

锦屏一级水电站煌斑岩脉化学复合灌浆试验研究

王 胜¹, 祝华平², 黄润秋¹, 林 锋¹, 陈礼仪¹

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要:雅砻江锦屏一级水电站左岸抗力体发育有 f_2 、 f_5 、 f_8 、 f_{42-9} 断层、煌斑岩脉及深部裂缝等软弱带, 需采用相应的工程方法对这些部位进行加固处理。化学复合灌浆是在水泥灌浆基础上发展起来的一种基础处理方法, 从化学浆材的选择、灌浆参数的确定、灌浆施工工艺等方面介绍了化学复合灌浆在左岸抗力体煌斑岩脉加固处理中的试验情况。根据试验结果对试验区煌斑岩脉的可灌性进行了分析, 并通过岩心观察、岩体透水性、岩体声波和孔内变形模量等资料的对比分析对灌浆效果进行了检测评价, 评价表明化学复合灌浆对煌斑岩脉的加固处理效果明显。最后根据本次灌浆的试验结果提出了建议。

关键词: 抗力体; 煌斑岩脉; 基础处理; 化学复合灌浆; 雅砻江锦屏一级水电站

中图分类号: TV543+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2009)11-0060-05

Analysis on Chemical Compound Grouting Tests of Jinping I Hydropower Station Lamprophyre Dike/WAND Sheng¹, ZHU Hua-ping², HUANG Run-qiu¹, LIN Feng¹, CHEN Li-yi¹ (1. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. HydroChina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu Sichuan 610072, China)

Abstract: The left resistance block of Jinping I hydropower station on Yalong River was built on f_2 、 f_5 、 f_8 、 f_{42-9} faults and the weak belt with lamprophyre vein and deep fractures, reinforcement treatment was necessary. Chemical compound grouting was developed based on cement grouting, the test was introduced in selection of chemical grouting material, determination of grouting parameters and grouting construction technology. Based on the test result, analysis was made on grouting feasibility in lamprophyre vein and testing evaluation was made on grouting effect by the comparative analysis on core, permeability of surrounding rocks, rock acoustic wave and deformation modulus in borehole, it showed that chemical compound grouting has obvious effect on reinforcement treatment in lamprophyre vein. The paper also gives the construction suggestion according to the grouting test.

Key words: resistance block; lamprophyre vein; foundation treatment; chemical compound grouting; Jinping I hydropower station on Yalong River

0 引言

雅砻江锦屏一级水电站左岸抗力体内发育有规模性断层及软弱岩带, 其中与坝基密切相关的规模较大的有 f_2 、 f_5 、 f_8 、 f_{42-9} 、煌斑岩脉及深部裂缝等。这些结构面发育规模大、性状差, 导致左岸抗力体岩体质量偏低, 并构成控制左岸坝肩抗滑稳定的边界条件^[1]。在结构面附近特别是其交汇部位, 可能会存在较大的变形和位移, 这对建筑物的稳定性、基础应力传递等极为不利, 严重影响大坝稳定性及安全运营, 必须运用相应的工程方法进行基础处理。化学灌浆是在水泥灌浆基础上发展起来的一种以化学材料作为浆液的新型灌浆方法。因其浆液粘度低、聚合时间可调、聚合体渗透系数小以及本身强度和粘结强度高等诸多优点在工程基础处理方面应用广泛, 尤其是在水电工程的基础加固防渗处理中更是

得到了迅速发展, 并取得了显著效果。有鉴于此, 对化学复合灌浆在左岸抗力体软弱岩带处理中的应用正在作进一步深入研究。本文主要对化学复合灌浆在左岸抗力体煌斑岩脉的试验情况进行了分析研究。旨在通过试验, 筛选高渗透性补强灌浆材料和优化灌浆参数, 探索在煌斑岩脉进行化学复合灌浆的施工工艺, 评价煌斑岩脉的可灌性, 并对灌浆效果进行检测评价, 从而为煌斑岩脉的加固处理寻求一种可行、有益的工程方法, 进而为左岸抗力体软弱岩带进行化学复合灌浆的适宜性进行评价。

1 试验区地质条件

本次试验研究代表岩体为煌斑岩脉, 该试验区煌斑岩脉在底板上出露位置见图 1^[2]。岩脉产状 $N60^\circ \sim 70^\circ E/SE \angle 70^\circ \sim 80^\circ$, 上盘面起伏, 下盘面较

收稿日期: 2009-06-08

作者简介: 王胜(1982-), 男(土家族), 重庆黔江人, 成都理工大学在读博士, 地质工程专业, 从事岩土钻掘及工程地质方面的研究工作, 四川省成都市成都理工大学环境与土木工程学院博二, yongyuandewangsheng@sina.com。

平顺,脉体宽 2~2.5 m,弱~强风化,两侧及掌子面附近强风化。脉体内裂隙主要发育第②组,其次为第①、④组,沿上盘滴水。两侧为断层接触,上盘断层带宽 20~50 cm,局部 70~90 cm,由碎裂岩组成,岩体松弛,见 10~20 cm 宽的糜棱角砾岩条带。下盘断层带宽 2~2.5 m,主要由碎裂岩、角砾岩组成,

风化较强,平行煌斑岩脉的裂隙密集发育,下盘断层带下盘面为宽 5~10 cm、局部 20 cm 的糜棱角砾岩条带。试验区洞室底板主要为煌斑岩脉及其两侧断层,岩体破碎,松弛,呈碎裂~散体结构,为 V 级岩体。

从实验区的地质条件可以看出,岩体破碎松弛,

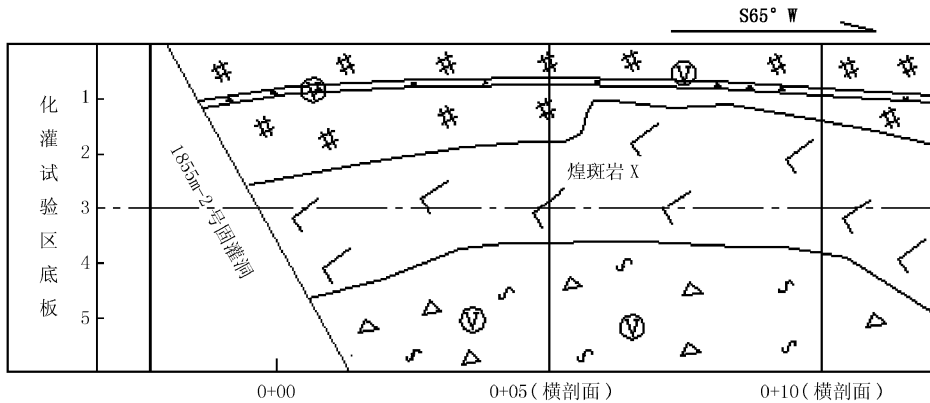


图 1 煌斑岩脉化学灌浆试验区底板素描图

裂隙发育,水泥浆液及化学浆液易沿裂隙通道浸渗,通过扩散、充填和压密作用,达到提高煌斑岩脉物理力学性质的目的。

成。另外按工程特殊要求加入稀释剂、增塑剂和固化剂等。稀释剂有丙酮、苯、甲苯、二甲化苯、环氧丙烷苯基醚等,目前国内多用糠醛丙酮混合稀释剂。增塑剂有邻苯二甲酸脂类、磷酸酯类、聚酰胺树脂和液态聚硫橡胶等。固化剂主要有脂肪族胺类中的伯胺和促胺。环氧树脂类浆液常温下具有固化强、聚合体强度高、粘结力大、化学稳定性好的特点,一般多用于岩体固结补强灌浆中^[6]。于是选用环氧树脂类浆材作为煌斑岩脉的化学灌浆材料。

2 化学灌浆试验

本次试验目的为采用化学复合灌浆的施工手段对煌斑岩脉进行原位加固处理。试验采用的灌浆材料为高渗透性环氧树脂浆材。灌浆方式为水泥、化学复合灌浆。对岩体透水率满足 $q < 1$ Lu 的直接进行化学灌浆,否则先进行水泥灌浆,达到要求后再进行化学灌浆。灌前压水试验表明试验区岩体透水率 q 部分为 30~100 Lu,部分大于 100 Lu,属中等~强透水^[2]。所以,在进行化学灌浆前都应进行水泥灌浆。灌浆时将预先制备好的浆液,在一定压力下通过灌浆孔灌入岩体的孔隙和裂隙中,通过对孔隙、裂隙的扩散、充填和压密作用,达到提高煌斑岩脉物理力学性质的目的。

2.2 化学灌浆参数的确定

化学灌浆参数的确定,首先要对灌浆试验区的地质条件准确把握,在对灌浆理论特别是岩体中的化学灌浆作用机理的深刻认识基础上,并借鉴国内外灌浆工程的先进经验,通过大量灌浆试验取得。

2.1 化学浆材的选择

目前化学浆液品种繁多,通常按其用途可分为防渗型、补强型、防渗补强型 3 类。在水利水电工程地基防渗加固处理化学灌浆中,常用的化学浆液主要有水玻璃类、丙烯酰胺类、丙烯酸盐类、聚氨脂类、环氧树脂类、甲基丙烯酸盐类等^[3]。20 世纪 90 年代新型环氧树脂类浆材问世以来,近年来已成功推广运用于多个水电工程中^[4-6]。

2.2.1 布孔

根据试验要求,按分序加密原则布置两个正方形试验区,两试区共布置抬动观测孔 2 孔、灌前测试孔 4 孔、水泥灌浆孔 15 孔,化学灌浆孔 9 孔(HK1~9)、水泥灌浆灌后检查孔 2 孔、化学灌浆灌后检查孔 4 孔^[2]。

水泥灌浆孔: I 序孔孔距 4.0 m, II 序孔孔距 2.0 m;化学灌浆孔: I 序孔孔距 2.0 m, II 序孔孔距 1.0 m。

2.2.2 成孔深度及直径

采用 SGZ-III A 型地质钻机进行钻孔施工, I 序孔开孔孔径为 110 mm,第二段灌浆结束以后镶铸

环氧树脂类浆液通常由环氧树脂和固化剂组

Ø90 mm的孔口管,然后钻孔变径为Ø76 mm,其中I序孔HK-1、HK-3、HK-7孔为取心孔。II序孔开孔孔径为76 mm,第一段灌浆结束以后镶铸Ø60 mm的孔口管,钻孔变径为56 mm,取心钻孔深度为32 m,不取心钻孔深度为32.5 m^[7]。

2.2.3 灌浆压力

化学灌浆压力参照多点压水试验的压力-流量关系曲线和遵循“地面无损害抬动”的原则确定,并同时控制地表抬动在0.2 mm范围内,当地表抬动达到0.2 mm时,则以此时压力为该段灌浆压力^[10]。本次化学灌浆施工各段灌浆压力见表1^[7]。

表1 化学灌浆段长及灌浆压力

灌浆段次	段长/m	灌浆压力/MPa	灌浆段次	段长/m	灌浆压力/MPa
1	2	1	5	5	3
2	2	2	6	5	3
3	3	2.5	7	5	3
4	5	3	8	5~5.5	3

2.3 灌浆施工工艺及注意事项

本次化学灌浆试验为水泥、化学复合灌浆,化学灌浆采用孔口封闭、纯压式灌浆工艺。灌浆施工工艺流程为:孔位布置→钻孔→钻孔冲洗→简易压水试验→配浆→孔内排水→灌浆→闭浆→孔内浆液置

表2 煌斑岩脉化学浆液单位注入量及频率统计表

灌浆次序	孔数	注入量/L	单位注浆量/(L·m ⁻¹)	不同单位注浆量(L·m ⁻¹)区间(频率)/%							
				≤10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~70	70~100	>100
I	4	15849	123	/	/	/	3	/	19	12	66
II	5	6320	40	21	5	13	10	15	13	10	3
合计	9	22169	77	12	3	7	8	8	14	11	38

由表2可以看出:经I序孔灌浆后II序孔的单位注浆量明显降低,由123 L/m降为40 L/m,降低幅度达67.5%。单位注浆量<50 L/m的频率由3%增至74%,递增明显。尽管单位注入量随灌序而明显降低,但注入量依然较大。这说明煌斑岩脉化学灌浆可灌性强。分析认为,这是由于煌斑岩脉内岩体裂隙发育及弱~强风化煌斑岩脉岩体的渗透性较强造成。该段裂隙发育,裂面锈染,化学浆液由于粘度低、流动性好,易沿细小的裂隙渗透及沿岩石矿物间扩散,从而导致煌斑岩脉化学灌浆可灌性强。

4 灌浆效果的检测评价

4.1 岩心观察

灌浆后对取出的岩心进行观察发现:HK-1孔5.05 m处、HK-3孔6.4和6.6 m处、HK-7孔5.3 m处有明显化学浆液胶凝体。同时在II序孔钻进过

换→扫孔→下一段钻进(第二段灌浆结束以后进行孔口管镶铸)→直至各孔段结束→封孔。在整个工艺流程中特别需要注意以下几方面问题^[2,7]:

(1)在灌浆过程中遇见地面冒、漏、渗情况时采用降压进行处理(一般应控制注入速率在0.05 L/min左右),同时在出现冒、漏、渗的地方进行表面封堵,待封堵表面有一定强度时,再逐级进行升压灌注。

(2)在灌浆过程中出现耗浆量较大的孔段时,即当注入量达到80~100 L/m时,且灌浆历时24 h以上,变换浆液为JPS-0(100:8)进行灌注。灌注时间控制在2 h范围内,再换回JPS-7(100:6)进行灌注。

(3)灌浆作业因故中断,应尽快恢复灌浆。若吸浆量明显降低,可适当增加灌浆压力,待恢复正常后,继续灌浆。

3 可灌性分析

可灌性是化学灌浆分析中一个十分重要的方面,主要是用化学浆液注入量及单位注浆量等指标进行分析,表2为煌斑岩脉化学浆液单位注入量及频率统计表^[2,7]。

程中所有煌斑岩段颜色有一定改变并有不同程度化学浆液胶凝体^[7]。这表明化学浆液对煌斑岩脉起到了良好的浸渗作用,之后所进行的磨片鉴定表明化学浆液对其内的裂隙产生了较好的胶凝固结作用。这也说明所灌注的环氧类化学浆液与煌斑岩脉具有较好的润湿性、亲和力和吸渗性。

4.2 岩体透水率分析

透水率是评价灌浆效果的重要指标之一,通过对岩体进行压水试验,得到了煌斑岩脉试验区岩体灌浆前后透水率对比表^[2],见表3。

由表3可以看出:灌前岩体透水率 q 多为30~100 Lu,部分大于100 Lu,属中等~强透水;水泥灌浆后透水率多小于1 Lu,少量1~3 Lu,最大值为2.8 Lu,属微透水;化学灌浆后透水率均小于1 Lu,属微透水。表明经水泥灌浆后,水泥结石充填了岩体中的大部分裂隙,防止了化学浆液因其良好流动

表 3 煌斑岩脉试验区岩体灌浆前后透水率对比表

序次	段数	最大值/Lu	最小值/Lu	透水率(q/Lu)分段所占百分比/段数					
				≤ 1	1~3	3~10	10~30	30~100	>100
灌前	32	>100	28	0%/0	0%/0	0%/0	3%/1	53%/17	44%/14
水泥灌后	14	2.8	0	78%/11	22%/3	/	/	/	/
化学灌后	35	0	0	100%/35	/	/	/	/	/

性而大量漏失,经水泥灌浆后进行的化学灌浆能进一步改善岩体的渗透性能,通过充填作用、化学胶结作用、离子交换作用等使岩体胶结凝固为密实的有机整体,且效果明显。这从另一个方面表明所选环氧类浆材对裂隙型岩体的充填胶结效果较好,且布孔及灌浆压力符合化学灌浆要求。

4.3 岩体声波分析

声波波速很好的衡量了岩体的完整程度,在对灌浆效果进行检测评价时岩体声波是一个重要的指标,表 4 为煌斑岩脉化学灌浆前后岩体声波波速统计表^[2]。

表 4 煌斑岩脉化学灌浆前后岩体声波波速统计表

灌序	波速/($m \cdot s^{-1}$)			KV	波速($km \cdot s^{-1}$)分布特征/%					
	平均值	大值平均	小值平均		<3000	3000~4200	4200~4500	4500~5000	5000~6000	>6000
灌前	3262	3799	2841	0.25	42	51	3	3	1	0
水泥灌后	3388	3820	2938	0.27	29	63	6	1	1	0
化学灌后	30 d	4322	4630	0.44	0	34	30	30	6	0
	60 d	4353	4703	0.45	0	34	22	37	7	0
	90 d	4095	4346	0.42	0	62	28	9	0	0

由表 4 可以初步得到以下几点认识:

(1) 煌斑岩脉水泥灌浆前后声波波速平均值变化较小,由灌前的 3262 m/s 提高到灌后的 3388 m/s,提高幅度仅 4%。这主要是由于经水泥灌浆后,尽管水泥结石充填了岩体中的大量裂隙,但由于水泥浆液的流动性能有限,无法完全充填岩体的细微裂隙,岩体孔隙率仍然较高,所以水泥灌浆前后的岩体声波值变化不大。

(2) 化学灌浆 30 天后与灌前原岩体相比,声波波速平均值变化较大,由灌前的 3262 m/s 提高到灌后 30 天的 4322 m/s,提高幅度达 32%。这主要是因为经水泥灌浆后进行化学灌浆,化学浆液中的糠醛丙酮稀释剂参与反应前能降低浆液粘度,使浆液能渗透到细微裂隙中,而参与化学反应后与环氧树脂混合生成树脂类固结体,试验研究表明该固结体粘聚力大,故表现为抗压、抗拉、抗剪强度高的物理力学性质。所以,化学灌浆后岩体声波值明显增大。

(3) 化学灌浆 30、60、90 天后声波波速对比分

析,随着龄期增加,声波波速基本无变化。这主要是由于浆液中的固化剂的作用,产生了较稳定的固化效果。另一方面,化学反应生成的树脂类固结体具有低蠕变性的特点。所以,不同龄期的声波波速值变化不大。

综合分析认为:由于煌斑岩脉本身性质特点,水泥灌浆对提高煌斑岩脉的声波作用不大,化学灌浆后声波波速主要集中在 3000~5000 m/s,消除了小于 3000 m/s 的低波速带,局部高达 5000 m/s 以上,表明化学灌浆对弱~强风化煌斑岩脉的物理力学性能改善较大。

4.4 孔内变形模量分析

变形模量用来衡量岩土体的抗变形能力,也是灌浆效果检测评价的重要指标,表 5 为煌斑岩脉化学灌浆前后孔内变形模量统计表^[2]。

由表 5 可以初步得到以下几点认识:

(1) 煌斑岩脉水泥灌浆后孔内变形模量由灌前的 0.72 GPa 提高到灌后的 1.44 GPa,提高幅度达

表 5 煌斑岩脉化学灌浆前后孔内变形模量统计

灌序	孔内变形模值/GPa			孔内变形模量值(GPa)分布特征/%						
	平均值	大值平均	小值平均	0~3	3~5	5~8	8~10	10~12	>12	
灌前	0.72	0.99	0.45	100	0	0	0	0	0	
水泥灌后	1.44	1.98	1.1	100	0	0	0	0	0	
化学灌后	30 d	3.52	5.27	2.2	57	26	17	0	0	0
	60 d	3.42	5.33	2.2	46	42	11	0	0	0
	90 d	3.26	4.12	2.63	42	47	11	0	0	0

100%。

(2) 煌斑岩脉化学灌浆后孔内变形模量由灌前的 0.72 GPa 提高到灌后 30 天的 3.52 GPa, 提高幅度达 390%, 变化明显。

(3) 化学灌浆 30、60、90 天后孔内变形模量对比分析发现: 随着龄期增加, 孔内变形模量变化不明显。

分析认为: 经水泥灌浆后, 煌斑岩脉及周边岩体裂隙得到了水泥的有效充填, 变形模量增加, 但仍然较小; 化学灌浆对弱~强风化煌斑岩脉的变形模量改善较大。但与设计要求值仍有一定差距(设计要求灌后其变形模量 > 5.0 GPa), 这主要与弱~强风化煌斑岩脉母岩本身性状较差、遇水易软化有关。

5 结论与建议

(1) 化学灌浆检测评价表明, 本试验所选用的化学灌浆材料能够适应煌斑岩脉地层, 在设计孔排距、灌浆压力等参数下, 能够达到对地层的较好浸渗和加固作用, 提高煌斑岩脉的物理力学性质, 对煌斑岩脉灌浆效果明显。

(2) 煌斑岩脉化学灌浆试验区岩体破碎、裂隙发育, 透水性好, 在化学灌浆前先进行水泥灌浆, 以封闭化学灌浆孔附近较大的岩体裂隙通道, 控制化学浆液大量流失, 提高了化学灌浆效果, 试验结果表明, 采用水泥、化学复合灌浆对煌斑岩脉进行加固处理是适宜的。

(3) 化学灌浆对煌斑岩脉加固处理取得了较好的效果, 建议在此试验研究的基础上进一步对左岸抗力体 f_5 断层等软弱带进行化学灌浆试验研究, 研究不同岩性裂隙的可灌性, 评价结构面效应对化学灌浆的影响, 进而对整个抗力体软弱带进行化学灌

浆的适宜性进行评价。

(4) 化学灌浆后岩体的耐久性是评价灌浆效果的重要指标, 建议开展部分耐久性试验, 评价化学浆材的耐久性。

(5) 尽管配制好的化学浆液没有毒性, 但其中的部分材料对环境会有一定程度的影响, 在进行化学灌浆时需要注意对废弃浆液的处理, 加强环境保护, 工作人员需要注意必要的防护措施。

参考文献:

- [1] 国家电力公司成都勘测设计研究院. 雅砻江锦屏一级水电站可行性研究报告[Z]. 2003.
- [2] 国家电力公司成都勘测设计研究院. 左岸抗力体质量评价及固结灌浆研究[Z]. 2008.
- [3] 余本海. 化学灌浆常用浆材组成及其施工工艺[J]. 小水电, 2007, (5): 55-57.
- [4] 王中美, 丁坚平, 刘世喜, 等. 化学灌浆在贵州岩溶山区滑坡治理中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(1): 40-43.
- [5] 李丙寅. 黄河李家峡电站左岸 F_{26} 断层化学灌浆试验分析[J]. 西北水电, 2006, (3): 75-77.
- [6] 魏继红. 岩质地基中的化学灌浆及其效果检测[D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [7] 中国水电七局. 四川省雅砻江锦屏一级水电站拱坝基础软弱岩带化学灌浆试验化学灌浆施工总结[Z]. 2008.
- [8] 蒋硕忠, 薛希亮. 水电工程中环氧树脂的开发应用[J]. 人民长江, 1991, 28(4): 40-42.
- [9] 程鉴基. 化学灌浆在岩石工程中的综合应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, (6): 186-192.
- [10] 孙钊. 大坝基岩灌浆[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

致谢: 本文得到了成都理工大学“锦屏一级施工地质专题”项目组的大力支持, 在此向项目组的各位老师和同学表示感谢。另外, 十分感谢中国水电顾问集团成都勘测设计研究院和中国水电七局对笔者工作的支持!

(上接第 49 页)

7 结论与建议

(1) 注浆钻孔采用钻机成孔, 钻机须安装牢固, 定位稳妥、固定。注浆孔应跳孔施钻, 不应全部钻孔完后再注浆, 以免孔位串浆, 增加难度及增加清孔工作量。

(2) 由于该地区地层破碎, 容易出现坍塌掉块现象, 在注浆过程中容易出现栓塞注浆通道, 造成注浆失败。针对此类现象, 采取下入注浆管采用全孔注浆管进行灌注的注浆工艺, 确保了注浆施工一次

成功。

(3) 针对施工过程中出现孔口冒浆现象, 根据施工情况加装保护管和浇注孔口管, 提高注浆的质量, 有效地避免了以上现象的发生。

参考文献:

- [1] 温汉德, 张所邦. 深圳葵涌西立交桥桩基溶洞的处理方法[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2005, 32(7): 36-37.
- [2] 孙小杰, 王立新, 吴兆军. 高压喷射注浆复合地基处理设计及施工实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(11): 20-22.