

DG 水电站河床坝基固结灌浆效果检测分析

杨震中¹ 赵建刚² 张旺¹

1 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081

2 水电九局西藏建设工程有限公司, 西藏 拉萨 850000

[摘要] DG 水电站基础开挖揭露及检测成果表明, 河床坝基分布有一定规模、性状较差的断层破碎带, 且表面岩体由于受应力卸荷和爆破振动的影响, 存在一定程度的松弛圈。固结灌浆作为提高建基岩体完整性的重要措施, 其灌浆效果会直接影响到基础稳定、大坝结构安全及后续工程的施工质量。采用水压试验及综合物探方法对河床坝基固结灌浆质量进行检测, 系统评价固结灌浆效果, 复核灌后岩体物理力学指标是否满足设计要求, 可以为其他类似工程提供参考和借鉴。

[关键词] 河床坝基; 固结灌浆; 物探检测; 灌浆效果

DOI: 10.33142/hst.v6i3.8543

中图分类号: TV5

文献标识码: A

Inspection and Analysis of the Consolidation Grouting Effect of the River Bed Dam Foundation of DG Hydropower Station

YANG Zhenzhong¹, ZHAO Jiangan², ZHANG Wang¹

1 PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou, 550081, China

2 Tibet Construction Engineering Co., Ltd. of Hydropower Bureau 9, Lhasa, Tibet, 850000, China

Abstract: The excavation and inspection results of the foundation of DG hydropower station indicate that there are certain scale and poorly behaved fault fracture zones distributed in the riverbed dam foundation, and there is a certain depth of relaxation zone in the surface rock mass due to the influence of stress unloading and blasting vibration. Consolidation grouting, as an important measure to improve the integrity of the foundation rock mass, its grouting effect will directly affect the stability of the foundation, the safety of the dam structure, and the construction quality of subsequent projects. Using water pressure test and comprehensive geophysical exploration methods to detect the quality of consolidation grouting for riverbed dam foundation, systematically evaluate the effectiveness of consolidation grouting, and review whether the physical and mechanical indicators of the rock mass after grouting meet the design requirements, which can provide reference for other similar projects.

Keywords: river bed dam foundation; consolidation grouting; geophysical detection; grouting effect

引言

随着我国水利水电工程大规模的开展, 水电工程的建设已向广袤的西部地区拓展, 其选址大多位于高山峡谷中, 建设过程将面对节理裂隙发育密集、岩体爆破松弛破坏、断层破碎带发育等越来越多复杂地质条件的考验。为改善这些部位岩石的物理力学性能, 对大坝基础岩体进行的固结灌浆能有效提高和改善坝基岩体的完整性、均质性、强度和不透水性。^[1]故可否准确评价固结灌浆效果对水利水电工程施工建设具有重要价值。为保证 DG 水电站后续建筑物施工质量与安全, 本文采用单孔波速测试、钻孔全景成像、孔内水压试验^[2]及钻孔变模^{[3][4]}等综合手段对河床坝基的固结灌浆效果进行分析, 评价灌浆效果是否满足要求, 为工程验收提供可靠的基础依据。

1 测区工程与地质概况

1.1 工程概况

西藏 DG 水电站位于西藏雅鲁藏布江干流藏木峡谷河段, 为大(2)型二等工程, 开发任务以发电为主, 相应库容 0.5528 亿 m³, 正常蓄水位 3447m, 多年平均发电量

32.045 亿 kW·h, 电站装机容量为 660MW, 电站枢纽建筑物由引水发电系统、泄洪消能建筑物、挡水建筑物及升压站等组成。拦河坝为碾压混凝土重力坝, 最大坝高 117m, 坝顶长 371.0m。

1.2 地质概况

工程区位于冈底斯~念青唐古拉地层区南部, 为青藏高原中南部高山深谷区, 并与雅鲁藏布江构造岩石地层区毗邻。区内岩浆岩、沉积岩、变质岩均有出露, 其中以变质岩、岩浆岩相对发育, 地层岩性较复杂。河床坝基主要出露岩性为灰白色喜山期花岗闪长岩, 中细粒花岗结构为主, 岩体结构面结合一般, 呈次块状构造。岩体总体较完整, 强度较高, 局部完整性差, 抗变形、抗滑性在一定程度上受结构面控制。河床坝基发育 F3、F7 两条断层, 走向为 NNE 向, 端侧性质以压性及压扭性为主。

2 固结灌浆布置与施工

2.1 固结灌浆布置

河床坝基固结灌浆施工范围为坝左 0+092.00m~坝右 0+025.35m, 坝上 0-007.50m~坝下 0+094.50m, 根据

地质条件的不同,总共划分为 I、II、III区三个灌浆区域,孔位布置型式为梅花型布置,间排距为 $3\text{m}\times 3\text{m}$,其中 I 区钻孔深度 5m、II 区钻孔深度 8m、III 区钻孔深度 12m。

2.2 固结灌浆施工

2.2.1 灌浆基本要求

河床坝基固结灌浆施工采用自上而下分段、循环式灌浆。灌浆原则按照分排分序加密的原则进行。分段长度为:孔深 5m 划分为 2m、3m 二段施工;孔深 8m 划分为 3m、5m 二段施工;孔深 12m 划分为 3m、4m、5m 三段施工。水灰比采用 3:1、2:1、1:1、0.5:1 四个比级,灌浆压力为 0.2~0.8Mpa。

2.2.2 特殊情况处理

根据本工程施工特点及固结灌浆试验结果,主要采用以下处理方法:

(1) 施工顺序:灌浆时先施工完周边孔,形成周围封闭后,内部再进行分排分序施工,以防止吃浆量过大扩散过远。

(2) 针对吃浆量大的孔段,在灌浆施工中采用浓浆、低压、限流、间歇、待凝的方式处理。

(3) 限流和间歇时间控制:针对吃浆量大的孔段,灌浆过程中在浆液变换至 0.5:1 浓浆后采用限流方式处理,限流标准为 35~40L/min;间歇时间:若吃浆量过大或出现地面冒浆情况,由于冬季气温过低,水泥凝固慢,间歇时间控制在 15~20min 之间。

(4) 耗浆量控制和待凝时间确定:当流量无明显变化的情况下或耗灰量达到 3.0T/段后压力则采取待凝处理方式,待凝时间定为夏季灌浆待凝 12h/次、冬季灌浆待凝 24h/次。

(5) 在寒冷的冬季施工时,须做好防寒保暖措施以保证灌浆质量。本项目采取对集中制浆系统及灌浆区域搭设彩钢瓦,室内顶部使用电热器或浴霸取暖设施保暖。供浆管路、灌浆供水、使用橡塑海绵+电热丝保暖。拌制浆液的水体采用锅炉加热到 $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$,视其环境温度的高低决定补温,浆液温控制在 40°C 以内。因外界温度低,考虑温差较大,热量损失较快,因此水温及浆液温度可适当调高,但不可超过规范规定值。

3 固结灌浆效果检测与评价

3.1 灌后检测指标要求

综合上述固结灌浆布置与施工、设计参数、灌浆工艺微观机理及生产性灌浆试验成果,总结河床坝基固结灌浆效果评价的标准^[5]如下:

(1) 主要采用压水试验的方法,辅以测量岩体波速的方法,并结合灌浆孔钻孔、检查孔取芯(即检查孔岩芯的采取率、裂隙情况、浆液结石密实度、强度)、钻孔全景图像和钻孔变模等成果进行对比分析来进行综合评定。

(2) 压水试验采用“单点法”,压力为最大灌浆压力的 80%,固结灌浆灌后透水率 $q\leq 5\text{Lu}$;压水试验孔段合格率,不合格孔段的透水率值不超过设计规定值的 150%,

且不集中,在上游帷幕轴线上游和下游帷幕轴线下游的范围的合格率应在 90%以上,其余范围为 85%以上。

(3) 基岩岩体波速验收声波波速标准:坝基断层等不良地质区经过固结灌浆后声波波速大于 3200m/s ,III₂类岩体经过固结灌浆后声波波速大于 3650m/s ,III₁类岩体经过固结灌浆后声波波速大于 4050m/s ,II 类及以上岩体声波波速大于 4500m/s ;声波波速合格测点数量不得低于 85%,小于设计标准的 85%的测试值不得超过 3%,且不集中。

3.2 检测工作布置

压水试验检测灌前利用 I 序灌浆孔,灌后利用设计及监理现场指定的灌后检查孔,抽检比例均为 10%。

物探测试灌前检测利用 I 序灌浆孔,采用单孔声波、钻孔全景图像进行检测,均按灌浆总孔数的 5%进行抽检;灌后检测中 1/2 的检测孔与灌前检测同位(I 序灌浆孔灌后扫孔),1/2 的孔利用设计及监理现场指定的灌后检查孔(综合分析地质情况、钻孔情况、灌浆成果、灌前或灌后透水率情况,布置于地质薄弱部位及重要部位),采用单孔声波(抽检比例 5%)、钻孔全景图像(抽检比例 5%)、钻孔变模(抽检比例 2%)进行检测。

灌后检测孔压水试验在该部位灌浆结束 7d 后进行,岩体波速测试在该部位灌浆结束 14d 后进行,钻孔变模在该部位灌浆结束后 28d 后进行,对局部灌后检测效果未能达到设计要求的部位将进行补强灌浆。

河床坝基固结灌浆于 2018 年 11 月开始施工,至 2019 年 6 月,固结灌浆施工及检测均全部完成。

3.3 检测成果分析

3.3.1 压水试验检测

河床坝基固结灌浆检查孔的具体压水成果详见下表 1。

从表 1 可以看出,河床坝基固结灌浆灌后检查孔,共压水 141 段,其中 $q\leq 5\text{Lu}$ 共计 139 段,占压水总段数的 98.6%,满足设计防渗指标; $q\geq 5\text{Lu}$ 共计 2 段,占压水总段数的 1.4%,主要出现在 F3 断层。后期进行了加密补强灌浆,经检查满足设计要求。总体来说,灌浆效果良好,达到了设计预期的目标,通过固结灌浆处理,有效改善了岩层的渗透特性,岩层内裂隙、空腔大部分被水泥结石填充,基岩整体性得到了明显的改善。

3.3.2 单孔声波检测

单孔声波测试是弹性波测试方法中的一种,是建立在固体介质中弹性波传播理论基础之上,以人工激振的方法向介质发射声波,在一定的空间距离上接收被测介质物理特性所调制的传播速度、振幅、频率等声波参数,测试采用测量点距为 0.2m。

河床坝基固结灌浆各单元灌后检测孔单孔波速满足设计要求,在 F3 断层部位进行了加密补强灌浆后也能满足设计要求,波速成果统计见下表 2。

由表 2 可以看出:①河床坝基固结灌浆后波速提高率在 2.5%~7.7%;②灌后声波波速测点所占比例相较灌前

表1 河床坝基各坝段(单元)固结灌浆灌后检查孔压水试验成果汇总表

坝段(单元)	孔数	压水段数(段)	透水性(Lu)分布区间、段数/频率(%)				透水性平均值(Lu)	大于设计标准的试验结果(Lu)
			<1	1~3	3~5	>5		
7#	14	23	0/0	10/43.4	13/56.6	0/0	3.04	/
8#	11	15	2/13.3	11/73.4	2/13.3	0/0	1.97	/
9#	15	20	2/10.0	18/90.0	0/0	0/0	1.43	/
10#	15	12	0/0	6/50.0	6/50.0	0/0	3.05	/
11#	15	25	0/0	14/56.0	11/44.0	0/0	2.95	/
F3 断层	6	26	0/0	13/50.0	11/42.3	2/7.7	3.48	10.85、11.97
F7 断层	10	20	0/0	13/65.0	7/35.0	0/0	3.11	/
小计	86	141	4/2.8	85/60.3	50/35.5	2/1.4	2.83	/
F3 断层(补灌后)	2	6	0/0	2/33.3	4/66.7	0/0	3.24	/

表2 河床坝基各坝段(单元)固结灌浆灌前、灌后单孔声波波速综合统计表

坝段(单元)	灌序	波速值(m/s)			提高率(%)	波速(m/s)分布区间、比例(%)				
		最大	最小	平均		$V_p < 3.44$	$3.44 \leq V_p < 4.05$	$4.05 \leq V_p < 4.50$	$4.50 \leq V_p < 5.30$	$V_p \geq 5.30$
7#	灌前	6200	3640	5370	2.8	0.0	5.0	7.0	8.0	80.0
	灌后	6200	3950	5520		0.0	2.0	8.0	9.0	81.0
8#	灌前	6010	4000	5010	2.6	0.0	1.0	10.0	69.0	21.0
	灌后	6110	3940	5140		0.0	0.0	8.0	58.0	34.0
9#	灌前	6200	3660	4920	5.5	0.0	6.0	15.0	49.0	30.0
	灌后	6240	4020	5190		0.0	1.0	10.0	44.0	45.0
10#	灌前	5620	3970	4890	2.5	0.0	2.0	5.0	75.0	18.0
	灌后	5790	4020	5010		0.0	1.0	8.0	76.0	15.0
11#	灌前	6200	3730	5330	4.3	0.0	6.0	2.0	32.0	60.0
	灌后	6200	3940	5560		0.0	5.0	0.0	12.0	83.0
F3 断层	灌前	5530	3260	4010	7.7	1.0	16.0	19.0	41.0	23.0
	灌后	5730	3870	4320		0.0	10.0	23.0	43.0	24.0
F7 断层	灌前	5880	3700	4040	6.7	0.0	12.0	12.0	58.0	18.0
	灌后	6110	3840	4310		0.0	5.0	14.0	61.0	20.0

声波波速测点所占比例在较大波速区间的占比逐步提高;③灌浆后平均波速均大于 4050m/s, 小于 4050m/s 的测点所占比例最大为 10.0%, 且无小于 3440m/s 的测点, 满足 III 类岩体设计指标要求。

3.3.3 钻孔全景图像检测

钻孔全景图像系统是采用一种堆面反射光学变换, 实现将 360° 钻孔孔壁图像转换为二维平面图像, 这种二维平面图像称为全景图像。它为工程提供视觉直观的钻孔资料, 了解地层的原始形象, 包括岩层产状、软弱夹层、裂隙发育程度以及浆液对裂隙的充填情况等。

河床坝基固结灌浆钻孔全景图像检测, 检测前对钻孔进行反复冲洗, 去掉孔壁残留附着物及孔底沉渣, 使钻孔内水质清澈透明, 以利于图像清晰; 如钻孔内积水仍浑浊, 处理方法主要采用明矾或漂白粉净水后再检测。孔内成像

典型成果图见下图 1。

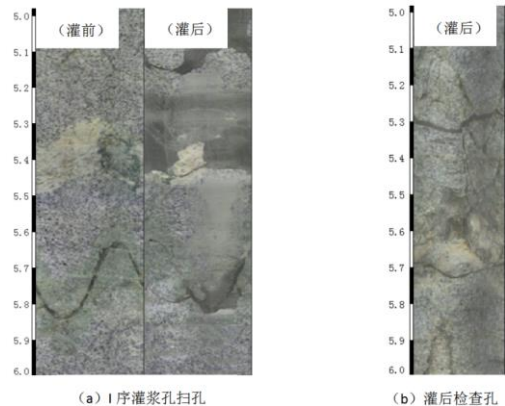


图1 河床坝基某坝段(单元)固结灌浆灌前灌后钻孔全景图像检测成果图

由图 1 中可见：灌前检测孔裂隙较发育，微张开，岩体完整性局部较差；灌后同孔位扫孔检测可见裂隙发育孔段已被浆液结石充填，其他部位也可见明显浆液结石附着，灌后随机检查孔裂隙发育孔段也可见明显浆液结石充填，岩体完整性明显提高，灌浆效果较好。

3.3.4 钻孔变模检测

钻孔变形模量测试是运用压力膨胀计，求得岩体深部变形特性的一种原位试验方法。在岩体钻孔中的有限长度内，利用钻孔压力膨胀计向孔壁施加均匀的径向压力，同时测得孔壁的径向变形，按弹性力学平面应变的公式，计算岩体的变形模量。

钻孔变形模量检测成果反映出岩体的结构特征，可以综合评价岩体的灌浆效果。河床坝基固结灌浆各单元灌后检测钻孔变形模量成果统计见下表 3。

表 3 河床坝基各坝段（单元）固结灌浆灌后钻孔变形模量综合统计表

坝段 (单元)	变模值 (GPa)			变模值 (GPa) 分布区间、比例 (%)					
	最大	最小	平均	$E_0 < 8$	$8 \leq E_0 < 10$	$10 \leq E_0 < 12$	$12 \leq E_0 < 14$	$14 \leq E_0 < 16$	$E_0 \geq 16$
7#	16.75	9.84	12.54	0.0	6.7	26.7	46.7	13.3	6.7
8#	19.24	6.16	11.18	35.3	11.8	17.6	11.8	0.0	23.5
9#	19.97	6.44	12.06	28.0	16.0	16.0	8.0	0.0	32.0
10#	14.88	6.98	9.36	26.7	40.0	26.7	0.0	6.7	0.0
11#	18.29	8.87	14.24	0.0	8.7	17.4	17.4	34.8	21.7
F7 断层	14.94	8.01	11.24	0.0	33.3	22.2	33.3	11.1	0.0

由表 3 可以看出：①河床坝基固结灌浆后变形模量平均值在 9.36GPa~14.24GPa；②F3 断层区域检测孔较少，且岩体局部较破碎，以致探头无法升压而未能获得有效数据；③依据设计标准，河床坝基固结灌浆后变形模量值满足 III₁ 类岩体指标要求。

4 结论

DG 水电站河床坝基经系统固结灌浆处理后，岩体透水率明显降低，声波波速得到显著提高，孔内成像也可见明显的浆液结石充填，各项岩石物理力学指标均能满足设计指标要求，达到了提高建基岩体完整性的目的。因此，可供其他类似工程在坝基系统固结灌浆处理及检测过程中参考和借鉴。

[参考文献]

- [1] 王毅, 杨建宏. 溪洛渡水电站河床坝基固结灌浆与检测评价[J]. 工程地质学报, 2015(23): 499-503.
 - [2] 陈玺, 马光明. 基于压水试验及声波检测的固结灌浆效果分析[J]. 水利规划与设计, 2020(5): 131-134.
 - [3] 廖伟, 邹延延等. 锦屏一级水电站左岸抗力体固结灌浆效果综合检测分析[J]. 水电站设计, 2015(6): 47-52.
 - [4] 张劲青, 刘刚. 二滩拱坝基础固结灌浆施工和质量控制[J]. 水电站设计, 2007(2): 88-92.
 - [5] 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司. 西藏 DG 水电站大坝及厂房基础处理施工技术要求[S]. 2018.
- 作者简介：杨震中，(1982-)，男，甘肃陇西人，高级工程师，硕士研究生，主要从事水电水利工程物探检测工作。