

杨房沟水电站 f_{27} 断层蚀变带化学灌浆试验研究

谢斌, 王灏, 刘均峰

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川成都 610081)

摘要: 杨房沟水电站 f_{27} 断层蚀变带具有透水率小、声波测速值低的特点, 不满足拱坝基础及防渗要求, 采用水泥灌浆注入率非常低, 必须进行化学灌浆处理。笔者围绕化学灌浆材料选择、灌浆工艺、施工技术展开研究, 通过试验表明, 化学灌浆对蚀变带的防渗及声波均有明显改善, 其研究成果可为类似工程提供借鉴。

关键词: 水电站; 拱坝坝基; 断层蚀变带; 化学灌浆

中图分类号: TV74; TV223.3+2; TV543+.2

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2021)01-0078-05

Experimental Study on Chemical Grouting for f_{27} Fault Alteration Zone of Yangfanggou Hydropower Station

XIE Bin, WANG Hao, LIU Junfeng

(Sinohydro Bureau 7 Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610081)

Abstract: The f_{27} fault alteration zone of Yangfanggou Hydropower Station has the characteristics of low water permeability and low acoustic velocity, which does not meet the anti-seepage requirements for arch dam foundation. Cement grouting is of very low grouting rate and chemical grouting treatment must be carried out. Focusing on selection of chemical grouting materials, studying on grouting technology and construction technology, this paper, through experiments, shows that chemical grouting obviously improves the anti-seepage ability and sound wave of the fault alteration zone. Findings of this study can be used as a reference for similar projects.

Key words: hydropower station; arch dam foundation; fault alteration zone; chemical grouting

1 概述

杨房沟水电站拱坝左岸坝基高程 1 947~1 990 m 上游侧发育 f_{27} 断层蚀变带, 产状: N50°—85°W SW \angle 55°~65°, 宽 10~15 cm, 最大可达 20 cm。带内为碎块岩、蚀变岩、岩屑充填, 面平直光滑, 沿断层面两侧分布蚀变岩体, 上盘蚀变岩体厚度 0.2~1.5 m, 下盘蚀变岩体厚 0.6~2.6 m, 蚀变岩体单轴饱和抗压强度 20~40 MPa, 属 IV 类岩体。 f_{27} 断层蚀变带与拱坝坝基帷幕斜交, 影响拱坝坝基防渗, 采用常规水泥灌浆可灌性差, 难以达到坝基防渗要求, 须采用化学灌浆以满足坝基防渗要求。在正式化学灌浆前必须对所选灌浆材料进行室内及现场灌浆试验, 对灌浆材料、灌浆参数、施工工艺、灌浆设备及灌浆效果检查等进行验证, 该试验研究对于指导类似工程基础处理具有参考意义^[1]。

通过现场灌浆试验研究, 了解经化学灌浆处理后, f_{27} 断层蚀变带影响区的完整性、抗渗性、抗压强度和抗剪强度提高的效果, 论证经过灌浆处理后的岩体作为拱坝基础的合理性和可靠性, 提出相应的岩体力学参数值, 满足大坝抗力体的要求^[2]。

化学灌浆灌后岩体检测指标包含压水试验透水率、声波波速、钻孔变形模量、钻孔全景图像检测等。并钻取满足常规物理性质、抗渗性能、干湿抗压强度、室内变形模量及磨片鉴定等检测项目的岩芯以开展相关检测工作^[3,4]。

2 室内模拟灌浆试验

2.1 化学浆材物理力学试验

该次化学浆材物理力学试验, 选择了两家单位的环氧浆材进行室内试验研究。

浆材型号和配比如下:

(1) 型号: CW511, 配比(质量比) A : B = 5 : 1、

6 : 1; CW512 型号配比(质量比)A : B=5 : 1, 6 : 1。

(2) 型号: PSI501, 配合比(质量比)9 : 1; PSI530 型号, 配合比(质量比)9 : 1。

对不同配方进行大量室内试验后, 根据设计要求和 f₂₇ 断层及蚀变带特性, 最终选择性能较好的 CW511 高渗透环氧浆材和 PSI501(9 : 1)高渗透环氧浆材进行室内模拟灌浆试验。

2.2 室内模拟化学灌浆试验成果

根据室内化学浆材的试验成果, 选择具有代表性的 f₂₇ 断层及蚀变带原状岩块进行室内模拟试验。CW511 浸泡试验成果: 吸水率为 1.04%, 吸浆率为 1.72%, 浸泡后岩样平均抗压强度为 15.03 MPa; PSI501 浸泡试验成果吸水率为 1.49%, 吸浆率为 1.47%, 浸泡后岩样平均抗压强度为 14.36 MPa。CW511 室内模拟灌浆试验成果: 吸浆率为 1.15%, 灌后岩样抗压强度 22.17 MPa; PSI501 室内模拟灌浆试验成果: 吸浆率为 1.42%, 灌后岩样抗压强度 20.4 MPa。通过灌(浸泡)后切片发现环氧浆液有效灌(进)入岩样的细微裂隙中^[5]。

经对上述化学浆材和室内模拟灌浆成果分析, 最终选择 PSI501 型号, 配合比(质量比)9 : 1 进行现场化学灌浆试验。该化学灌浆浆液性能和固化物性能满足环氧树脂材料的浆液性能 L(低黏度)、固化性能 II 型要求, 检测成果见表 1。

表 1 PSI501 型号环氧树脂灌浆材料浆液性能检测成果

序号	项 目	性能指标	检测结果
1	外观	均匀、无分层	均匀、无分层
2	密度/g · cm ⁻³	>1.0	1.06
3	起始黏度/MPa · s ⁻¹	<30	8
4	可操作时间 /200 MPa · s ⁻¹ , min	>30	2 930
5	28 d 抗压强度/MPa	≥70	93
6	28 d 抗拉强度/MPa	≥15	25
7	28 d 拉伸剪切强度/MPa	≥8.0	11.6
8	28 d 抗渗压力/MPa	≥1.2	1.4
9	28 d 抗渗压力比/%	≥400	467
10	28 d 黏接强度 /MPa	干黏接	≥4.0
		湿黏接	≥2.5

3 现场灌浆试验

3.1 灌浆试验区选择

根据 f₂₇ 断层及蚀变带影响区范围, 并结合开

挖阶段勘探资料, 经现场实地考察和反复研究, 化学灌浆试验区选择在 8 号坝段 1 955 m 高程基础廊道, 在帷幕线以外 f₂₇ 断层及蚀变带区域。f₂₇ 断层化学灌浆试验区桩号范围为: K0+120.78~K0+123.03, 钻孔共布置两排, 排距 0.6 m, 孔间距 1 m, 下游排距廊道下游边墙 0.5 m。

3.2 现场灌浆试验方案

根据设计要求, 化学灌浆前需进行水泥灌浆, 在岩体透水率 ≤1 Lu 时, 再进行化学灌浆。

该试验区所在部位前期已完成水泥灌浆, 灌后检查孔透水率均小于 1 Lu, 不再进行整体水泥灌浆, 若化学灌浆段灌前压水试验透水率大于 1 Lu, 需先进行水泥浆液灌注, 直至透水率小于 1 Lu 时, 再进行化学灌浆。

化学灌浆采用 PSI501 低黏度改性环氧树脂灌浆材料, 该材料具有强度高、黏度低、操作时间可控、收缩性小、稳定性高、耐久性好、施工简便等性能。

3.3 现场灌浆试验方法

(1) 化学灌浆试验区施工顺序: 施工准备→孔位放样→抬动孔施工(利用 1 955 m 高程基础廊道帷幕灌浆已施工的抬动孔)→先导孔施工→下游排(I 序孔→II 序孔)→上游排(I 序孔→II 序孔)→检查孔施工→质量验收。

(2) 化学灌浆施工工艺流程见图 1。

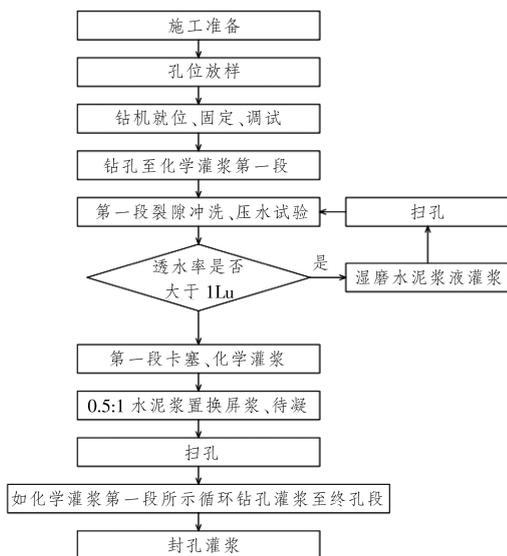


图 1 化学灌浆试验施工工艺流程图

(3) 化学灌浆采用“孔内卡塞、自上而下分段”纯压式灌浆法, 最大化学灌浆压力 3 MPa。

(4) 灌浆段长、孔深。灌浆孔分段与钻孔分段一致,见表 2。各灌浆孔段的灌浆压力为 3 MPa。

(5) 主灌浆材料为 PSI501 环氧灌浆材料,配 合比为 A : B=9 : 1(质量比)。

表 2 化学灌浆范围和段次划分表

序号	孔号	孔向	化学灌浆范围 /m	灌浆长度 /m	段次划分 /m	备注
1	JC-HXXYS-II-4	向下游倾斜 5°	32~48	16	4、4、4、4	下游排
2	JC-HXXYS-I-5	向下游倾斜 5°	37~48	11	3、4、4	
3	JC-HXSYS-I-3	竖直向	29~47	18	5、5、4、4	上游排
4	JC-HXSYS-II-4	竖直向	31~47	16	4、4、4、4	
5	JC-HXSYS-I-5	竖直向	36~47	11	3、4、4	

(6) 化学灌浆遵循“长时间、慢速率、尽量达到一定的注入量”的原则,控制好灌浆压力和注入率的协调关系,一般情况下注入率控制在 0.05 ~ 0.1 L/min · m 之间。当注入率 ≤ 0.05 L/min · m 时,适当升高灌浆压力,当注入率 ≥ 0.1 L/min · m 时,需适当降低灌浆压力或控制注入量。

(7) I 序孔距为 2 m, II 序孔距为 1 m,排距 0.6 m。钻孔终孔段孔径不小于 φ56 mm。

(8) 每段灌浆总历时达到 40 h 以上,在设计灌浆压力下,不吸浆或注入率 ≤ 0.01 L/(min · m) 时,屏浆 4 h 即可结束化学灌浆。

(9) 在每段灌浆结束后,关闭进、回浆阀门,待压力自然归零后,由进浆管灌注 0.5 : 1 水泥浆,并打开回浆阀门,用水泥浆液置换出孔内化学浆液,当孔内化学浆液置换完后,屏浆 30 min 后待凝 12 h, 然后进行下一孔段钻灌施工。

4 化学灌浆成果分析

该试验区共计完成化学灌浆孔 5 个,化学灌浆 72 m。下游排 I 序孔单位化学浆材耗量 37.07

kg/m, II 序孔单位化学浆材耗量 9.50 kg/m, II 序孔单耗较 I 序孔单耗减少 74.37%; 上游排 I 序孔单位化学浆材耗量 11.55 kg/m, II 序孔单位化学浆材耗量 10.24 kg/m, II 序孔单耗较 I 序孔单耗减少 11.34%。

该试验区 I 序孔单位化学浆材耗量 18.57 kg/m, II 序孔单位化学浆材耗量 9.87 kg/m, II 序孔单耗较 I 序孔单耗减少 46.85%, 各序孔的单位注入量呈现 I 序孔 > II 序孔,符合一般灌浆规律。

5 化学灌浆效果检查

灌浆效果检查主要采用压水试验、声波测试、孔内电视以及钻孔取芯进行室内物理力学性能试验,其成果可作为评价灌浆试验效果的主要依据。

5.1 压水试验

化学灌浆试验区共布置 1 个灌前测试孔,共计进行“单点法”压水 3 段。灌后共布置 3 个检查孔,共计进行“单点法”压水 7 段,成果统计见表 3。

表 3 试验区灌前测试孔与灌后检查孔压水成果统计表

施工工序	孔数	透水率 /Lu			透水率段数 /频率 %								设计标准 /Lu	
					总段数	<0.5		0.5~1		1~1.5		>1.5		
		最小值	最大值	平均值		段数	频率 %	段数	频率 %	段数	频率 %	段数		频率 %
灌前	1	0.00	0.36	0.12	3	3	100.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	不大于 1 Lu
灌后	3	0.01	0.11	0.03	7	7	100.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	

化学灌浆试验区灌前测试孔最大透水率 0.36 Lu, 平均透水率 0.12 Lu; 灌后检查孔最大透水率 0.11 Lu, 平均透水率 0.03 Lu。灌后最大透水率较灌前减少 69.44%, 灌后平均透水率较灌前减少 75.00%, 灌后检查孔各段压水透水率均小于 1 Lu, 符合压水试验合格标准。

5.2 声波检测

化学灌浆试验区灌前对 1 孔进行了单孔声波测试, 灌后 14 d 后对 3 孔进行了单孔声波测试。化学灌浆试验区灌前测试段声速范围为 4 282~5 572 m/s, 平均声波波速为 5 070 m/s, 小于 3 700 m/s 波速测点占比为 0。灌后测试段声速范围为 4 520~5 895 m/s, 平均声波波速为 5 137 m/s, 小于 3 700 m/s 波速测点占比为 0。灌后较灌前

平均波速提高 67 m/s,提高 1.32%。灌后较灌前最小波速提高 238 m/s,提高 5.56%。

5.3 钻孔全景图像分析

化学灌浆试验灌后全景图像显示:岩体细微裂隙均得到了有效充填。

5.4 钻孔取芯室内试验

开挖阶段现场提取了 f_{27} 断层及蚀变带天然岩样,进行室内物理力学性能试验。在检查孔岩芯中选取了部分代表性的芯样进行检测,灌后岩体检测的物理力学指标有:常规物理性质、抗渗性能、干湿抗压强度、室内变形模量和磨片鉴定。

(1)常规物理性质。灌前岩块干密度在 2.49~2.72 g/cm³ 之间。含水率均值在 0.29%~2.63% 之间。灌后岩块的干密度在 2.68~2.76 g/cm³ 之间,含水率在 0.05%~0.38% 之间。

(2)抗渗性能。灌前试验成果表明:当渗透压达到 3 MPa 时,蚀变岩未产生渗透变形破坏。灌后试验数据表明:灌后岩体的渗透系数在 2.80×10^{-6} mm/s~ 1.20×10^{-5} mm/s 之间,灌后岩体的渗透系数较低,防渗能力较高。

(3)抗压强度及室内变形模量。灌前岩石的单轴抗压强度试验成果: f_{27} 断层蚀变岩天然单轴抗压强度在 7.86~59.56 MPa 之间,均值为 24.81 MPa,饱和单轴抗压强度在 5.23~34.01 MPa,均值为 18.63 MPa,略低于 f_{27} 强蚀变岩,也属较软岩~软岩类。取自槽底的中等蚀变岩天然模量为 17.81 GPa,饱和弹性模量为 7.39 GPa;而取自建基面的强蚀变岩天然弹性模量仅为 0.89~1.72 GPa,饱和弹性模量仅为 0.19~0.6 GPa。灌后岩石的单轴抗压强度试验成果表明:灌后岩石的天然单轴抗压强度为 136.60 MPa,饱和单轴抗压强度为 103.17 MPa,灌后岩石的抗压强度处于较高的水平。对岩石的室内弹性模量进行计算,结果表明:灌后干燥岩体的变形模量为 21.74 GPa,饱和岩体的变形模量为 16.40 GPa。灌后较灌前干燥岩体、饱和岩体的变形模量均有较大程度提高。

(4)室内抗剪强度。灌前岩石天然摩擦角均值为 51.23°,黏聚力均值为 9.72 MPa;饱和和内摩擦角均值为 41.45°,黏聚力为 13.37 MPa。饱和条件下,蚀变岩内摩擦角较天然条件下降低约 10°,而黏聚力较接近。由于灌后岩石完整性较

好,内摩擦角折减系数取 0.87,黏聚力折减系数取 0.25。灌后天然岩体的黏聚力为 3.82 MPa,内摩擦角为 41.75°;灌后饱和岩体的黏聚力为 2.905 MPa,内摩擦角为 40.79°。

(5)微观结构与化学组成。灌前岩石微观结构显示, f_{27} 断层蚀变岩破碎程度较高,微观裂隙相对发育,且通常充填针叶状绿泥石,长石边缘可见伊利石化。坝基 f_{27} 断层蚀变带的蚀变类型以矿物颗粒的机械破碎以及暗色矿物的绿泥石化为主,伴有少量的斜长石组云母化蚀变,部分样品中可见斜长石进一步蚀变为绿泥石。受风化卸荷等因素影响,建基面处的强蚀变岩微裂隙大多张开,矿物颗粒间或矿物碎片间接触松散。

灌后岩石微观结构呈现出典型的花岗岩特征,结构较为致密。化学灌浆处理后存在少量微裂缝,大部分裂缝中充填有颗粒状物质。浆液对节理裂隙的充填较为充分。化学浆液能够有效地进入岩石内部,浆液颗粒有效地充填了结构面,并且和岩石表面产生了较好的连接,对岩石的完整性、强度及抗渗性能有较大程度的提高。岩石颗粒和浆液颗粒之间形成了良好的连接,有效地提高了岩石的完整性和强度,对岩石的抗压和抗剪强度指标有较大的提高。

6 结 语

利用 PSI501 低黏度改性环氧树脂灌浆材料,对 f_{27} 断层及蚀变带进行化学灌浆,岩石颗粒和浆液颗粒之间形成了良好的连接,有效地提高了岩石的完整性和强度,对岩石的抗压和抗剪强度指标有较大的提高,灌浆效果明显。

化学灌浆后,根据孔内电视和钻孔取芯观察及室内试验成果, f_{27} 断层及蚀变带岩体张开的裂隙经水泥灌浆后得到了较为有效的填充,细微裂隙及微小孔隙被化学胶凝体充分填充,抗渗性能有较大程度的提高。

f_{27} 断层及蚀变带得到了有效的胶结及充填,其整体性及变形模量、岩体完整性系数等都有较大的提高。说明该次灌浆效果明显,灌浆材料配方、灌浆工艺、施工参数合理。

参考文献:

- [1] 葛家良. 化学灌浆技术的发展与展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, (增 2): 3384-3393.
- [2] 杨培青, 康路明, 等. 长河坝水电站帷幕灌浆关键施工措施

研究与应用[J]. 四川水利, 2019, (4): 100-103.

- [3] 刘涛. 杨房沟水电站坝基固结灌浆现场试验[J]. 四川水利, 2019, (4): 1-6.
- [4] 周强. 杨房沟水电站河床坝段坝基固结灌浆施工技术[J]. 四川水利, 2019, (4): 86-89.
- [5] DL/T 5406-2010, 水工建筑物化学灌浆施工规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 10-13.

作者简介:

谢斌(1979-), 男, 四川南部人, 高级工程师, 从事水利水电施工管理工作;

刘均峰(1983-), 男, 河南郑州人, 中级工程师, 从事水利水电施工管理工作;

王灏(1995-), 男, 重庆人, 助理工程师, 从事水利水电施工管理工作.

(责任编辑: 吴永红)

(上接第72页)

通过对1、2号拌和楼生产数据的统计和分析, 采用履带式输送装置较传统的螺旋输冰和冷风回收利用装置, 每小时生产能力提高了6%~10%, “片冰的称量误差控制在±1%之内”^[4], 并实现了冷风回收利用率达60%以上, 保证了片冰质量, 降低了运行成本。同时, 设备运行安全可靠, 提高了生产效率, 满足了预冷混凝土生产的质量要求。

5.2 控制系统技术改造取得的效果

生产运行实践表明: 输冰系统与拌和楼控制系统配套技术改造实现了拌和系统生产环节的控制自动化和管理信息化, 节省了人力资源, 提升了生产效率, 降低了运行成本。其运行效果主要体现在以下方面:

(1) 变频控制技术的运用。履带式小冰仓在传统的控制基础上引入了变频控制技术, 驱动电机采用变频电机, 控制单元采用变频器, PLC通过模拟量模块与变频器进行通讯, 通过试验测定值调整履带输送量, 能控制片冰称量精度, 同时能提供综合保护功能, 提高了设备的安全性和可靠性。

(2) PLC控制技术的运用。输冰系统采用“PLC控制技术, 在拌和楼中控室集中进行监控和管理, 实现了控制自动化, 管理信息化的目标。”^[5]通过生产运行统计, 其输冰效率可提升20%以上, 提高了生产效率, 也大幅度提高了设备运行的可靠性和安全性。

同时, 采用PLC实现自动化控制, 可根据设备及信号监测装置的信号反馈在小冰仓等部位实现无人值守功能, 采用计算机进行集中监控和管理, 提高了运行的安全性, 节约了运行成本。

6 效益分析

采用履带式小冰仓可以实现小冰仓满仓储冰, 输冰系统运行时间可由原25 min/h, 缩短为12 min/h, 减少了输冰系统运行时间。履带式小冰仓运行可靠性提高和自动化控制技术的应用, 使拌和楼小冰仓运行和输冰系统运行可由原4人/班减少为2人/班。同时, 减少了故障处理时间8%~10%, 降低了因故障处理造成的能耗浪费, 起到了“节能降耗”的作用, 提高了片冰的输送质量和生产的连续性, 确保了工程质量和进度。

7 结语

笔者依托杨房沟水电站低线混凝土拌和系统工程, 探析履带式小冰仓在系统中使用及配置的合理性和适用性, 介绍了履带式小冰仓的安装以及冷风回收与循环利用工艺。同时, 对拌和楼自动化控制及监控系统进行改造, 实现了输冰过程的自动化控制, 较好地解决了输冰过程中起拱、堵管等问题, 提高了系统生产效率和设备保障率, 保证了产品质量, 降低了工程运行成本, 为类似工程履带式小冰仓的应用提供了很好的借鉴和参考意义。

参考文献:

- [1] 方鉴, 等. 水利水电工程施工技术全书 第三卷混凝土工程 第四册混凝土生产系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [2] 刘友元, 吴燕明. 冰库及气力输冰系统在生产预冷混凝土中的应用[J]. 建筑机械(施工技术), 2001, 34(02).
- [3] 水利电力部水利水电建设总局. 水利水电工程施工组织设计手册 4: 辅助企业[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1997.
- [4] DL/T 5144-2015, 水工混凝土施工规范[S]. 16, 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [5] 廖常初. 主编. S7-1200/1500 PLC应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

作者简介:

范晓亮(1977-), 男, 四川达县人, 工程师, 从事水电施工技术与管理工作.

(责任编辑: 吴永红)