

溪落渡电站防渗料试验研究

唐剑虹 陈定贤

(成都勘测设计研究院 成都 610072)

摘要 本文对溪落渡电站比较方案——堆石坝心墙防渗料现场大型筛分、密度测定及室内物理力学性进行试验研究,并对东边坡三个区土料作为防渗料的优劣性提出评价。建议用料要求和进一步试验研究工作的改进意见,对该比较方案选用料场、用料技术要求等提供了依据。同时提出了防渗土料的试验研究方法和选料途径。

关键词 防渗土料 选料途径 试验研究 物理力学性

1 前言

溪落渡电站位于四川省雷波县和云南省永善县境内。是金沙江干流攀枝花市至宜宾市河段梯级开发的第三个梯级。电站初步规划坝高275m,装机容量为1008万kW。电站地理位置适中,经济指标优越。

可行性研究阶段堆石坝作为比较方案之一。防渗料的研究涉及到设计、地质及土工试验研究。基于此点,本文在评价防渗料的同时,并提出有关防渗土料的试验研究方法和选料途径。

2 防渗料的料场调查

在可行性阶段,初步明确坝址所在位置后,设计人员按拟定的防渗墙边坡,计算出所需防渗料方量。据此,地质人员在坝址附近50km范围内进行踏勘,调查土料场。对调查

到的所有土料场,进行挖探槽、竖井等勘探工作。确定土料储量、成因、地质粗分类,并作建材填图。从地质角度,初步明确可使用的土料场。然后按不同的设计阶段,以及地质建材试验规范要求,布置料场的现场筛分,密度测定的点位。经过初步筛分试验后,地质与土工试验人员一起确定室内一系列物理、力学性试验组数。

3 防渗土料现场筛分、密度测定及室内物性试验

3.1 东边坡料场

按设计要求,堆石坝心墙需防渗料560~570万 m^3 。东边坡料场按地质状况分为I、II、III区。料场离坝址约6km。储量、成因类型和化学成份,参见表1。

东边坡料场上部为褐黄色碎石土,厚2~4m结构较松散,洪积形成碎砾石土成份以玄武岩为主,其次为灰岩,有少许页岩,棱角状弱风化。

表1 东边坡防渗土料一览表

料场名称	成因类型	高程	储量	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	烧失量	硅铝比	主要粘土矿物成份
		m	10 ⁴ m ³	%	%	%	%	%	%		
I区	洪积,冰积	900~1175	390.0	52.78	11.86	18.72	5.74	1.84	7.17	3.44	伊利石
II区	洪积,冰积	975~1150	390.4	51.93	11.62	18.13	4.57	2.35	8.17	3.48	伊利石
III区	洪积,冰积	980~1175	568.1	49.13	10.26	15.77	7.55	3.21	10.30	3.78	伊利石

中部为灰黄色碎砾石土,厚2~6m,结构较紧密,冰水沉积形成。碎砾石成份与上部相似。

下部为灰黄色泥砂碎砾石,结构较松散,冰积形成。碎砾石成份与上部相同。

3.2 防渗料现场筛分、密度测定及室内物性试验

地质人员按规范布置现场筛分试验点位后,又据每个点位不同层次土料的变化状况,安排筛分组数。本次共进行了100余组大型筛分及密度测定。

现场密度测定方法有灌水法和灌砂法两种,两种方法的影响因素较多,主要有:

1. 灌水法:(1)测试坑体积时,塑料布与试坑周边贴实好坏;(2)试坑开挖引起土松动和坍塌;(3)灌水时,水漏失多少;(4)试坑开挖前表面是否平整,水平;(5)挖出土料的漏失多少。

2. 灌砂法:(1)灌砂粒径的均匀程度;(2)灌砂标定值的准确程度;(3)试坑开挖前表面是否整平;(4)环的安装是否与开挖线一致;(5)灌砂落高影响。

灌砂法与灌水法的比较,由于灌水法在灌水时容易产生水的漏失和塑料布与坑周围

的贴实不好,灌水法不如灌砂法测试准确。但灌砂法试验步骤繁多,试验时灌砂携带工具较多,会大大降低试验进度。因此,工程上经常使用灌水法。

本次试验采用灌水法测定密度。根据现场土料最大粒径为100~200mm,个别甚至300mm,试坑直径取为50cm,试坑深度取为50cm。现场湿密度测定后,将20mm以下土料用双层塑料袋装2kg密封,带回室内用烘干法测定含水量,20mm以上在现场用干炒法测试。按20mm以上和以下的各自土料含量,加权计算出天然含水量。取试坑挖出的土样10kg左右,带回室内作物性试验。

现场将试坑内挖出的土料分5~10mm,10~20mm,20~40mm,40~60mm四级筛分,60mm以上用尺测量,5mm以下取样带回室内筛分,确定试验土样的颗粒大小级配曲线。

经现场筛分、密度测定及室内物性试验的计算整理后,按颗粒级配曲线进行分类。作出各区筛分曲线的上、下包线、平均线及室内力学性试验的筛分曲线,见图1~3。并统计出物性成果的上、下线值及平均值。三个区的物性指标见表2。

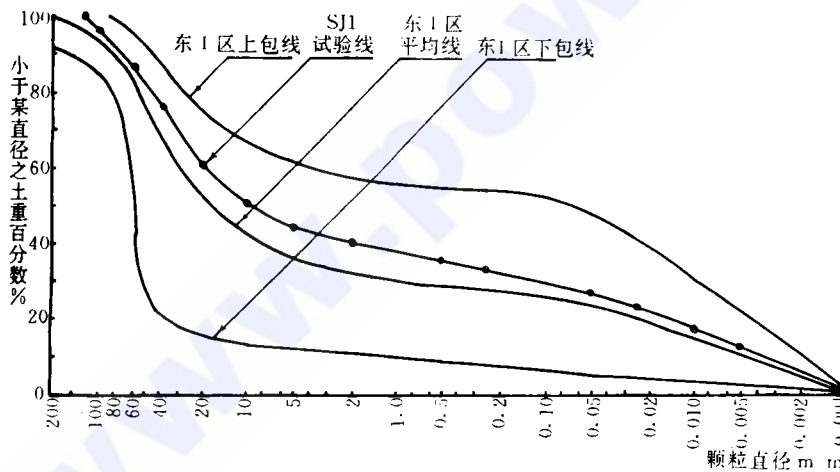


图1 东1区料场平均线、上、下包线及试验筛分曲线

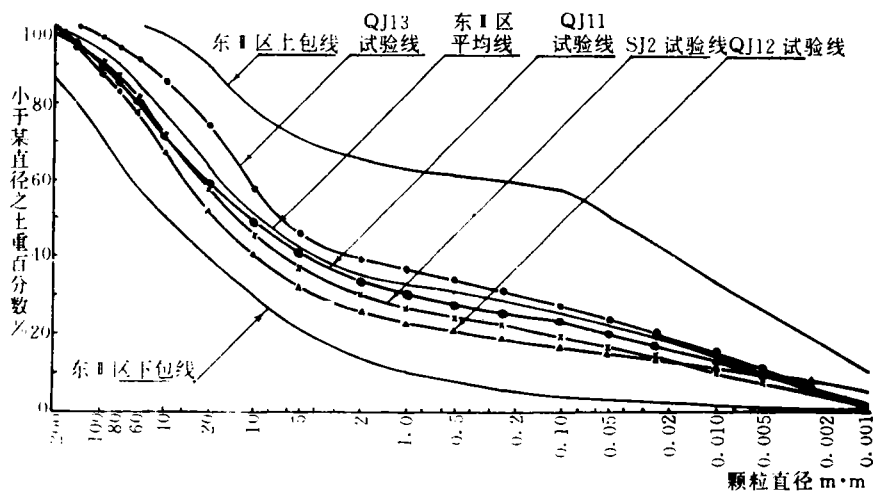


图 2 东 I 区料场平均线, 上、下包线及试验筛分曲线

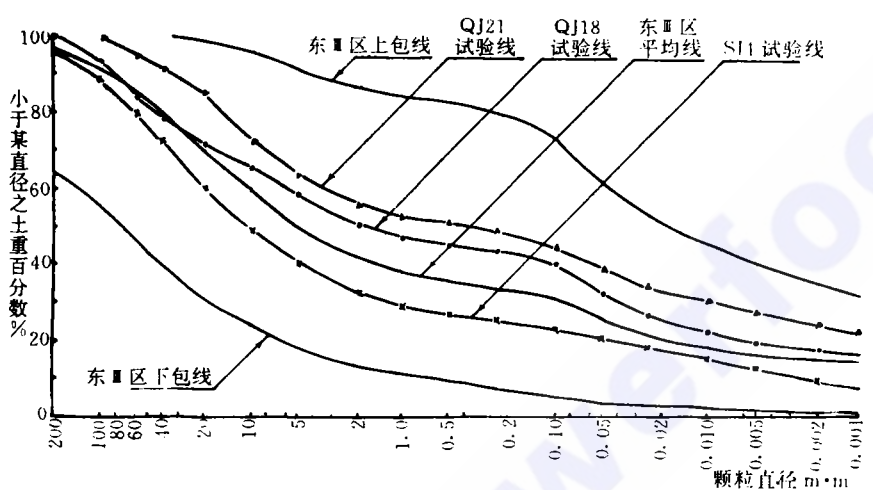


图 3 东 II 区料场平均线, 上、下包线及试验筛分曲线

从表 2 看出, 三个区中, 东 I、II 区粉粘粒含量相近, 且均属微含粉粘粒碎砾石土。东 III 区粘粒含量高于东 I、II 区, 粉粒含量低于东 I、II 区, 属含粘粒碎砾石土。三个区的天然含水量接近。其料场的物性变化, 东 II 区最小, 东 I 区次之, 东 III 区较大。

4 防渗土料室内力学性试验

室内共做六组力学全项试验和两组大三轴试验, 试验采用筛分线与各区平均线相似。

由图 1~3 现场筛分曲线成果表明土料大于 20mm 粒径的大颗粒含量一般都超过 30%, 有的甚至达 70%~80%。因此室内试验必须采用大型仪器, 其限制最大粒径为 60mm。室内力学性试验的试样制备, 采用现场土样风干后, 重新加水制备, 用现场试验选取的具有代表性筛分线, 将超径部分采用等量代替法处理后, 进行配制而成。

4.1 击实试验

防渗料击实试验与防渗土料施工碾压具有密切关系, 国内外土石坝施工碾压质量的

表 2 东边坡料场物理性试验指标

试样位置	试样编号	天然状态的物理性指标				土粒比重 G_s	粘粒含量 <0.005 mm	小于 5mm 含量 %	平均粒径 D_{50} mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	分类典型名称
		含水量 ω_0 %	密度		孔隙比 e							
			湿 ρ g/cm ³	干 ρ_d g/cm ³								
I 区	SJ1 试验用线 (5组平均)	14.9	2.26	1.98	0.46	2.87	13.3	43.6	10.2	6142	0.2	微含碎石粉粘砾质土。
	东 I 区上包线	21	2.40	2.27		2.91	22.8	62.2	0.06	1907	0.01	
	东 I 区 20 组平均线	11.7	2.25	2.00		2.84	10.6	36.1	18	6444	9.3	微含粉粘粒碎砾土。
	东 I 区下包线	5.0	1.86	1.77		2.73	2.0	12.7	60	46	32.8	
II 区	SJ2 试验用线 (6组平均)	11.0	2.29	2.02	0.38	2.75	8.1	36.9	14	2771	20.9	微含粉粘粒粘质碎砾土。
	QJ11 试验用线 (4组平均)	10	2.33	2.17	0.26	2.74	10	40	10.5	3727	9.8	微含粉粘质碎砾土。
	QJ12 试验用线 (5组平均)	8.7	2.35	2.16	0.27	2.73	7.2	29	18.5	3470	70.4	微含粉粘质碎砾土。
	QJ13 试验用线 (7组平均)	14.9	2.27	1.98	0.40	2.74	11.5	45.1	6.7	2820	0.87	微含碎石粉粘质砾土。
	东 II 区上包线	23	2.41	2.31		2.83	26.7	70.9	0.05	250	0.16	
	东 II 区 34 组平均线	12	2.23	2.01		2.74	10.3	41.5	9.0	3723	2.8	微含粉粘粒碎砾土。
	东 II 区下包线	5	2.03	1.71		2.69	1.4	23.2	39	71	1.77	
III 区	SJ4 试验用线 (8组平均)	8.8	2.29	2.12	0.32	2.78	13.1	40.4	10.5	10156	37.19	微含粘粒碎砾土。
	QJ18 试验用线 (4组平均)	13.9	2.04	1.80	0.56	2.79	20.4	59.4	1.9	55000	2.49	含粘粒碎砾土。
	QJ21 试验用线 (4组平均)	14.8	2.11	1.84	0.51	2.78	28.1	64.6	0.3	115000	0.75	微含碎石粘砾土。
	东 III 区上包线	22	2.46	2.33		2.84	41	91.5	0.02			
	东 III 区 48 组平均线	12.2	2.18	1.95		2.78	17.5	49.9	4.9	7000	4.06	含碎石粘砾质土。
	东 III 区下包线	4.0	1.88	1.59		2.69	3.0	19.5	78	207	3.77	

检验,一般都采用碾压后密度与击实试验的密度之比,即压实度控制施工质量。室内其它力学性试验也以击实的最大干密度和最优含水量作制样控制标准。施工时防渗料含水量也应以击实最优含水量为标准。所以击实试验成果直接影响其它力学性试验和施工质量。

采用击实功能为 866kJ/m³,击实桶容积为 22000cm³,分三层击实,每层厚 10cm,每层 50 击。

影响击实试验的主要因素:(1)击实土样粗粒料中团粒结构的影响。(2)击实落锤高度。(3)土样配料前各级配含水量的测试控制情况。(4)击实后含水量取样均匀程度。其中含水量测试是较为关键问题,它与所取土料

粗、细比例是否合适及所取部位有关。其含水量可以通过修正方法加以确定,试验成果列入表 3。

以上三个区中,东 I 区试验点位 SJ1 试验线比整个区平均线略为偏上(见图 1)。而东 II 区与其相反,试验线略低于东 II 区平均线(见图 2)。东 I、II 区最优含水量与天然含水量相近。东 III 区最优含水量高于天然平均含水量。由于试样采用风干土加水制备,会引起土的部分失水不可逆,故实际最优含水量将略高于试验最优含水量,有利于施工碾压。东 I、II 区的最大干密度相近。东 III 区的最大干密度较小,击实后的密实性差些。

4.2 压缩试验

压缩试验反映防渗料在施工碾压后,防

表 3 东边坡料场物理力学性试验成果表

工 程 编 号	天然状态物理性质				击实试验			压缩试验		抗剪强度试验		渗透变形试验			说 明	
	天然 密度	天然 含水量	<5 mm 含量	<0.1 mm 含量	击实 功能	最大干 密度	最优含 水量	压缩 系数	压缩 模量	凝 聚力	摩 擦角	临 界 坡降	破 坏 坡降	透 透 系 数		
	ρ_d	ω_0	$P < 5$	$P < 0.1$	W	ρ_{dmax}	ω_{op}	$0.8 \sim 1.2$ a_v	$0.8 \sim 1.2$ E_s	$\frac{c}{cu}$	$\frac{\varphi}{cu}$	i_k	i_l	k_{10}		
	g/cm ³	%	%	%	kJ/m ³	g/cm ³	%	MPa ⁻¹	MPa	10 ² kPa	度	—	—	cm/s		
I 区	SJ1	1.98	14.58	43.63	30.63	866	1.96	13.00	0.0412	35.57	0.10	20.56	3.62	≥12.16	3.0×10 ⁻⁷	代表 I 区
II 区	SJ2	2.02	11.04	36.88	19.61	866	1.95	12.50	0.0370	38.11	0.10	21.18	4.01	5.60	4.33×10 ⁻⁷	平均 值代 表 高压 三轴 试验
	QJ13	1.98	14.81	45.12	24.29	866	1.89	15.50	0.0488	30.12	0.10	19.54	3.24	8.03	2.63×10 ⁻⁶	
	QJ11	2.17	9.98	40.04	23.94	866	2.21	8.50	0.0166	73.96	0.40	29.36	2.02	4.09	2.62×10 ⁻⁶	
	SJ12	2.16	8.69	29.13	16.83	866	2.06	9.80	—	—	—	—	—	—	—	
III 区	QJ21	1.84	14.80	64.62	45.24	866	1.76	17.00	0.0463	33.94	0.05	16.44	2.94	5.04	4.97×10 ⁻⁷	平均 值代 表 高压 三轴 试验
	SJ4	2.12	8.83	40.37	24.43	866	1.97	12.80	0.0433	32.63	0.10	19.67	5.30	8.03	7.45×10 ⁻⁷	
	QJ18	1.80	13.88	59.37	41.13	866	1.90	15.30	—	—	—	—	—	—	—	

渗心墙受加载的沉降量。防渗心墙的压缩量小,能防止心墙与坝壳之间产生较大的负摩擦力,避免防渗心墙水平方向劈裂。

压缩试验的试样直径为 $\varphi 50.5\text{cm}$,试样高 24cm。按击实最大干密度和最优含水量制样。试验分六级施加压力,分别为:0.05、0.1、0.2、0.4、0.8、1.2MPa 分三层制样,样制好后吊入大型饱和箱内进行抽气饱和。然后吊出安装在压缩仪上装百分量表,加压进行试验。

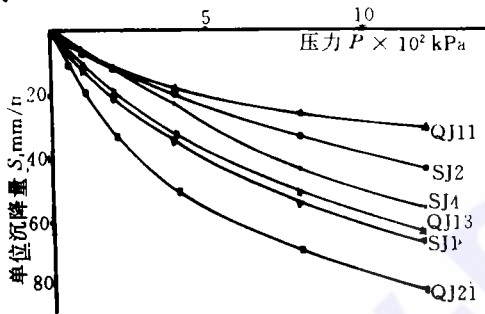


图 4 压缩试验 P~S 关系曲线

因防渗心墙大部分承载均在 1.2MPa 以上,其压缩试验的压缩系数和压缩模量取值,按 0.8~1.2MPa 级差计算出,其试验成果见表 3。东 I 区平均压缩系数为 0.0412MPa⁻¹,压缩模量为 35.57MPa。东 II 区平均压缩系数为 0.034MPa⁻¹,平均压缩模量 47.4MPa。

东 III 区平均压缩系数为 0.045MPa⁻¹,平均压缩模量为 33.3MPa。其各试验 P~S 关系曲线见图 4。

由此得出东 I 区抗压性最好,东 II 区次之,东 III 区较差,东边坡三个区均属低压缩性土,能满足防渗土料的抗压性要求。

4.3 抗剪强度试验

防渗料的抗剪强度好坏,直接影响着防渗心墙边坡的稳定和是否产生裂缝。心墙防渗料的抗剪强度要求与坝壳抗剪能力有关。坝壳既可帮助防渗心墙的稳定,而坝壳的抗剪指标高,也要求防渗料抗剪能力要高,以防止坝壳产生拱效应,而使心墙开裂。

试验采用 $\varphi 50.5\text{cm} \times 45\text{cm}$ 的直剪仪。试验方法为饱和固结快剪。试样制备采用击实法,分三层装填抽气饱和。剪切面开缝,考虑到粗、细料的含量变化,控制剪切过程中的内部结构变化。当粗料含量高时,剪切过程是粗料彼此之间的滚动、摩擦和剪断。当细料含量高时,粗颗粒被细料包裹,剪切过程主要是细料彼此之间的滚动和摩擦。因此,按 1.5cm、1.1cm、0.7cm 三种开缝。

剪切试验的主要影响因素:(1)制样的均匀性,特别是剪切面上的均匀性。(2)试样的

饱和度。(3)试样的剪切速率。(4)试样剪切开缝大小。(5)破坏点的选取。

试验成果见表3。东Ⅰ区的凝聚力为0.01MPa,内摩擦角20.56°;东Ⅱ区的凝聚力为0.01~0.04MPa,内摩擦角为19.5°~29.4°;东Ⅲ区凝聚力为0.005~0.01MPa,内摩擦角为16.4°~19.7°。东Ⅰ区抗剪强度最高,东Ⅱ区次之,东Ⅲ区最差。

4.4 渗透变形试验

堆石坝心墙防渗料的抗渗透性是防渗料好坏评价极为重要的指标之一。渗透变形试验,反映防渗料的渗透性及抗渗透破坏形式。目前渗透变形试验方法很多。本次试验采用大型垂直渗透仪,水流方向与层间方向垂直。直径为φ30cm,渗径20cm,分三层装填。水流方向自下而上,试样制备按击实最大干密度和最优含水量控制。

影响试验的主要因素:(1)侧壁渗漏。(2)试件中产生气泡堵塞渗流通道,影响试验。(3)水质情况。

由表3看出。东Ⅰ区试验临界坡降3.62,渗透系数 3.00×10^{-7} cm/s;东Ⅱ区试验临界坡降为2.02~4.01,渗透系数 $4.3 \sim 26.3 \times 10^{-7}$ cm/s;东Ⅲ区试验临界坡降2.94~5.30,渗透系数 $4.97 \sim 7.45 \times 10^{-7}$ cm/s。其试验渗透坡降与速率关系曲线见图5。

从颗粒分析资料看,东Ⅰ、Ⅱ区的试验颗粒分线分别高于和低于本区的平均线,且两个区的平均细料含量和粘、粉粒含量相近。因而,东Ⅰ区的平均线临界坡降将低于试验值。东Ⅱ区则相反,其临界坡降值将高于试验临界坡降值。东Ⅰ、Ⅱ区抗渗性相似,东Ⅲ区抗渗能力更佳。

整个东边坡料场的防渗土料均完全能满

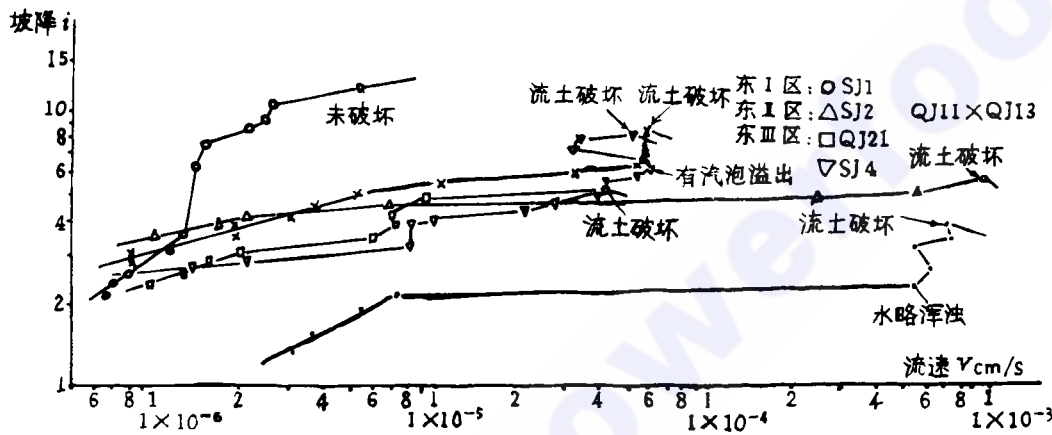


图5 渗透坡降*i*~流速*v*关系曲线

足堆石坝防渗料的抗渗性要求。

4.5 高压大三轴试验

为了满足堆石坝方案的有限元应力~应变及边坡稳定计算分析。分别对东Ⅰ区和东Ⅱ区各进行一组高压大三轴试验,并提出土的弹性非线性 $E-\mu$ 模型的八个参数。

试验采用GST-80型高压大三轴及平面应变仪,试样直径φ30cm,高60cm。试样制备按击实最大干密度和最优含水量控制,分10层装填。在样中间,用砂装填一个自底部到顶

部的贯穿的细通道(相当于防渗料的渗透途径),以利孔隙水压力在固结和剪切过程中完全消散。试验方法为饱和固结排水剪。试验分四级施加围压,加压后剪切,并自动采集数据,然后整理出 $E-\mu$ 模型的八个参数。

影响试验的主要因素:(1)试样的饱和度。(2)橡皮膜的厚度和柔度。(3)试样加荷速率。(4)试样孔隙水压消散情况。

试验成果列入表4。成果表明,固结排水剪的 C_{cu} 、 φ_{cu} 值,明显地高于固结不排水剪的

表 4 东边坡碎石土心墙料高压大三轴试验成果表

试 验 编 号	控 制 密 度	最 优 含 水 量	施 加 围 压		非 线 性 $E-\mu$ 模 型 参 数								
					ρ_{dmax}	w_{op}	σ_3	c	φ	R_t	K	n	D
					MPa	MPa	°	—	—	—	—	—	—
I 区 QJ12	2.06	9.80	0.9~0.9	1.3 1.7	0.214	31.51	0.70	349	0.505	3.77	0.116	-0.130	
II 区 QJ18	1.90	15.30	0.4~0.8	1.2 1.6	0.190	25.38	0.70	244	0.570	3.35	0.394	0.038	

C_{cu} 、 φ_{cu} 值。东 II 区的抗剪强度试验值高于东 II 区试验值。

5 结论和建议

5.1 结论

1. 从物性试验成果看出,东边坡料场 I、II 区碎石土料优于 III 区。
 2. 东 I、II 区的最优含水量与天然含水量接近。东 III 区含水量高于天然含水量,以致压实性较差。所以东 I、II 区优于东 III 区。
 3. 东边坡三个区防渗料的压缩性和抗渗稳定性均能满足堆石坝防渗料的要求。属低压缩性土,渗透破坏形式为流土破坏。
 4. 东边坡三个区的防渗料的抗剪指标略低于高堆石坝防渗心墙对防渗料的抗剪强度要求,其中东 III 区最差。
- 纵观东边坡料场,东 I、II 区防渗土料在土的均质性,压实性,抗压缩性和抗剪性等方

面,均优于东 III 区。其中 II 区最好, I 区次之。

5.2 建议

1. 考虑采用 I、II 区土料作为该工程的防渗料。III 区可作为备用,使用时将 III 区土料用于堆石坝防渗墙顶部。
2. 考虑到实际施工中,80mm 以上的大颗粒被剔除,土料的粗粒含量将减少。防渗土料的室内力学性试验,应以剔除 80mm 以上的颗粒级配曲线作为试验筛分线,将 60~80mm 部分的粗颗粒作为超径粒组,按等量代替法处理。击实试验成果以 60~80mm 粒组当超径含量进行校正。

参 考 文 献

- 1 黄文熙主编.《土的工程性质》.水利电力出版社,1983 年 1 月
- 2 Hans F. Winterkorn And Hsai-Yang Fang. Foundation Engineering Handbook. van Nostrand Reinhold Company, 1975

参加本试验的有唐剑虹,陈定贤、于敬克、胡文华、袁光国等同志。

Experiment and Study on Impervious Materials at Xiluodu Hydroelectric Station

Tang Jianhong Chen Dengxian

(Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Reaserch Institute)

Abstract The alternative scheme of Xiluodu hydroelectric station is impervious core wall type rockfill dam which is evaluated here. The work includes large-scaled screening at site, density determinations and experiment and study on laboratory physical and mechanical properties of impervious core material. The advantages and disadvantages of impervious earth in three zones at east slope are also estimated. Material requirements and better suggestions on further experiment and study are presented to provide useful basis for the selected material site, specifications for material. Experiment and analysis method, material selection method for impervious earth are presented.

Key Words impervious earth, material selection method, physical and mechanical properties, experiment and study.