

技术创新

硃碛水电站大坝碎石土防渗料工程特性及土料设计

王寿根

(国家电力公司成都勘测设计研究院, 成都 610072)

[摘要] 硃碛水电站大坝高 123 m, 采用宽级配碎石土作为高土石坝心墙防渗料。对全料场进行了大量的室内工程特性试验研究以论证使用该材料的可行性, 提出了设计及施工控制标准; 选用代表性土料通过现场碾压试验验证该控制标准的合理性; 对坝体、坝基进行了整体三维应力应变和渗流计算, 分析了各种材料控制标准的合理性和共同作用下大坝的安全性; 详实论述了防渗料工程特性研究方法、过程、成果, 提出了心墙防渗料设计及施工控制标准。

[关键词] 硃碛水电站; 宽级配碎石土; 防渗料; 工程特性; 碾压试验; 土料设计

[中图分类号] TV441 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)07-0088-06

1 概况

硃碛水电站是四川省宝兴河流域开发的龙头工程, 于 2002 年 10 月开工, 坝址位于宝兴县硃碛乡下游 1 km 的东河上, 挡水建筑物为碎石土心墙堆石坝, 最大坝高 123 m, 库容 $2.12 \times 10^8 \text{ m}^3$, 装机容量 240 MW, 心墙防渗料用量约为 $81 \times 10^4 \text{ m}^3$, 采用砾石土料。该料场位于坝址上游 2~2.6 km、海拔 2 050~2 170 m 的宽缓台地, 面积 $14.5 \times 10^4 \text{ m}^2$, 有用层厚度 15~20 m, 探明储量 $256 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该料场有用层厚度稳定, 整体质地均匀, 虽由上往下, 砾石粒径稍有加粗趋势, 但击实破碎率高, 为质量较好的防渗土料。

2 试验研究及土料设计

根据国内外土石坝设计经验, 适做大坝防渗体的粗粒土, 其特性及适用性见表 1。

大坝心墙防渗体采用砾石土料, 其可行性和土料设计及施工控制标准, 是在对全料场进行大量工程特性试验研究基础上提出, 再对代表性土料进行现场碾压试验验证, 最后对坝体、坝基进行整

体三维应力应变和渗流计算后确定的。

表 1 适做大坝防渗体的粗粒土特性及适用性

Table 1 Characteristics list of the coarse-grained soil suit for the impervious material of the dam

分类符号	特性			用作坝体	
	碾压后的透水性	碾压后饱和抗剪强度	碾压后饱和压缩性	可填筑性	防渗体的适用性
GM	平透水—不透水	良	几乎没有	良	4 级
GC	不透水	良—可	极小	良	1 级
SM	平透水—不透水	良	小	可	5 级
SC	不透水	良—可	小	良	2 级

2.1 全料场详勘及工程特性试验

2.1.1 基本物理力学试验 可研和招标阶段对该料场进了详细勘探, 完成 61.5 m 浅井、302 m³ 坑槽探、全坑刻槽取样进行了 77 组物理力学试验 (结果见表 2, 包线级配见图 1), 以及 8 个钻孔取样进行了 27 组物理力学试验 (因钻孔改变了土体颗粒级配, 未予采用)。表 2 及图 1 可见:

1) 颗粒组成表明: 本防渗土料分类定名为粘土质砾 (GC), 不均匀系数为 1 225.0, 曲率系数

表 2 昨日碎石土料物理力学性质汇总表

Table 2 The physics and mechanics characteristics list of the crushed stones and earth in Kari

试样编号	天然				颗粒大小组成/%						
	含水率 /%	湿密度 /g·cm ⁻³	干密度 /g·cm ⁻³	容重	>150 mm	150~5 mm	5~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm	>5 mm	<0.075 mm
上包线	-	-	-	-	0	24.5	39.5	15.0	21.0	24.5	36.0
平均线	9.76	2.06	1.88	2.73	1.4	52.75	27.44	9.37	9.22	53.97	18.59
下包线	-	-	-	2.71	8.0	77.50	13.00	2.50	1.00	83.5	3.50

试样编号	击实		渗透变形		压缩			直剪	
	最大干密度 /g·cm ⁻³	最优含水率 /%	渗透系数 /cm·s ⁻¹	临界坡降	破碎率 /%	压缩系数 /MPa ⁻¹	压缩模量 /MPa	凝聚力 /MPa	内摩擦角 /度
上包线	-	-	-	-	-	-	-	-	-
平均线	2.09	9.5	3.15×10 ⁻⁷	6.53	11.83	0.102	13.42	0.02	24.5
下包线	2.09	8.5	2.33×10 ⁻³	0.85	3.77	0.052	25.06	0.03	27.4

为 30.60。

2) 含水率试验表明：天然含水率除个别点位大于最优含水率 3~5 个百分点外，其余与最优含水率相近。

3) 力学试验表明：凝聚力为 0.02 MPa，摩擦角为 24.5°；0.1~0.2 MPa 压力下压缩系数为 0.101 MPa⁻¹，压缩模量为 13.42 MPa；渗透系数为 3.15×10⁻⁷ cm/s，临界坡降为 6.53，破坏坡降为 11.83，破坏型式为流土。

4) 矿化分析表明：其硅铝比为 2.91~3.05，主要矿物成分以伊利石为主，含有少量蒙脱石，其液限为 34.8%，塑限为 18.8%，塑性指数为 16，根据卡沙格兰德塑性图判定该料不属于膨胀性土，符合使用条件。

整，以使原来不均匀的材料相对均匀化。

2.1.2 土料压实特性试验 目的是通过对土料在 P₅ (砾石含量) 不同时的全料大型击实试验，查明不同 P₅ 与 ρ_{dmax} (最大干密度) 和 ω_{op} (最优含水率) 的关系等压实特性，以确定砾石含量上限。考虑到硃碛水电站坝高 123 m，为了满足压缩性要求，必需规定砾石含量下限，为此对细料进行了试验，结果见表 3、表 4。从表 3 可以看出：

1) 碎石土的全料最大干密度 ρ_{dmax}、细料最大干密度 ρ'_d、渗透系数 k₂₀ 与粒径大于 5 mm 的颗粒含量 P₅ 呈单峰型曲线关系。

2) ρ'_d-P₅ 曲线和 k₂₀-P₅ 曲线在 P₅≈20%~30% 时出现拐点：ρ'_d 减小幅度增大、k₂₀ 随 P₅ 增加由减小变为增大，这一特征砾石含量用 P₅¹ 表示。由表 4 可知，昨日碎石土料中的细料为粘性土，抗压缩性能差。为了满足高坝要求，参考国内外经验，规定砾石含量下限大于 20%。

3) ρ_{dmax}-P₅ 曲线在 P₅≈70% 时，出现拐点 (ρ_{dmax} 达到最大值)，此砾石含量为第二特征值 P₅²。超过此值后 P₅ 增加、ρ_{dmax} 反而下降，是由于细料不足以完全充填砾石间的孔隙所致。P₅=70% 时渗透系数 k₂₀=4.12×10⁻⁵，比 P₅=25% 时 k₂₀ (4.5×10⁻⁸) 增大了 3 个数量级，已不满足《碾压式土石坝设计规范》(SL274-2001) 要求。为此，参考国内外经验，拟定砾石含量上限≤50%。

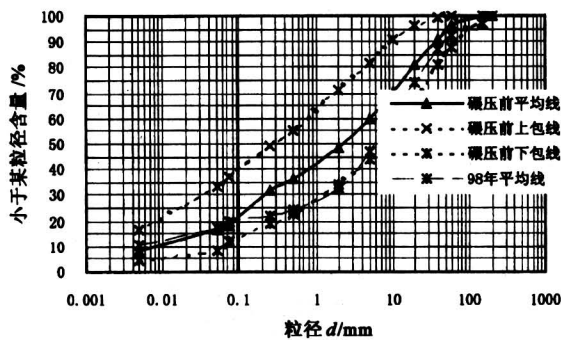


图 1 心墙料颗分曲线

Fig.1 The impervious material gradation curve

综上，昨日碎石土料做心墙防渗料是可行的，满足粗粒土的特性及其适用性要求 (见表 1)，但全料场综合下包线级配较粗，上坝前需进行级配调

2.1.3 与反滤层的联合抗渗试验 土石坝心墙在反滤层保护下工作。为此选用综合平均级配心墙料 (见表 2)，进行了 3 组大型心墙料与反滤层联合抗渗试验 (见表 5)，以论证心墙料与反滤料

表3 全料及细料大型击实成果表

Table 3 Results list of the large-scale compacted test for fine-grained and fully-graded material

试验编号	>5mm 含量/%	全 料			<5 mm 细料		
		最优含水率	最大干密度	渗透系数	干密度平均破碎量	平均破碎率	
		$\omega_{op}/\%$	$\rho_{dmax}/g \cdot cm^{-3}$	$k_{20}/cm \cdot s^{-1}$	$\rho'_d/g \cdot cm^{-3}$	/%	/%
1	0	14.5	1.85	1.02×10^{-7}	1.850	0	0
2	10	13.0	1.92	8.2×10^{-8}	1.847	1.05	10.45
3	20	11.0	1.99	4.12×10^{-8}	1.845	2.45	12.05
4	30	10.0	2.03	4.12×10^{-8}	1.840	3.77	12.56
5	40	9.3	2.06	1.6×10^{-7}	1.785	5.68	14.19
6	50	8.6	2.08	1.02×10^{-6}	1.734	6.80	13.68
7	60	8.0	2.11	9.05×10^{-6}	1.670	9.65	16.08
8	70	7.5	2.12	4.12×10^{-5}	1.610	-	-
9	80	7.0	2.11	-	-	-	-
10	90	6.5	2.01	-	-	-	-
11	100	5.9	1.9	-	-	-	-

表4 细料试验成果表

Table 4 Results list of experiments for the fine-grained material

容重	颗粒大小组成/%			分类	塑性/%			最大干密度	最优含水率
	G_s	5~0.075 mm	0.075~0.005 mm		<0.005 mm	ω_l	ω_p		
2.73	59.61	20.36	20.03	CL	34.8	18.8	16.0	2.09	9.50

是否满足要求(反滤料设计见后续论述)。

结果表明:心墙料在反滤层保护下,渗透系数 k_{20} 由 3×10^{-7} 降低至 $\approx 9 \times 10^{-8}$, 临界坡降 i_k 由 6.53 增大至 50.7~55.7, 增大 7.7~8.5 倍。说明心墙防渗土料加反滤层保护后抗渗能力得以较大幅度提高。

表5 心墙料在反滤料保护下渗透变形试验成果

Table 5 Results list of the seepage deformation of the core material protected by the filter material

指 标	X 混合反滤	Y 混合反滤	B 混合反滤
渗透系数 $k_{20}/10^{-8} cm \cdot s^{-1}$	9.03	8.93	8.92
临界坡降 i_k	55.7	55.0	50.7

2.2 土料设计及施工控制标准

根据上述试验研究成果和《碾压式土石坝设计规范》(SL274-2001)要求,并参考国内外经验确定心墙防渗土料控制标准为:

1) 级配:填筑料最大粒径应不大于 150 mm; 粒径大于 5 mm 的颗粒含量为 20%~50%; 小于 0.075 mm 的颗粒含量为 15%; 0.005 mm 的粘粒

含量为 5%~20%。

2) 碎石土心墙料的渗透系数应小于 $1 \times 10^{-5} cm/s$, 抗渗透变形的临界坡降应大于 4.0, 其渗透破坏型式应为流土; 塑性指数为 7~20。

3) 碎石土心墙料的含水率为最优含水率的 2%~3%。

4) 碎石土心墙料的全料压实度应大于 98%, 细料压实度应大于 99%。

由于碎石土在不同 P_5 时 ρ_{dmax} 是不同的, 所以碎石土的压实干密度采用某一固定值显然是不合理的, 应采用“固定压实系数, 浮动干密度”来确定干密度, 以保证不同 P_5 时的填土既有不同的填筑干密度, 又具有相同的压实系数。

碎石土的压实标准分为全料压实系数控制与细料压实系数控制。因为碎石土的渗透性与渗透稳定性主要取决于细料的性质和细料的干密度, 为保证细料得到有效压实, 以采用细料压实系数控制为宜, 为便于不同施工单位的检测习惯和设备配置。经试验分析研究提出了不同 P_5 时全料的干密度与其细料干密度的对应关系(见表 6)。

2.3 现场碾压试验

表 6 全料、细料压实干密度控制值

Table 6 Control standards list of the compacted dry density for fine-grained and fully-graded material

击实功能 E	862.5/kJ·m ⁻³						
粗粒含量 P ₅ /%	0	10	20	30	40	50	60
全料击实 最大干密度 ρ _{dmax} /g·cm ⁻³	1.850	1.905	1.952	1.993	2.031	2.068	2.104
全料击实 细料干密度 ρ' _d /g·cm ⁻³	1.850	1.846	1.843	1.840	1.833	1.814	1.792
全料干密度控制值 mρ _{dmax} /g·cm ⁻³	1.832	1.886	1.933	1.973	2.011	2.047	2.083
细料干密度控制值 βmρ' _d /g·cm ⁻³	1.832	1.828	1.825	1.822	1.815	1.796	1.774
设计的最优含水率 ω _{op} /%	14.20	13.40	12.30	11.40	10.50	9.70	8.90

用碎石土做高土石坝心墙防渗料在国内属首次，这种土料级配范围宽、均匀性差，室内试验难以反映实际填筑坝体的工程特性，需通过现场碾压试验，以论证根据室内试验成果确定的土料控制标准在当前施工水平和工艺条件下的可靠性。

2.3.1 试验方案 碾压试验场地面积 36 m × 22 m，经凸块碾碾压密实的昨日碎石土料作为基底，场地纵横高差控制在 5 cm 以内。试验场分为 12 个试验参数单位，每个试验参数单元的面积 40 m²。

碾压机具采用振动凸块碾，前进速度为 0~4 km/h，技术指标如表 7。

表 7 振动凸块碾技术指标表

Table 7 Technical indices list of the pad foot vibration roller

国别	型号	种类	静重 /kN	碾长 /m	振动频率 /Hz	激振力 /kN	激振力 /静重
中国	ZX-205	自行式	204	2.00	45	356	1.745

根据室内试验成果及现场碾压试验要求，选择具有代表性的 3# 坑浅黄色平均级配土料和 6# 坑灰黑色偏粗土料作为试验土料。取样采用挖土机立式开采，采深 4 m，将上下层料充分混合后，用 T815 自卸汽车运输。试验共安排 4 场：

1) 第一、第二场研究两种土料在不同铺土厚度 (30, 40, 50 cm) 和不同碾压遍数 (6, 8, 10, 12) 下的压实效果，采用逐渐收敛法，选定碎石土料的最优铺土厚度和最优压实遍数。

2) 第三场研究两种土料在最优铺土厚度和最优压实遍数下，变化含水率 (ω_{op} + 3%, ω_{op}, ω_{op} - 2%)、行车速度、铺料方式的压实效果。

3) 第四场为两种土料在最优参数确定后，按最优参数填筑五层，进行复核试验，并在压实土体上进行原位大剪、承载、注水、渗透变形试验，并取料进行室内三轴压缩试验。

4) 各场试验质控手段以试坑法取样进行容重、筛分、含水率试验，辅以沉降量测定，相互校核。

2.3.2 试验成果及分析 以上四场试验，共压实土方约 3 000 m³，完成现场物性试验 237 组，含水率试验 216 组，击实试验 16 组，现场大型原位试验 24 组，部分室内物理力学试验 12 组，结果见表 8、表 9。现场碾压试验表明：

1) 最优压实参数为：铺土厚度 40 cm，静碾 2 遍，振碾 8 遍，填筑含水率控制在 ω_{op} + 2% ~ ω_{op} - 2% 范围内为宜，退铺法更佳。

2) 通过现场碾压试验验证，按击实试验确定的压实标准比较符合实际，当 P₅ = 20% ~ 50% 时，压实度平均值达 100%，干密度合格率达到 96% 以上，填筑干密度比设计干密度高 0.04 g/cm³ 左右。

表 8 现场填筑质量检测成果

Table 8 Test results list of the filling quality on site

土类	特征粒径含量/%			碾后破 碎率/%	填筑质量检测		压实度/%	
	>5	<5	<0.075		干密度/g·cm ⁻³	含水率/%	下限	平均
3	31.80	62.20	21.33	11.25	2.060~2.139, 平均 2.083	8.47~12.85, 平均 10.80	103.4	105
6	37.78	62.22	17.98	0.27	1.965~2.110, 平均 1.993	12.72~17.3, 平均 16.35	98.6	101

3) 2种土料现场注水试验结果表明, 渗透系数均在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/s; 压实土体原状样室内渗透试验(8组)渗透系数均在 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/s, 证明咔日料防渗性能满足要求。

4) 现场压实土体的渗透变形试验结果表明, 2种土体的破坏型式均为流土, 破坏坡降为 8.42~10.13, 能满足渗透变形要求。

5) 从力学性能分析, 3[#]土料填筑含水率控制

合适, 力学性能能满足要求。受雨季影响, 6[#]土料填筑含水率偏高, 因此力学性能差, 说明“填筑含水率宜控制在 $\omega_{op} + 3.0\%$ 以内”的要求合理。

3 结论

1) 最优压实参数为: 铺土厚度 40 cm, 静碾 2 遍, 振碾 8 遍, 填筑含水率控制在 $\omega_{op} + 2\% \sim \omega_{op} - 2\%$ 范围内为宜, 退铺法更佳。

表9 现场试验成果

Table 9 Test results list on site

土类	颗粒大小组成/%						干密度 /g·cm ⁻³	含水率/%	
	>150 mm	150~5 mm	5~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm	>5 mm			<0.075 mm
3	0	31.80	45.86	12.55	9.79	31.80	21.34	2.08	10.80
6	0	37.78	44.24	10.02	7.96	37.78	17.98	1.99	16.35

土类	现场压实度/%	室内压缩模量/MPa	现场抗剪		现场渗透变形			现场渗透系数 /cm·s	
			凝聚力/MPa	内摩擦角/(°)	渗流方向	破坏坡降	破坏型式	顺层方向	垂直方向
3	105	10.98~15.96	0.025	23.4	垂直	8.42	流土	1.56×10^{-6}	3.64×10^{-8}
6	101	6.74~12.66	0.035	18.0	垂直	10.13	流土	4.38×10^{-8}	1.97×10^{-8}

2) 大坝心墙防渗土料小于 5 mm 平均含量为 62.2%~68.2%, 细料可以填满粗料的孔隙, 而不致产生架空现象, 小于 0.075 mm 颗粒平均含量为 17.98%~21.33%, 可达到防渗要求, 其级配按统一分类为 GC, 符合作防渗料的级配要求。设计控制指标合理。

3) 大坝心墙防渗土料室内渗透试验与原位渗透试验成果基本一致, 渗透系数为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/s, 可以满足防渗要求; 渗透变形的破坏型式为流土, 破坏坡降较高, 加反滤层及盖重后抗渗透变形能力更好。设计控制指标 $k_{20} < 1 \times 10^{-5}$ cm/s 合理。

4) 大坝心墙防渗土料压实性能好, 咔日料平均级配的室内击实试验最大干密度为 2.07 g/cm³, ω_{op} 为 9.7%; 现场用线压力 1.78 kN/cm 的振动凸块碾、铺土 40 cm, 压 8 遍, 干密度可达 1.98~2.08 g/cm³; 压实度平均 100%, 干密度合格率 96% 以上。设计控制指标——细料压实度 > 99%

合理。

5) 3[#]土料力学性能较好。现场载荷试验的变形模量值 8.49 MPa, 室内压缩模量达 10.98 (对应 $P_5 = 20\%$)~15.98 MPa (对应 $P_5 = 50\%$), 可与坝壳模量匹配; 抗剪强度较高, 凝聚力 $c = 0.025$ MPa, 内摩擦角 $\varphi = 23.4^\circ$, 说明使用咔日土料做心墙防渗料是完全可行的。

参考文献

- [1] SL274-2001 碾压式土石坝设计规范[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002
- [2] GB/T 50123-1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- [3] 高堆石坝关键技术问题研究总结报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1995
- [4] 林昭. 碾压式土石坝设计[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003
- [5] 雷泽宏. 瀑布沟水电站黑马 I 区防渗料的选择[J]. 水电站设计, 2001(3)

The Engineering Characteristics and Design of the Crushed Stones and Earth as Impervious Material for the Dam in Qiaoqi Hydropower Station

Wang Shougen

(*Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute of State Power Corporation, Chengdu 610072, China*)

[**Abstract**] The dam of Qiaoqi Hydropower Project is 123m high, in which it is the first time for the spreading gradation crushed stone-earth to be adopted as the impervious material for so high an earth – rock dam in China. Study about the engineering application is conducted. First, a lot of experiments about the engineering characteristics are done indoors to analyze the feasibility for this kind of material in whole material storage, based on which, the control standards of design and construction are recommended. Second, the representative earth sample is selected to verify if the control standard is reasonable by rolling experiments on site. Finally, the three – dimension stress and strain and seepage about the dam body and foundation are calculated to analyze the rationality of the control standard for these materials and the safety factor of the dam under all the actions together. This article states the methods, process and results of the study on the impervious materials and proposes the design and construction control standards for the impervious material used as the core wall.

[**Key words**] Qiaoqi Hydropower Project; spreading gradation crushed stones and earth; impervious material; engineering characteristics; rolling experiment; design for earth gradation

(cont. from p. 80)

Interaction Effects Between Wave and Two Connected Floating Bodies

Gou Ying, Teng Bin, Ning Dezhi

(*State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China*)

[**Abstract**] In this paper, boundary integral equation method is used to study the hydrodynamic interaction effects between wave and two connected floating structures. The hydrodynamic interaction between the two bodies is considered. The amplitudes of the body motions are determined according to the motion equations of the two bodies and the continuous conditions at the connection between the bodies. In order to verify this method, the heave amplitude at the hinged joint and the relative angular deflection of two floating barges, which connected by a hinge, are calculated and compared with the results from Newman. The comparison shows that the present calculation agrees well with Newman's result except at the nearby of the resonant frequency of the system. At the resonant frequency of the hinged system the present result changes quickly, but Newman did not mention the phenomenon.

[**Key words**] boundary integral method; hydrodynamic interaction effects; motion responses