电站坝址区主要存在且应重点关注的结构面有:①岩体层面;②Ⅱ类夹层(软弱夹层),夹层主要为紫红色黏土岩,薄层状,厚2~5 cm,局部泥化;③Ⅲ类夹层(泥化夹层),夹层主要为紫红色黏土岩,部分含灰绿色,薄层状,厚2~5 cm,夹层面泥膜连续;④大圆包崩滑体原滑面。

针对上述各类结构面,从预可研阶段到技术施工设计阶段,共对21组各类结构面进行了原位直剪试验。

2 试验方法

对于岩体结构面,试验按照行业标准《水利水电工程岩石试验规程》(SL264—2001)^[3]执行。根据平洞揭露的情况,沿结构面走向开挖试验支洞。开挖试验支洞时,其底板高出结构面50~60 cm,并打防震孔,减少爆破开挖对结构面的扰动。用人工制成长50 cm×宽50 cm×高35 cm的方形试体,剪切面积2 500 cm²左右,在剪切面预留2 cm,留出预剪口,立模并充填高强水泥砂浆。安装法向和切向加荷系统及测量系统进行直剪试验。试验采用平推法,法向应力垂直作用于结构面,试验最大法向应力按照工程设计应力的1.2倍施加,但以不破坏结构面性状为原则按等差级数分别施加于各个试体上。试

验时,先对每个试体分 3 级施加预定法向应力且达到相对稳定后,再施加剪切应力。剪应力顺结构面倾向而平行作用于结构面,且与法向应力垂直正交于剪切面中心。先进行抗剪断试验,然后在相同法向应力作用下进行剪切(摩擦)试验。在整个试验过程中,始终保持法向应力不变。试验结束后,翻开试体进行地质描述和照像,描述结构面的性状,充填物的性质、厚度、泥化程度及量测剪切面的起伏差、确定有效剪切面积。

对于大圆包崩滑体滑面,试验按照《土工试验规程》(SL237—1999)^[4]执行。试验分别在勘探平洞、勘探竖井以及地表探槽内进行。剪切面积为 2 500 cm² 左右。在人工修整好的试体周边套上剪切盒,剪切盒与试样之间的小缝隙填充土体。试验采用平推法,剪切应力方向与滑坡推力方向一致。施加法向压力后,让土体在此压力下进行压缩。当压缩变形达到相对稳定后,架设测试水平位移的百分表,并施加剪切应力。在整个剪切试验过程中,始终保持法向压力不变,最大垂直压力按滑体上覆自重考虑。试验结束后,翻开试体进行地质描述,描述土体的性状及成份,并量测剪切面的起伏差、确定有效剪切面积。

3 试验成果

3.1 成果整理方法

根据实测最大剪应力荷载值(峰值)、所施加正应力荷载值以及实测有效剪切面积,分别按式(1)、式(2)计算各试点法向应力和剪应力。

$$\sigma = \frac{p_1}{A} ; \quad (1)$$

$$\tau = \frac{p_2}{A} 。 \quad (2)$$

式中: σ 为作用于剪切面上的法向应力(MPa); τ 为作用于剪切面上的剪应力(MPa); p_1, p_2 为作用于剪切面上的法向和切向载荷(N); A 为有效剪切面面积(mm²)。

在 $\tau - \sigma$ 坐标系内绘制法向应力与剪应力强度关系曲线,建立库仑方程,即

$$\tau = f\sigma + c 。 \quad (3)$$

根据库仑方程(3)确定其直剪强度参数值。

3.2 试验成果整理

亭子口电站坝址区共完成各类结构面、滑面抗剪试验 21 组,历时 10 余年。其中坝址区各类岩体

结构面 16 组,大圆包崩滑体滑面 5 组。在坝址区所完成的 16 组结构面直剪试验中,岩体层面 7 组;Ⅱ类夹层 3 组;Ⅲ类夹层 6 组。由于亭子口电站坝址区下卧基岩为白垩系下统苍溪组砂岩、粉砂岩、黏土岩互层岩体,软硬相间,相变频繁。因此岩体层面包括了岩屑砂岩/黏土岩、长石砂岩/黏土岩、长石砂岩/泥质粉砂岩、粉砂岩/黏土岩以及它们之间的上下盘互换等。为了便于统计分析,又将岩体层面总体划分为硬岩/软岩和软岩/软岩 2 个类别。硬岩/软岩共进行了 5 组直剪试验,软岩/软岩共进行了 2 组直剪试验。

由于亭子口电站现场岩石力学试验跨越了该项目建设过程的各个阶段,试验成果分散于各个阶段的试验报告中,将文献[5-8]中岩体结构面试验成果统计得到表 1,将文献[5]和文献[9]中大圆包崩滑体滑面试验成果统计得到表 2。各类结构面直线试验成果算术平均统计结果见表 3,作图法统计结果见表 4。

4 分析及结语

表 1、表 2 客观真实地反映了亭子口电站坝址区各结构面直剪试验的原貌,具有较好的代表性,同时也具有一定的离散性^[10]。为了较全面地了解亭子口电站坝址区各类结构面的抗剪强度特性,需对各类结构面试验成果作一个再统计再分析。

对于抗剪强度参数 f, c 值,有 2 种统计方法。一种是将 f 和 c 值分别进行直接算术平均(算术平均值法)^[11]。另一种方法是得到每一个 f, c 值的所有法向应力与剪应力峰值点重新建立库仑方程,再根据新的库仑方程式(3)确定直剪强度综合参数值(作图法)。

用第一种方法(算术平均值法)统计表 1、表 2 得到表 3。用第二种方法(作图法)统计表 1、表 2 得到表 4。表 3 和表 4 存在一定差异,但总体上相近,都较好地反映出了各类结构面的抗剪强度特性。

通过表 1、表 2 较全面较详细地了解了各结构面的抗剪强度特性后,再通过表 3 或者表 4 或者结合表 3 及表 4,即可进行各类结构面抗剪强度参数的地质建议值(或设计采用值)取值。由于影响结构面抗剪强度的因素很多而且复杂,在进行设计取值时还必须结合其它因素进行综合考虑^[12],包括:建筑物等级、试验成果的地质代表性、试验及资料整理过程中的影响因素、工程类比情况等。

表 1 岩体结构面直剪试验成果
Table 1 Results of direct shear tests on structural planes

序号	坝线	试验编组	试验平洞号 或位置	结构面特性	直剪强度参数				简要地质描述	试验阶段/年份
					抗剪断		抗剪(摩擦)			
					f'	c'/MPa	f	c/MPa		
1	II - II 坝线	$\tau\text{D2} - 2$	PD2	岩屑砂岩/ 黏土岩	0.63	0.55	0.58	0.45	层面明显、较平整	预可研/ 1994
2	VIII - VIII 坝线	$\tau\text{I1} - 3$	PD11	长石石英砂 岩/黏土岩	0.57	0.14	0.53	0.10	沿长石石英砂岩与黏土岩接触面破坏,剪切面较平整,起伏差一般 0.5 ~ 1 cm,最大 1 ~ 3 cm	可研/ 2007
3	VIII - VIII 坝线	$\tau\text{I5}(2) - 3$	PD15	砂岩/泥质 粉砂岩	0.59	0.40	0.52	0.17	在上盘砂岩与下盘黏土质粉砂岩见有一层 2 ~ 3 cm 厚灰绿色黏土岩,基本沿该灰绿色层剪切破坏。起伏差一般 4 ~ 5 cm,1# 样达 10 cm	可研/ 2007
4	II - II 坝线	τXLC1	左岸厂房 消力池 反坡段 (K_{1c}^{2-2} 层)	泥质粉砂 岩/砂岩	0.84	0.51	0.73	0.08	上盘岩性为褐红色泥质粉砂岩,含较多灰绿色团块及条带。岩石微新,完整性较好,含少量短小微裂隙,下盘为新鲜完整岩屑砂岩。沿层面剪切破坏,剪切面较平整,见灰绿色团块,起伏差约 0.5 ~ 3 cm,个别样剪切面上见新鲜岩石断面,起伏差 3 ~ 5 cm	技设/ 2010
5		τXLC2		泥质粉砂 岩/砂岩	0.80	0.46	0.61	0.18		
6	II - II 坝线	τD1	PD1	粉砂岩/ 黏土岩	0.49	0.26	0.48	0.24	层面明显、较平整	预可研/ 1994
7	VIII - VIII 坝线	$\tau\text{I5}(1) - 3$	PD15	黏土岩/ 粉砂岩	0.50	0.10	0.48	0.08	沿黏土岩与粉砂岩接触面破坏,剪切面平整,起伏差一般 0.5 ~ 1 cm,最大 1.5 cm	可研/ 2007
8	II - II 坝线	τJ13	PD1	泥化夹层 J13 (II 类)	0.40	0.17	0.38	0.15	上盘为褐红色粉砂岩,下盘为紫红色黏土岩,夹层内充填泥厚 1 ~ 3 mm,夹层为波浪状,不连续	预可研/ 1994
9	II - II 坝线	$\tau\text{I} - 3$	PD1	破碎夹泥层 (II 类)	0.40	0.19	0.36	0.14	上盘 2 个样为粉砂岩,4 个样为砂岩,下盘均为粉砂岩。沿夹层剪切破坏,夹层为紫红色黏土岩,薄层状,厚 2 ~ 5 cm,局部泥化,且有 1 mm 厚泥膜,擦痕明显	可研/ 2006
10	II - II 坝线	$\tau\text{7} - 3$	PD7	破碎夹泥层 (II 类)	0.39	0.19	0.38	0.17	上盘为岩屑砂岩,下盘为粉砂岩。沿夹层剪切破坏,夹层为紫红色黏土岩,薄层状,厚 2 ~ 4 cm,局部泥化,且有 2 ~ 3 mm 厚泥膜。见擦痕	可研/ 2006
11	VIII - VIII 坝线	$\tau\text{DK3} - 1$	DK3 (室内中剪)	泥化夹层 (III 类)	0.31	0.12	0.29	0.09	试样取自 DK3 大口径钻孔孔深 37.23 m 处,上盘为褐红色粉砂岩,下盘为紫红色黏土岩,夹层内充填泥厚 3 ~ 5 mm,层面较平整	预可研/ 1994
12	II - II 坝线	$\tau\text{DJ1} - 3$	DJ1 下层支洞 (K_{1c}^{2-2} 层中)	泥化夹层 (III 类)	0.32	0.04	0.30	0.03	上下盘均为泥质粉砂岩,局部含绿色团块。沿夹层剪切破坏,夹层为紫红色砂质黏土岩,薄层状,厚 0.5 ~ 2.5 mm,且泥化。剪切面较平整光滑	可研/ 2006
13	VIII - VIII 坝线	$\tau\text{8} - 3$	PD8	泥化夹层 (III 类)	0.34	0.07	0.32	0.05	上盘为黏土质粉砂岩,下盘为灰白色长石石英砂岩。夹层物质为 2 ~ 5 cm 厚的紫红色黏土岩,含少许绿色团块,附 1 ~ 3 mm 厚泥膜。破坏后,剪切面较光滑,见擦痕	可研/ 2007
14	VIII - VIII 坝线	$\tau\text{9} - 3$	PD9	泥化夹层 (III 类)	0.32	0.05	0.31	0.03	上下盘均为灰白色长石石英砂岩,夹层物质为 1 ~ 3 cm 厚的褐红色黏土岩,泥膜厚 2 ~ 3 mm。破坏后,剪切面较光滑,局部见擦痕	可研/ 2007
15	VIII - VIII 坝线	$\tau\text{I5}(3) - 3$	PD15	泥化夹层 (III 类)	0.29	0.04	0.28	0.03	上盘为粉砂岩,下盘为黏土岩。泥厚 1 ~ 3 mm。剪切面平整、光滑,有擦痕	可研/ 2007
16	II - II 坝线	τCC	34#—35#坝 块齿槽 上游侧	JS2 - 1 - 2 泥化夹层 (III 类)	0.26	0.07	0.22	0.06	JS2 - 1 - 2 为深灰色砂质黏土岩挤压破碎夹泥层,夹层厚约 2 ~ 5 cm,泥化物厚约 1 ~ 5 mm,泥连续,夹层性状差。剪切面沿夹层剪坏,面平直,见擦痕	技设/ 2010

表 2 大圆包崩滑体滑面直剪试验成果

Table 2 Results of direct shear tests on the slip surface of Dayuanbao slide mass

试验编组	试验位置	结构面特性	抗剪断直剪强度参数		简要地质描述	试验阶段/年份
			f'	c'/MPa		
$\tau 7-4$	PD7	滑面	0.25	0.030	上盘为紫色或黄色黏土,下盘为基岩面,基岩面上部滑面物质为黄色黏土层,厚 1~2cm,软塑状,剪断后,剪切面较平整光滑,起伏差 0~3 mm	
$\tau \text{SJ}6-4$	SJ6	滑面	0.38	0.020	上盘为黏土岩破碎带及黄泥,下盘为基岩面,滑面为绿色条带,厚 5~7 cm,主要成份为小碎石、砂及黏土,起伏差 2~3cm	可研/2006
$\tau \text{SJ}7-4$	SJ7	滑面	0.19	0.010	上盘为土体,下盘为基岩面,滑面为绿色条带及黄色泥膜,泥膜厚 1 mm,软塑状,剪切面光滑平整,近似镜面	
$\tau \text{TC}1$	探槽 (距 PD7 较近)	滑面	0.24	0.022	上盘为紫色或黄色黏土,下盘为基岩面,基岩面上部滑面物质为黄色黏土层,厚 1~2 cm,软塑状,剪断后,均有不同程度的擦痕,剪切面较平整光滑,起伏差 0~2 mm	可研/2009
$\tau \text{TC}2$		滑面	0.25	0.029	上盘为紫色或黄色黏土,下盘为基岩面,基岩面上部滑面物质为黄色黏土层,厚 1~2 cm,软塑状,剪断后,均有不同程度的擦痕,剪切面较平整光滑,起伏差 0~4 mm	

表 3 各类结构面直剪试验成果算术平均统计结果

Table 3 Statistics of direct shear test results of structural planes by means of arithmetic mean value

结构面类型	直剪强度参数			
	抗剪断		抗剪(摩擦)	
	f'	c'/MPa	f	c/MPa
硬岩/软岩	0.57~0.84 0.69(5)	0.14~0.55 0.41(5)	0.52~0.73 0.59(5)	0.08~0.45 0.20(5)
软岩/软岩	0.49~0.50 0.50(2)	0.10~0.26 0.18(2)	0.48~0.48 0.48(2)	0.08~0.24 0.16(2)
Ⅱ类夹层	0.39~0.40 0.40(3)	0.17~0.19 0.18(3)	0.36~0.38 0.37(3)	0.14~0.17 0.15(3)
Ⅲ类夹层	0.26~0.34 0.31(6)	0.04~0.12 0.065(6)	0.22~0.32 0.29(6)	0.03~0.09 0.048(6)
大圆包崩滑体滑面	0.19~0.38 0.26(5)	0.01~0.03 0.022(5)		

注:横线上为范围值,横线下为均值,括号内为样本数。

表 4 各类结构面试验成果作图法统计结果

Table 4 Statistics of direct shear test results of structural planes by means of diagrams

结构面类型	直剪强度参数			
	抗剪断		抗剪(摩擦)	
	f'	c'/MPa	f	c/MPa
硬岩/软岩	0.69	0.40	0.56	0.25
软岩/软岩	0.51	0.15	0.49	0.15
Ⅱ类夹层	0.40	0.19	0.36	0.15
Ⅲ类夹层	0.32	0.07	0.30	0.05
大圆包滑面	0.25	0.024		

参考文献:

[1] 长江水利委员会. 嘉陵江亭子口水力枢纽可行性研究报告——工程地质[R]. 武汉:长江水利委员会, 1995. (Changjiang Water Resources Commission. Report on the Feasibility of Tingzikou Hydraulic Project on Jialing River: Engineering Geology[R]. Wuhan: Changjiang Water Resources Commission, 1995. (in Chinese))

[2] 何沛田,肖本职,吴相超. 嘉陵江亭子口水力枢纽岩石力学试验研究综合报告[R]. 武汉:长江科学院, 2007. (HE Pei-tian, XIAO Ben-zhi, WU Xiang-chao.

Comprehensive Report on Rock Mechanics Tests for Tingzikou Hydraulic Project in Jialing River [R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2007. (in Chinese))

[3] SL264—2001, 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,2001. (SL264—2001, Specification for Rock Tests in Water Conservancy and Hydroelectric Power Engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001. (in Chinese))

[4] SL237—1999, 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999. (SL237—1999, Specification of Soil Test[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese))

[5] 肖本职,何沛田,刘将忠. 嘉陵江亭子口水力枢纽初步设计阶段岩石力学试验研究报告(一)[R]. 武汉:长江科学院,2006. (XIAO Ben-zhi, HE Pei-tian, LIU Jiang-zhong. Research Report of Rock Mechanics Tests for Tingzikou Hydraulic Project on Jialing River in Conceptual Design Stage (1) [R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2006. (in Chinese))

[6] 肖本职,何沛田,刘将忠. 嘉陵江亭子口水力枢纽初步设计阶段岩石力学试验研究报告(二)[R]. 武汉:长江科学院,2007. (XIAO Ben-zhi, HE Pei-tian, LIU Jiang-zhong. Research Report of Rock Mechanics Tests for Tingzikou Hydraulic Project on Jialing River in Conceptual Design Stage (2) [R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2007. (in Chinese))

[7] 肖本职,何沛田,刘将忠. 嘉陵江亭子口水力枢纽初步设计阶段岩石力学补充试验报告[R]. 武汉:长江科学院,2008. (XIAO Ben-zhi, HE Pei-tian, LIU Jiang-zhong. Supplementary Report of Rock Mechanics Tests for Tingzikou Hydraulic Project on Jialing River in Conceptual Design Stage [R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2008. (in Chinese))

[8] 郭喜峰,刘将忠. 亭子口水力枢纽技施设计阶段坝区岩体结构面原位直剪试验研究报告[R]. 武汉:长江科学院,2011. (GUO Xi-feng, LIU Jiang-zhong. Research Report of In-situ Shearing Tests for Structural Plane in Dam Site of Tingzikou Power Station in Detailed Design Stage [R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2011. (in Chinese))

[9] 肖本职,刘将忠. 嘉陵江亭子口水力枢纽大圆包崩滑

体滑面抗剪补充试验报告[R]. 武汉:长江科学院, 2009. (XIAO Ben-zhi, LIU Jiang-zhong. Supplementary Report of Shearing Tests for Slide Planes of Dayuanbao Slide Mass for Tingzikou Hydraulic Project on Jialing River[R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2009. (in Chinese))

[10] 肖本职,何沛田,刘将忠,等. 亭子口水电站大圆包崩滑体滑面抗剪强度参数确定[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(6):1091-1096. (XIAO Ben-zhi, HE Pei-tian, LIU Jiang-zhong, et al. Determination of Shear Strength Parameters of Slide Surface of Dayuanbao Slide Mass at Tingzikou Power Station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2008,4(6):1091-1096. (in Chinese))

[11] 郑颖人,时卫民,刘文平,等. 三峡库区滑坡稳定性分析中几个问题的研究[J]. 重庆建筑,2005,(6):37-

42. (ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, LIU Wen-ping, et al. Study on Some Engineering Problems of Slope Stability Analysis in Three Georges Reservoir Zone [J]. Chongqing Architecture, 2005, (6):37-42. (in Chinese))

[12] 梁俊勋,覃再肯. 南宁市某滑坡的滑动成因及滑面抗剪强度指标的确定[J]. 城市勘测,2006,(2):67-70. (LIANG Jun-xun, QIN Zai-ken. Analyzing the Cause of a Slope Sliding in Nanning City and Determining the Shear Strength Parameters of the Sliding Surface[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2006, (2):67-70. (in Chinese))

(编辑:姜小兰)

Tests and Result Analysis on the Shear Strength of Structural Planes at Tingzikou Hydropower Station

XIAO Ben-zhi

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources (Chongqing Center), Yangtze River Scientific Research Institute, Chongqing 400014, China)

Abstract:The dam site of Tingzikou Power Station is located in red bed sedimentary rocks area, and there are many structural planes in this area. Through in-situ direct shear tests on 21 sets of typical structural planes, the shear strength properties of the structural planes were revealed. Furthermore, statistics of the shear strength parameters were obtained by means of arithmetic mean value and diagram. The statistical results by the two methods are similar in general. The research findings not only serve as the basis for the design of this project, but also could be taken as reference for other similar projects.

Key words:Tingzikou power station; structural plane; shear strength; direct shear tests

~~~~~

(上接第 42 页)

## A Simple Calculation Method for the Normal Water Depth of Tunnel with Egg-shaped Section

TENG Kai

(Qiqihar Municipal Water Affairs Bureau, Qiqihar 161006, China)

**Abstract:**The normal water depth of tunnel with egg-shaped cross-section involves the solution of complex transcendental equations, and it cannot be calculated directly by analytical method. It's redundant and inaccurate to calculate by conventional method of looking-up tables and diagrams which would cause man-made errors. Meanwhile by trial method, the formulas are partitioned and the equations are complicated with heavy work load and low efficiency. In this research, an approximate formula was obtained by optimal fitting in the range of parameters applicable to practical engineering with the minimum standard residual difference as the objective function. The formula is convenient, practical, and simple in expression. Its precision also meets design requirements (maximum error 0.729%). It is of practical promotion significance.

**Key words:**egg-shaped flow section; normal water depth; optimal fitting; approximate calculation