

双江口大坝心墙盖板裂缝原因分析与处理措施探讨

曹 优 兰, 何 军

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

摘 要:堆石坝心墙盖板混凝土产生裂缝的原因通常是由于混凝土原材料、混凝土强度等级、混凝土施工工艺及混凝土温控措施等不满足设计图纸或施工规范要求所致。双江口水电站大坝心墙盖板在排除上述设计和施工因素的情况下,对比同类工程设计与施工经验^[1],出现了高地应力、温度应力、灌浆抬动、长期未填筑覆盖等多种前所未有的复杂情况,导致大坝心墙盖板施工在不同时段出现了不同状况的裂缝。工程建设管理单位高度重视裂缝问题,多次组织专家组和参建单位人员召开专题会议,共同分析裂缝产生的原因,研究出相应的处理及预防措施并予以实施,取得了较好的效果。

关键词:大坝;盖板裂缝;双江口水电站

中图分类号:TV7;TV52;TV545

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2023)06-0050-06

Analysis on the Causes and Treatment Measures of Cracks in the Cover Plate of the Core Wall of Shuangjiangkou Dam

CAO Youlan, HE Jun

(Sinohydro Bureau 7 CO., Ltd., Chengdu Sichuan 610213)

Abstract: The cracks in the concrete of dam core wall cover plate are usually caused by the fact that the concrete raw materials, concrete strength grade, concrete construction technology and concrete temperature control measures do not meet the requirements of design drawings or construction specifications. Under the circumstance of excluding the above design and construction factors and comparing the design and construction experience of similar projects, many unprecedented complicated situations, such as high ground stress, temperature stress, grouting lifting, long-term unfilled coverage, appeared in the cover plate of Shuangjiangkou dam core wall, causing the cracks in different conditions appeared in different periods of construction. The engineering construction management unit attaches great importance to the problem of cracks, and organizes expert groups and personnel from participating units to hold special meetings for several times to analyze the causes of cracks, study the corresponding treatment and prevention measures, and achieve good results.

Key words: Dam; Crack of cover plate; Shuangjiangkou Hydropower Station

1 概 述

双江口水电站为一等大(1)型工程,位于四川省阿坝藏族羌族自治州马尔康市、金川县境内的大渡河上源河流——足木足河与绰斯甲河汇合口以下约 2 km 处。枢纽工程由砾石土心墙堆石坝、右岸洞式溢洪道、深孔泄洪洞、放空洞和左岸竖井泄洪洞以及地下引水发电系统等建筑物组成。大坝为砾石土心墙堆石坝,坝顶高程 2 510 m,最大坝高 315 m。

该大坝心墙高程 2 265 m 以下河床的部分基础于 2018 年 10 月 29 日开挖至基岩面高程,2018 年 11 月 18 日坝基开挖完毕,2019 年 3 月 25 日

进行了首仓混凝土浇筑施工(河床段第 19 号块)。2019 年 5 月 16 日,河床段心墙基础固结灌浆生产性试验启动,并于 2019 年 7 月 29 日完成生产性试验。截至 2022 年 6 月,河床段盖板、廊道全部浇筑完成(共 23 个单元);左坝肩盖板已浇筑 61 个单元,廊道已浇筑 8 个单元;右坝肩盖板已浇筑 51 个单元,廊道已浇筑 8 个单元。

该大坝自 2019 年 7 月 6 日发现首条裂缝以来,截至 2022 年 6 月,工程建设管理单位高度重视心墙盖板出现的裂缝问题,先后多次组织专家组和参建单位人员查勘现场,召开专题会议分析裂缝形成的原因,研究并制定了相应的处理及预防措施。

收稿日期:2023-02-02

笔者从双江口水电站大坝心墙盖板施工中遇到的实际问题入手,对大坝盖板裂缝的分布情况、产生原因分析、处理方案及预防措施的制定等进行了详细的分析与探讨,收集、整理并总结出复杂情况下心墙盖板裂缝的处理方案,以供类似工程项目参考。

2 大坝心墙盖板及廊道设计参数与初期盖板裂缝产生的原因分析及处理

2.1 大坝心墙盖板及廊道设计参数

左岸坝肩盖板坝底宽度为 150.27 m,坝顶宽度为 14.02 m,盖板混凝土共分为 92 个单元;右岸坝肩盖板坝底宽度为 150.27 m,坝顶宽度为 8 m,盖板混凝土共分为 76 个单元。

设计单位根据实际情况将左、右岸心墙盖板混凝土厚度调整为 65 cm,标准分仓尺寸为 16 m(宽)×20 m(高),仓间均设置结构缝,仓内设置:Φ14 单层钢筋网。左、右岸坝肩盖板混凝土为 C25W10F50 混凝土(二级配)。

左、右岸坝肩心墙基础廊道净空尺寸为 3 m(宽)×3.5 m(高),城门洞型,底板混凝土厚 100 cm,顶拱混凝土厚 150 cm。心墙基础廊道混凝土为 C30W10F50 混凝土(二级配)。左、右岸廊道混凝土共分为 31 个单元。

2.2 初期盖板裂缝情况

前期施工的盖板中有 5 块出现了裂缝,其主要为河床水平段盖板和廊道底板;裂缝大致为顺水流方向,从盖板长边开裂沿短边发展;裂缝宽度大于 0.3 mm,主要为深层裂缝或贯穿性裂缝;其相关块混凝土于 2019 年 3~6 月浇筑,裂缝在相关块或相邻块固结灌浆期间发生;缝宽随时间总体变化不大或呈台阶状发展,分析其可能为一次或多次抬动造成;钻孔发现裂缝呈竖直向发育。具体施工及裂缝发育情况如下:

(1)河床盖板 11 号块于 2019 年 4 月 26~27 日浇筑,5 月 30~7 月 15 日进行固结灌浆。2019 年 8 月 30 日发现了 1 条长 3.1 m、缝宽 0.1~0.15 mm、顺水流方向的裂缝,发现裂缝时其相邻的 14 号块正在进行固结灌浆。盖板建基面埋设的变位计监测成果表明:固结灌浆期间盖板抬升了 23.26 mm,后期裂缝未见发展。

(2)河床盖板 14 号块于 2019 年 3 月 26~27 日浇筑,8 月 6~9 月 9 日进行固结灌浆。2019 年

7 月 6 日发现了 3 条缝宽 0.1~1.6 mm、顺水流方向的裂缝,发现裂缝时其相邻的 14 号块正在进行固结灌浆。现场施工无法进行裂缝的详细测量,目测裂缝未见发展。

(3)河床盖板 19 号块于 2019 年 3 月 25~26 日浇筑,8 月 19~9 月 17 日进行固结灌浆。2019 年 8 月 24 日发现了 4 条、缝宽 0.1~1.25 mm、大致顺水流方向发育的裂缝,左侧两条呈“Y”型分布。布置在盖板下游附近的基岩变位计监测结果表明:盖板于 9 月初~9 月中旬抬动了 16.37 mm。

(4)左岸上游岸坡盖板 64 号块于 2019 年 6 月 23~25 日浇筑,此时岸坡尚未进行固结灌浆,8 月 30 日发现了 3 条近似竖直向发育、缝宽 0.3~0.5 mm 的裂缝。截至 2019 年 9 月 15 日,3 条裂缝的宽度均呈现出逐渐增大的趋势。

(5)河床基础廊道底板 3 号块于 2019 年 6 月 25~27 日浇筑,尚未进行固结灌浆,7 月 6 日发现了 1 条顺水流方向发育、缝宽 0.15~2.25 mm 的裂缝,此时相邻的 11 号块正在进行固结灌浆。廊道底板中间部位新出现了 1 条分支裂缝,且原裂缝宽度有所增大。

2.3 盖板裂缝产生原因初步分析

鉴于大坝盖板结构设计、混凝土强度等级及施工技术要求等满足相关规程规范要求且与已有工程经验相近,其导致盖板混凝土产生裂缝的可能性不大。大坝盖板及廊道混凝土分别为 C25W10F50 和 C30W10F50 二级配混凝土,采用常态及溜槽施工。该工程使用的低热硅酸盐水泥、粉煤灰、花岗岩人工骨料、外加剂等原材料检测结果总体满足设计要求。混凝土原材料有利于盖板和廊道混凝土的防裂抗裂。经初步分析,得出盖板产生裂缝的原因如下:

(1)高地应力影响^[2]。大坝心墙河床部位的基础高程为 2 195~2 205 m,呈上游低、下游高的缓坡,该段河谷形态为上游狭窄、下游较宽的喇叭状。区域构造应力作用方向表现为近 EW 向的挤压,应力相对集中而导致地应力高,因此而在高地应力环境下的河床岩体开挖完成后产生了大量的回弹、松弛变形和裂缝,且岩体裂缝大体呈顺河向分布。分析认为:固结灌浆开始施工后产生的混凝土裂缝方向与岩体裂缝大体一致,河床岩体进一步回弹、松弛变形及开裂是导致盖板混凝土

产生隐微裂隙的一个重要因素。河床基岩裂缝与

盖板混凝土裂缝对照情况见图 1。



河床基岩裂缝



河床盖板裂缝

图 1 河床基岩裂缝与盖板混凝土裂缝对照图

(2) 温度应力影响^[3]。盖板及廊道混凝土胶材用量一般为 $303\sim 349\text{ kg/m}^3$, 局部混凝土胶材用量偏高; 受施工条件制约, 单仓混凝土施工的最大时长超过 24 h, 跨过了中午高温时段; 廊道底板及附近厚度大的部位其混凝土内部最高温度测值超标 $6.8\sim 16.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。

盖板及廊道混凝土的浇筑时间为 2019 年 3~6 月, 发现裂缝的时间主要集中在 2019 年 8 月, 部分块体发现裂缝时的混凝土内部温度在 15~20 d 内已下降了 $20\sim 30\text{ }^\circ\text{C}$, 降温速率偏大。因此, 混凝土内部最高温度大、日降温幅度过大、昼夜温差大等引起的温度应力增大了混凝土开裂风险。

分析认为: 盖板及廊道底板混凝土的基础约束强, 坝址区昼夜温差大、夜间低温寒冷、日间日照温高、混凝土水化过程中造成其内部温度高等引起的温度应力可能是混凝土发生表面裂缝的内因之一。

(3) 固结灌浆抬动^[4]。2019 年 5 月 16 日, 河床段心墙基础固结灌浆生产性试验启动, 并于 7 月 29 日完成。混凝土盖板固结灌浆开始前未发现裂缝。自 2019 年 8 月 4 日开始实施河床段常规固结灌浆施工, 固结灌浆时盖板和廊道底板抬

动时有发生。根据现有的监测及物探成果: 河床岩体的回弹松弛仍在持续发展, 但固结灌浆前其变形量值较小。相应的基岩变位计监测成果表明: 灌浆过程中其抬动变形明显加剧。已完工程固结灌浆的单位注入量显示: 河床段各块的单位注灰量均超过 100 kg/m 。在高压作用下, 单位注入量大的固结灌浆易造成盖板混凝土抬动。

综上所述, 盖板及廊道底板混凝土裂缝是在高地应力条件下河床岩体回弹松弛变形、固结灌浆抬动及温度应力较大等综合因素作用下产生的。

2.4 初期处理建议

鉴于后续固结灌浆施工的其他盖板和廊道底板混凝土存在类似的地质条件、混凝土施工工艺以及严峻的气候条件, 其盖板和廊道底板混凝土新发裂缝的可能性较大。专家组建议: 在深入分析研究的基础上, 做好裂缝防控的技术准备。

(1) 做好盖板混凝土温度控制是温控防裂的根本措施。加强混凝土的温度控制, 控制其最高温度不大于允许最高温度, 确保混凝土降温速率每天不大于 $1\text{ }^\circ\text{C}$; 加强混凝土的保护工作, 将保温覆盖措施持续至坝体填筑时; 先浇筑因超挖形成的填塘混凝土或地质缺陷处理的混凝土, 并采取

降温措施使其冷却到一定温度。

(2)河床段固结灌浆在高压力作用下其灌浆过程中抬动变形明显。采取进一步优化固结灌浆设计参数的方式,适当降低固结灌浆压力。

(3)控制固结灌浆引起的盖板和廊道底板混凝土抬动影响是防控裂缝的主动措施。需要改进固结灌浆施工工艺,在施工中控制灌浆压力以满足混凝土或岩石面不抬动为原则进行低压慢灌,确保浅层固结灌浆不发生或少发生抬动;研究利用灌浆孔或采取局部增设钻孔等方法以减小灌浆时盖板及廊道底板下岩体承压水产生的浮力影响。

(4)混凝土盖板的抬动对“T”型止水结构的受力影响大,建议研究改善“T”型止水结构受力的工程措施,必要时在盖板结构缝间增设跨缝钢筋。

(5)初期发生的盖板裂缝属结构性裂缝,对其除采取化学灌浆处理外,尚需研究对缝面采取覆盖封闭处理的工程措施。

(6)针对两岸岸坡岩体卸荷松弛较强烈的部位研究适当加强锚固的必要性和可能性。

(7)在后续施工过程中合理安排帷幕灌浆和坝体填筑的施工时序,以满足帷幕灌浆时盖板及廊道上部有一定高度的坝体压重,尽量减小盖板及廊道帷幕灌浆时可能产生的抬动。

2.5 初期实施的处理措施

为有效控制混凝土裂缝进一步扩展并做好河床基岩的灌浆工作,尤其是防渗线一带的灌浆工作,考虑并采取了以下措施。

2.5.1 设计措施

(1)在河床廊道以及部分盖板上布置长观孔,中长期监测河床基岩部位的变化情况;对坝基监测措施进行进一步的优化调整,加强对基岩应力与变形的监测。通过这些措施为设计参数的优化调整、施工工艺的改进提供依据。其中河床廊道的长观孔可长期使用,而对于布置在盖板上的长观孔则需在坝体开始填筑时予以封堵。

(2)对于固结灌浆,采取降低第二段及后续段的卡塞位置、适当降低终孔压力并通过试验进行验证和调整的措施。

(3)利用固结灌浆Ⅰ序孔补打部分深锚筋,适当加强盖板的锚固效果。

(4)将盖板及廊道裂缝的消缺处理安排在坝体即将填筑前进行。

(5)利用河床廊道(以及岸坡廊道),在坝体填筑到一定阶段后根据监测或检查情况进行必要的补充灌浆以加强防渗线一带的灌浆效果。

(6)将河床的帷幕灌浆以及基坑范围内低高程岸坡的帷幕灌浆安排在坝体填筑超出基坑范围(2 245 m 高程)并确认其基岩回弹变形终止后进行。

2.5.2 施工措施

(1)合理有序地安排灌浆孔位和时序,避免灌浆孔位过于集中。

(2)加强灌浆过程中的抬动监测并及时采取限压限流措施。

(3)大坝填筑前进行盖板裂缝消缺处理时,首先全面、系统地排查裂缝,然后编写具体的施工方案并严格处理到位。

(4)持续观察、监测盖板及廊道施工缝、结构缝的变形情况。在坝体填筑到一定阶段后根据监测或检查情况进行必要的补充灌浆。

3 盖板裂缝处理后的跟踪检查

(1)固结灌浆前的裂缝检查情况。大坝河床段盖板、左右岸岸坡心墙基础混凝土盖板及大坝基础廊道固结灌浆前,项目部联合现场监理工程师及基础工区现场管理人员一道对已达到混凝土龄期的单元进行了混凝土裂缝情况检查并进行了工作面移交。本次跟踪统计内容为:2019年10月18~2021年5月3日对高程2 260 m以下的混凝土单元进行检查的情况。

对于左岸岸坡心墙基础混凝土盖板、大坝基础廊道及河床段混凝土盖板共计检查了21个单元,其中16个单元混凝土表面出现了裂缝,共计39条。

针对右岸岸坡心墙基础混凝土盖板、大坝基础廊道共计检查了24个单元,其中13个单元混凝土表面出现了裂缝,共计26条。

(2)化学灌浆处理^[5]后新增裂缝的普查。在 高程 2 240 m 以下裂缝处理完成后,于 2021 年 8 月 29 日再次对(高程 2 227~2 240 m)混凝土盖板裂缝进行了普查,发现新增裂缝 106 条,裂缝总长度为 722.2 m。2022 年 2~4 月(填筑前)再次对(高程 2 240~2 260 m)混凝土盖板裂缝进行了普查,发现新增裂缝 148 条,裂缝总长度为 723.5 m。高程 2 260 m 以下裂缝处理完成后,共新增

裂缝 254 条。盖板初期裂缝化学灌浆处理后发现 的新增裂缝分布情况见图 2。



图 2 化灌处理后新增裂缝分布图

(3)跟踪检查结果。通过对上述检查数据进行汇总后发现:在无外力推动下,混凝土盖板产生裂缝的比例较小,总占比为 3.91%(固结灌浆前为 65 条/总体裂缝 1 663 条)。混凝土盖板第一次裂缝处理完成后,由于长时间未进行填料料覆盖,发现新增裂缝 254 条,总占比为 15.27%。

4 盖板裂缝产生原因的深入分析及处理

4.1 裂缝产生原因的分析

根据检查发现的情况,专家组在初步分析裂缝成因的基础上进一步对裂缝增加的原因进行分析如下:

(1)盖板混凝土浇筑及灌浆完成后,由于原规划河口石料场壁画保护问题而导致重新选取备用飞水岩石料场的原因,导致大坝填筑未及时进行,最终导致盖板施工完成后长时间外露。

(2)混凝土原材料质量不稳定,波动较大,部分指标未达到设计配合比要求,不利于盖板和廊道混凝土的防裂抗裂。

(3)混凝土供应方面:鉴于从砂石骨料生产、混凝土拌制到混凝土浇筑系由多家施工单位完成,整个混凝土生产链过于复杂,进而造成混凝土质量控制难度大。

(4)固结灌浆方面:严格按照设计方案指定的初期处理措施要求进行固结灌浆施工。由于现场实施的固结灌浆压力已经控制到最低,灌浆过程中采取了低压(设计压力下限)、浓浆、限流(20 L/

min)、限压等措施。灌浆过程受到了严格监控,过程透明。但在上述条件下盖板抬动现象仍时有发生。

(5)两岸边坡开挖完成后长期裸露,岩石进一步风化、卸荷、松弛,裂隙串通性增强且开挖阶段施工的锚杆拉拔力降效,将会进一步增加盖板抬动的可能性。

(6)从孔内成像资料及现场岩层走向分析,两岸岸坡岩层节理多为顺坡走向(垂直于钻孔方向),灌浆时浆液扩散范围远,受力面积大,虽然灌浆压力已采取有效措施控制,但由于其受力面积大,从而亦导致压强随之而增大,也加大了产生盖板抬动的可能性。

(7)两岸盖板混凝土坡面为高陡边坡(其中右岸坡度约为 $55^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 、左岸为 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}$),且混凝土盖板厚度仅为 0.5 m/0.65 m,较类似工程明显偏小,在高陡边坡的情况下其盖重分解为法向、顺坡向两个方向的分力,其坡度越陡,作为抗抬动法向上的盖重分力越小,发生抬动的可能性越大。

(8)由于固结灌浆每段灌浆前的裂隙冲洗均为带压冲洗,而大面积频繁的带压冲洗增加了发生劈裂破坏的可能性,且带压冲洗易形成瞬间压力增大,从而导致盖板发生破坏性抬动。

综上判断认为:盖板裂缝依然是因高地应力、温度应力、固结灌浆抬动等综合因素导致,而盖板长期未覆盖则导致裂缝发展加剧。

4.2 后续处理建议及措施

(1)在控制原材料质量稳定的基础上应进一步研究将混凝土设计龄期延长至90 d,优化混凝土配合比以降低水泥用量,控制混凝土温升,进一步提高混凝土防裂抗裂的能力。

(2)鉴于该工程地处高原,昼夜温差大,后续需进一步加强混凝土浇筑后的保温保湿养护,适当提前或延长养护。

(3)加强对固结灌浆压力的控制和抬动监测,一旦有抬动迹象即停灌待凝以有效降低固结灌浆对盖板的损伤;研究并优化各孔序灌浆孔的施工顺序,避免群孔效应的出现。

(4)在不降低裂缝处理要求的前提下研究取消缝面刻槽处理的措施,对缝面进行封闭处理;采用柔性盖片或涂覆材料封闭的措施代替刻槽处理;采取试验和调研结合的方式优选并确定缝面封闭材料和化学灌浆材料及工艺参数。

(5)岸坡盖板混凝土浇筑前应加强对建基面的清理,对软弱挤压破碎带等地质缺陷采取一定深度的清理、刻槽置换混凝土等处理措施。

(6)对于未浇筑部位,应采取锚杆加密、加深(深度应超过灌浆深度)的措施;加强现场锚杆的入岩深度及“L”型筋与混凝土钢筋连接的有效性。

(7)对于岸坡心墙基础盖板区域,应根据现场实际情况在合适的位置布置随机减压排水孔。

4.3 后续裂缝处理的实施情况

对于后续裂缝的处理充分考虑了专家组提出的处理意见,结合现场心墙盖板的施工进度情况,设计单位采取了优化混凝土龄期及配合比、加深加密未浇筑部位锚杆的数量、增设“L”型连接筋及破碎带刻槽以及布置随机减压孔等措施;而施

工单位则采取了在严格控制灌浆原材料的同时优选了裂缝处理材料、处理工艺和工序以及加强保温、保湿养护等措施。目前大坝盖板混凝土施工已过半。采取上述处理措施后大坝心墙盖板裂缝情况已得到有效控制。

5 结 语

堆石坝心墙盖板裂缝产生的原因多种多样,与施工环境息息相关。双江口水电站大坝心墙盖板在排除设计和施工因素的情况下出现了高地应力、温度应力、灌浆抬动、长期未填筑覆盖等多种前所未遇的复杂情况,在大坝心墙盖板施工的不同时段出现了不同状况的裂缝。通过现场实践和探索,裂缝的处理和预防措施已趋于完善,裂缝治理和控制效果尚可。笔者收集并整理了裂缝治理过程的实施经验,对于堆石坝心墙盖板施工裂缝预防具有重要的意义,亦为今后的类似工程建设提供了相关经验,具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 牟文羽,李彪,孙庆辉.两河口水电站心墙盖板混凝土裂缝控制研究[J].四川水利,2020,41(3):23-25.
- [2] 孙永清,李桂林.双江口水电站大坝心墙建基岩体松弛特征研究[J].四川水力发电,2021,40(11):1-5.
- [3] 徐利君,肖贵梅,王怀斌.白石水库河床坝段混凝土灌浆盖板裂缝原因分析[J].东北水利水电,2000,18(1):10-11.
- [4] 李锡均,苏杨军,秦来燕.混凝土灌浆盖板裂缝产生的原因与处理方法[J].水利技术监督,2022,30(4):75-78.
- [5] 邓辉红.化学灌浆法在武隆县银盘水电站大坝混凝土裂缝处理中的应用[J].绿色科技,2021,23(22):233-235.

作者简介:

曹优兰(1980-),女,四川武胜人,副高级工程师,从事水利水电与市政工程基础设施建设施工技术与管理工

何 军(1986-),男,四川南充人,工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工作。(责任编辑:李燕辉)

水电十局一分局云阳抽蓄项目下水库竖井式泄洪洞贯通

10月14日,由水电十局承建的云阳抽蓄项目下水库竖井式泄洪洞安全顺利贯通,标志着该工程又一个重要节点圆满完成,为衬砌混凝土转序施工、大坝截流奠定了坚实基础。云阳抽水蓄能电站位于重庆市云阳县高阳镇境内,电站装机容量为1200兆瓦,安装4台、单机容量为300兆瓦的单级混流可逆式水泵水轮机组。该工程为一等大(I)型工程,包括上水库、下水库、输水发电系统三大枢纽建筑物,承担重庆电力系统调峰、填谷、储能、调频、调相和紧急事故备用等功能。水电十局承建该工程下水库大坝、导流洞、竖井式泄洪洞、泄洪放空洞及道路工程。其中竖井式泄洪洞全长447米,城门洞型,开挖断面为7.6米×9.8米,处于下水库施工关键线路上。施工过程中,受无筹建期、场内外交通道路、原材料供应、交地等问题影响导致工期紧、任务重。鉴于泄洪洞洞身围岩为泥岩与砂质泥岩互层、局部围岩破碎、地质条件差、安全风险较高,经过项目管理团队超前谋划、精准施策、优化资源,强化管控,通过“短进尺、强支护、勤量测”等多措并举,加强了施工工序衔接管理,做好了资源调配,保障了开挖支护安全与进度,确保了泄洪洞的顺利贯通。

(水电十局 供稿)