

# 锦屏二级水电站引水隧洞衬砌混凝土裂缝的处理

徐茂华, 李亮

(四川二滩国际工程咨询有限责任公司, 四川 成都 611130)

**摘要:**混凝土裂缝是一个普遍存在而又难以解决的工程实际问题, 锦屏二级水电站引水隧洞衬砌混凝土裂缝采用化学灌浆进行了系统修复, 对保证衬砌混凝土结构的耐久性, 防止引水隧洞内水外渗起到了良好作用。对锦屏二级水电站引水隧洞东端衬砌混凝土裂缝处理要求、修补工艺进行了总结, 对裂缝产生原因进行了初步分析, 可为其他类似工程提供借鉴。

**关键词:**锦屏二级水电站; 引水隧洞; 裂缝原因; 裂缝处理

**中图分类号:** TV7; TV554; TV52

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2015)增2-0017-04

## 1 工程概述

锦屏二级水电站4条引水隧洞平行布置, 横穿跨越锦屏山, 从进水口至上游调压室的平均洞线长度约为16.67 km, 隧洞沿线上覆岩体一般埋深1 500~2 000 m, 最大埋深约为2 552 m, 具有埋深大、洞线长、洞径大的特点。

根据施工分标, 引水隧洞分为东端和西端, 其中东端引水隧洞洞段长度平均为11.2 km左右, 4条引水隧洞总长约45 km。

东端1#、3#引水隧洞开挖采用TBM结合钻爆法进行, 其中1#引水隧洞TBM开挖洞段长度为5 760 m, 3#引水隧洞TBM开挖洞段长6 300 m。2#、4#引水隧洞全部采用钻爆法开挖。

引水隧洞TBM开挖直径为12.4 m, 全圆断面; 钻爆开挖直径为12.8~14.4 m, 分标准马蹄形和平底马蹄形。混凝土衬砌厚度普遍为60~80 cm(含喷护混凝土厚度), 渐变段等一些特殊部位厚度最大为150 cm。混凝土衬砌洞段根据

不同的围岩类别分别布置了单层钢筋或双层钢筋。

## 2 裂缝产生的原因分析

锦屏二级水电站东端引水隧洞衬砌洞段长度约44.9 km, 共发现裂缝13 424条(裂缝统计情况见表1)。裂缝以Ⅲ类和Ⅳ类裂缝为主, 裂缝中近似环向裂缝占总裂缝数量的55%左右, 但其长度占总长度的85%左右。4条引水隧洞裂缝发展情况总体相当, 但4#引水隧洞裂缝发展相对较多, 主要是因为4#引水隧洞末端有2 014 m的洞段前期采用先边顶拱后底板浇筑, 这部分洞段裂缝发展多, 达到每米洞段6.59延米裂缝, 为普通洞段的4倍以上, 且99%为环向贯穿裂缝; 4#引水隧洞其他洞段裂缝为每米洞段1.3延米左右。根据相关资料分析, 锦屏二级水电站引水隧洞衬砌混凝土裂缝总体发展情况在特大断面水工隧洞中处于中等偏下水平。

表1 引水隧洞裂缝统计表

项目	I类裂缝		II类裂缝		III类裂缝		IV类裂缝		每米洞段 裂缝长度 延米/m
	条数	长度/m	条数	长度/m	条数	长度/m	条数	长度/m	
1#引水隧洞	285	955.24	387	1 418.5	563	2 263.9	2 395	10 056.2	1.36
2#引水隧洞	8	19.18	27	758.9	1 056	4 586.59	2 711	11 817.96	1.52
3#引水隧洞	77	209.2	100	279.5	1 831	10 443.8	1 039	6 375.2	1.53
4#引水隧洞	11	67.20	35	253.52	1 118	7 738.71	2 084	16 238.37	2.12

针对锦屏二级水电站引水隧洞衬砌混凝土裂缝产生和发展原因进行分析认为: 混凝土裂缝主要是由衬砌结构尺寸、混凝土原材料、现场施工组

织管理、水文地质及工程地质情况等因素综合作用的结果。

### 2.1 引水隧洞衬砌结构

锦屏二级水电站引水隧洞衬后尺寸在11.4

收稿日期: 2015-07-14

~12.4 m 之间,属于特大断面引水隧洞,衬砌厚度大部分为0.6~0.8 m(含20 cm厚喷混凝土)。因此,这种特大断面薄壁衬砌结构形式易于裂缝的发生与发展。

## 2.2 混凝土自身收缩

混凝土因收缩而导致的裂缝是混凝土裂缝最主要的形成原因,主要与混凝土的水灰比、水泥的成分、水泥的用量、集料的性质和用量、外加剂的用量等有关。锦屏二级水电站引水隧洞混凝土使用的水泥为“乃托”P. O42.5,该水泥凝结时间快、细度高、早期强度高、水化热高;骨料采用大理岩轧制,干法生产,细骨料石粉含量较高(20%~30%)、粗骨料裹粉较严重(1%~3%);由于特长引水隧洞以及隧洞群施工交通组织的困难,泵送混凝土运输距离有的长达15 km以上,且要考虑必要的交通拥堵、等待等情况,加之泵送混凝土施工和易性要求高,出机口坍落度大(一般为200~220 mm左右),水灰比控制在0.45~0.50之间,混凝土砂率较高(42%~50%)等因素的影响,增加了混凝土的自收缩值,减弱了混凝土之间的连接能力,增大了干缩裂缝产生的机率。

## 2.3 温度裂缝

由监测结果得知,引水隧洞边顶拱浇筑完成后最高温度达到40℃~48℃,内外温差达26℃~32℃,混凝土浇筑完后30 h左右温度为最高,7~8 d内温度下降较快。从内外温差分析得知,内外温差大导致温度应力超过混凝土的抗拉强度,从而产生温度裂缝。

另外,引水隧洞岩爆、地质缺陷导致的塌方、施工控制不到位导致的超挖等造成衬砌混凝土厚薄不均、衬砌断面变化大等问题。在断面变化大的部位产生的应力集中可能诱发裂缝产生。

## 2.4 施工组织对裂缝产生发展的影响

### 2.4.1 先边顶拱后底板浇筑工艺诱发裂缝的发生和发展

根据锦屏二级水电站引水隧洞群总体施工交通规划,4#引水隧洞部分洞段在相当长的一段时间内作为1#、2#、3#引水隧洞及4#引水隧洞自身施工的公共交通洞,导致底板衬砌混凝土无法及时进行浇筑。为了不影响总体衬砌工期,按期实现充水目标,对承担公共交通的洞段采取先边顶拱再底拱衬砌施工,在保证底板公共交通通行的

同时,采用边顶拱钢模台车进行边顶拱混凝土浇筑,最后快速进行底板连续浇筑。这一措施保证了整个引水隧洞施工群施工的顺利进行,但后期裂缝普查发现先期浇筑的边顶拱先行洞段裂缝是普通洞段的四倍以上,且99%以上为环向贯穿裂缝。分析其原因包括:(1)边顶拱先行段在浇筑完后3 a左右才进行底板的施工,其受力结构不同于先底板后边顶拱的浇筑洞段,主要是由于其下部缺少支撑及约束,未能及时形成封闭的整体受力结构,导致边顶拱混凝土承受自重及围岩压力影响而产生裂缝;(2)4#引水隧洞末端边顶拱先行段浇筑时间最早,在开挖完成1 a左右即开始混凝土边顶拱衬砌,此时围岩变形收敛还没有完全结束,也会增加衬砌结构的围岩压力而导致裂缝的产生和发展。

### 2.4.2 底板浇筑长度对底板裂缝的影响

边顶拱浇筑台车为12 m和13.5 m两种,但钻爆洞段底板为平底板,底板一般为两仓同时浇筑,个别部位存在3仓连续浇筑。底板只在分仓部位钢筋断开,不设置分缝材料。这种过长的底板连续浇筑易导致底板横向裂缝的发生。

## 2.5 外水压力加大了初砌混凝土裂缝的发展

锦屏二级水电站引水隧洞总体埋深大、富水洞段多、外水压力高,普遍达到1.5 MPa以上,外水压力不可避免地会加大裂缝的发展。

## 3 混凝土裂缝的处理

虽然锦屏二级水电站引水隧洞衬砌采用了限裂设计,但由于上述多方面的原因,衬砌混凝土裂缝的发生发展难以避免,在富水洞段,混凝土裂缝贯穿后普遍出现了渗水现象。为了保证混凝土衬砌结构的耐久性,防止运行期内水外渗,全洞段系统地裂缝进行了普查和处理。

### 3.1 裂缝的分类及处理要求

针对锦屏二级水电站引水隧洞裂缝的实际情况,设计根据裂缝发展状况对裂缝进行了分类,并对每类裂缝的处理提出了具体的处理技术要求。

#### (1) 裂缝的分类。

I类裂缝(浅层裂缝):表面缝宽 $\delta \leq 0.2$  mm;

II类裂缝:表面缝宽 $0.2 < \delta \leq 0.35$  mm,且不渗水、不渗浆或潮湿;

III类裂缝:表面缝宽 $\delta > 0.35$  mm,且不渗水、

不渗浆或潮湿;

Ⅳ类裂缝:表面有明显渗水、渗浆,缝宽 $\delta > 0.2 \text{ mm}$ ;

(2)处理技术要求。

①Ⅰ类裂缝可不予处理,Ⅱ类裂缝只进行表面封闭,Ⅲ类和Ⅳ类裂缝需进行化灌处理。

②Ⅲ类和Ⅳ类裂缝修补完成后,按照裂缝总条数的5%~10%抽检进行压水和取芯检查。压水试验压力在0.5 MPa下平均透水率小于0.3 Lu为合格;裂缝取芯检查,芯样劈拉试验平均抗拉强度不小于1.5 MPa为合格。

### 3.2 裂缝处理专业队伍

混凝土裂缝化学灌浆尤其是浅层缝灌浆工艺相对比较成熟,但现场操作精细化程度要求较高,因此必须引进具有类似水电工程混凝土裂缝化灌处理经验的专业队伍。锦屏二级水电站东端引水隧洞裂缝化学灌浆处理引进了3支作业队伍,都具有在三峡、小湾等大型水电工程裂缝化学灌浆处理的实际施工经验。

### 3.3 灌浆材料的选定和采购

为了保证裂缝化灌后与混凝土的粘接强度和耐久性,要求封缝材料选用环氧类涂料和环氧胶泥;化灌材料必须是环氧类浆材,要求同混凝土的粘接强度不小于2 MPa,不允许使用聚氨酯类浆材。

环氧胶泥、化灌浆材均由承包人初选性能符合质量标准要求的材料,然后提出采购申请,监理工程师审查合格后由承包人进行采购。材料到货后承包人和监理工程师分别按批次取样,送业主指定的实验室进行各项性能指标的检测,合格后准许使用。

### 3.4 裂缝处理台车的布置

引水隧洞裂缝修补工作采用脚手架管搭设有轨和无轨修补台车进行施工,对因施工干扰、引水隧洞固结灌浆制浆站及各个横通道交通干扰影响而导致部分修补台车无法行走至工作面的部位,采用吊车悬挂吊篮辅助施工。

### 3.5 裂缝普查及现场记录

在混凝土裂缝修复前,利用修补台车首先按浇筑仓进行裂缝普查。普查项目包括裂缝部位、走向、缝宽、缝长以及是否渗水等参数和状态,绘制《混凝土裂缝性状描述表》。描述表包含两部

分:第一部分为裂缝分布图,为按浇筑仓绘制的衬砌展开图,在其上面描绘出裂缝的具体部位并标注裂缝编号;第二部分为参数表,除缝宽、缝长、是否渗水等参数外,还包括裂缝分类。《混凝土裂缝性状描述表》一个浇筑仓一份,含电子版和纸质版,所有裂缝都进编号并保证编号的唯一性。《混凝土裂缝性状描述表》由监理工程师现场核对无误后签字确认。

### 3.6 裂缝化学灌浆的施工方法

裂缝普查完成后,根据确认的裂缝分类,按裂缝处理技术要求进行处理。

Ⅰ类裂缝不处理;Ⅱ类裂缝对裂缝表面进行打磨,打磨宽度为20 cm,去除缝面的钙质、析出物及其他杂物并冲洗干净,然后采用环氧胶泥进行封闭即可。

Ⅲ类和Ⅳ类裂缝对缝面进行打磨处理及清理后,对裂缝进行骑缝刻“V”型槽,槽深3~5 cm,槽表面宽3~5 cm;刻槽完成后采用清水、风枪对裂缝进行清洗,以保证槽内缝口张开、内无粉尘,然后进行化灌孔布置。

化灌孔采用电锤开孔,钻头一般选用 $\phi 27$ 或 $\phi 30$ 、长度为35 cm的规格。根据裂缝情况采用骑缝钻孔和斜穿钻孔方式,钻孔孔距为0.3~0.5 m。骑缝孔是对准裂缝直接钻孔,适用于宽度较细、深度较浅的裂缝;斜穿孔的钻孔角度一般为 $45^\circ$ ,在裂缝两侧交错布置,钻孔必须穿过裂缝,确保与裂缝相交。

化灌孔开孔完成后进行压力水冲洗并吹干孔内的积水,然后安装注浆嘴并用PSI-130(帕斯卡环氧类材料)快速堵漏剂封孔并固定好,安装过程中应注意防止注浆嘴被堵塞。注浆嘴安装完成后,用PSI-130快速堵漏剂对V型槽进行填充,填充至与混凝土面持平,并对其表面进行打磨、冲洗干净,之后采用环氧胶泥封缝,封缝胶泥厚度控制在3 mm,宽度为左右各100 mm并保持均匀、平整、防止灌浆时漏浆。封缝完成后,按照灌浆的顺序给每个孔口编号,在裂缝封闭环氧胶泥强度达到灌浆要求进行通风检测,现场填写《混凝土裂缝灌浆孔通风检测表》。对于不通风的灌浆孔,在距原孔5 cm的地方补钻灌浆孔,以保证其通风性能。

针对锦屏二级水电站引水隧洞贯穿裂缝有渗

水的现状,现场选定的灌浆材料为 PSI-500 环氧树脂。PSI-500 环氧树脂具有粘度小、可灌性好、凝固时间可调、操作方便等优点,可以对混凝土结构中的细微裂缝、温度裂缝、施工缝、冷接缝、基础工程等作灌浆处理,以恢复结构的整体性和密实

性,而且在有水、潮湿和干燥的基面上均可进行施工。该工程混凝土裂缝处理施工所采用的 PSI-500 环氧浆材经检验各项性能指标均满足设计要求,具体检测结果见表 2。

表 2 化灌浆材性能检测成果表

序号	检测项目	标准要求	检验结果	单项结论
1	起始粘度 /mPa·s	≤20	13	合格
2	可操作时间(100 mPa·s)/min	≥720	1080	合格
3	抗压强度(28 d)/MPa	≥70	80	合格
4	抗拉强度(28 d)/MPa	≥20	25	合格
5	干粘结强度(28 d)/MPa	≥4.5	4.6	合格
	湿粘结强度(28 d)/MPa	≥4	4.1	合格

化学灌浆浆材由主液和固化剂调配而成,固化剂掺量主要控制浆材凝固时间。灌浆过程中,一般提前根据吸浆需求量和需灌注时间确定浆材固化时间,从而确定浆材主液和固化剂比例。引水隧洞裂缝灌浆施工中浆材主液和固化剂溶液普遍使用的比例为 5:1 和 6:1。在主液和固化剂溶液混合过程中,固化剂溶液应缓慢注入主液中,边注入边搅拌,保持浆液在温度 30℃ 以下,防止发生暴聚现象。现场化灌过程中采取少称勤配、分批配制浆液的原则,以避免灌浆材料浪费,且在随用随配情况下以利保持浆液低粘度,进而提高灌浆质量。

裂缝化灌采用电动注浆泵进行。裂缝化灌时,从裂缝低端往高端逐步灌注。注浆起始压力为 0.4 MPa,最大压力不超过 0.6 MPa,屏浆压力均为 0.6 MPa。一整条裂缝灌满浆液并稳压 5~10 min 且屏浆压力不下降,即结束整条裂缝的灌浆。

裂缝灌注结束、灌浆材料凝固后,铲除注浆嘴并用钢丝刷清理缝面两侧,清理完后在缝面涂刷 2 道增厚环氧涂料,涂刷宽度为 20 cm,厚度 1 mm。对混凝土有损伤的部位,采用环氧胶泥进行修补。

#### 4 混凝土裂缝灌浆后的质量检查

裂缝修补完成后,按照裂缝总条数的 5%~10% 进行抽检,包括压水试验检查和裂缝取芯检查。压水试验压力在 0.5 MPa 下平均透水率小于 0.3 Lu 为合格;裂缝取芯检查,芯样劈拉试验平均抗拉强度不小于 1.5 MPa 为合格。

锦屏二级水电站东端 4 条引水隧洞衬砌洞段

长度约为 44.9 km,共发现Ⅲ类和Ⅳ类裂缝 12 797 条,监理工程师压水检查裂缝 679 条,基本不吸水,全部合格;骑缝取芯检查裂缝 660 条,裂缝浆液充填基本饱满,劈拉试验中芯样最大强度为 2.27 MPa,最小劈拉强度为 1.35 MPa,芯样劈拉强度平均在 1.65 MPa 左右,裂缝化灌后总体力学指标良好,满足设计要求。

#### 5 结 语

锦屏二级水电站引水隧洞衬砌混凝土因各种因素综合作用产生了一些裂缝,但裂缝总体发展程度不高,所有裂缝均按照不同的处理要求分别进行了处理,保证了结构的完整性和耐久性。在 2014 年 12 月,锦屏二级水电站 1#引水隧洞在运行两年后进行了第一次放空检修,从检查结果看,引水隧洞在运行期基本没有新裂缝产生,原修补裂缝没有出现重新张开渗水的情况,说明原处理方案和措施科学、合理,处理质量良好。由此可以确定,水工特大断面有压隧洞裂缝经过系统严格地化学灌浆处理,完全可以消除裂缝对永久运行的不利影响。

锦屏二级水电站引水隧洞衬砌混凝土裂缝高强度大规模处理,在施工工艺、施工组织及施工保障措施方面建立起了一套完整的方法和规章制度,可为其他类似工程提供借鉴。

#### 作者简介:

徐茂华(1972-),男,四川蒲江人,副总监理工程师,工程师,学士,从事水利水电工程建设监理工作;

李 亮(1986-),男,四川内江人,助理工程师,从事水利水电工程建设监理工作。

(责任编辑:李燕辉)