

文章编号: 1000-7598-(2008) 增-485-06

小湾水电站坝基卸荷岩体抗剪特性研究

李朝政, 沈 蓉, 李 伟, 廖建军, 苏智光

(昆明勘测设计研究院, 昆明 650033)

摘 要: 通过对小湾水电站松弛岩体抗剪特性以及更深入的现场和室内多种试验研究, 以更细致深入的评价松弛岩体结构面的变形破坏机理及抗剪强度参数, 为后续评价坝基固结灌浆效果以及复核拱坝坝基开挖和地基处理设计方案提供可靠的依据。

关 键 词: 模拟灌浆; 抗剪强度; 单点摩擦试验; 结构面

中图分类号: TV 73

文献标识码: A

Research on shear resistance of dam foundation unloading rockmass of Xiaowan Hydropower Station

LI Chao-zheng, SHEN Rong, LI Wei, LIAO Jian-jun, SU Zhi-guang

(Kunming Hydroelectric Investigation and Design Institute, Kunming 650033, China)

Abstract: In order to evaluate more deeply and articularly the deformation and failure mechanism and shear strength parameters of relaxed rock mass structural plane, and to provide reliable evidence for subsequent assessment of consolidation grouting effects of dam foundation and recheck arch dam foundation excavation and design scheme of foundation treatment, the researches on shear resistance of Xiaowan Hydropower Station relaxed rock mass infield and laboratory are carried out.

Key words: simulation grouting; shear strength; single-point friction test; structural plane

1 前 言

小湾水电站枢纽区河谷深切、岸坡陡峻, 属高地应力区, 谷底应力集中现象明显, 坝基开挖后普遍存在应力松弛现象, 尤其是在河谷低高程部位更为突出, 主要在坝基浅表部出现顺坡向的中、缓倾角裂隙(河床地段表现为近水平), 并有松弛张开且伴有错位现象等, 近 EW、SN 向陡倾角结构面也出现相应的拉张现象。从开挖后的实际情况、声波长期观测孔、孔壁成像、监测成果和固结灌浆等资料看, 坝基浅表部位开挖松弛现象明显, 且随时间推移有劣化趋势。这些开挖卸荷松弛岩体(以下简称松弛岩体)可以通过固结灌浆提高岩体的完整性和变形强度, 但由于松弛产生了新的裂隙和岩体体积扩容, 也难以恢复到天然状态下的质量。

天然状态下建基面上出露的以 II 类岩体为主, 在坝基的高高程及坝趾部位的局部地段分布有 IIIa、

IIIb 及 IVa 类岩体, 此外, 在建基面上出露有 III 级断层 F11、蚀变岩带(E4+E5、E1、E9、E8、E10)及较多的 IV 级结构面, 多属 IVb 类岩体, 随断层破碎带出露的糜棱岩和断层泥属 IVc 类岩体。由于建基面附近地应力属高地应力, 局部应力集中现象明显, 实测最大主应力 σ_1' 可达 35 MPa, 坝基开挖后浅部岩体出现明显的松弛现象, 尤其是处在高应力区的河床坝基部位表现更突出, 松弛岩体质量较天然岩体变差, 且随时间推迟有进一步劣化的趋势。

2006 年 4 月, 以潘家铮院士为组长和谭靖夷院士、王柏乐大师为副组长的小湾水电工程设计顾问组第 8 次会议在小湾工地举行。会议围绕坝基卸荷松弛岩体特征、力学参数及工程措施等议题展开了讨论。经设计顾问组评议, 认为“拱坝底部浅层抗滑稳定是个复杂的问题, 国内经验很少, 对国外的情况也掌握不多。设计规范中也无明确说明, 只能根据工程实际情况研究确定”。

收稿日期: 2008-07-24

作者简介: 李朝政, 男, 1981 年生, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事岩石及土工试验研究。E-mail: lichaozheng0429@yahoo.com.cn

基于以上原因,为进一步评价小湾拱坝坝基浅层抗滑稳定条件、拱坝变形稳定状况和整体安全度,进行开挖卸荷松弛岩体抗剪特性研究,为小湾拱坝建设和安全运行提供技术支持,具有重要的研究意义。

2 坝基岩体抗剪试验研究

2.1 现场Ⅱ类岩体抗剪残余强度试验^[1]

2.1.1 试验成果

本次共进行 10 组现场Ⅱ类岩体抗剪残余强度试验,表 1 共列出其中 5 组。

表 1 Ⅱ类岩体抗剪试验残余强度成果表
Table 1 Results of residual strengths of rock mass class Ⅱ by shear tests

试验组号	岩性	风化类型	试点编号	残余强度			
				正应力 /MPa	剪应力 /MPa	φ / (°)	C /MPa
1	角闪斜长片麻岩	弱至微风化	1-1	1.352	2.097	58.0	0.70
			1-2	2.871	4.982		
			1-3	4.266	8.902		
			1-4	6.307	10.723		
			1-5	1.486	3.487		
2	角闪斜长片麻岩	弱至微风化	2-1	3.670	5.338	49.9	0.70
			2-2	2.791	4.056		
			2-3	1.487	2.701		
			2-4	4.242	7.598		
			2-5	4.481	6.237		
			2-6	0.986	2.773		
3	黑云花岗片麻岩	微风化	3-1	7.679	15.272	62.0	0.80
			3-2	4.874	7.954		
			3-3	3.607	8.955		
			3-4	2.412	4.023		
			3-5	1.741	5.259		
4	黑云花岗片麻岩		4-1	6.446	6.618	50.0	0.7
			4-2	7.102	9.831		
			4-3	5.211	6.27		
			4-4	5.324	11.778		
			4-5	4.754	5.585		
5	片岩	弱风化	5-1	5.375	5.788	47.0	0.25
			5-2	5.414	6.763		
			5-3	1.913	3.449		
			5-4	4.752	4.567		
			5-5	3.521	3.941		
			5-6	0.211	0.913		

2.1.2 成果分析

(1) 岩体抗剪强度与剪切位移关系分析

岩石抗剪试验中其剪断位移与岩性有关,一般来说,较致密的岩石剪断位移较小。但对于岩体来讲,则与试件中所含的节理有较大关系。如节理较发育,试件主要从节理面处破坏,剪断位移也将随着节理面发育程度的加大而增大。

岩体抗剪强度随剪断位移的增大而降低。除少数点由于试件较破碎造成剪断位移较大而不参与统

计外,Ⅱ类岩体试件剪断位移在 1.95~4.71 mm,平均剪断位移为 3.36 mm。各类岩体的剪断位移见表 2。

表 2 Ⅱ类岩体抗剪断试验剪断位移表
Table 2 Snipping displacements of rock class Ⅱ by shearing resisting tests

岩性	试点数 /点	剪断位移平均值 /mm
黑云花岗片麻岩	22	3.89
角闪斜长片麻岩	19	2.71
片岩	6	2.56

(2) 正应力与抗剪强度关系分析

根据岩石力学的有关理论及其他工程的经验,岩体的抗剪强度包络线在低正应力下一般呈直线型,但在高正应力下常呈曲线型,曲线斜率由陡变缓,岩体抗剪强度最初主要是由岩块间的摩阻引起,随着正应力的提高,岩块嵌合逐渐紧密,岩块的 C 值作用逐渐增大。

(3) 成果分析

岩体抗剪试验在Ⅱ类岩体中进行,岩性分别为黑云花岗片麻岩、角闪斜长片麻岩、片岩。3 种岩性的岩体残余强度试验分析成果表(点群中心法)见表 3, τ - σ 关系曲线如图 1 所示。

表 3 Ⅱ类岩体残余强度试验分析成果表
Table 3 Test analysis of residual strengths of rock mass class Ⅱ

试点数 /点	平均值		小值平均值	
	c /MPa	f	c /MPa	f
54	0.80	1.25	0.60	1.03

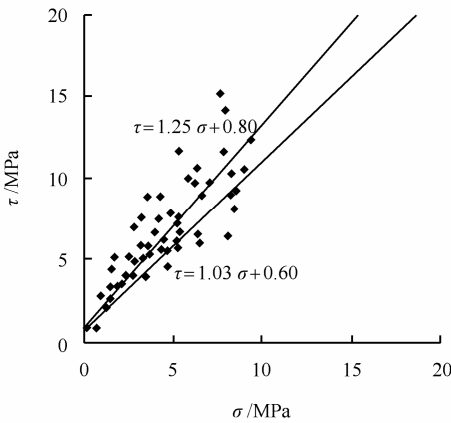


图 1 Ⅱ类岩体残余强度试验 τ - σ 关系曲线
Fig.1 Residual strength tests of rock mass class Ⅱ τ - σ relationship curves

2.2 现场结构面抗剪强度试验

2.2.1 试验成果

预可研、可研阶段在小湾水电站现场硬性结构面原位抗剪试验共进行了 8 组,表 4 列出其中 3 组。

表 4 结构面抗剪试验成果表
Table 4 Result table of shear tests of structural plane

岩性及地质 结构类型	峰值强度					残余强度			
	正应力 /MPa	剪应力 /MPa	剪切位移 /(0.01 mm)	$\phi' / (^{\circ})$	c' / MPa	正应力 /MPa	剪应力 /MPa	$\phi / (^{\circ})$	c / MPa
黑云花岗片 麻岩缓倾角 结构面	3.975	3.040	789	33.0	0.30	3.957	3.040	33.0	0.30
	3.177	2.227	829			3.177	2.227		
	1.495	1.378	1 552			1.495	1.378		
	2.541	1.333	762			2.541	1.333		
	1.914	1.871	522			1.914	1.871		
黑云花岗片 麻岩陡倾角 结构面	0.245	0.981	687	33.0	0.35	0.245	0.589	33.0	0.35
	0.549	0.710	797			0.549	0.601		
	0.714	0.804	1 856			0.714	0.804		
	1.081	1.074	859			1.081	1.074		
	0.248	0.77	701			0.248	0.397		
顺坡向硬性 结构面	0.593	1.484	836	30.0	0.50	0.593	1.188	30.0	0.30
	1.882	1.613	625			1.882	1.229		
	1.849	1.421	314			1.849	1.405		
	1.835	2.131	2 079			1.835	1.737		
	0.781	0.736	786			0.781	0.736		

2.2.2 结构面抗剪特性

硬性结构面是无充填或充填硬性物质，在小湾坝址多为石英质充填。

结构面剪切破坏主要表现为塑性破坏特征，硬性结构面剪断时平均剪切变形为 6.2 mm。结构面在剪切过程中，无论临近破坏，或是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，硬性结构面的剪胀角变化较大， $i = 3 \sim 19^{\circ}$ 。

2.2.3 结构面抗剪成果分析

将试验数据用点群中心法求出各组结构面峰值强度和残余强度的平均值和小值平均值。结构面抗剪试验分析成果表（点群中心法）见表 5， τ - σ 关系曲线见图 2。

表 5 硬性结构面抗剪试验分析成果表
Table 5 Test analysis result of shear tests of hard structural plane

试点数 /点	峰值			
	平均值		小值平均值	
	c' / MPa	f'	c' / MPa	f'
43	0.25	0.71	0.15	0.68

2.3 坝基岩石芯样结构面单点摩擦试验

对黑云花岗片麻岩和角闪斜长片麻岩各选取了 3 组试样，将岩石芯样敲断后形成结构面，然后进行单点摩擦试验。

2.3.1 试验成果

绘制 τ - σ 关系曲线，用作图法和最小二乘法求出单点摩擦强度，坝基岩石芯样结构面抗剪单点摩擦试验成果见表 6。

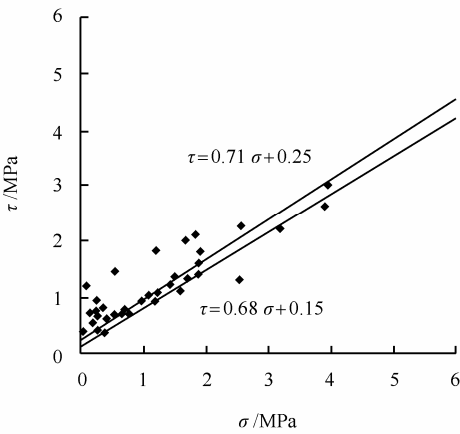


图 2 硬性结构面抗剪试验 τ - σ 关系曲线
Fig.2 Shear tests of hard structural plane τ - σ relationship curves

2.3.2 试验成果分析

从表 6 可以看出，单点摩擦强度 ϕ 在 $25.6 \sim 40.4^{\circ}$ 之间， c 在 $0.21 \sim 1.06 \text{ MPa}$ 之间。5[#]及 6[#]单点摩擦强度尤其 c 值较高，主要是剪切面粗糙，呈锯齿状及起伏差较大所致。

将岩石芯样结构面单点摩擦试验成果用点群中心法进行回归，见图 3，岩石芯样结构面单点摩擦强度平均值 $f = 0.77$ ， $c = 0.35 \text{ MPa}$ ，单点摩擦强度小值平均值 $f = 0.58$ ， $c = 0.15 \text{ MPa}$ 。

2.4 室内结构面中型剪试验

岩石结构面中型剪试样面积大多为 $600 \sim 800 \text{ cm}^2$ 。岩性为黑云花岗片麻岩、角闪斜长片麻岩，此次进行的岩石结构面中型剪试验主要采用单点摩擦试验。

表 6 室内岩石芯样单点摩擦试验成果表
Table 6 Result of laboratory rock core sample single point friction tests

试样 编号	岩性	摩擦强度				试件描述
		σ /MPa	τ /MPa	Φ / (°)	c /MPa	
1 [#]	黑云 花岗片 麻岩	1.00	0.934	25.6	0.36	天然结构面，表面粗糙，起伏差 1~2 mm。
		2.00	1.147			
		3.00	1.845			
		4.00	2.301			
		5.00	2.205			
2 [#]	黑云 花岗片 麻岩	1.00	0.934	27.0	0.570	人工敲断，起伏差 1~2 mm。
		2.00	1.877			
		3.00	2.088			
		4.00	2.364			
		5.00	3.242			
3 [#]	黑云 花岗片 麻岩	1.00	0.934	40.4	0.43	人工敲断，表面粗糙，锯齿状，起伏差 3 mm。
		2.00	2.607			
		3.00	3.061			
		4.00	3.580			
		5.00	4.701			
4 [#]	角闪 斜长片 麻岩	1.00	0.934	35.8	0.21	人工锯断，表面粗糙，起伏差 2~3 mm。
		2.00	1.391			
		3.00	2.575			
		4.00	3.517			
		5.00	3.485			
5 [#]	角闪 斜长片 麻岩	1.00	2.150	40.4	1.06	人工敲断，表面粗糙，锯齿状，起伏差 3 mm。
		2.00	2.607			
		3.00	3.305			
		4.00	4.490			
		5.00	5.431			
6 [#]	角闪 斜长片 麻岩	0.50	1.907	43.8	1.00	人工锯断、表面人工凿毛粗糙，起伏差 1~3 mm。
		1.00	2.850			
		2.00	3.305			
		3.00	3.760			
		4.00	4.458			

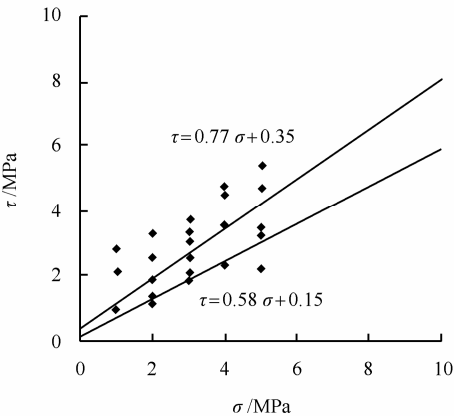


图 3 岩石芯样结构面单点摩擦试验 τ - σ 关系曲线
Fig.3 Rock core sample structural plane single point friction tests τ - σ relationship curves

2.4.1 试验成果

根据试验数据绘制 τ - σ 关系曲线，用作图法和最小二乘法求出单点摩擦强度；结构面中型剪试验成果见表 7。

表 7 室内岩石结构面中型剪单点摩擦试验成果表
Table 7 Result of single point friction tests of laboratory rock structural plane medium shearing

编号	岩石 名称	摩擦强度				试件描述
		σ /MPa	τ /MPa	Φ / (°)	c /MPa	
I	黑云 花岗片 麻岩	0.3	0.222	25.6	0.04	剪切面较平整，局部起伏差 5 mm，吻合不好，张开度 1~2 cm。
		0.5	0.222			
		1.0	0.505			
		1.5	0.758			
		0.3	0.323			
II	黑云 花岗片 麻岩	0.5	0.330	40.7	0.02	剪切面大部分平整，边部高，角度 6°，吻合不好，张开度为 0.3~1.0 cm；岩石局部被压裂。
		0.7	0.338			
		0.9	0.719			
		1.2	1.012			
		1.5	1.370			
III	黑云 花岗片 麻岩	0.5	0.407	36.5	0.07	剪切面下块面不平，起伏差 3~5 mm，张开度为 2 cm，吻合不好，擦痕明显，见磨碎岩粉。
		0.7	0.592			
		0.8	0.657			
		1.2	0.804			
		1.5	1.294			
IV	角闪 斜长片 麻岩	0.5	1.089	34.6	0.58	岩石风化稍强，剪切面平整，局部起伏差 6 mm，张开度为 8 mm。
		0.7	0.993			
		0.9	1.238			
		1.0	1.413			
		1.1	0.993			
		1.4	1.413			
		1.6	1.585			
		1.8	1.967			
		2.0	2.025			

2.4.2 试验成果分析

将结构面中型剪抗剪试验成果用点群中心法进行回归，见图 4。其单点摩擦强度平均值 $f = 0.76$ ， $c = 0.09$ MPa，小值平均值 $f = 0.65$ ， $c = 0.04$ MPa。

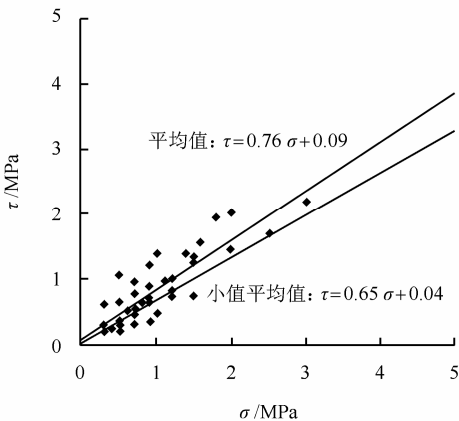


图 4 岩石结构面中型剪 τ - σ 关系曲线
Fig.4 Rock structural plane medium shearing τ - σ relationship curves

2.5 岩体结构面室内模拟固灌后芯样抗剪试验

由于现场很难取到水泥结石胶结完整的芯样，故采取对坝基岩体结构面模拟固灌后的芯样进行室

内抗剪试验。试验共分为 4 个类型：①岩石缓倾角天然结构面模拟固灌后芯样抗剪试验；②人工锯（敲）断 2 mm 缝模拟固灌后芯样抗剪试验；③人工敲断 5 mm 缝模拟固灌后芯样抗剪试验；④人工敲断 10 mm 缝模拟固灌后芯样抗剪试验。

2.5.1 室内岩石结构面模拟灌浆制样^[2]

选取缓倾角裂隙（结构面）试样或对接稍好的岩芯或用人工敲（锯）断后模拟岩石结构面，按不同水灰比灌注水泥净浆胶结，养护 28 d 后进行抗剪试验。

根据小湾灌浆的实际情况并依据现场声波及全孔壁成像测试以及现场坝基岩体缓倾角裂隙发育情况统计成果，对天然结构面裂隙及人工敲断岩石缝（结构面）宽为 2、5、10 mm 采用不同水灰比的浆液灌注。把配制好的岩石水泥净浆以一定的压力，灌入已加工好的天然裂隙及结构面的裂缝中。分期分批共灌注了 22 组。

2.5.2 天然结构面与人工模拟结构面固灌后芯样抗剪试验成果对比

表 8 为室内岩石结构面模拟固灌芯样抗剪试验成果表。

表 8 室内岩石结构面模拟固灌芯样抗剪试验成果表
Table 8 Result of shear tests on simulation laboratory rock structural plane of consolidation grouting core sample

模拟结构面及结石 充填情况	峰值强度				残余强度			
	平均值		小值平均值		平均值		小值平均值	
	f'	c'	f'	c'	f	c	f	c
	/MPa		/MPa		/MPa		/MPa	
天然结构面结石充填 3~5 mm	1.27	2.66	1.03	2.51	0.93	1.25	0.84	0.47
人工模拟结构面结石充填 2 mm	0.86	1.11	0.74	0.74	0.55	0.49	0.52	0.26
人工模拟结构面结石充填 5 mm	0.91	2.2	0.84	1.93	0.79	1.04	0.69	0.67
人工模拟结构面结石充填 10 mm	0.95	2.42	0.86	2.02	0.65	1.32	0.54	1.00

3 基岩体抗剪特性分析及地质建议抗剪参数评价

3.1 坝基 II 类岩体抗剪特性分析

（1）研究中选用了 3 种岩性的 II 类岩体，其大多数试件呈现脆性破坏。

（2）沿岩体剪断时，抗剪强度较大；沿局部分布的裂隙剪断时，抗剪强度较小。

3.2 现场结构面抗剪特性分析

（1）由 4 种常见结构面分类可知，本次研究中

结构面抗剪过程中大多发生剪胀，即为粗糙起伏结构面。

（2）由 Ladanyi&Archambault 方程，结构面发生剪胀时其剪应力与剪断率、剪胀率、凸起岩石抗剪强度有关，当正应力很小时，凸起岩石不被剪断，发生剪胀，即对相同的正应力，抗剪强度要大，反映在剪应力与正应力关系上则内摩擦角要大，凝聚力要小。

3.3 室内芯样模拟结构面摩擦试验成果分析

（1）带规则锯齿的结构面，Patton 双直线剪切强度模型将剪切过程分为 2 种情况，一是低法向应力水平下，认为剪切过程中只发生剪胀而不发生剪断，剪切强度模型采用 Patton 剪胀模型；二是高法向应力水平下，认为只发生剪断而不发生剪胀，剪切强度模型采用线性的摩尔-库仑准则，凝聚力 c 主要来自于结构面凸体的剪断效应，实际上二者是同时发生的；

（2）从摩擦试验成果看，结构面呈锯齿状起伏差稍大的 f 、 c 值（如 3[#]、5[#]、6[#]）要大于规则起伏状结构面（如 1[#]、2[#]、4[#]）。

3.4 室内结构面中型剪摩擦试验成果分析

室内中型剪结构面较平整，其起伏差较芯样要小。其摩擦强度主要取决于结构面的起伏差、张开度及岩体本身强度；对于岩体未被压裂且起伏差及张开度稍大者，其粘结力要大（如单点摩擦试验 IV 样等）；对于岩体擦痕明显或见岩粉吻合不好者，其粘结力要小（如单点摩擦试验 I~III 样等）。

3.5 抗剪参数汇总

（1）从表 9 中可以看出，II 类岩体的残余强度平均值和小值平均值要高于现场结构面及室内芯样结构面单点摩擦、室内结构面中型剪单点摩擦峰值强度的相应值；

（2）对于 3 种结构面而言，室内芯样结构面单点摩擦强度 c 的平均值和小值平均值要高于室内结构面中型剪单点摩擦峰值强度的相应值；现场结构面 c 和 f 与室内芯样结构面单点摩擦强度 c 和 f 的相应值相差不大；室内芯样结构面的单点摩擦强度要高于岩石结构面中型剪结构面，二者的抗剪参数 f 值变化不大， c 值的增加幅度较大；

（3）由结构面灌浆前后抗剪强度参数可知，结构面的抗剪参数有明显提高，这说明灌浆可以提高松弛岩体的抗剪特性。

表 9 各类抗剪试验成果汇总
Table 9 Summary of various shear tests results

序号	试样性质	平均值		小值平均值		备注
		c /MPa	f	c /MPa	f	
1	II类岩体	0.80	1.25	0.60	1.03	残余
2	硬性结构面	0.25	0.71	0.15	0.68	峰值强度
3	芯样结构面	0.35	0.77	0.15	0.58	摩擦
4	室内结构面 中型剪	0.09	0.76	0.04	0.65	摩擦
5	2, 3, 4 综合	0.30	0.74	0.12	0.62	
6	1, 2, 3, 4 综合	0.45	0.93	0.25	0.75	
7	模拟天然结构面	2.66	1.27	2.51	1.03	峰值强度
8	人工模拟结构面 2 mm	1.11	0.86	0.74	0.74	峰值强度
9	人工模拟结构面 5 mm	2.20	0.91	1.93	0.84	峰值强度
10	人工模拟结构面 10 mm	2.42	0.95	2.02	0.86	峰值强度
11	7、8、9、10 综合	1.60	1.28	1.20	0.95	峰值强度

3.6 地质建议抗剪参数评价

在大量试验研究成果的基础上, 综合考虑自然地质条件、相关工程经验及有关规范要求, 进行了大量的分析研究工作, 提出了施工详图阶段的岩石力学参数建议值。相关的建议参数见表 10。

表 10 地质建议抗剪参数
Table 10 Shear parameters suggested by geological personnel

岩性	f'	c' /MPa
岩体 (II)	1.4~1.5	1.6~2.0
结构面 (硬性)	0.7	0.1
0~2 m	0.8	0.3
E L. 975 m 以下坝基	0.98	0.78
2~6 m		
建基面以下岩体	1.19	1.29
6~20 m		

从表 9 和表 10 可以看出, 对于硬性结构面, 本研究报告在大量的现场试验和室内试验成果的基础上得到的, f' 、 c' 平均值分别为 0.74 和 0.30 MPa, 与地质建议参数中硬性结构面的参数具有良好的对应性。表 9 中, II 类岩体残余强度与硬性结构面、芯样结构面单点摩擦、室内结构面中型剪单点摩擦试验结果综合后, c 、 f 平均值分别为 0.45 MPa 和 0.93, 经适当折减, 与地质建议坝基岩体 0~2 m 抗剪参数比较接近。从表 9 亦看出, II 类岩体残余强度 c 、 f 平均值分别为 0.8 MPa 和 1.25, 因岩体松弛后存在张开裂隙, 故选用残余强度是合适的, 同时坝基岩体 2~6 m 裂隙稍少, 故与 II 类岩体残余强度相对比。经与坝基岩体 2~6 m 地质建议参数对比发现二者比较接近;

地质建议参数的选取建立在大量试验研究的基础上, 本次试验研究成果分析进一步表明, 建议参数指标是合适的。

4 结 论

(1) II 类岩体的残余强度平均值和小值平均值要高于现场结构面及室内芯样结构面单点摩擦、室内结构面中型剪单点摩擦峰值强度的相应值, 因岩体本身强度较高, 无充填或硬质充填。

(2) 室内芯样结构面的 c 值比现场硬性结构面偏高, 因为室内的试件起伏差较大, 试件面积较小; 室内芯样结构面的单点摩擦强度要高于岩石结构面中型剪强度, 二者的抗剪参数 f 变化不大, c 值的增加幅度较大。

(3) 3 种结构面综合后峰值强度的平均值和小值平均值要低于 II 类岩体的残余强度, 因 II 类岩体的强度较高, 剪断后其剪切面起伏差较大, 所以残余强度仍比较大; 结构面因系薄弱面, 其抗剪峰值强度决定了结构面的抗剪特性;

(4) 在一定充填物厚度条件下结构面充填物厚度与抗剪强度存在一定关系: 缝较薄时, 结石强度不能充分发挥, 其抗剪强度就小; 缝厚较大时, 结石强度能充分发挥, 其抗剪强度就大; 天然结构面模拟灌浆后的抗剪强度大于 10 mm 和 5 mm 缝模拟固灌后的芯样抗剪强度;

(5) 通过对 II 类岩体残余强度与硬性结构面、芯样结构面单点摩擦、室内结构面中型剪单点摩擦试验结果综合, 发现得到的抗剪参数与地质建议坝基岩体 0~2 m 抗剪参数比较接近;

(6) 通过对 II 类岩体残余强度与地质建议坝基岩体 2~6 m 抗剪参数比较, 发现二者比较接近;

(7) 由于室内试验条件的局限性, 模拟灌浆的边界条件, 及试件面积等因素与现场有一定出入, 试验成果会比现场试验值偏高;

(8) 在大量的现场试验和室内试验成果的基础上, 对现场结构面采用峰值强度, 室内芯样结构面采用单点摩擦, 室内结构面中型剪采用单点摩擦强度进行综合以及 II 类岩体的残余强度与 3 种结构面综合得到的 f 、 c , 符合岩体及结构面强度变化规律, 说明采用该方法是即独到又可行的。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国水利部. 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.
- [2] 《岩土灌浆理论及工程实践》协作组. 岩土灌浆理论及工程实践 (第一版) [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院. 小湾水电站开挖卸荷松弛岩体抗剪特性及固结灌浆效果研究子题报告[R]. 昆明: 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院 2008.