

# 斜卡水电站大坝基础防渗处理工程质量控制综述

陈明辉<sup>1</sup>, 王敦平<sup>2</sup>, 代亚洲<sup>1</sup>

(1. 四川久隆水电开发有限公司, 四川 成都 610041; 2. 四川省清源工程咨询有限公司, 四川 成都 610072)

**摘要:**斜卡水电站为雅砻江二级支流踏卡河的龙头水库电站, 拦河大坝为混凝土面板堆石坝, 坝基河床部位覆盖层深厚, 两岸基岩为变质砂岩夹板岩, 右岸为松弛拉裂变形体, 裂隙发育、张开度大、透水性极强。其基础防渗处理工艺复杂、技术难度大。在工程建设中, 业主、设计、监理、施工各方全面落实质量管理责任, 实施精细化质量管控, 依靠科技创新, 采用自密实砂浆复合灌浆、化学灌浆等新材料、新工艺进行基础防渗处理施工, 工程质量可靠, 水库蓄水安全运行, 其工程质量控制经验可供同类工程参考。

**关键词:**斜卡水电站; 坝基防渗处理; 质量控制

**中图分类号:** TV7; TV52; TV543; TV523

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2018)增2-0004-04

## 1 概述

斜卡水电站位于四川省甘孜州九龙县海拔3 100 m的高寒地区, 坝基为深厚覆盖层, 基岩裂隙发育、张开度大, 强透水岩体分布广、深度大、无规律, 坝基防渗墙、防渗帷幕施工难度大, 为同类型工程罕见。其防渗墙、防渗帷幕的工程质量是整个工程建设安全的关键。在工程建设中, 业主、设计、监理、施工全方位着手, 实施精细化质量管理, 依靠科技创新, 采用自密实砂浆复合灌浆、化学灌浆等新材料新工艺进行基础防渗处理施工, 工程质量良好, 大坝至今已安全蓄水运行3个完整水文年。

斜卡水电站大坝为混凝土面板堆石坝, 水库正常蓄水位高程为3 165 m, 坝顶高程为3 168 m, 最大坝高106 m, 坝顶长度为550 m。大坝建于深厚覆盖层上, 坝上游趾板最低高程为3 060 m, 趾板部位对应河床覆盖层最厚度达79 m。大坝基础防渗系统由面板、趾板、连接板、防渗墙及帷幕灌浆等组成, 防渗墙厚度为1.2 m, 深入基岩1 m, 防渗墙施工最大深度为96 m(防渗墙作业平台高程为3 075 m)。两岸坝肩及河床底部透水基岩采用帷幕灌浆进行防渗处理。

### (1) 工程地质条件。

工程区地处青藏高原东南缘向四川盆地过渡带高山区中部, 在大地构造部位上属松潘~甘孜地槽褶皱系雅江冒地槽褶皱范畴的贡嘎山断块

内, 区域地质和地震地质条件复杂。

坝趾区河谷横断面呈不对称“U”型谷, 坝址两岸山体雄厚, 冲沟不发育, 临河坡高大于300 m。河床覆盖层深厚, 钻孔揭示一般为60~75 m, 最大厚度为108.82 m。河床下部为冰川、冰水积块(漂)碎(卵)砾石层, 厚45~65 m, 最厚为86.32 m; 上部为堰塞相静水沉积粉土质砂层, 厚15~20 m。两岸基岩为变质砂岩夹板岩, 岩层产状为N35°~40°W/NE∠35°~40°。右岸岩体为顺向坡, 河床下部(高程3 085~2 995 m)存在高约90 m的陡壁, 岩体不同程度呈现出松弛、拉裂状态, 水平深度为180~200 m, 垂直深度为110~150 m; 左岸岩体为反向坡, 岩层为中等倾角, 虽然倾角变形不明显, 但卸荷强烈, 强卸荷带水平深度达65~75 m。右岸趾板基岩开挖后的典型岩体结构见图1。



图1 右岸坝基C型趾板基岩照片

### (2) 防渗系统的布置。

收稿日期: 2018-02-10

斜卡水电站大坝基础防渗系统由混凝土面板、趾板、连接板、防渗墙及防渗帷幕等组成。河床范围连接板与全封闭混凝土防渗墙相接,防渗墙墙体厚度为1.2 m,底部嵌入基岩1 m,最大深度为96 m。防渗墙顶由连接板、趾板与混凝土面板相接,防渗墙采用C25W12F100混凝土。根据三维有限元应力应变计算成果,防渗墙上部为拉应力区,配筋率按0.2%控制,趾板和防渗墙下部的透水基岩范围采用帷幕灌浆进行基础防渗处理。本工程帷幕底线通过渗流计算成果综合评估后确定为透水率 $q \leq 10$  Lu。

右岸岩体灌浆帷幕的最大深度为150 m。为了保证帷幕施工质量,设置了中部灌浆平洞。对左岸坝顶灌浆平洞、放空洞与溢洪洞交叉段进行了补充灌浆处理。本工程混凝土面板、趾板、连接板为常规混凝土结构,施工质量容易控制,但防渗墙及防渗帷幕受地形地质条件影响,施工难度极大,质量控制技术工艺较为复杂,其防渗剖面见图2。

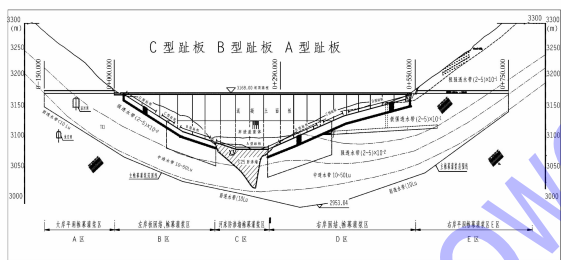


图2 大坝防渗系统沿趾板基准线展开剖面图

## 2 大坝基础防渗系统施工质量控制要点

(1) 防渗墙施工中预防塌孔、孔斜的控制措施。

本工程大坝基坑上下游围堰未封闭,汛期基坑渗水量大,需充水度汛。根据地质资料揭示,河床覆盖层为冰川、冰水堆积(gl+fglQ3)块(漂)碎(卵)砾石,存在大孤石或块石集中地段,孔壁稳定性差,施工中易塌孔。在防渗墙造孔过程中,采取了预防塌孔措施:①泥浆控制,造孔过程中对泥浆要求较高,采用膨润土制浆进行护壁,分散剂为工业碳酸钠( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ),降失水增粘剂为中粘类羧甲基纤维素钠(CMC);②遇大孤石或块石集中地带,采用聚能定向爆破和钻头刃部加焊耐磨块措施用以提高钻孔效率。因坝基覆盖层深厚,故在防渗墙施工中,钻孔深度为50~70 m,最大深度为96 m,严格孔斜控制。在造孔过程中,每班均进行孔斜检

测,发现孔斜不能满足设计要求时,及时进行纠偏处理。

(2) 趾板固结灌浆质量控制。

根据地质资料揭示,右岸趾板位于松弛拉裂变形体部位。岩体拉裂松弛、裂隙张开度大,为了提高趾板的防渗和承载力,增设了防渗板。按照灌浆试验技术成果,先用自密实砂浆进行预处理,再用常规水泥浆灌浆。灌浆压力控制要求:Ⅰ序孔为0.2 MPa,Ⅱ序孔为0.3~0.4 MPa。固结灌浆为孔距2 m,排距2 m,交错布置,左岸孔深10 m,右岸孔深15 m。固结灌浆质量采用声波检测,声波检测标准:岩体灌后声波平均值为4 000 cm/s以上,声波值小于3 000 cm/s的点数占该孔总测点数的比例不大于15%视为合格,否则补充灌注,直至其合格。

(3) 防止趾板抬动的措施。

灌浆施工中,防止趾板抬动采取了以下措施:①右岸基础为顺向坡的变质砂岩,为防止灌浆趾板抬动,采取了预埋灌浆孔口导管(10 m深),并对趾板安装锚杆预防趾板抬动。使用千分表经常进行检查,以确保其灵敏性和准确性。②抬动变形采用千分表观测,每隔10 min测记一次千分表读数。③抬动变形派专人进行观测记录,在裂隙冲洗、压水试验及灌浆等作业过程中,当变形值接近变形允许值(200  $\mu\text{m}$ )或变形值上升速度较快时,及时报告各工序操作人员采取降低压力措施,防止发生抬动破坏。施工中若发现超过规定的允许值,降低压力及注入率至停止施工,并按现场监理工程师指示采取处理措施。④在灌浆过程中,安排专人严密监视抬动装置千分表的变化情况,在抬动值 $< 100 \mu\text{m}$ 时,灌浆压力的升压过程按正常升压程序执行;在 $100 \mu\text{m} \leq$ 抬动值 $< 200 \mu\text{m}$ 时,灌浆升压过程严格控制注入率小于10 L/min,如果抬动值不再上升,则逐级升压,否则停止升压;在抬动值 $\geq 200 \mu\text{m}$ 时,停止灌浆,待凝8 h后扫孔复灌。⑤抬动变形观测过程中,严格防止碰撞,以保证能在正常的工作状态下进行观测,确保测试精度。⑥灌浆工作结束后,抬动观测孔按要求进行封孔处理。

(4) 针对灌浆孔孔斜采取的控制措施。

本工程帷幕钻孔较深,而灌浆孔垂直精度是确保帷幕质量的基础。施工中采取了以下技术措

施:①为保证钻机机座稳固,严禁钻机下的方木与地面呈"点"接触状态;②埋设孔口管,使用水平尺校正钻机,以保证开孔角度准确无误;③钻进中使用平直钻杆和大于4 m的长钻具,连接后同心度较好;④在钻进软硬互层时,采用较低的钻压和较低的转速钻进。

#### (5)帷幕灌浆过程采取的质量控制措施。

本工程右岸岩体拉裂松弛、裂隙十分发育,相对弱透水层埋藏较深,特别是右岸C型趾板部位,帷幕底线深度大于150 m。帷幕上部岩体透水性强。在整个灌浆范围内,随着深度增加,吕容值收敛性不明显,因此,灌浆质量控制就显得十分重要。根据设计要求,施工质量控制要点如下:

①沿帷幕深度方向,将基岩分为4个带:极强透水带(渗透系数 $K = (2 \sim 5) \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ ),强透水带(渗透系数 $K = (2 \sim 5) \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ ),中透水带(吕容值 $q = 10 \sim 50 \text{ Lu}$ )和弱透水带。对于不同透水带采取不同的灌浆工艺。

②灌浆试验结果表明:本工程对于极强透水带和强透水带采用常规水泥灌浆方案或采用控制注入量的方法形成辅助帷幕后再进行主体帷幕灌浆的方案,岩体灌浆后透水率均不能满足设计和规范要求。而采用“先自密实砂浆形成关门孔(辅助帷幕)后主体帷幕”<sup>[1]</sup>的施工工艺,其灌浆效果能够满足设计要求。在施工过程中,采用自上而下灌浆,对于钻孔过程中孔口不返水段先进行自密实砂浆的灌注,待凝6 h后,扫孔灌注水泥浆直至结束;对于钻孔过程中孔口返水段,直接灌注水泥浆至结束。

③右岸趾板辅助帷幕排距为2.5~3 m,孔距1 m,深度与对应部位主帷幕相同;左岸趾板辅助帷幕排距为3 m、孔距1.5 m、深度为对应部位主帷幕的2/3;幕体深入弱透水层5 m,灌后的岩体透水率在死水位以下按3 Lu控制、以上按5 Lu控制。帷幕灌浆在死水位高程3 115 m以下布置为两排,上游排为主帷幕、下游排为副帷幕;死水位以上按单排布置,帷幕灌浆孔距采用1.5 m、排距1 m。

#### (6)灌浆帷幕成本控制。

本工程由于基岩裂隙张开度大,灌浆试验结果表明单位耗灰量达500 kg/m以上,是影响该项工程造价的主要因素。施工单位先后作了常规水

泥灌浆方案、膏状浆液灌浆方案、自密实砂浆灌浆方案等灌浆试验。常规水泥灌浆质量不能达到设计要求,其他两种灌浆工艺质量和成本对比情况见表1。

表1 灌浆工艺质量和成本对比表

灌浆方案	1 m <sup>3</sup> 浆液的技术配比	综合单价 /元·m <sup>-3</sup>	灌浆质量
豪状浆液灌浆方案	水泥 1.16 t, 水 580 kg, 膨润土 112 kg	2 655	合格
自密实砂浆灌浆方案	水泥 0.405 t, 水 248 kg, 砂 1 282 kg, 外加剂 4.73 kg	901	合格

经比较后最终采取了浆液成本较低的自密实砂浆方案。

施工中,为了有效控制灌浆成本,实施了精细化管理。先采用自密实砂浆封堵大裂隙,再实施水泥灌注,既节约水泥耗量,又控制了灌浆成本。所采取的主要措施:①遇有大量耗浆孔段时,首先降低灌浆压力,采用浓浆,减少并限制其注入率并视耗浆量情况采用在浆液中掺速凝剂,待该段0.5:1浓浆耗灰量超过800 L/m(左岸)、1 000 L/m(右岸)时仍不见压力回升、地面又无漏浆的迹象,则应停止灌浆,待凝24 h后复灌;②复灌时若注入率逐渐减少,则应灌至正常结束;③复灌时注入率仍较大、灌浆难于结束时,则可先采用自密实砂浆对裂隙进行充填,待凝后采用水泥浆复灌至正常结束;④复灌时注入率较待凝前相差悬殊较大且耗灰量很小时,则应对该段扫孔后再灌浆,如扫孔后注入率仍很小,此孔即告结束。

### 3 工程建设管理质量控制措施及取得的成效

鉴于该工程大坝趾板河床段位于深厚覆盖层上,左右岸基岩裂隙亦十分发育、较大范围呈透水状,大坝基础防渗系统的施工质量是整个工程安全的关键,在工程建设过程中,采取了以下措施:

#### (1)健全的质量管理体系。

业主、设计、监理、施工单位逐级成立并落实了质量管理机构。业主单位由总工程师负总责,工程建设部负责具体的工程质量管理,工程建设部派出专业工程师对施工现场进行质量跟踪管控;设计单位由电站项目设总负总责,由地质专业工程师和水工设计专业工程师具体负责设计质量;监理单位由总监理工程师负总责,派出若干灌浆监理工程师进行现场跟踪、旁站监督质量;施工

单位由项目总工程师负责质量管理。根据本项目的特点,由总公司派出了独立于施工项目部的“质量监督检测组”在现场进行独立的质量检测,施工项目部将其质量检测成果与现场施工班组的经济责任考核挂钩,奖罚分明。

### (2) 实施精细化的设计管理。

设计单位对斜卡水电站防渗系统实施了精细化的设计。在项目可行性研究和初步设计阶段,根据斜卡水电站大坝地质条件和现场灌浆试验成果,先后组织召开了多次专家咨询会议,对大坝防渗系统的设计方案进行专题咨询论证。灌浆帷幕沿趾板轴线方向根据基岩裂隙的发育情况和透水率情况,将大坝趾板分为A、B、C、D、E多个趾板类型区域,对应不同区域采取了不同的灌浆孔布置方案。右岸岩体卸荷强烈、强透水岩体深度达120 m以上,为保证帷幕灌浆质量,在死水位高程3 115 m附近增设了4.5 m×6 m的“城门洞形”中部灌浆平洞。根据渗流计算成果,合理调整了帷幕基础底线,透水率按 $q \leq 10$  Lu控制。沿深度方向,按透水率不同分为极强、强、中、弱4个透水带,对不同透水带采取了相应的灌浆工艺导则。施工中,根据灌浆先导孔压水参数,不断优化设计方案,实时调整灌浆技术要求。对透水率不能达到设计要求的部分,及时采取有效的灌浆措施。

### (3) 实施精细化的施工质量过程控制

在工程建设过程中,承包商项目部成立了以项目经理为组长,分管质量副经理、总工程师为副组长,项目部各职能部门主要负责人为成员的质量管理工作组,全面负责本工程施工作业的质量管理工作。在工作中坚持技术交底,单项工程开工前由工程技术部组织,按设计要求、施工措施对作业人员进行技术交底;对于分部工程和关键项目,由总工程师和质量部主任参加进行技术交底;在工作中认真开好“三会”,即质量技术交底会,每月、季、年质量总结会与质量专题会;在工作中严格执行质量“三级检查制度”,即班组初检,作业队复检,项目部终检的质量管理制度。所有三检人员名单由监理部考核批准,在施工现场进行实名制签字管理。施工中,三级质检人员与现场监理工程师一道进行全过程旁站监督检查,出现违规施工、质量隐患及时纠正。质量与经济效益挂钩,奖、罚分明,效果明显。

### (4) 引入第三方独立进行质量监测。

在工程建设施工过程中,业主引入了第三方进行“独立质量监测”,对施工过程实施强有力的质量检测监督。按照每一个单元定一个灌后检查孔的标准,由检测单位派专人对灌后检查孔进行压水检测、孔内成像、声波检测等质量抽查检测。对于监测不合格的部位,返工补灌直至合格为止。

### (5) 科技创新是防渗帷幕质量的有力保障。

在工程建设施工过程中,先后进行了“自密实砂浆复合灌浆用于斜卡水电站大坝基础灌浆的实验研究”“膏状浆液在斜卡水电站大坝基础灌浆的实验研究”。经对试验成果进行对比得知:“膏状浆液”灌注工艺复杂,浆液成本高,不适合斜卡水电站大坝基础灌浆;“自密实砂浆复合灌浆”方案利用自密实砂浆的超流态特性,无水区域自流灌注,水下孔段采用“隔离球”进行自流灌注,先用自密实砂浆对大裂隙进行封堵灌注,再用普通水泥进行常规灌浆,其工艺简单,质量便于控制,且灌浆材料绝大部分为当地材料,成本较低,优势明显。为此,设计单位根据“自密实砂浆复合灌浆用于斜卡水电站大坝基础灌浆的实验研究”成果进行了设计优化调整。施工成果表明:帷幕质量符合灌浆规范要求,灌浆成本得到了有效控制。

在工程施工中,为了及时准确地计量和掌握整个灌浆情况,对每台灌浆设备均安装了微机灌浆记录仪,实施计算机网络化计量检测,对工程质量实施动态监控。

### (6) 采取针对性措施及时处理施工质量缺陷。

①对防渗墙未封闭段采取了复合灌浆处理措施。在工程建设过程中出现了以下问题:防渗墙一期15号槽7号孔深度为84.25 m、底高程为2 990.75 m,而相邻的二期16号槽4号孔深度为56.28 m、底高程为3 018.72 m,两者相差27.97 m。由于该处处于冰川、冰水堆积(gl+fglQ3)块(漂)碎(卵)砾石层中块石集中带,施工进度缓慢,若继续施工,大坝基坑不能安全度汛。经研究决定,对于未成墙的覆盖层,由先磨细水泥灌浆后再采用丙稀酸盐化学灌浆处理。具体处理方式:在该处设置两排化灌孔,排距约0.5 m,上游排位于混凝土防渗墙中部,孔距1 m,下游排

(下转第24页)

合,两者浑然一体。

(2) 鉴于该工程闸址区河漫滩宽阔,闸基覆盖层深厚。对低闸坝的防渗设计采用了上游水平铺盖,下游渗流出口设反滤层和防冲墙,左岸副坝与基岩结合处设固结灌浆的方案,不仅能达到防渗的目的,而且施工方便,节省工程造价。

(3) 首部枢纽设计泄洪宽度基本接近原河道主河槽宽度。实际运行证明:闸址上下游基本能达到冲淤平衡。

(4) 该电站 82.1% 的流量直接由上游沙坪水电站尾水提供,河道取水仅为 17.9%,减少了取水和沉沙需要的成本,水力学试验和实际运行证明,上下游两电站串联式布置在运行上完全可行。

(5) 沉沙池采用双箱布置,排沙道采用双孔排沙,模型试验结果验证:冲沙效果更好,缩短了

(上接第7页)

为原防渗墙帷幕灌浆孔,孔距约 2 m。先用纯水泥浆灌注,灌浆压力为 2.5 MPa,再升至 4~5 MPa 闭浆 0.5 h,待凝 12 h 后扫孔进行压水试验,若透水率  $q < 0.4 \text{ Lu}$  则进入下一段施工,透水率  $q > 0.4 \text{ Lu}$  则进行化灌补强,并在已完成的帷幕灌浆上游侧再增加了三排覆盖层帷幕灌浆,排距为 1.2 m、孔距 1 m,采用纯水泥浆分两序灌注,灌浆压力为 2 MPa,灌后透水率按  $q \leq 10 \text{ Lu}$  控制,帷幕与防渗墙底搭接长度为 5 m、入岩 5 m,平面上与左右单元搭接,搭接段宽度为 5 m。采取该方案后,根据趾板上布置的帷幕厚度与孔距、排距等参数的相关经验公式估算,帷幕厚度为 8 m。经三维渗流计算复核,得到水力坡降为 7.6~9.8。灌后经压水试验检查,满足设计要求。

② 对右岸 C6~D3 单元、中部灌浆平洞未达标段的处理。施工过程中,灌浆质量检测发现:右岸 C6~D3 单元 60 m 以下部位及中部灌浆平洞以下部位灌注压水检测不合格段,先采用磨细水泥提高压力灌浆,再进行原孔压水检测判定其是否采用水泥-化学灌浆进行补强处理。复合灌浆孔布置在主帷幕灌浆孔之间,采用单排布置,孔距 1.5 m。具体方式为:钻孔结束后,采用孔口封闭单点法进行压水试验,压力为 1 MPa,当透水率  $q > 3 \text{ Lu}$  时,对该孔段进行水泥-化学复合灌浆;当透水率  $q \leq 3 \text{ Lu}$  时,继续下一工序施工;若继续钻进施工的孔段透水率  $q \geq 3 \text{ Lu}$  时,可与上部合

冲沙时间,冲沙运行更加灵活。

(6) 利用左岸地形、采用宽浅式设计的输水明渠巧妙地将上下游两电站结合为一体,既能充当电站调节池,又能避免上下游两电站尾水和进水口水位的频繁波动。输水明渠采用单宽流量小、设计水头低的圆弧式溢流侧堰,阶梯式的消能方式与原河道衔接合理,泄流顺畅;平滑如镜的渠面溢流如瀑布般的水帘,为首部枢纽增添了一道亮丽的风景。

(7) 偏桥水电站已运行 9 a 有余,首部枢纽运行管理方便,水流控制满足设计要求。

#### 作者简介:

方卫红(1966-),女,浙江兰溪人,高级工程师,从事水工设计工作;

唐德江(1970-),男,四川万源人,主任,工程师,从事水利水电工程建设管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

格的孔段一起灌注,但段长不得大于 20 m。水泥灌浆压力为 2.5 MPa,化学灌浆压力为 2 MPa。采取该方案进行处理后,经压水试验检测,满足设计要求。

## 4 结 语

斜卡水电站大坝主体工程于 2010 年 1 月开工,2015 年 8 月工程竣工。在工程建设过程中,针对大坝基础处理存在的诸多技术难题进行了大量的实验研究,多次召开专家咨询会进行咨询论证,精心组织、科学管理,最终攻克了深厚覆盖层防渗墙施工和超深强透水基岩灌浆成幕的技术难题。水库蓄水发电以来,大坝已经过 3 个完整水文年的正常水位蓄水检验,大坝沉降、绕坝渗漏等各项水工监测参数未见异常,基础防渗系统施工质量良好,坝体运行安全可靠,完全满足设计和安全运行要求,为我国类似工程建设提供了成功的实践经验。

#### 参考文献:

- [1] 蔡海燕. 新型自密实砂浆在高寒地区宽贯通型裂隙深孔帷幕灌浆中的应用[J]. 水利水电技术. 2014, 45(8): 112~114.

#### 作者简介:

陈明辉(1963-),男,四川成都人,党委书记兼常务副总经理,工程师,从事水电工程建设技术与管理工;

王敦平(1970-),男,四川三台人,高级工程师,从事水利水电工程地质勘察工作;

代亚洲(1978-),男,重庆市人,总经济师,高级经济师,从事合同管理和工程造价管理工作。

(责任编辑:李燕辉)