小湾水电站坝址区岩体结构面抗剪强度试验研究

戴培志，李　伟，李融融，王　平，李仕胜，廖建军

（中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院，云南 昆明 650051）

摘　要：小湾水电站坝址区结构面发育，特别是高陡倾角的节理裂隙和Ⅳ级结构面(f、gm)。因结构面强度控制岩体的强度，故研究坝址区各类结构面的抗剪强度具有十分重要的意义。结构面抗剪强度试验制样难度很大，特别是高陡倾角的结构面，在制样过程中要最大限度地减少对岩体的挠动。为此采用了静态爆破方法，成功解决了制样问题。通过大量的结构面抗剪强度试验研究，提出了小湾电站坝址区各种类型结构面的抗剪强度参数，为小湾电站的设计与施工提供了科学依据。

关键词：小湾水电站；结构面；强度，分析预测

作者简介：戴培志(1965－　)，男，工程师，主要从事水利水电工程岩石力学试验研究工作。

0　引　　言

小湾水电站位于云南省大理白族自治州南涧县和临沧市凤庆县交界的澜沧江中游河段上，在主要支流黑惠江口下游 1.5 km 处，为澜沧江中下游河段八个梯级电站的龙头水库，以发电为主，兼有防洪、灌溉和库区水运等综合利用的水利水电枢纽工程。其主要建筑物有高 292 m 的混凝土双曲拱坝、坝后水垫塘和二道坝，左岸两条导流隧洞和一条泄洪隧洞，右岸地下式引水系统和厂房。小湾水电站总装机容量 6×700 MW，保证出力 1789 MW，属Ⅰ等工程，永久建筑物为一级建筑物。

进行坝肩抗滑稳定计算、岩质高边坡的稳定分析、地下洞室群的围岩稳定分析，在预可研、可研及招标设计阶段，对小湾电站坝址区岩体的各种类型结构面进行了大量的现场试验与研究，为设计提供科学依据。

本文对小湾坝址区进行的岩体结构面抗剪强度试验进行介绍，同时根据试验资料，采用不同的方法对其进行归纳与总结，作出了分析与评价，并利用 Hoek-Brown 的经验公式进行预测。

1　结构面的特征

由于枢纽区经受多期构造活动，断裂构造比较发育。根据结构面规模大小，对枢纽区结构面进行分级。已查明枢纽区无区域性的Ⅰ级断层通过，Ⅱ级断层仅有一条(F7)，Ⅲ级断层共 20 条和若干分属Ⅳ、Ⅴ级结构面的小断层(f)、挤压面(gm)和节理组(J)。

Ⅲ级结构面以 NWW 走向的陡倾角断层为主，仅 F20 为 SN 向，多属顺层挤压错动性质，破碎带物质主要由糜棱岩、碎裂岩、角砾岩及断层泥组成。

Ⅳ级结构面的小断层(f)和挤压面(gm)较发育，据左右两岸平硐中揭露的 428 条 f、gm 的等密度图，其产状主要分两组：①N70°～85° W，NE∠75°～90°；②N10° W～N10° E，WE∠80°～90°。①组(近 EW 向)属顺层错动，大部分顺片岩类夹层发育。破碎带特征一般是两壁附近有数厘米厚连续分布的岩屑夹泥的软弱物质。该组结构面发育的平均间距，左岸为 14.5 m，右岸为 16.4 m，延伸长度一般大于 40 m。②组(近 SN 向)多属张性，破碎带宽度一般小于 20 cm，主要由碎块岩组成，有少量糜棱岩和不连续泥膜。该组结构面发育的平均间距，左岸为 19 m，右岸为 24.2 m。

Ⅴ级结构面(节理 J)主要有三组：

(1) 近 SN 向节理组，产状 N10° W～N10° E∠90°，延伸一般 2～3 m，最长可达 10 余米，一般间距 20～50 cm，早期为张性，被电气石和长英质岩脉充填胶结，后期具左行错动迹象。其发育程度因构造部位和岩性不同而异，在近 EW 向断层附近和黑云花岗片麻岩中相对发育，常形成节理密集带，其宽度一般 0.5～2 m，最宽可达 7.5 m，延伸可达 10 余米。带内岩体常有高岭石化和裂面高岭土化现象。

(2) NWW 节理组，产状 N70°～85° W，NW∠75°～90°，延伸长一般 3～6 m。在微风化中延伸一般 2～3 m，间距一般 30～50 m。大部分闭合无充填，少数有动力蚀变矿物和绿泥石分布。

(3) 中缓倾角构造节理不发育，分布局限，走向以近 SN 为主。一般为断层挤压带派生构造。在新鲜岩体中闭合，延伸短，多表现为裂纹状。但在卸荷带中，这组节理往往成带出现，且多呈张开状，中间有次生夹泥充填，延伸一般 3～7m，最长可达 30 余米。为岸坡剪切裂隙或剪切带。

2　试验成果分析与预测

2.1　试验成果

小湾水电站现场结构面的抗剪试验一共进行了 14 组，均采用平推法。其中硬性结构面进行了 8 组，分别为 τ_{J13}，$\tau_{J13\text{-}II}$，$\tau_{J78\text{-}I}$，$\tau_{J66\text{-}I}$，$\tau_{J66\text{-}II}$，$\tau_{J77\text{-}I}$，$\tau_{J8\text{-}I}$以及 $\tau_{J78\text{-}II}$，软弱结构面共进行了 6 组，为 $\tau_{J78\text{-}III}$，$\tau_{J64\text{-}I}$，τ_{J82}，$\tau_{J189\text{-}I}$，$\tau_{J61\text{-}I}$，$\tau_{J106\text{-}I}$，软弱结构面中后 3 组为断层带，试验成果见表 1。

2.2　结构面抗剪特性

(1) 结构面的破坏机理

结构面是指岩体内开裂的和易开裂的面，如层面、软弱夹层、节理、裂隙、片理、断层等。按结构面胶结（或充填）物质的性质，通常又分为硬性结构面和软弱结构面。结构面的抗剪强度与结构面的性质、分布、组合规律以及是否夹有充填物有密切关系。硬性结构面一般为无充填或充填极薄的节理面，两侧的岩体强度、节理的胶结强度

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

以及起伏差对试验结果影响很大。如果在制样时试件受到扰动则有可能出现强度明显偏低的情况，故选点和制样难度很大，试验结果规律性一般较差，单点摩擦强度一般低于峰值强度。硬性结构面的破坏有一个逐渐发展的过程，在整个破坏面上不可能同时达到最大抗剪强度。当沿整个弱面发生微位移时，首先受力的是凸出部分，随着应力增加达到峰值强度以后，即被剪坏，应力转而集中到次一级凸出部分，依此类推，逐级破坏，这一过程将一直发展到只留下比较平整的弱面来抵抗外力为止。逐级破坏的结果，是沿整个弱面的抗剪强度达到残余强度。

软弱结构面一般为有充填的结构面和断层破碎带，其破坏取决于充填物的厚度及其性质、两壁面的粗糙度、施加的应力的大小等。当夹泥较厚，且厚度大于两壁粗糙度的高度，而正应力的大小未使夹泥挤出时，一般沿软弱层中破坏，当夹泥较薄而正应力又较低时，可能沿壁面接触处滑移。对于断层面，由于充填有灰白色粘泥、碎屑及少量碎块，且厚度较大，它的破坏是沿软弱层中破坏。一般柔性结构面的峰值强度和残余强度较接近，试件的扰动对试验结果影响不大。单点摩擦试验时，常因部分填充物已被挤出，上下盘岩体有部分接触，使得单点摩擦的强度常高于抗剪强度甚至是抗剪断强度。但进行单点摩擦试验可以校核抗剪断强度和抗剪强度。

(2) 结构面的剪切变形分析

小湾水电站坝址区结构面剪切破坏主要表现为塑性破坏特征。硬性结构面多为石英质充填，剪断时的剪切变形较小，平均剪切变形为6.2 mm；而软弱结构面一般由粘土、绿泥石等软性物质所充填，剪断时的剪切变形较大，平均剪切变形为15.6 mm。

(3) 结构面的剪胀作用

小湾坝区的结构面在剪切过程中，无论临近破坏或在摩擦试验过程都表现出一定的剪胀特征，不同性质的结构面所产生的峰值剪胀角也有所不同。结构面的剪胀角统计如表2所示。总的来看，硬性结构面，其抗剪强度参数值较高，剪胀角 i 变化较大，在3°～19°之间；而软弱结构面，抗剪强度参数值较低，剪胀角 i 变化也相应较小，在4°～10°之间。

2.3 结构面试验成果分析

将小湾14组结构面现场抗剪试验按硬性结构面、有软弱充填物的软弱结构面以及断层带（f）进行分类统计，剔除离散性较大或不合理的试点，采用点群中心法和优定斜率法求出各类结构面峰值强度和残余强度的平均值和小值平均值（下限值）。各类结构面分析成果见表3和表4。

2.4 面强度预测

岩体力学参数通常是借助于各种试验来测定，但岩体是非均质的，其变形和破坏规律极其复杂，室内试验成果不能代表岩体的力学性质，而大体积现场岩体试验又代价昂贵；现场试验的数量和范围有限且随机性较大，同时，因岩体的非均质性易造成成果分散。从分散的试验成果中确定出能代表岩体的力学参数，并评价由此得到的岩体力学参数的代表性，是十分困难的。因此，必须加强岩体力学参数预测的研究。本文利用Hoek－Brown的经验公式对小湾14组结构面现场抗剪试验成果并按其硬性结构面、有软弱充填物的软弱结构面以及断层带（f）进行分类预测，以便与点群中心法和优定斜率法结果相互比较与验证。

(1) 硬性结构面强度预测

将小湾8组硬性结构面现场抗剪试验的所有试点视为Hoek-Brown的研究对象。根据点群中心法的结果，从表3可知，c' = 0.67 MPa，由试验时的 τ、σ 值可求出 a=0.253，b=27.1。根据室内试验，取 σ_c=60、80、100 MPa三种情况进行预测，由于 σ_c 在计算中影响较小，故只进行了 σ_c= 80 MPa时的预测。因此，小湾水电站硬性结构面抗剪强度试验的剪切破坏准则可用如下莫尔包络线方程表示：

$$\left.\begin{aligned} &\tau = 3.3875(\cot\varphi_i - \cos\varphi_i)\ ,\\ &\varphi_i = \arctan[4h\cos^2(30^\circ + 1/3\arcsin h^{-3/2}) - 1]^{-1/2}\ ,\\ &h = 1.0018373 + 0.196802\sigma\ ,\\ &c_i = \tau - \sigma\tan\varphi_i\ \ 。 \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

表1 结构面抗剪强度试验成果表

试验编号	结构类型	岩　性	最大正应力/MPa	剪断时的平均剪切位移 /mm	峰值强度		残余强度	
					φ' /(°)	c' /MPa	φ' /(°)	c /MPa
$\tau_{J13\text{-}I}$	硬性结构面	黑云花岗片麻岩	3.9	4.647	34.0	0.23	34.0	0.15
$\tau_{J13\text{-}II}$		黑云花岗片麻岩	3.975	8.908	33.0	0.3	33.0	0.3
$\tau_{J78\text{-}I}$		黑云花岗片麻岩	1.081	10.498	33.0	0.35	33.0	0.35
$\tau_{J66\text{-}I}$		角闪斜长花岗片麻岩	2.554	6.168	38.0	0.12	38.0	0.05
$\tau_{J66\text{-}II}$		角闪云母片岩	2.173	5.618	53.5	1	56.0	0
$\tau_{J77\text{-}I}$		顺坡向硬性结构面	0.372	4.903	32.5	0.48	30.7	0.42
$\tau_{J8\text{-}I}$		顺坡向硬性结构面	1.882	8.902	30.0	0.5	30.0	0.3
$\tau_{J78\text{-}II}$		黑云花岗片麻岩	1.839	17.42	30.0	0.07	30.0	0.07
$\tau_{J78\text{-}III}$	软弱结构面	黑云花岗片麻岩	2.148	3.964	40.0	0.725	46.5	0.175
$\tau_{J64\text{-}I}$		顺坡向软弱结构面	0.681	7.598	22.4	0.051	19.1	0.062
τ_{J82}		陡倾面结构面	0.657	13.902	25.0	0.1	25.0	0.1
$\tau_{J189\text{-}I}$	断层带	F89-1	1.165	8.348	29.5	0.065	29.0	0.054
$\tau_{J61\text{-}I}$		F3	1.021	4.817	20.1	0.079	20.1	0.074
$\tau_{J106\text{-}I}$		F30	0.347	5.632	26.5	0.009	26.5	0.007

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 结构面的剪胀角统计表

编号	结构面类型	剪胀角 i/(°)						平均剪胀角/(°)
		1	2	3	4	5	6	
τ_{J13-I}	硬性结构面	4.5	13.3	0.7	0.5	7.2	0.8	5
τ_{J13-II}		0.4	1.3	0.7	9.7	0.4		3
τ_{J78-I}		18	13.1	2.5	4.1			9
τ_{J78-II}		1.2	3.9	9.6	2.3	0.5	0.2	3
τ_{J66-I}		2.8	4.2	7.4	5.8			5
τ_{J66-II}		35	14.6	14.6	10.6	19.7	28.6	15
τ_{J8-I}		27.2	11.4	15.3	11.6		2.3	14
τ_{J77-I}			35		25.9	2.5	12.7	19
τ_{J82}	软弱结构面	10	9.5	4	2.8	4.1	5.6	6
τ_{J64-I}		3.3	8.9	7.2	2.4			5
$\tau_{J78-III}$		8.7	4.1	17.5	6.3	21.3	1	10
τ_{J89-I}		15	0.6	6.4	1.5	3.1		5
τ_{J61-I}		1.7	3.8	3.5	3.3	9	1.2	4
τ_{J106-I}		1.2		19.4	7.3	2		7

表 3 结构面抗剪试验点群中心法分析成果表

结构面类型	试点数（点）	平均值				小值平均值			
		c' /MPa	f'	c /MPa	f	c' /MPa	f'	c /MPa	f
硬性结构面	43	0.67	0.75	0.47	0.69	0.27	0.7	0.2	0.69
软弱结构面	15	0.05	0.61	0.05	0.58	0.01	0.53	0.01	0.52
断层带	15	0.02	0.55	0.02	0.54	0.02	0.43	0	0.44

表 4 结构面抗剪试验优定斜率法分析成果表

结构面类型	试点数（点）	平均值				下限值			
		c' /MPa	f'	c /MPa	f	c' /MPa	f'	c /MPa	f
硬性结构面	43	0.5	0.75	0.45	0.70	0.2	0.75	0.2	0.70
软弱结构面	15	0.06	0.55	0.06	0.55	0.01	0.55	0.01	0.55
断层带	15	0.04	0.50	0.03	0.50	0	0.50	0	0.50

表 5 各类结构面的 Hoek-Brown 预测方法与点群中心法成果表

结构面性质	Hoek-Brown 预测方法计算值		点群中心法	
	$\overline{f_i}$	$\overline{c_i}$ /MPa	f'	c' /MPa
硬性结构面	0.73	0.63	0.75	0.67
软弱结构面	0.58	0.13	0.61	0.05
断层带	0.53	0.08	0.55	0.02

(2) 软弱结构面强度预测

将小湾 3 组有软弱充填物的软弱结构面现场抗剪试验的所有试点视为 Hoek-Brown 的研究对象。根据点群中心法的结果，从表 3 可知，c' =0.05 MPa，由试验时的 τ，σ 值可求出 $a=-0.4106$，$b=4.7879$。根据室内试验，取 σ_c=60 MPa、70 MPa、80MPa 三种情况进行预测，由于 σ_c 在计算中影响较小，故只进行了 σ_c=60 MPa 时的预测。因此，小湾水电站有软弱充填物的软弱结构面抗剪强度试验的剪切破坏准则可用如下莫尔包络线方程表示：

$$\left.\begin{aligned}&\tau=0.43082(\cot\varphi_i-\cos\varphi_i)\ ,\\&\varphi_i=\arctan[4h\cos^2(30^\circ+1/3\arcsin h)]\ ,\\&h=1+1.547437\sigma\ ,\\&c_i=\tau-\sigma\tan\varphi_i\ 。\end{aligned}\right\}\qquad(2)$$

(3) 断层带强度预测

将小湾3组断层带(f)现场抗剪试验的所有试点视为Hoek-Brown的研究对象。根据点群中心法的结果，从表3可知，c′ =0.02 MPa，由试验时的 τ，σ 值可求出 $a=-0.091$，$b=2.0022$。根据室内试验，取 σ_c=60 、70、80 MPa 三种情况进行预测，由于 σ_c 在计算中影响较小，故只进行了 σ_c =60 MPa 时的预测。因此，小湾水电站断层带（f）抗剪强度试验的剪切破坏准

则可用如下莫尔包络线方程表示：

$$\left.\begin{aligned}&\tau=0.199794(\cot\varphi_i-\cos\varphi_i)\ ,\\&\varphi_i=\arctan[4h\cos^2(30^\circ+1/3\arcsin h^{-3/2})-1]^{-1/2}\ ,\\&h=1+3.33667\sigma\ ,\\&c_i=\tau-\sigma\tan\varphi_i\ 。\end{aligned}\right\}\qquad(3)$$

(4) 预测结果评价

通过采用Hoek－Brown的经验公式对小湾14组结构面现场抗剪试验成果并按其硬性结构面、有充填物的软弱结构面以及断层带（f）进行分类预测，按 Hoek-Brown 预测方法求出各类结构面不同正应力

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

下的f_i、c_i，进而求出平均值$\overline{f_i}$，$\overline{c_i}$，并与点群中心法的f'与c'相比较，其结果见表5。经比较，二者结果较为接近，说明用Hoek－Brown准则预测结构面强度是成功的。

3 结　　语

通过对小湾水电站枢纽区岩体的各种类型结构面进行大量的现场试验，获得了各种类型结构面的力学参数与力学特性，采用多种方法对其进行分析总结，并对其抗剪强度进行了预测。

小湾坝区进行抗剪试验的结构面有多种不同性质，但总起来可分为Ⅳ级结构面和Ⅴ级结构面两大类，Ⅳ级结构面为小断层(f)，Ⅴ级结构面包括各种片麻理、片理结构面、中缓倾角节理以及卸荷裂隙。Ⅴ级结构面可分为硬性结构面和有泥质充填的软弱结构面。根据试结果，微风化—新鲜的片麻理和片理、片麻理与片岩接触面的f，c值都较高，一般不会成为弱面。而其他一些硬性结构面，制样时虽然事先采取了某些加固措施，但仍有部分试件由于开挖振动和卸荷的作用，试验结果有所偏低；而软弱结构面因充填物较薄，节理面两壁起伏粗糙，其试验结果略为偏高。

由于影响结构面抗剪强度参数的因素较多，因此在采用试验参数时，应结合具体工程部位，通过合理的工程类比，选择正确、适用的岩石力学参数。

参考文献：

[1] 祝立群.小湾水电站现场变形试验研究阶段报告[R]. 昆明:昆明勘测设计院科学研究所,1986.

[2] 张林洪.小湾水电站坝址岩体强度试验报告[R]. 昆明: 昆明勘测设计院科学研究所,1990.

[3] 尹森清.小湾水电站岩石力学试验[R]. 昆明: 昆明勘测设计院科学研究所,1991.

[4] 李仕胜.小湾水电站坝址区岩体抗剪试验[R]. 昆明: 昆明勘测设计院科学研究所,1994.

[5] 李融融.小湾水电站招标设计阶段岩石力学试验报告[R]. 昆明: 昆明勘测设计研究院科学研究分院,2001.

[6] 李仕胜.小湾水电站岩石力学试验成果分析报告[R]. 昆明: 昆明勘测设计研究院,2004.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net