

晓碛水电站大坝帷幕灌浆试验

唐群刚, 刘 义

(四川准达岩土工程有限责任公司, 四川 成都 610072)

摘 要: 晓碛水电站坝址区工程地质条件复杂, 根据大坝防渗帷幕工程需要, 进行了大坝帷幕灌浆试验, 获得了充分的灌浆工艺技术参数, 为帷幕灌浆设计和施工提供了依据, 对类似灌浆工程施工具有重要的参考及借鉴价值。

关键词: 晓碛水电站; 帷幕灌浆; 试验

中图分类号: TV543⁺.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-7428 (2009) S1-0305-05

1 工程概况

1.1 电站概况

晓碛水电站是宝兴河流域梯级开发的龙头水库工程, 坝址位于宝兴县晓碛乡下游约 1km 的东河上。工程区右岸有夹金山公路通过。

电站采用碎石土心墙堆石坝长隧洞引水发电, 正常蓄水位 2140m, 最大坝高 123m, 总库容约 2 亿 m^3 , 总装机容量 240 MW。

电站首部枢纽由拦河大坝、泄洪洞、放空洞等组成。拦河大坝坝基及坝肩岩土体抗渗性能较差, 设计采用防渗墙和帷幕灌浆进行全封闭防渗处理。为此, 需要在帷幕灌浆正式施工前进行帷幕灌浆试验, 获得充分的工艺参数, 指导帷幕灌浆施工。

1.2 坝址基本地质条件

坝址左右岸及谷底基岩, 由志留系下统 (S_1) 灰黑色炭质千枚岩与变质砂岩组成。根据其工程特性自下而上分 3 个岩性段, 下段为炭质千枚岩 (S_1^1), 中段为炭质千枚岩与变质砂岩互层 (S_1^2), 上段为炭质千枚岩、粉砂质千枚岩 (S_1^3)。

炭质千枚岩主要矿物成分由绿泥石、石英、石墨及绢云母组成; 变质砂岩由白云石、绿泥石、斜长石、石英等矿物组成。

变质砂岩透水性相对较好; 炭质千枚岩透水性较弱, 构成相对隔水层, 但在构造破坏和风化卸荷较强的岸坡及谷底浅表部位, 则具有较强的透水性。两岸坝肩谷坡下陡上缓, 由炭质千枚岩、变质砂岩互层组成, 由此决定了渗透结构的复杂性。浅表岩体卸荷强烈, 深度较大, 透水性较强, 有条件

形成一定水平范围、沿谷坡连续分布的壳状渗透结构; 各种构造破碎带则构成带状渗透结构; 深部弱~微风化岩体 (钻孔深度范围未揭示相对抗水层) 为中等透水带 ($q=10\sim100\text{Lu}$), 形成深部渗透结构。

2 帷幕灌浆试验概况

2.1 试验目的

为降低坝区岩石的透水性, 减少坝基及坝肩渗漏, 降低扬压力, 确保坝体安全, 设计在坝基及坝肩采用帷幕灌浆进行防渗处理, 并为此进行帷幕灌浆试验, 主要目的为:

(1) 确定帷幕灌浆钻孔适宜的工艺、方法, 选择灌浆段孔壁与裂隙冲洗方法, 测试岩体灌浆前透水率。

(2) 选择并推荐使用合理的灌浆方法及其施工工程序、工艺、灌浆材料和浆液配合比。

(3) 揭示千枚岩、变质砂岩等岩体的可灌性; 测试灌浆效果。

(4) 提供有关孔距、排数、排距、深度、灌浆压力等合理的技术经济指标。

(5) 提出灌浆设备、机具建议意见。

(6) 基本形成编制灌浆设计和施工技术要求等文件的条件。

2.2 试验孔布置

2.2.1 双排帷幕试验

双排帷幕试验孔 10 个, 孔距 2m, 排距 1.5m, 每排分三序施工 (图 1)。帷幕灌浆试验孔深度宜超过防渗帷幕线, 帷幕单孔深 90m。

收稿日期: 2009-08-30

作者简介: 唐群刚 (1977-), 男 (汉族), 湖北孝感人, 四川准达岩土工程有限责任公司项目经理, 工程师, 岩土工程专业, 工程硕士在读, 从事岩土工程、地基与基础工程施工, 四川省成都市青羊区浣花北路 1 号, 13154925660。

万方数据

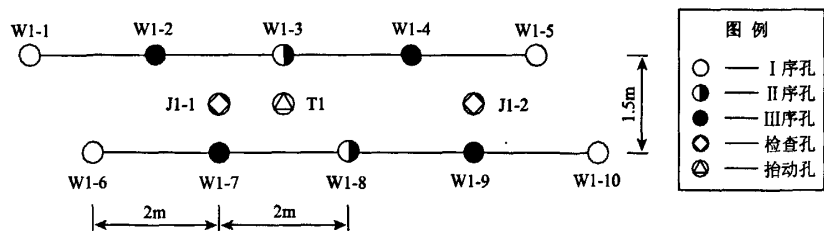


图1 双排帷幕灌浆试验孔布置图

2.2.2 三排帷幕试验

三排帷幕试验孔 14 个，孔距 2.0m，排距 1.25m，两边排分三序施工，中间排分两序施工（图 2）。帷幕灌浆试验孔深度宜超过防渗帷幕线，帷幕单孔深 90m。

表 2 W1-1、W1-6、W2-5、W2-14 孔灌浆压力							
孔深/m	0~2	2~5	5~10	10~15	15~20	20~25	>25
灌浆压力/MPa	0.3	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.5~3.0

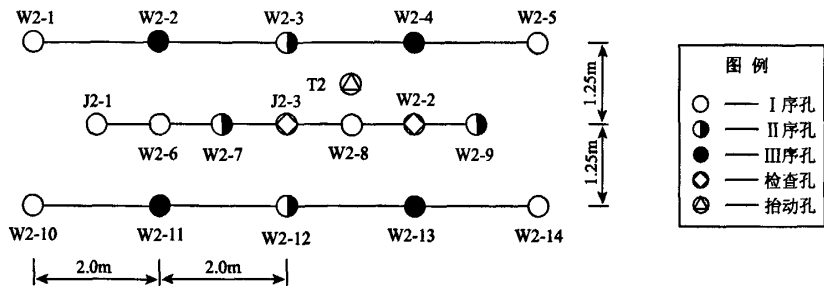


图2 三排帷幕灌浆试验孔布置图

2.3 灌浆材料及浆液

2.3.1 灌浆原材料

采用四川夹江规矩特性水泥有限公司生产的 P.O 42.5 水泥。

2.3.2 灌浆浆液配比

使用 5 : 1、3 : 1、2 : 1、1 : 1、0.8 : 1、0.6 : 1、0.5 : 1 七个浆液比级。

2.4 灌浆段长度分割

灌浆段长度参见表 1。

表 1 灌浆段长度值					
孔深/m	0~2	2~5	5~10	>10	备注
段长/m	2	3	5	5	当地层特别破碎或塌孔严重时可适当缩短段长

2.5 灌浆压力选择

根据试验段的实际情况，为防止浆液扩散半径过大，对最先施工的最边上的 I 序孔 W1-1、W1-6、W2-5、W2-14 的压力调整如表 2 所示。

其它 I 序孔的灌浆压力如表 3 所示，II、III 序孔的灌浆压力较前序孔依次提高 15% 左右。

表 3 I 序孔的灌浆压力							
孔深/m	0~2	2~5	5~10	10~15	15~20	20~25	>25
灌浆压力/MPa	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0~4.0

2.6 试验工艺方法

2.6.1 施工顺序

双排帷幕灌浆孔分为 I、II、III 序；三排帷幕灌浆孔两边排分为 I、II、III 序，中间排分为 I、II 序。三排帷幕灌浆孔，先施工两边排，后施工中间排。

2.6.2 抬动变形观测

在双排帷幕区、三排帷幕区指定位置各安设一个抬动观测装置。抬动观测孔 T1、T2 深度均为 30m。本次试验中抬动观测表明，抬动变形主要发生在灌浆压力较高或耗浆量较大的孔段，深度位于 20~30m 范围内。

2.6.3 钻进方法

帷幕孔采用金刚石回转钻进方法及潜孔锤冲击回转钻进方法，其中 W1-1 孔采用 $\Phi 91$ 、 $\Phi 75$ mm 金刚石单动双管钻具回转钻进取心，其余孔采用 CIR90 潜孔锤冲击回转钻进，当孔深大于 60m 时，采用风、水联合排渣效果差，致使孔内负荷较大，换用 $\Phi 75$ mm 金刚石单管钻具回转钻进。

2.6.4 钻孔冲洗及裂隙冲洗

先用风、水联动进行钻孔冲洗后，再采用压力水进行裂隙冲洗方法，深孔时可采用压力脉动冲洗法进行裂隙冲洗。

2.6.5 压水试验

对 I 序孔作单点法压水试验，其余孔做简易压水试验；单点法压水试验的压力值如表 4 所示，简易压水试验压力为灌浆压力的 80%，并不大于 1MPa。

表 4 单点法压水试验压力

灌浆压力/MPa	≥ 1	< 1	< 0.3
压水压力/MPa	1	0.3	灌浆压力

2.6.6 灌浆

(1) 灌浆方式方法

采用孔口封闭、自上而下分段循环灌浆法。

(2) 灌注浆液及其配合比

选用 5 : 1、3 : 1、2 : 1、1 : 1、0.8 : 1、0.6 : 1、0.5 : 1 七个重量比级。具体起灌水灰比根据地层透水率情况确定，具体原则如下：

①当地层 $\omega \leq 5$ Lu 时采用水灰比为 5 : 1 的浆液开灌。

②当地层 ω 值 $5 < \omega \leq 10$ Lu 时同序孔、同孔深平齐分别选择水灰比为 5 : 1、3 : 1、2 : 1 的浆液开灌（表 5）。

表 5 $5 < \omega \leq 10$ Lu 时灌浆孔开灌水灰比

类型	孔序	5 : 1	3 : 1	2 : 1
双排	I 序孔	W1-1、W1-6	W1-5	W1-10
	II 序孔		W1-3	W1-8
	III 序孔	W1-2、W1-7	W1-4、W1-9	
三排	I 序孔	W2-1、W2-6、W2-10	W2-8、W2-5	W2-14
	II 序孔		W2-3、W2-7	W2-12、W2-9
	III 序孔	W2-2、W2-11	W2-4、W2-13	

③当地层 $\omega \geq 10$ Lu 时同序孔、同孔深平齐分别选择水灰比为 3 : 1、2 : 1、1 : 1 的浆液开灌（表 6）。

表 6 $\omega \geq 10$ Lu 时灌浆孔开灌水灰比

类型	孔序	3 : 1	2 : 1	1 : 1
双排	I 序孔	W1-1、W1-6	W1-5	W1-10
	II 序孔		W1-3	W1-8
	III 序孔	W1-2、W1-7	W1-4、W1-9	
三排	I 序孔	W2-1、W2-6、W2-10	W2-8、W2-5	W2-14
	II 序孔		W2-3、W2-7	W2-12、W2-9
	III 序孔	W2-2、W2-11	W2-4、W2-13	

(3) 灌浆结束标准

灌浆在同时满足下述两个条件后，方可结束：

①在设计压力下，注入率不大于 1L/min 时，延续灌注时间不少于 90min；

②灌浆全过程中，在设计压力下的灌浆时间不少于 120min。

3 灌浆成果及灌后效果分析

3.1 双排帷幕灌浆成果分析

3.1.1 灌浆前透水率分析

双排帷幕孔灌前各次序孔透水率情况见表 7。

表 7 双排帷幕孔灌前各次序孔透水率情况

排序	灌浆次序	孔数	压水试验段数	透水率（Lu）区间 [段数/频率（%）]						透水率平均值（Lu）
				<1	1~5	5~10	10~50	50~100	>100	
双排	I	4	73		17/23	17/23	13/18	1/1	25/35	226.65
	II	2	37		6/16	19/51	7/19	2/5	3/9	37.32
	III	4	73		22/30	28/38	16/22	2/3	5/7	88.44
	合计	10	183		45/25	64/35	36/20	5/3	33/17	133.24

双排帷幕 I 序孔灌前透水率大于 10 Lu 的孔段占 54%；II 序孔灌前透水率主要分布在 5~10 Lu，占 51%；III 序孔灌前透水率小于 10 Lu 的孔段占 68%，其中 30% 的孔段的透水率小于 5 Lu。

III 序孔灌前透水率大于 II 序孔灌前透水率，主要是 W1-2 孔第 1 段透水率过大所致。W1-2 孔第 1 段压水时，不返水、无表压，按照公式计算出该段透水率值为 3920 Lu。

由此可知，I 序孔的灌浆有效地充填、封堵了裂隙通道，使后序孔的透水率较大幅度地减小。

3.1.2 单位注入量分析

水泥单位注入量直接反映在被灌岩体条件下，所采用的灌浆浆液、灌浆工艺的效果。一般情况下，单位注入量按 I、II、III 序逐序递减。双排帷幕孔灌前各次序孔单位注入量情况见表 8。

表 8 双排帷幕孔灌前各次序孔单位注入量情况

排序	灌浆次序	孔数	灌浆总长度/m	注入水泥总量/kg	单位注入量/(kg·m ⁻¹)	灌浆段数	单位注入量（kg/m）区间 [段数/频率（%）]					
							<20	20~50	50~100	100~500	500~1000	>1000
双排	I	4	362.1	131491.58	363.14	73		14/19	6/8	30/41	14/19	9/13
	II	2	180.0	41500.49	230.56	37		1/3	5/14	27/73	3/8	1/2
	III	4	362.4	65261.39	180.08	73	1/1	10/14	24/33	29/40	8/11	1/1
	合计	10	904.5	238253.46	263.41	183	1/1	25/14	35/19	86/47	25/14	11/5

双排帷幕 I 序孔单位注入量大于 500kg/m 的孔段占 32%，其中大于 1000kg/m 的占 13%；II 序孔单位注入量主要分布在 100~500kg/m，占 73%；III 序孔单位注入量小于 100kg/m 的孔段占 48%。单位注入量的分布区间逐序向较小单位注入量方向显著移动。

I、II、III 序孔单位注入量分别为 363.14kg/m、230.56kg/m、180.08kg/m。各次序孔单位注入

量排列为：III 单注 < II 单注 < I 单注。II 序孔单位注入量递减 37%，III 序孔单位注入量递减 22%。

由以上可以看出：各孔段单位注入量随灌浆次序的增加呈现明显递减趋势，说明前序孔的灌浆对裂隙的封堵是有效的。

3.2 三排帷幕灌浆成果分析

3.2.1 灌浆前透水率分析

三排帷幕孔灌前各次序孔透水率情况见表 9。

表 9 三排帷幕孔灌前各次序孔透水率情况

排序	灌浆次序	孔数	压水试验段数	透水率（Lu）区间 [段数/频率（%）]						透水率平均值（Lu）
				<1	1~5	5~10	10~50	50~100	>100	
三排	I	6	109		11/10	49/45	28/26	1/1	20/18	223.36
	II	4	72		10/14	43/60	12/17	1/1	6/8	106.64
	III	4	71		15/21	39/56	15/21	1/1	1/1	15.50
	合计	14	252		36/14	131/52	55/22	3/1	27/11	131.4

从表 9 可以看出，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ序孔透水率分别为 223.36 Lu、106.64 Lu、15.5 Lu，透水率逐序递减明显。这说明，前序孔的灌浆是有效的，成功地充填、封堵了裂隙，使后序孔的透水率显著

降低。

3.2.2 单位注入量分析

三排帷幕孔灌前各次序孔单位注入量情况见表 10。

表 10 三排帷幕孔灌前各次序孔单位注入量情况

排序	灌浆次序	孔数	灌浆总长度/m	注入水泥总量/kg	单位注入量/(kg·m ⁻¹)	灌浆段数	单位注入量 (kg/m) 区间 [段数/频率 (%)]					
							<20	20~50	50~100	100~500	500~1000	>1000
三排	Ⅰ	6	541.7	215177.89	397.23	112		10/9	23/21	52/46	12/11	15/13
	Ⅱ	4	360.7	69279.57	192.07	72		4/6	26/36	36/50	3/4	3/4
	Ⅲ	4	360.4	50602.63	140.40	71	1/1	27/38	16/23	24/34	2/3	1/1
	合计	14	1262.8	335060.09	265.33	255		41/16	65/25	112/4417/7	19/8	

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ序孔单位注入量分别为 397.23kg/m、192.07kg/m、140.40kg/m，Ⅲ单注<Ⅱ单注<Ⅰ单注，符合灌浆规律。Ⅱ序孔单位注入量递减 52%，Ⅲ序孔单位注入量递减 27%，Ⅱ序孔单位注入量递减显著，说明Ⅰ序孔灌浆成功地充填了裂隙。

3.3 灌后透水率分析

3.3.1 双排帷幕试验区

该区布置了两个检查孔 J1-1、J1-2，所采取岩心较完整。裂隙间可见水泥结石，充填良好；上部 15m 内水泥结石较大，约 5~6cm，说明上部岩层破碎严重、裂隙较大，检查孔 J1-1、J1-2 所处位置岩层主要为炭质千枚岩。

检查孔 J1-1、J1-2 的压水试验成果见表 11。

表 11 检查孔 J1-1、J1-2 的压水试验成果

部位	孔数	总段数	透水率区间、段数和频率								备注
			<1Lu		1~3		3~5		>5		
			段数	%	段数	%	段数	%	段数	%	
双排	2	38			24	63	13	34	1	3	排距 1.5m

双排帷幕有 1 段透水率值大于 5 Lu。该段为检查孔 J1-1 第 07 段 (26.0~31.0m)，透水率值为 8.3 Lu。J1-1 孔钻取的岩心在 30.2~34.0m 为褐黄色泥砂，有粘性。分析认为，该段透水率值偏大，可能受此情况影响。除去该段异常情况，各孔段透水率值均满足 <5 Lu 的要求。

另外，63% 的孔段透水率为 1~3 Lu，主要在中下部孔段；34% 的孔段透水率为 3~5 Lu，主要在上部孔段。因此，炭质千枚岩地层采取孔距

2.0m、排距 1.5m 的双排孔帷幕基本能满足 <5 Lu 的防渗标准。

3.3.2 三排帷幕试验区

该区布置了两个检查孔 J2-3、J2-2，所取岩心较完整，岩心采取率高。水泥结石充填良好，水泥结石厚者约 3cm 左右，检查孔 J2-3、J2-2 所处位置岩层主要为变质砂岩。

检查孔 J2-3、J2-2 的压水试验成果见表 12。

表 12 检查孔 J2-3、J2-2 的压水试验成果

部位	孔数	总段数	透水率区间、段数和频率								备注
			<1Lu		1~3		3~5		>5		
			段数	%	段数	%	段数	%	段数	%	
三排	2	38			37	97	1	3			孔距 2.0m 排距 1.25m

(下转第 312 页)

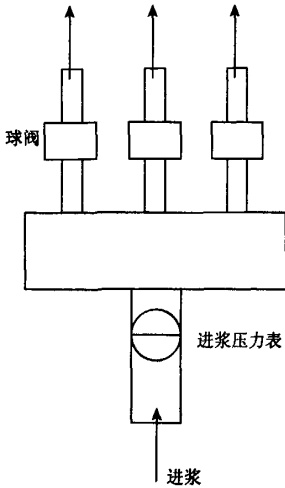


图6 多重灌浆专用器具

液达 3000 L 后，浆液采用 0.5 : 1 水泥浆加入 7% 的膨润土，灌注 2000 L 后，若无明显结束趋势，加水玻璃待凝。

(3) 灌浆压力

灌浆压力，有回浆时以孔口回浆管压力表读数中值为准；无回浆以进浆压力管路上压力表读数中

值为准。I 序孔灌浆压力（表压值）初拟采用 0.2 MPa，II 序孔灌浆压力初拟采用 0.4 MPa。

(4) 灌浆结束标准

灌浆结束标准：在设计压力下，灌浆段注入率不大于 2 L/min，持续 5 min。

2.4.5 多重埋管法灌浆施工

(1) 灌浆次序

灌浆分三级进行，采用“自下而上，分级灌浆，孔内循环”。

(2) 灌浆操作方法

灌浆开始前连接好灌浆管路及多重灌浆管（图 6）。

将最后一级灌浆管阀门打开，用灌浆泵向孔内压水，检查灌浆管是否通畅，然后进行灌浆。

当最上一级灌浆管返出浆液时，或不返浆但灌浆量达到要求时，换用另外一级灌浆进行灌浆，直至灌浆结束。

3 结语

采用多重埋管法对砂卵石地层进行灌浆，有效地、快速地解决了本工程的技术难题，大大的提高了施工的效率，保证工程顺利进行，为类似工程提供参考。

(上接第 309 页)

透水率主要为 1 ~ 3 Lu，占 97%，仅有 1 段透水率为 5.0 Lu。说明三排孔的灌浆完全满足了设计要求，孔距 2.0 m、排距 1.25 m 是合理。

4 结束语

1) 选用的四川夹江矩特性水泥有限公司生产的 P. O 42.5 水泥满足碛碛电站大坝区岩层帷幕灌浆的需要。试验所使用的灌浆浆液性能及其配比适合该试验区地层。

2) 冲击回转钻进方法与回转钻进方法均能满

足帷幕灌浆对钻孔的要求，且冲击回转钻进方法具有钻进效率高、钻进成本低的优点。

3) 变质砂岩地层采用三排帷幕（孔距 2.0 m、排距 1.25 m）能够满足 5 Lu 的防渗标准。炭质千枚岩地层采用 2.0 m 孔距、1.5 m 排距的双排帷幕，基本能满足 < 5 Lu 的要求。

4) 建议帷幕灌浆孔距 2.0 m，上部强风化、强卸荷岩体采用三排帷幕，其余部位采用双排帷幕。

5) 建议最大灌浆全压力控制在 3 ~ 4 MPa。