

锦屏一级水电站深部裂缝控制性灌浆技术研究^{*}

王 胜 黄润秋 陈礼仪

(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 成都 610059)

摘 要 针对锦屏一级水电站深部裂缝加固技术难题,在对深部裂缝工程地质特征及其灌浆加固技术特点分析基础上,对水泥-水玻璃控制性灌浆技术进行了研究。首先对水泥-水玻璃灌浆作用机理进行分析,然后主要从胶凝时间和强度两方面对水泥-水玻璃浆液进行试验研究,分析了水玻璃和缓凝剂加量对浆液胶凝时间和强度的影响规律,并按初凝时间为5min的情况进行了水泥-水玻璃浆液配比设计。最后,提出采用水泥-水玻璃双液孔口混合式灌浆方法,采用自上而下、孔口封闭、纯压式灌浆方式对深部裂缝进行固结灌浆加固处理。由此初步建立了锦屏一级深部裂缝灌浆加固处理技术研究方案。

关键词 锦屏一级水电站 深部裂缝 水泥-水玻璃 控制性灌浆

中图分类号:TV543 文献标识码:A

ANALYSIS ON GROUTING TECHNOLOGY FOR CONTROLLING DEEP ROCK CRACKS AT JINPING I HYDROPOWER

WANG Sheng HUANG Runqiu CHEN Liyi

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention & Geoenvionment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract This paper analyzes the features of deep rock cracks and grouting technology. It then studies the grouting technology with cement-silicate for controlling the deep rock cracks. It particularly addresses the problems of grouting in deep cracks in Jinping I Hydropower. First of all, the paper analyzes the mechanism of cement-silicate grouting. Then, it investigates the cement-silicate slurry mainly from the aspects of gel time and strength. It studies the influence law of gel time and strength from the dosage of silicate and retarder. It obtains a design formula for 5min. cement-silicate slurry. Finally, the paper proposes the grouting method using two pipe outlets for mixing the two grout fluids. One pipe outlet is for the cement grout and the other for silicate grout. The grouting method further includes the top-down approach, closed hole, and pure pressure grouting, according to the characteristics of the deep rock cracks. Thus, the paper has initially established the research programs of grouting treatment technology for deep rock cracks at Jinping I Hydropower.

Key words Jinping I Hydropower, Deep rock cracks, Cement-silicate grout, Controlling grouting

* 收稿日期:2011-10-15;收到修改稿日期:2012-02-25.

基金项目:雅砻江水电开发联合研究基金重点项目(50539050),地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室人才培养课题(SKLG2010Z008).

第一作者简介:王胜,地质工程专业. Email:yongyuandewangsheng@sina.com

1 引言

在建的锦屏一级水电站规模巨大,其开发任务主要是发电,结合汛期蓄水兼有分担长江中下游地区防洪的作用,在雅砻江梯级滚动开发中具有“承上启下”的重要作用。其大坝采用混凝土双曲拱坝,最大坝高达 305m,乃当今世界上在建的最高拱坝^[1, 2]。相对右岸而言,大坝左岸工程地质条件较复杂。目前,左岸边坡开挖已完成。主要发育的断层有 f_5 、 f_8 、 f_{14} 、 f_{18} 等规模较大的 NE 向陡倾断层。其间还发育有煌斑岩脉(X)。左岸 2400~1810m 高程为三叠系杂谷脑组第三段砂板岩,1810m 高程以下为三叠系杂谷脑组第三段大理岩。自然边坡高陡(高度 1500 余米)、浅表生地质作用强烈,除浅表层的正常卸荷以及倾倒变形外,在 f_5 断层以里还发育有深部裂缝^[2-5]。

据统计,左岸基础处理洞室及边坡开挖揭示出近 50 条深部裂缝。这些深部裂缝大体位于 $II_1 \sim I$ 勘探线之间,高程上介于 1885~1670m 之间。通过对施工期开挖揭示深部裂缝进行分析,可以初步确定其具有如下特征:深裂缝的优势方位主要为 $N50^\circ \sim 90^\circ E$,其次为 NE 和 NNE 向。倾向 SE,倾角一般为 $50^\circ \sim 80^\circ$ 。其中,NNE 向深裂缝主要见于左岸砂板岩段。近 50 条深部裂缝中,约有 3/4 分布于大理岩段,1/4 分布于砂板岩段。大理岩段中,以 2(8)2(7)层的深裂缝最多;砂板岩段中,以 3(4)3(2)层居多。总体上,深裂缝分布于弱卸荷以里的坡体深部。深裂缝距自然坡面的水平距离一般为 100~250m,深者可达 280~320m。深裂缝可见延伸一般 10~20m,个别可达 60m。一般表现单缝或松弛带,多表现为局部张开;开度一般为 1~3cm,部分 3~5cm。绝大部分属 IV 级和 III 级深裂缝。一般是无充填或充填少量岩屑;其次是充填岩块、岩屑;少部分充填物为构造岩。部分发育于大理岩段的深裂缝可见溶蚀现象。

深部裂缝因规模较大,对坝肩的变形稳定有重要的影响,同时,宽大裂隙也构成了左岸绕坝渗流的重要通道^[2]。深部裂缝作为锦屏一级水电站关键工程地质问题之一,必须对其进行加固处理^[6]。国内外专家、学者通过采用各种物理模拟、数值模拟等分析方法对高拱坝及坝肩稳定性、大坝的整体安全度以及拱坝基础加固处理措施等方面进行研究,获得了一系列研究成果^[2, 7, 8]。通过对相关研究成果

的总结分析发现,所进行的研究多是对拱坝、坝肩稳定性分析及拱坝整体稳定安全度等方面进行数值模拟分析。分析结果表明,包括深部裂缝在内的各种地质缺陷的存在可能从强度、变形和抗渗性等方面对拱坝和坝肩稳定造成不利影响。如果不对存在的地质缺陷采取有效的处理措施,大坝建成蓄水后,在强大的库水推力作用下,发育的地质缺陷体可能使拱坝由于两岸坝肩岩体产生不均匀变形而造成大坝的变形甚至破坏^[2]。然而,专门针对深部裂缝的加固处理研究成果甚少。祝介旺等用数值模拟方法,分别对锚固洞方案、预应力锚梁方案进行数值模拟计算。通过比较 2 种加固方案中裂隙周围的应力状态、位移状态以及塑性区的分布,发现预应力锚梁技术对深部裂隙的加固效果更好^[9]。而本文主要采用试验的方法对深部裂缝进行固结灌浆加固处理研究。

固结灌浆作为一种常用而又重要的加固处理技术,利用各种水泥浆液或其他化学固化材料对软弱岩土体的充填、压密、黏合和胶结等一系列物理化学作用,达到加固的目的^[2, 10]。然而,宽大裂缝的固结灌浆长期以来一直是灌浆技术的一大难题,通常耗浆量大、灌浆效率低、施工成本高,且灌浆质量无法保证。对锦屏一级水电站深部裂缝发育部位进行水泥固结灌浆时,钻孔施工频繁出现卡钻、掉块、塌孔、漏风等现象,灌浆持续时间太长,漏浆现象异常严重,“灌不住”、“顺缝跑”,无法达到充填裂隙、加固岩体的目的,严重影响了固结灌浆工程的顺利进行。因此迫切需要采取切实可行的措施解决深部裂缝灌浆的技术难题。

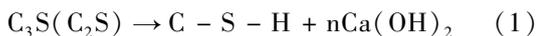
2 水泥-水玻璃控制性灌浆技术的提出

为了解决锦屏深部裂缝灌浆的技术难题,笔者认为,需要对灌注浆液进行针对性控制,尽快使宽大裂缝有效充填起来,采用控制性灌浆技术防止浆液过量流失,使浆液扩散至设计的范围并且有效地对裂缝进行充填、浸渗并胶结,从而达到对其加固处理的目的^[11]。控制性是相对于不控制或难以控制而言的,黏度和凝结时间的调整、水灰比变换、压力控制以及“浓浆、降压、间歇、待凝”等都是常用且重要的控制性技术手段^[10, 11]。针对锦屏深部裂缝的实际工程地质特点,笔者认为,要想达到对深部裂缝良好的固结灌浆效果,所灌注的浆液应该具有:良好的

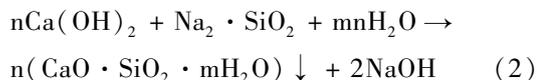
流动性、凝结时间可控、凝固后具有一定的抗压、抗剪强度、以及一定的耐久性等。水泥-水玻璃浆液是以水泥浆液和水玻璃溶液按一定比例混合配制而成的浆液。这种浆液不仅具有水泥浆的优点,而且兼有化学浆液的一些特点,在对宽大裂隙的加固处理中具有较好的效果^[11]。因此,提出对锦屏深部裂缝采用水泥-水玻璃控制性灌浆技术进行加固处理,期望通过相关的研究能对锦屏深部裂缝以及其他类似工程地质缺陷的加固处理提供有益的方案。

3 水泥-水玻璃灌浆作用机理

水泥的成分是硅酸三钙(C₃S)、硅酸二钙(C₂S)、铝酸三钙(C₃A)和铁铝酸四钙(C₄AF)。前两者为水泥的主要成分,占水泥总重量的70%~80%^[10]。硅酸三钙和硅酸二钙的水化反应产物基本相同,都是水化硅酸钙(C-S-H)和氢氧化钙(Ca(OH)₂),只是水化反应速度和水化热高低有所差异而已。水化反应可用下式表达:



水泥的水化产物水化硅酸钙呈胶质状态,几乎不溶于水,而生成的氢氧化钙很快与水玻璃反应,反应过程如下:



反应连续进行生成具有一定强度的胶质体,与被灌岩体胶结在一起,其强度不断增加转化为稳定的凝固体,从而达到灌浆加固的目的。

4 浆液性能试验研究

配制成分的性质、水泥浆的水灰比、水玻璃溶液的模数和浓度以及二者的比例均会对浆液的性质构成一定的影响^[12]。水泥-水玻璃浆液的性能包括很多方面,比如胶凝时间、强度、体积安定性(凝结硬化过程中体积变化的均匀性)、抗渗性、抗冻性等,本试验主要对水泥-水玻璃浆液的胶凝时间和强度进行研究,在此基础上进行了水泥-水玻璃浆液配方设计。在试验过程中水玻璃模数为3.2~3.4,浓度为41°Be',水泥选用拉法基瑞安水泥(P. O42. 5)。

4.1 胶凝时间

已有试验资料表明^[10, 12],水泥-水玻璃浆液的胶凝时间(定量的水泥浆和水玻璃混合搅拌后,到

其流动度小于14cm时的时间)具有一定的规律性:随着水玻璃模数增大,相应的SiO₂含量提高,其凝结时间加快;相同条件下,胶凝时间随水泥浆浓度的增加而缩短;水玻璃浓度为30~50°Be'时,水玻璃浓度减小,凝结时间缩短;水泥浆与水玻璃的体积比在1:0.3~1:1范围内,水玻璃用量较少,胶凝时间较短。

4.1.1 缓凝剂加量对胶凝时间的影响

由于以上述条件确定的水泥-水玻璃浆液的胶凝时间往往过短,多为几十秒范围内,无法满足灌浆工程的施工要求,因此需要通过掺加合适的缓凝剂适当延长浆液的胶凝时间。磷酸氢二钠在延缓水泥-水玻璃浆液胶凝时间方面效果较明显,其作用机理是通过抑制水泥与水玻璃的反应,使两者开始反应时间推迟10~45min。于是采用磷酸氢二钠作为缓凝剂,对水灰比为0.8:1、水玻璃加量占水泥浆体积20%的水泥-水玻璃浆液进行了胶凝时间测试(图1)。

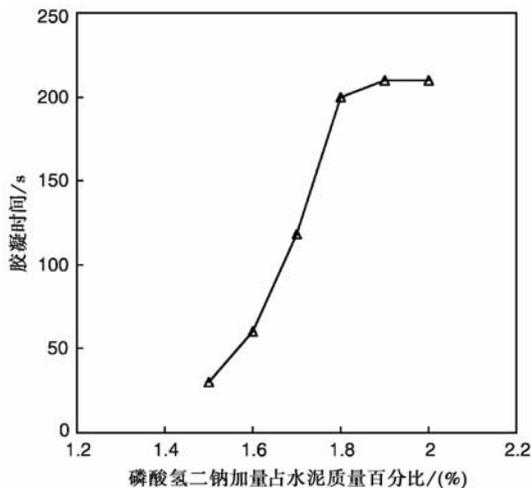


图1 磷酸氢二钠加量对水泥-水玻璃浆液胶凝时间的影响
Fig. 1 Influence of disodium hydrogen phosphate's amount to gel time of silicate cement slurry

由图1可知,当磷酸氢二钠加量占水泥质量比为1.5%时,其胶凝时间为30s;加量为1.6%时,胶凝时间达到60s,提高幅度达到100%;而当其加量为1.7%时,胶凝时间达到了118s,胶凝时间成倍地提高;当其加量为1.9%时,胶凝时间达到最大值(210s),之后随着磷酸氢二钠加量的增加胶凝时间无明显增长。可见,在一定水灰比和水玻璃加量情况下,浆液随磷酸氢二钠加量的增加其胶凝时间延长,但是当其加量达到一定数值时,胶凝时间无明显增长。

4.1.2 水玻璃加量对胶凝时间的影响

已有试验研究表明^[10], 当向一定水灰比的水泥浆液中加入水玻璃时, 最初水泥-水玻璃浆液的凝结时间随着水玻璃量的增加而逐渐缩短, 但当超过一定比例以后, 浆液的凝结时间随着水玻璃量的增加, 转变为逐渐加长。对应于凝结时间最短的那一点的水玻璃占水泥浆液体积的百分数称之为“凝结转点比值”。该比值的大小因使用水泥的品种、水泥浆液的水灰比、水玻璃的模数、水玻璃溶液的浓度不同而异, 具体值应通过试验确定。

4.2 强度

4.2.1 水玻璃加量对强度的影响

为了分析水玻璃加量对结石体强度的影响, 向水灰比为 0.8:1、缓凝剂(磷酸氢二钠)加量为 2% 的浆液中加入不同加量的水玻璃, 测试结石体的单轴抗压强度(图 2)。

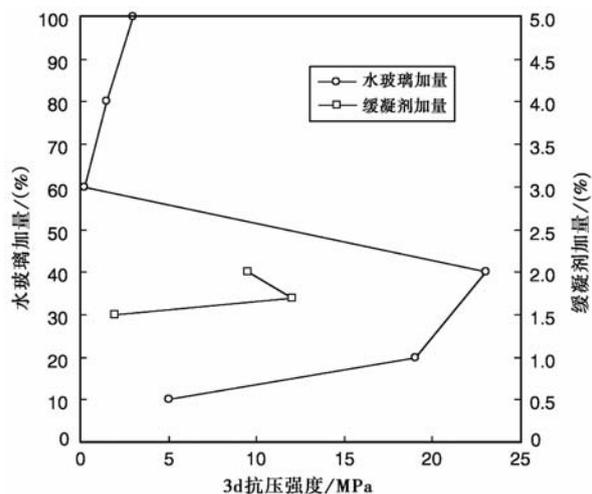


图 2 水玻璃和缓凝剂加量对结石体抗压强度影响

Fig. 2 Influence of silicate and retarder's amount to strength of stone

由图 2 可知, 当水玻璃加量为 10% 时, 3d 单轴抗压强度为 5MPa; 当水玻璃加量增至 20% 时, 单轴抗压强度大幅度提高, 达到 19MPa, 提高幅度达 260%; 而当其加量继续增至为 40% 时, 单轴抗压强度增大至 23MPa。但是当水玻璃加量继续增大至 60% 时, 其单轴抗压强度突然降低为 0.2MPa, 之后随着水玻璃加量的继续增大, 抗压强度缓慢上升, 但其值依然很小。由此可见, 水玻璃加量对结石体强度影响规律相对复杂, 结石体单轴抗压强度随水玻璃加量变化曲线存在一个极值。当水灰比为 0.8:1, 水玻璃加量为 20%~40% 时结石体单轴抗压强度

处于较高的水平。

4.2.2 缓凝剂加量对强度的影响

为了分析缓凝剂对结石体强度的影响, 向水灰比为 1:1、水玻璃加量为 20% 的浆液加入不同加量的缓凝剂, 测试其 3d 单轴抗压强度(图 2)。缓凝剂加量为 1.5% 时, 其单轴抗压强度为 2MPa, 当其加量增至 1.7% 时, 强度值陡增至 12MPa, 继续增大缓凝剂加量至 2%, 强度值降低为 9.5MPa。可见, 随着缓凝剂加量的增加, 开始阶段结石体单轴抗压强度随之增加, 且幅度较大, 但是当其加量增至某个值后, 强度值缓慢降低。

4.3 浆液配方设计

通过对以上试验结果分析可以发现, 影响水泥-水玻璃浆液性能的因素较多。在锦屏深部裂缝固结灌浆过程中, 应充分考虑岩体裂缝分布、张开度、充填情况、连通状况等, 以设计的浆液填充量和扩散半径为依据, 通过大量的试验, 对水泥浆液的水灰比、水玻璃的浓度及相对含量及添加的外加剂用量等进行确定。

探索出既满足流动性能较好、凝结时间可控, 又满足抗压强度要求的浆液配比是锦屏深部裂缝灌浆技术研究中的关键, 通过大量试验获得了初凝时间为 5min 的浆液配比(表 1)。在此配方条件下, 胶凝时间为 1'20", 水泥浆水灰比为 0.8, 水玻璃加量为 40% (体积百分比), 缓凝剂加量为 1.5% (质量百分比), 3d 单轴抗压强度为 3MPa, 7d 单轴抗压强度为 21MPa, 14d 单轴抗压强度为 24MPa。

表 1 按初凝时间为 5min 设计的浆液配方

Table 1 Formula with 5min initial setting time

初凝时间/min	5	
水灰比	0.8	
水玻璃占水泥浆体积百分数/(%)	40	
磷酸氢二钠占水泥质量百分数/(%)	1.5	
胶凝时间/min	1'20"	
单轴抗压强度/MPa	3d	3
	7d	21
	14	24

5 灌浆方法及施工工艺

根据水泥与水玻璃浆液在灌浆设备中混合形式及位置的不同, 一般将水泥-水玻璃灌浆方式分为 3 种类型(图 3)^[2, 10, 12, 13]: 单液式灌浆、双液孔底混

合式灌浆、双液孔口混合式灌浆。

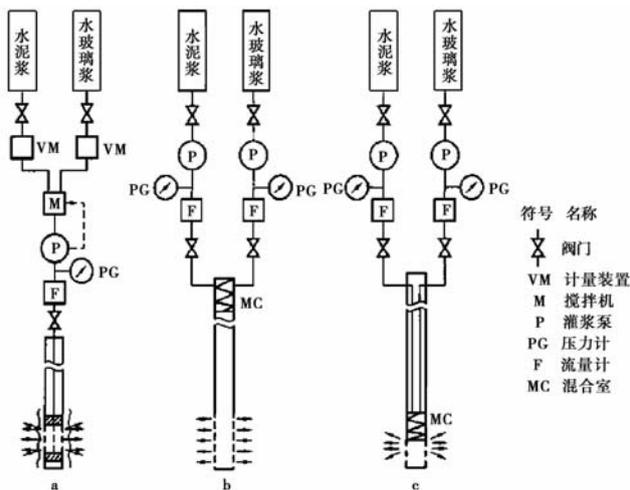


图3 水泥-水玻璃浆液的灌浆方式

Fig. 3 Grouting methods of silicate cement slurry

a. 单液式; b. 双液孔口混合式; c. 双液孔底混合式

单液式灌浆是将水泥浆液与水玻璃浆液按配比放进同一容器内,预先混合,再进行单泵单管线注浆。混合浆液的黏度通常比较高。因此,单液式灌浆一般适用于凝胶时间较长的情况。双液孔口混合式灌浆是将水泥浆液和水玻璃浆液预先分别装在不同容器中,分别用泵输送,在注浆管的头部使2种浆液混合。这种在注浆管中进行混合的灌注方法,适用于凝胶时间较短的情况。这种情况下水泥浆液和水玻璃浆液混合后流下期间不凝固,而是从灌浆管流出后到达设计扩散范围时才凝固硬化。而双液孔底混合式灌浆是将水泥浆液和水玻璃浆液分别放在不同的容器中,分别用泵输入2套注浆管线(并列管、双层管)在2套注浆管线出口端流出的瞬间,2种溶液混合而注浆。这种方法适用于凝胶时间为瞬凝的情况。由于2种浆液混合后发生瞬凝,凝固硬化后的凝胶体本身就起到了封闭作用,达到了在限定范围内固结的目的^[2, 10, 11]。3种类型灌浆方式各具特点,需根据实际工程地质特点、灌浆目的、灌浆设备等灵活选用。鉴于锦屏深部裂缝固结灌浆的实际特点,对工期要求很紧,需要采用一种操作简便、凝结时间可调、安全可靠的灌浆方法,通过比较3种类型的灌浆方式,推荐在深部裂缝加固中采用双液孔口混合式灌浆。

采用自上而下分段灌浆方式先行灌注上部岩体,有利于减少地表冒浆,减小浆液过多的浪费。另外,深部裂缝灌浆区岩体比较破碎且节理裂隙多呈中、陡倾角发育,采用孔口封闭灌浆法可增加上部岩

体的复灌次数及减少绕塞串浆造成的孔内铸塞事故。而纯压式灌浆,浆液注入到孔段内和岩体裂隙中,不再返回,与循环式灌浆相区别。具有备施工简单、施工速度快的优点。根据水泥-水玻璃灌浆技术要求,结合锦屏深部裂缝的工程地质特点,提出采用“自上而下、孔口封闭、纯压式”灌浆方法。灌浆时将射浆管下入孔内距孔底不大于50cm,安装好孔口封闭器,并在进浆管和回浆管上安装阀门,打开回浆阀门,由进浆管用丙酮置换孔内积水,待回浆管返出丙酮后关闭回浆阀门,进行灌浆。其灌浆工艺流程见图4。

灌浆压力是控制和提高灌浆质量的一个重要因素^[10]。一般情况下,使用较高的压力是有利的,但压力偏大或过大会使岩体裂隙扩宽,甚至产生新的裂隙,使原来的地层地质条件恶化,或更严重者造成岩体和岩石抬动变形,产生新的问题,也可能使浆液灌注到需要灌浆的区域之外,造成浪费,甚至危及建基面、边坡和其他建筑物的稳定。锦屏一级深部裂缝的控制性灌浆应以公式计算为基础,参考同类工程经验,结合固结灌浆试验成果,以混凝土或岩石面不抬动为原则,确定其不同灌注段的灌浆压力(表2)。同时在灌浆实施过程中,应结合变形监测和抬动监测成果进行动态控制。

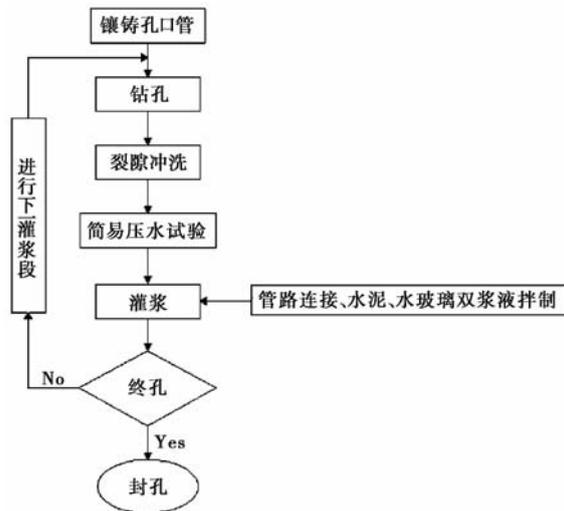


图4 水泥-水玻璃灌浆施工工艺流程

Fig. 4 Grouting process of silicate cement slurry

提出优化的水泥-水玻璃控制性灌浆技术方案如下:

5.1 钻孔

钻孔采用地质钻机、金钢石钻头、清水钻进。钻孔孔径:灌浆孔开孔孔径为 $\Phi 91\text{mm}$, I序孔孔径

表2 控制性灌浆段长及灌浆压力

Table 2 Section chief and pressure of controlling grouting

段次	第1段	第2段	第3段	第4段	5段及以下
段长/m	2	2	3	5	5
灌浆压力/MPa	0.8~1.0	1.5	2.5	3.0	3.0~3.5

Φ76mm, II序孔孔径 Φ56mm。

5.2 孔口管镶筑

孔口管为长度3.0m, φ89mm的钢管,孔口管上端应高出地面10cm。采用φ91mm钻具钻进,进行孔口卡塞灌浆,待第一段灌浆结束后,再进行扫孔;

通过钻杆向孔内注入0.5:1的浓浆置换孔内稀浆,然后下入φ89mm的孔口管,并导正孔口管,孔口管上端口高出地面10cm。

5.3 裂隙冲洗与简易压水试验

考虑到深部裂缝部位岩体松弛破碎,建议采用风、水联合冲洗。冲洗压力为:风压0.5~1.0MPa,水压0.5~1.0MPa,风水混合压力不大于1MPa。

各次序灌浆孔灌前均按自上而下分段进行简易压水试验。压水压力为该灌浆段灌浆压力的80%,并不大于1.0MPa。压水时间20min,每5min测读一次压入流量,以最终流量值计算吕荣值。

(4) 配制浆液

在配制浆液时,先将水泥浆液在搅拌机内拌合均匀,然后将其加入到双桶储浆搅拌机内。再将水玻璃浆液加入到储浆桶内^[12]。均采用直接泵入法对水泥浆液和水玻璃浆液进行泵送。浆液配制应根据注入量大小,遵循“少量多次随灌随制”的原则,不得一次配制大量浆液存放,以防止浆液存放时间过长造成浆液黏度增大影响灌浆效果和浆液浪费。

6 结 论

(1) 针对锦屏一级水电站深部裂缝加固技术难题,在对深部裂缝特征及其灌浆技术特点分析基础上,提出采用水泥-水玻璃控制性灌浆技术对其进行加固处理。

(2) 主要从胶凝时间和强度两方面对水泥-水玻璃浆液进行了试验研究,初步获得了水玻璃、缓凝剂加量对水泥-水玻璃浆液胶凝时间和结石体强度的影响变化规律,并结合锦屏一级水电站深部裂缝的实际工程地质特点,按初凝时间为5min的情况进

行了浆液配比设计。

(3) 在对锦屏一级水电站深部裂隙工程地质特点分析的基础上,提出采用水泥-水玻璃“双液孔口混合”灌浆方法,采用“自上而下、孔口封闭、纯压式”灌浆方式。

(4) 建议结合本文的研究成果,在锦屏一级深部裂缝发育部位选择合适的区域进行水泥-水玻璃控制性灌浆现场试验,对所研究的方案适宜性进行评价,对水泥-水玻璃控制性灌浆技术方案进行进一步优化和完善。

致 谢 感谢成都理工大学“锦屏一级施工地质专题”项目组全体成员的大力支持。对中国水电顾问集团成都勘测设计研究院和中国水电七局在项目实施及论文撰写过程中给作者的大力支持表示衷心的感谢。

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[R]. 成都:国家电力公司成都勘测设计研究院, 2003.
Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute, State Power Corporation of China. Feasibility Study Report on Jinping First Stage Hydropower Station. Chengdu: Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute, State Power Corporation of China, 2003.
- [2] 王胜. 锦屏一级水电站左岸抗力体地质缺陷及加固处理技术研究[D]. 成都理工大学, 2010.
Wang Sheng. Analysis on Geological Defects and Reinforcement Technology on Left Bank Resisting Rock of Jinping I Hydropower. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [3] 王士天, 黄润秋, 李渝生, 等. 雅砻江锦屏水电站重大工程地质问题研究[M]. 成都:成都科技大学出版社, 1998.
Wang Shitian, Huang Runqiu, Li Yusheng, et al. A Study on the Key Engineering Geological Problems at Jinping Hydropower Station, Yalong River. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1998.
- [4] 祈生文, 伍法权, 兰恒星. 锦屏一级水电站普斯罗沟左岸深部裂缝成因的工程地质分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 596~599.
Qi Shengwen, Wu Faquan, Lan Hengxing. Study on the mechanism of the deep fractures of the left abutment slope at the Jinping First Stage Hydropower Station. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 24(5): 596~599.
- [5] 黄润秋. 中国西部岩石高边坡应力场特征及其卸荷破裂机理[J]. 工程地质学报, 2004, 12(增1): 7~13.
Huang Runqiu. Geo-stress distribution and unloading fracturing mechanism of high rock slopes in western part of China. Journal of

- Engineering Geology, 2004, 12(supp. 1): 7~13.
- [6] 谭成轩, 张鹏, 郑汉淮, 等. 雅砻江锦屏一级水电站坝址区实测地应力与重大工程地质问题分析[J]. 工程地质学报, 2007, **16**(2): 162~168.
- Tan Chengxuan, Zhang Peng, Zheng Hanhuai, et al. An analysis on in-situ crustal stress measurements and major engineering geology issues at the dam site area of Jinping First Stage Hydropower Station. Journal of Engineering Geology, 2007, **16**(2): 162~168.
- [7] 顾冲时, 伍元, 赖道平, 等. 地质缺陷对坝体结构影响分析模型研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **13**(6): 886~891.
- Gu Chongshi Wu Yuan, Lai Daoping, et al. Analytical model for the effect of geological defects on dams. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **13**(6): 886~891.
- [8] 蔡元奇, 朱以文, 李金光, 等. 地质缺陷对拱坝及坝基力学行为的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(12): 1805~1809.
- Cai Yuanqi, Zhu Yiwen, Li Jinguang, et al. Influence of geological flaw on mechanical behaviors of arch dam and dam foundation. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(12): 1805~1809.
- [9] 祝介旺, 刘建友, 伍法权, 等. 锦屏一级水电站左岸深部卸荷裂隙的加固方案及数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(12): 2541~2548.
- Zhu Jiewang, Liu Jianyou, Wu Faquan, et al. Study on reinforcement technology of deep unloaded fissures in left bank of Jinping First Stage Hydropower Station and its numerical simulation. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(12): 2541~2548.
- [10] 孙钊. 大坝基岩灌浆[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- Sun Zhao. Rock Dam Grouting. Beijing: China Water Power Press, 2004.
- [11] 肖恩尚, 苏迎春. 大空隙地层控制性灌浆技术综述[J]. 水利水电施工, 2009, (S1): 50~52.
- Xiao Enshang, Su Yingchun. Large void formation technique of controlled grouting. Hydraulic Engineering Construction, 2009, (S1): 50~52.
- [12] 胡国兵. 水泥-水玻璃浆液在锦屏工程涌水封堵中的应用[J]. 人民长江, 2009, **40**(21): 32~34.
- Hu Guobing. Applications of silicate cement slurry in inflow occlusion in Jinping engineering. Yangtze River, 2009, **40**(21): 32~34.
- [13] 李焰, 余常茂. 三峡坝基灌浆施工主要技术问题及解决措施[J]. 水利水电科技进展, 2007, **27**(1): 31~35.
- Li Yan, Yu Changmao. Main technical problems in dam foundation grouting construction of Three-Gorges Project and measures for their treatment. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, **27**(1): 31~35.