

库水位以下强溶蚀地层输水隧洞施工

李 进¹, 张宇弛², 赖 勇²

(1. 杭州市千岛湖原水股份有限公司, 浙江 杭州 310016; 2. 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310002)

摘 要: 千岛湖配水工程进水口段输水隧洞位于新安江水库库水位以下 22.90 m, 强溶蚀带地下暗河发育且无法避让, 常规的“引、跨、绕”方案均难以实施。为此, 基于地质超前预报成果, 采用先进行全断面动态回填注浆封堵, 后“先导洞, 再扩挖”的施工方案, 成功穿越了高水压下的强溶蚀带, 有力保障了配水工程隧洞在岩溶地层的施工安全。实践表明, 该工程实施方案对此类工程涌水问题的处理具有借鉴意义。

关键词: 库水位以下; 强溶蚀; 输水隧洞; 涌水; 注浆封堵; 导洞扩挖

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)20-0118-05

Schemes of Hydraulic Tunnel Backfilling Grouting and Crossing the Intensive Denudation Area below the Reservoir Water Level

LI Jin¹, ZHANG Yu-chi², LAI Yong²

(1. Hangzhou Qiandao Lake Raw Water Co. Ltd., Hangzhou 310016, China; 2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydro-electric Power, Hangzhou 310002, China)

Abstract: The intake section of the hydraulic tunnel of Qiandao Lake diversion project was located at 22.90 m below Xin'an Reservoir water level. Since the intensive denudation area and underground river were unable to be avoided, it was difficult to carry out the conventional “diversion, span and winding” scheme. Therefore, the dynamic backfilling grouting of full cross-section and the pilot-tunnel excavation were implemented in sequence based on the results of the Ground Penetrating Radar (GPR). This scheme ensured that the tunnel crossed the intensive denudation area under high water-pressure successfully and guaranteed the safety of tunnel excavation in karst region. The successful experience indicated the scheme of disposing the water burst had instructive meaning to the similar projects in the future.

Key words: below reservoir water level; intensive denudation; hydraulic tunnel; water burst; backfilling grouting; pilot-tunnel excavation

杭州市第二水源千岛湖配水工程从千岛湖淳安县境内取水, 通过输水隧洞将水引至杭州市余杭区闲林配水井, 全长约为 113 km, 设计流量为 38.8 m³/s^[1], 供水对象主要为杭州主城区及工程沿线部分地区, 涉及近千万人口的饮用水工程。进水口区域部分洞段位于岩溶地层, 由于邻近库区, 隧洞底高程在库水位以下 20 多米, 隧洞开挖过程的涌水出泥

问题是施工面临的技术难点和重大安全隐患, 需要及时利用超前地质预报技术对岩溶地质进行探测以指导施工^[2]。

根据资料统计, 涌水量超过 1 × 10⁴ m³/d 的涌水, 70% 属于岩溶涌水^[3]。隧洞涌水危害极大, 不仅影响工期和安全, 而且对地下水位造成影响, 可能引发如地面塌陷等次生地质问题^[4]。隧洞岩溶地

质问题的基本处理方法可概括为“引、堵、跨、绕”4种方法^[5-7]。“引”指采用导水管、涵管等系统,将岩溶水引排出隧洞范围,千岛湖为大型水库,不适合采用“引”水措施。“跨”是针对巨型溶洞,可修建洞内渡槽、渠道等连接上下游隧洞段^[8]。地质超前预报结果显示,进水口区域前方为严重的溶蚀破碎带,溶洞空间小,不宜采用“跨”的措施。“绕”是对于难处理的溶洞,更改隧洞轴线,采取避让措施保证施工正常进行。由于前方均有破碎带,且涌水点位于库水位以下高程,难以通过“绕”的措施避免涌水及岩溶问题。“堵”是对隧洞影响范围内的溶洞,采用灌浆、混凝土回填等手段进行封闭的方法。针对进水口段输水隧洞掌子面涌水情况,结合地质雷达超前预报结果,确定方案如下:首先进行全断面动态回填注浆封堵,降低穿越岩溶地质的施工风险,随后采用“先导洞,再扩挖”的穿越方式。

1 施工中涌水概况

2017年3月11日,金竹牌支洞施工段上游输水隧洞工作面已开挖至桩号K1+940 m位置,掌子面为灰岩洞段,Ⅲ₁类围岩,洞底高程约75.42 m。在掌子面实施打钻作业中,掌子面中部左侧距底板约1.8 m,钻孔入岩3 m深度处岩体突发涌水,水柱喷射达20余米(见图1),涌水点实测水压为0.48 MPa,流量较大难以控制,最严重时220 m洞内积水水深达50 cm(见图2)。几天内水压未见降低,当前库水位约98.32 m,推测为山体地下水,补给强烈。

3月12日隧洞内排水后进行超前地质预报,揭示前方K1+938 m~K1+918 m段为较严重的溶蚀破碎带,发育中小规模溶洞或管道,推测溶腔自近掌子面部位的左侧向远离掌子面的右侧发展,并伴有地下水富集,排泄面位于库水位以下。



图1 涌水水柱

Fig. 1 Spout of water

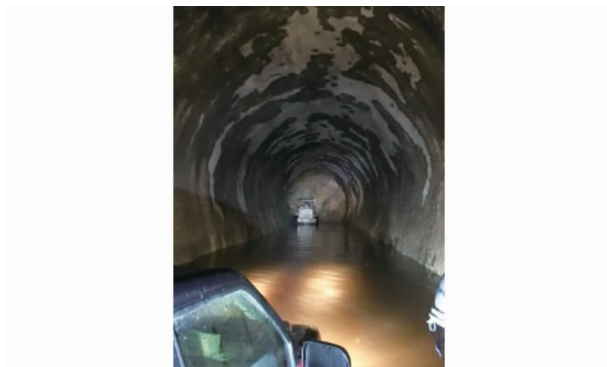


图2 掌子面积水情况

Fig. 2 Ponding of tunnel face

2 注浆封堵方案

2.1 动态注浆方案

结合涌水情况分析,对三个区域分步骤进行注浆,分别是已出水的三个钻孔、已开挖洞段围岩以及掌子面前方围岩。

① 对已经出水的左侧三个钻孔进行灌浆,灌浆压力初定为0.8 MPa,采用普通水泥-水玻璃双液浆进行灌浆。

② 对已经完成开挖支护,距掌子面6 m以内的洞段围岩进行加固灌浆。此段灌浆孔排距为3 m,孔深为4 m,灌浆压力初定0.8 MPa,也采用普通水泥-水玻璃双液浆。

③ 对掌子面前方围岩进行灌浆,灌浆顺序依次为外环注浆孔、内环注浆孔和中心注浆孔,具体见图3、4。

其中:外环注浆孔深入掌子面深度为10.0 m,外插角为23.75°,共20孔。内环注浆深入掌子面深度为20.0 m,外插角为14.04°,共20孔。要求灌浆后洞控线以外的完整岩壁厚度不小于4.0 m,灌浆压力初定为1.2 MPa,环向周边孔灌浆材料采用普通水泥-水玻璃双液浆。环向周边孔灌浆完成后,对钻孔内的水流进行观测,若已完全截断溶蚀通道,并通过地质超前预报检测完整性良好,则可直接进行爆破开挖;否则,在掌子面中心平行洞轴线布置6个充填灌浆孔,加固深度为25.0 m,灌浆压力初定为1.2 MPa,采用普通水泥单液浆。

掌子面超前注浆孔远近兼顾、长短布置,经过对掌子面前方岩体及附近洞段围岩进行注浆封堵,形成了等壁厚的“保护圈”,为输水隧洞的进一步穿越提供有利条件。

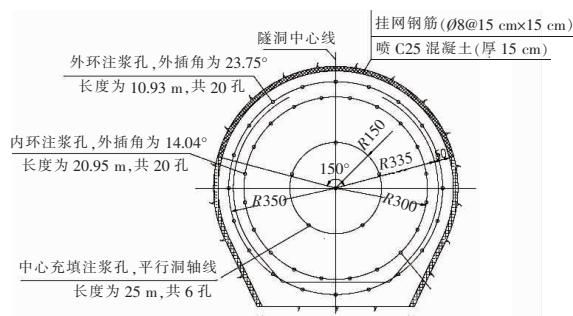


图3 输水隧洞掌子面灌浆孔平面布置示意

Fig. 3 Layout of tunnel face grout hole

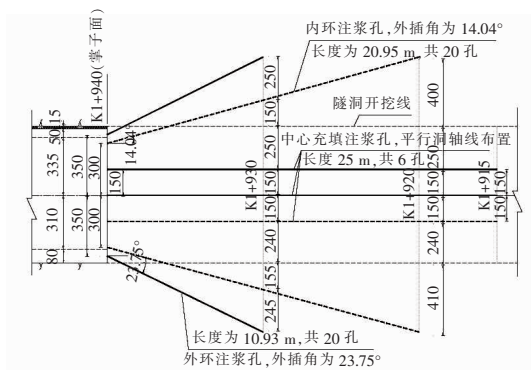


图4 输水隧洞掌子面灌浆孔纵剖面示意

Fig. 4 Longitudinal section of tunnel face grout hole

2.2 注浆技术要求

为保证注浆方案的有效实施,对于注浆过程,提出了如下技术要求:

① 灌浆过程中应结合钻孔过程对溶蚀发育情况进一步查探,施工单位及时反馈内部溶蚀情况。

② 加强灌浆过程中对已开挖洞段岩壁渗水、变形等情况的监测和巡检,以保证岩壁安全,施工期间要加强隧洞内排水准备工作。

③ 若溶蚀发育存在较大尺寸空腔时,应先采用水泥砂浆或膏状浆液回填,然后进行水泥浆或水泥-水玻璃双液浆灌浆。

④ 普通水泥-水玻璃双液浆配比应根据水流及加固范围要求制定,水泥浆、水泥砂浆应按技术规范要求制备,必要时掺入速凝剂、稳定剂。

⑤ 灌浆过程中若出现压力上升困难,难以充填加固的情况时,应考虑采用间歇灌浆、先充填后灌浆等施工方案。

⑥ 在设计灌浆压力下,注入率 ≤ 1 L/min后,继续灌注30 min方可结束灌浆。

通过明确以上技术要求,实现了对注浆方案的

动态响应,有力地把控注浆过程中的不确定因素,保障了注浆方案的成功实施。

3 地质雷达探测结果

地质雷达对于断层破碎带、溶洞有较明显的响应,可准确查明发育位置^[9]。地质雷达超前预报测线布置于左壁-掌子面-右壁连线,从下部到上部依次为第1、2、3条测线,间距约1.5 m。第1条测线左右壁向后延长20 m,第2、3条延长5 m。

2017年3月12日进行了第一次探测,为注浆方案的确定提供了可靠依据。4月21日注浆后进行了第二次探测,结果显示岩体破碎程度较灌浆前有明显改善,特别是左边墙附近原推测的溶洞迹象已不明显,富水迹象也没有灌浆前表现明显。在左侧原先较破碎的岩体部位打设20 m深探孔进行孔内全景数字成像,结果也表明部分腔体已被水泥浆液填充。

依据超前预报结果,不再向掌子面中心的6个中心孔注浆,导洞开挖的方式可观察内部灌浆情况,若发现仍存在岩溶破碎带,可进行二次灌浆处理,因此采用“先导洞,再扩挖”的施工方案开挖掘进。

4 “先导洞,再扩挖”施工方案

通过导洞可以探明并确认地质情况,不仅便于提前研究不良地段施工对策和及时进行施工准备,同时可避免大断面遭遇不良地质所引起的施工安全风险和组织风险,有利于减少甚至避免掉块或坍塌发生^[10]。依据掌子面围岩情况和地质雷达超前预报结果,掌子面左侧岩溶发育程度较右侧较重,且左侧先遇岩溶,因此二期导洞位置选择偏向掌子面的右侧。

导洞分两次开挖,形式均为城门洞形,初期导洞尺寸为2.6 m×3.5 m(宽×高),二期导洞尺寸为3.86 m×5.4 m(宽×高)。导洞开挖前采用潜孔钻机在初期导洞开挖轮廓线外的上部、左侧和右侧三个方向各打一个探孔,探孔垂直掌子面,深度不小于15 m。导洞开挖采用短进尺、小药量、弱爆破的方式进行,进尺宜控制在1.0~1.5 m,根据围岩情况进行现场试验后选取最优爆破参数并爆破。导洞开挖后若洞壁完整性较好,可不进行临时喷护,若围岩较破碎,则导洞顶部挂钢筋网 $\Phi 8@15$ cm×15 cm,导洞顶部和侧壁素喷10 cm厚C25混凝土。

先进行初期导洞开挖,每6 m进尺为一个工序循环,然后采取地质雷达对洞室侧壁进行超前预报,

检测灌浆情况以及侧壁围岩情况,若在导洞开挖时遇到不可控的涌水,则暂停施工,需经灌浆处理后再行处理。若经地质雷达超前预报显示导洞左壁围岩异常,则开挖二期导洞并对导洞左壁进行灌浆处理。掌子面前方开挖及支护断面见图5,固结灌浆孔布置见图6。

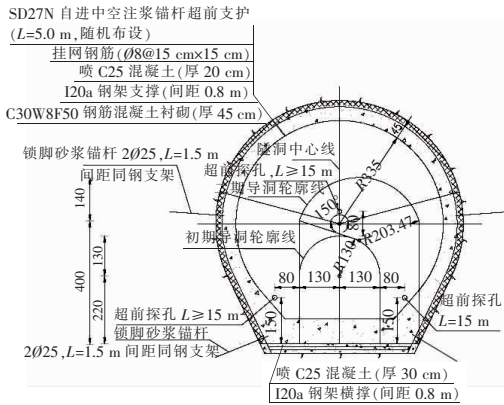


图5 掌子面前方开挖及支护断面

Fig. 5 Cross sectional view of tunnel face excavation and pre-supporting

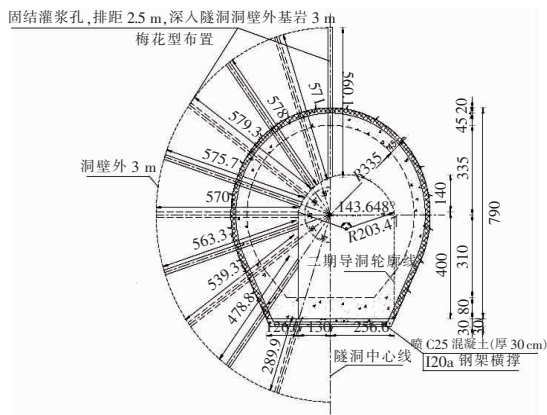


图6 掌子面前方导洞左侧岩壁灌浆孔布置

Fig. 6 Layout drawing of grouting hole in the left side of pilot-tunnel

导洞开挖完成一个工序循环,若经地质雷达超前预报显示初期导洞左壁围岩良好或对二期导洞灌浆处理好后,按Ⅳ类围岩进行全断面扩挖及支护,具体开挖方案如下:

① 底板开挖至设计高程以下 30 cm。钢拱架间距调整为 80 cm,取消系统锚杆,钢拱架的锁脚锚杆长度调整为 1.5 m。

② 钢拱架底脚处用 I20a 工字钢作横向支撑焊接,要求横撑工字钢应尽可能贴紧清洗过基岩后

的底面,避免横撑工字钢受力弯曲对侧墙钢拱架产生二次拉力。

③ 钢拱架及横撑工字钢用 C22 钢筋作横向连接,间距 50 cm,然后素喷 30 cm 厚混凝土,封闭底板。在底板上填筑石渣,厚度以能保证施工要求为准,最大限度地减小施工车辆对横撑工字钢的碾压荷载。

④ 要求导洞开挖前准备好洞内排水设备,排水量不得小于 200 m³/h。按照“先导洞,再扩挖”的方式,直至超前地质预报显示围岩稳定,且已穿过溶蚀地段具备一次全断面开挖条件后再恢复正常钻爆施工。

5 结语

输水隧洞掌子面位于新安江水库库水位以下,涌水点水压较大,处理风险较大,常规的方法难以实施,需要情报化、系统化、动态化的处理手段。结合地质雷达探测结果和实际情况,采取了全断面动态注浆方案,随后布置了“先导洞,再扩挖”的穿越方案,得到如下结论:

① 通过地质雷达超前预报与实际开挖对比,显示预报结果较为准确,能够为制定处理方案提供可靠的情报,其合理应用有助于对方案实施过程进行动态响应。

② 涌水点实测水压为 0.48 MPa,地质雷达探测及开挖结果显示,注浆后均被灌浆料充填完整,证明此全断面动态回填注浆方案适用于处理高水压下岩溶地质涌水问题。

③ 掌子面注浆孔远近兼顾、长短布置,灌浆后会形成等壁厚的“保护圈”,满足了后期开挖的要求,表明此注浆孔布置方案具有较好的效果。

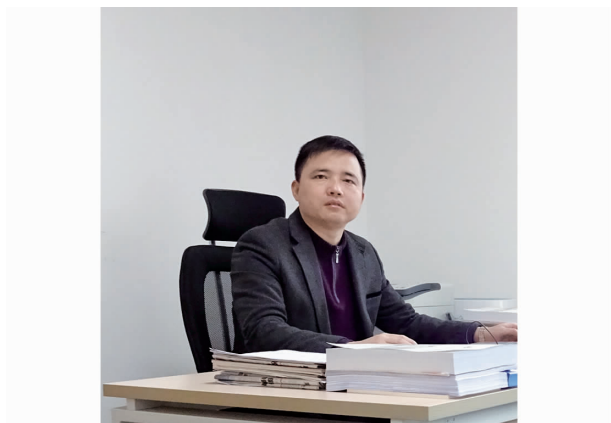
④ 导洞具有后期加固方案可控、可观察、易操作、风险低的优势,“先导洞,再扩挖”的方案适合于全断面动态回填注浆后穿越强溶蚀带。

⑤ 通过对本次输水隧洞岩溶处理,再次印证了千岛湖配水工程进水口段输水隧洞轴线调整的必要性。

参考文献:

- [1] 赖勇,张永进. 千岛湖配水工程概况及前期论证关键问题探讨[J]. 浙江水利科技,2017(6):42-44,48.
Lai Yong, Zhang Yongjin. Brief description of Qiandao Lake water diversion project and key issues in early-

- phase demonstration [J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2017 (6): 42–44, 48 (in Chinese).
- [2] 张文, 武科, 刘国强, 等. 城市地铁隧道岩溶地质灾害预警与成因分析 [J]. 水利与建筑工程学报, 2015 (2): 42–46.
- Zhang Wen, Wu Ke, Liu Guoqiang, *et al.* Geological disaster prediction and cause analysis of karst cave in Guiyang subway construction [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015 (2): 42–46 (in Chinese).
- [3] 揣连成, 杜士斌, 卜丽华. 隧洞工程涌水处理的对策和措施 [J]. 水利水电技术, 2005, 36 (5): 53–55.
- Chuai Liancheng, Du Shibin, Bu Lihua. Countermeasures for treatment of gushing water during tunneling [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36 (5): 53–55 (in Chinese).
- [4] 马学龙. 隧洞工程涌水处理的对策和措施 [J]. 甘肃农业, 2015 (21): 57.
- Ma Xuelong. Countermeasures for treatment of gushing water during tunneling [J]. Gansu Agriculture, 2015 (21): 57 (in Chinese).
- [5] 李迎新, 卢林强, 魏宏. 帷幕注浆及小导管处置隧道岩溶病害实例分析 [J]. 土工基础, 2009, 23 (2): 1–4.
- Li Yingxin, Lu Linqiang, Wei Hong. Analysis on the treatment case for diseases of tunnel karst by use of curtain grouting and small pipe [J]. Soil Engineering and Foundation, 2009, 23 (2): 1–4 (in Chinese).
- [6] 刘晓斌, 唐俊才, 冉利春. 浅谈岩溶对公路隧道的危害及施工处治对策分析 [J]. 城市建筑, 2015 (35): 313.
- Liu Xiaobin, Tang Juncai, Ran Lichun. Discussion on the harmfulness of rock dissolving in the karst region of highway tunnel and analysis on construction treatments [J]. Urbanism and Architecture, 2015 (35): 313 (in Chinese).
- [7] 魏春龙. 浅析公路隧道溶岩处理技术 [J]. 山西建筑, 2008, 34 (31): 311–312.
- Wei Chunlong. Discussion on the dissolution rock treatment technology of highway tunnel [J]. Shanxi Architecture, 2008, 34 (31): 311–312 (in Chinese).
- [8] 陆亿千, 覃庆忠. 浅谈强岩溶区输水隧洞常遇工程地质问题及防治措施 [J]. 科技信息, 2009 (19): 704.
- Lu Yiqian, Qin Qingzhong. Discussion on the frequent geological problems and prevention measures of water-conveyance tunnel in karst region [J]. Science & Technology Information, 2009 (19): 704 (in Chinese).
- [9] 徐久红, 吴声松, 郑颖. 地质雷达在野三河电站岩溶破碎带探测中的应用 [J]. 人民长江, 2010, 41 (11): 47–50.
- Xu Jiuhong, Wu Shengsong, Zheng Ying. Application of geological radar in exploration of karst fractured belt of Yesanhe hydropower station [J]. Yangtze River, 2010, 41 (11): 47–50 (in Chinese).
- [10] 王立川, 陈海勇, 王占军, 等. 对隧道 TBM 导洞扩挖法施工的探讨与展望 [J]. 隧道建设, 2015, 35 (2): 149–159.
- Wang Lichuan, Chen Haiyong, Wang Zhanjun, *et al.* Discussion and prospects on TBM pilot-heading and enlarging method [J]. Tunnel Construction, 2015, 35 (2): 149–159 (in Chinese).



作者简介: 李进 (1979 –), 男, 浙江兰溪人, 硕士, 高级工程师, 杭州市千岛湖原水股份有限公司工程建设部部长, 长期从事给排水、市政工程的建设和管理和技术研究工作。

E-mail: 28939234@qq.com

收稿日期: 2019-01-21