

大五山隧洞穿越对龙河浅埋暗挖方案研究

钱勇¹, 杨选波², 杨振花¹, 李双兰³, 张定彪⁴

(1. 云南省水利水电学校, 昆明 650202; 2. 云南水投牛栏江滇池补水工程有限公司, 昆明 650051;
3. 云南禹川建设工程咨询有限公司, 昆明 650051; 4. 云南省水利水电勘测设计研究院, 昆明 650051)

摘要: 牛栏江-滇池补水工程大五山隧洞穿越对龙河段, 存在地表环境复杂、埋深浅、地质条件复杂等不利施工的因素。为此, 综合考虑技术、经济和环境等方面的因素, 通过方案比选, 设计采用了地表预固结灌浆、洞内钢支撑结合超前小导管等措施联合加强支护的方案, 安全高效地穿过了该浅埋段, 最终实现了施工安全、工期保证、投资合理、节能环保的目标, 可为同类工程提供借鉴。

关键词: 牛栏江-滇池补水工程; 浅埋隧洞; 不良地质; 预固结灌浆; 联合支护

中图分类号: TV554+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0178-03

Scheme Research on Shallow Underground Excavation of Dawushan Tunnel Crossing Duilonghe

QIAN Yong¹, YANG Xuanbo², YANG Zhenhua¹, LI Shuanglan³, ZHANG Dingbiao⁴

(1. Yunnan Water Resources and Hydropower School, Kunming 650202, China;

2. Niulanjiang Dianchi Lake Water Supplement Project Co. Ltd., Kunming 650051, China;

3. Yunnan Yuchuan Engineering Cost Consulting Co. Ltd., Kunming 650051, China;

4. Yunnan Water Conservancy and Hydroelectric Survey Design and Research Institute, Kunming 650051, China)

Abstract: The Dawushan tunnel crossing Duilonghe segment of the Niulanjiang Dianchi Lake Water Supplement Project has some disadvantages such as complex ground surface environment, shallow buried depth, and complicated geological conditions. In consideration of the technical, economic, and environmental factors, the combined measure of pre consolidation grouting on the ground and steel in the cave combined with advanced small pipe was applied to help the project crossing the shallow buried segment successfully. The project finally realizes the goals of safe construction, guaranteed working period, reasonable investment, and energy conservation and environmental protection, which can provide reference for other similar projects.

Key words: Niulanjiang Dianchi Lake Water Supplement Project; shallow buried tunnel; unfavorable geology; pre consolidation grouting; combined support

浅埋隧洞穿越复杂水文地质和工程地质地段时, 较易发生塌方、冒顶、变形侵限等事故。一般当隧洞浅埋段长度超过100 m、埋深小于40 m时, 大多数水利工程采用明挖方案, 但是明挖方案占地多、深坑排水和支护的难度大, 因此当工程位于居民聚集区或地表条件复杂区域时, 因征占地补偿、环境影响等导致的社会不安定因素可能会成为影响工程正常进展的瓶颈。如何实现浅埋隧洞开挖安全保证、进度高效、投资合理、节能环保的目标, 是广大工程技术人员长期关注的一大问题。

1 工程概况

牛栏江-滇池补水工程是穿越大型山岭区的长距离引

水工程, 其主要工程任务是近期每年向滇池补水5.66亿m³, 远期兼顾向曲靖市和昆明市供水, 在严重干旱年份也承担向昆明市应急供水的任务。工程主要由德泽水库、干河泵站、引水线路组成。引水线路全长115.8 km, 设计纵坡为0.05%, 设计流量为23 m³/s, 其中隧洞总长103.6 km, 占线路总长的83.61%。本文的研究对象大五山隧洞是该引水线路的重要组成部分, 其全长36.1 km, Ⅰ类围岩开挖断面为城门形, 开挖尺寸为5.3 m×5.75 m^[1]。

大五山隧洞在桩号12+130 m~12+400 m处穿越对龙河, 河宽约300 m, 隧洞埋深26~29 m。该段隧洞轴线紧邻上对龙村, 距部分居民住房及农业生产用房较近, 地表环境

收稿日期: 2013-08-25 修回日期: 2014-02-14 网络出版时间: 2014-03-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.007.html>

作者简介: 钱勇(1974), 男, 云南祥云人, 讲师, 主要从事水利水电工程教学方面研究。E-mail: 83799134@qq.com

通讯作者: 杨选波(1983), 男, 云南双柏人, 工程师, 主要从事水利水电工程施工管理方面研究。E-mail: yxbhappy@163.com

较复杂,分布有清水海引水工程管道、公路、对龙河河道、民房、耕地、灌溉渠道等,其中耕地又以蔬菜大棚、鱼塘、苗莆等高附加值产业为主。

据地质勘探成果,对龙河内冲洪积层厚度 16.4~22.6 m,隧洞顶部基岩厚度约 3~12 m;隧洞处于强溶蚀带中,溶蚀淤泥裂隙十分发育,围岩非常破碎;基岩之上的第四系覆盖层为含砾黏土夹黏土;地下水位线位于洞顶以上 20 m 左右^[2]。

2 方案选择

从技术经济、外部环境、水环境保护等方面,对“盾构、顶管、明挖、暗挖”4种方案进行比较,选择一种较为合理的方式穿越该浅埋段^[3]。

(1) 盾构方案。作为一种新型施工工艺,其优点主要是:无需爆破,对围岩基本无扰动,施工安全;环境污染小;能有效控制地表沉降,对地表建筑物基本无影响。但其缺点也是显而易见的,主要表现为:盾构方案一般适用于圆形断面,而该隧洞标准断面为马蹄形,盾构方案需要扩大开挖断面才能保证衬砌后成为马蹄;盾构机械制作周期长,对总工期影响较大;本工程地质复杂,围岩变化频繁,对盾构设备要求较高;由于断面较大,需要大功率的动力系统,设备一次性投入成本较大,而浅埋段长度只有 270 m。因此,从经济上来讲不宜采用盾构方案。

(2) 顶管方案。优点与盾构方案基本相同,在市政工程中采用较多,一般来说洞径均不超过 3 m,且多为圆形断面,铁路、机场工程有类似的顶箱涵结构,但顶进距离一般在几十米,且多为黏土或泥质土。由于本工程断面大,需要与断面尺寸相匹配的沉井及顶进设备,沉井深度达 35~30 m,支护难度及投资较大。该浅埋段隧洞处于灰岩复杂地质条件下且长度较长,能否顺利顶进也存在诸多不确定性因素,因此无论是从技术还是经济方面论证,都不宜采用顶管方案。

(3) 明挖方案。明挖方案的优点是施工技术比较成熟;对施工单位的能力要求不高。但其主要缺点表现为:软土开挖的边坡稳定坡比一般要在 1:1.4 左右,开口宽度达 100 m 左右,需对该范围内的民房、清水海引水工程管道(供昆明市饮用水,管径 DN 1 500 mm)、公路、水利等设施进行迁移,涉及部门多,且事关省会城市昆明市的供水安全,可以说该方案存在现实的不可操作性。另外,附近为优质耕地且靠近村庄,施工噪声、扬尘等环境影响敏感度高,爆破飞石可能给上对龙村带来安全隐患,而且土石方开挖、边坡支护及排水工程量及投资较大。因此,无论是从技术、经济、还是社会影响因素等方面论证,明挖方案都不宜采用。

(4) 暗挖方案。暗挖方案存在无新增占地、环境影响小、对地表建筑物影响较小等优点,但也存在支护难度大、可能发生塌方、冒顶等事故的风险。

综合对比以上几种开挖方案,对于不良地质区浅埋隧洞,暗挖法虽然也存在风险,但最可行,也有成熟的施工经验和成功案例可借鉴,故选择暗挖方案。

3 预加固措施

基于安全考虑,开挖前应在地表进行固结灌浆,对围岩

进行预加固处理。

3.1 预加固段的确定

大五山隧洞穿越对龙河浅埋段里程为 12+130 m~12+400 m,其中 12+134 m~12+239 m 段隧洞上覆围岩中基岩厚为 2~6 m,均为强溶蚀风化岩体,较为破碎,故将该段确定为风险重点控制段。该段基岩上部覆盖层为含砾黏土,砂砾含量较大,可灌性较好,所以将固结灌浆预加固段确定为 12+134 m~12+239 m,长度为 105 m。

3.2 灌浆方案

灌浆孔的布置:灌浆孔间距(隧洞轴线法线方向)为 2 m,排距(隧洞轴线方向)为 1.5 m,梅花形布置。

灌浆范围:隧洞两侧各 1.3 m、洞顶以上 10 m 至洞底板以下 2.0 m,见图 1。

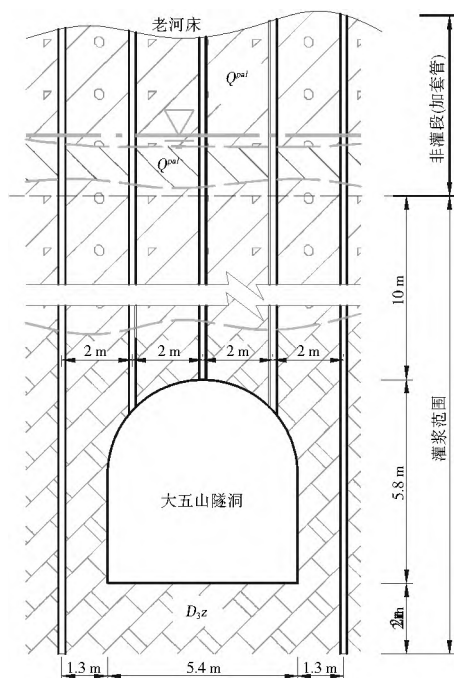


图 1 地表预加固灌浆示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pre consolidation grouting on the ground

灌浆材料与参数:外围周边采用水泥-水玻璃双液灌浆,内部孔采用水泥浆液,灌浆压力 0.6~0.8 MPa。水玻璃采用 0 型水玻璃,体积质量为 1.25 g/cm³,浓度为 35 Be,水泥浆水灰比为 0.6:1~1:1,水泥浆-水玻璃体积比为 1:0.5。预加固固结灌浆验收合格标准为透水性 $q \leq 10$ Lu。

环境保护措施:非灌段钻孔完成后下套管隔离,以减少浆液上串,利于灌后耕地的恢复,同时也方便了止浆塞的安装、节约了水泥耗量。灌浆施工将不可避免地对土地造成一定污染,因此在施工前先将 1 m 厚的表土层剥离并堆放在临时渣场内,灌浆结束后再将其运回铺在场地内,恢复土地的耕作功能。

4 开挖过程中的一次支护措施

预加固完成后进行隧洞开挖施工,施工过程中严格遵循“短进尺、少扰动、强支护”的原则,按“新奥法”的理念进行支护工程的设计及施工^[4,5],主要施工过程及工艺如下。

(1) 开挖时采取多孔小药量爆破,每循环进尺不超过 1.5

m, 爆破后及时出渣; 在第一时间对边墙及顶拱部分喷 5 cm 厚的 C20 混凝土进行封闭, 打 $\Phi 25$ mm、 $L=3$ m 的随机锚杆, 并在顶部挂 $\Phi 6@20$ cm \times 20 cm 的钢筋网。

(2) 钢筋网安装完成后, 紧接着进行钢支撑的安装, 钢支撑在洞外用 I18 工字钢分段制作而成, 运至洞内拼装完成后采用螺栓连接并用电焊焊接牢固, 间距为 0.5 m, 每榀钢支撑设 6 根 $\Phi 25$ mm、 $L=3$ m 的锁脚锚杆, 锁脚锚杆与钢支撑之间用 $\Phi 25$ 钢筋制作而成的“L”型连接件焊接牢固; 钢支撑安装完成后, 对边墙及顶拱部分再补喷 20 cm 厚的 C20 混凝土。

(3) 为保证开挖断面成型良好、有效避免塌方事故, 在隧洞顶拱部位设置超前小导管, 超前小导管用 DN48 mm 钢管加工而成, 单根长度为 4.5 m, 间距 25 cm, 排距为 3 m (搭接长度 1.5 m); 外倾角控制在 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$, 在满足施工作业空间的前提下, 做到尽量与洞轴线平行并进, 以保证其受力条件及隧洞成型^[6]。

(4) 针对局部地质条件极差的洞段, 开挖时将底部高程降低 20 cm 并用 C20 素混凝土进行硬化, 以保证钢支撑的稳定性, 避免围岩变形挤压钢支撑而侵占衬砌断面; 对于开挖后顶部掉块严重或塌方的部位, 先打随机锚杆、挂网喷混凝土, 再在钢支撑上方铺钢模板或铁皮并喷一层 5 cm 厚的 C20 混凝土进行封闭, 最后用 1:1:0.6 (水泥:砂:水) 的浆液对空腔进行填充, 见图 2。

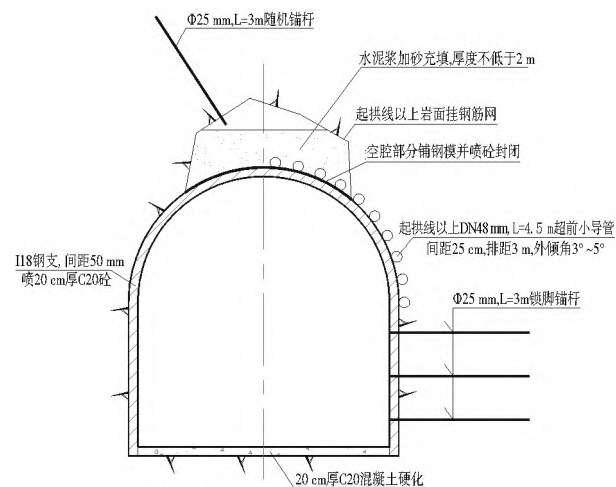


图2 一次支护示意图

Fig. 2 Schematic diagram of first support

5 实施效果

根据预加固之前先导孔钻孔成果, 预加固区岩体为白云质灰岩夹泥质白云岩, 泥夹石严重, 局部有孤石, 属于强溶蚀带, 裂隙极其发育, 岩芯一般呈短柱状、碎块状。先导孔平均岩心采取率为 42%; 灌浆后再次钻孔取芯, 芯样较为完整, 平均采取率提高到 83.6%, 其中 YGJ9 孔在 230 m 处有一长约 40 cm 的岩芯可见水泥结石, YGJ12 孔在 221 m 处有一长约 4cm 的岩芯可见水泥结石, 可见灌浆效果显著。

大五山隧洞过对龙河浅埋暗挖段全长 270 m, 其中 105 m 采取地表预加固结合洞内钢支撑、小管棚联合加强支护的方式, 其余 165 m 采取钢支撑、小管棚联合加强支护的方式进行开挖, 开挖总工期为 8 个月, 平均强度为 1.1 m/d; 预加

固投资为 850 万元, 开挖及一次支护投资为 290 万元, 开挖及一次支护平均投资为 1.1 万元/延米 (预加固洞段平均投资为 9.2 万元/延米)。

施工过程中共设置 3 个监测断面, 地表沉降值均小于 1 cm, 洞内围岩收敛变形为 -9.6~5.4 mm, 并且基本在 1 个月左右即逐渐趋于稳定; 施工过程中未发生过任何安全事故及环境污染事件, 对区域内的民房、公路、农业设施等未造成任何不良影响, 取得了良好的技术经济效果。

6 讨论

实践证明, 对于浅埋富水软土不良地质条件下的隧洞开挖, 按照“新奥法”的理念, 采取地表灌浆预加固结合洞内钢支撑、超前小导管、锚杆、喷混凝土等措施联合支护的方法, 在技术、经济、节能环保等方面都是合理而有效的, 但也要注意以下几点。

(1) 详细的地勘资料和合理的设计方案是保证工程顺利实施的关键, 设计阶段是控制工程功能和投资的最重要环节。因此, 必须重视和加强设计质量管理。

(2) 在浅埋富水软土不良地质条件下的隧洞开挖过程中, 极易发生冒顶和变形侵限事故, 补救处理难度和安全隐患极大, 甚至导致安全事故, 延长工期, 增加投资风险, 因此必须遵循“循序渐进、安全稳妥”原则进行施工, 不可急功冒进。

(3) 从本工程来看, 由于地处岩溶通道极其发育的灰岩地区, 预加固灌浆的水泥耗量较大。据分析, 有相当一部分水泥浆沿着岩溶通道远离设计加固范围, 这部分浆液不但对工程无益, 反而可能影响地下水环境, 并且造成了投资浪费。因此, 应不断总结和提高固结灌浆工艺, 最大限度地减少不必要的浪费。

(4) 隧洞开挖时应遵循“少扰动、早喷锚、快封闭、勤测量”的原则, 并根据不同的围岩条件及时调整爆破及支护参数, 充分利用围岩的自稳能力, 在保证围岩稳定的前提下, 选用技术可行、经济合理的支护方案。

参考文献 (References):

- [1] 杨选波, 曹劲绩, 李伟泉, 等. 高落差长溜管在长隧洞混凝土运输中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 211-214. (YANG Xuanbo, CAO Jinqi, LI Weiquan, et al. Application of High drop Long Articulated Chute in Concrete Transportation within a Long Tunnel[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 211-214. (in Chinese))
- [2] 李云, 何伟, 朱国金. 输水线路关键技术问题初探[J]. 人民长江, 2013, 44(12): 31-36. (LI Yun, HE Wei, ZHU Guojin. Preliminary Study on Key Technical Issues of Niulan River Dianchi Lake Water Supplement Project[J]. Yangtze River, 2013, 44(12): 31-36. (in Chinese))
- [3] 孙文杰, 李云, 朱国金, 等. 不良地质区浅埋隧洞处理方案研究[J]. 人民长江, 2013, 44(12): 44-46. (SUN Wenjie, LI Yun, ZHU Guojin, et al. Engineering Treatment for Shallow-buried Section in Adverse Geological Environment of Water Diversion Tunnel[J]. Yangtze River, 2013, 44(12): 44-46. (in Chinese))

(下转第 184 页)

升高而降低。分析 LSI 指数为负时,挂片在水质中表面不能形成碳酸钙沉积层,此时影响钢管腐蚀因素主要为水中 SO_4^{2-} 与 Cl^- ; LSI 指数为正时,碳酸钙在挂片表面累积,使挂片表面形成致密碳酸钙保护膜,减缓挂片的腐蚀速度。

3 结论

(1) A3 碳钢(给水管材 Q235A)与球墨铸铁管材在常规处理工艺生产的再生水中,腐蚀速率随时间延长而降低;腐蚀过程中材料表面可形成不同特征的腐蚀产物,靠近基体金属的腐蚀层结构致密,能抑制腐蚀的进一步发生。

(2) 膜工艺处理的再生水对两种材料的腐蚀速率随时间延长而加快。表明 A3 碳钢与球墨铸铁在此类水中形成的腐蚀产物不能有效阻止腐蚀增加。

(3) 在试验周期为 72 h 情况下, A3 碳钢挂片在常规再生水中腐蚀的速率高于膜工艺再生水,而球墨铸铁腐蚀在常规再生水中腐蚀的速率低于膜工艺再生水,从腐蚀速率变化的趋势可知,膜工艺再生水对两种管材的腐蚀性强于常规处理工艺的再生水。

(4) A3 碳钢与球墨铸铁在水中腐蚀速率受 SO_4^{2-} 、碱度、 Cl^- 、pH、硬度等影响。其中,水中阴离子浓度对 A3 碳钢的腐蚀影响较大,而球墨铸铁受阳离子影响大于阴离子。

(5) 当采用 LSI 和 LR 指数分析再生水对金属管材腐蚀性时,应考虑两种指数适用的水质类型。

参考文献(References):

[1] 冯运玲,戴前进,李艺,等.几种典型再生水处理工艺出水水质对比分析[J].给水排水,2011,(2):49-51.(FENG Yurrling, DAI Qiangjin, LI Yi, et al. Several Typical Reclaimed Water Treatment Process Effluent Quality Comparative Analysis[J]. Water and Wastewater, 2011, (2): 49-51. (in Chinese))

[2] Edwards M. Controlling Corrosion in Drinking Water Distribution Systems: A Grand Challenge for the 21st Century[J]. Water Science Technology, 2004, 49(2): 1-8.

[3] 刘喆,石宝友,郑红,等.市政再生水对铸铁材料的腐蚀特性研究[J].中国给水排水,2011,(15):71-75.(LIU Zhe, SHI Baoyou, ZHENG Hong, et al. Corrosion Characteristics of Municipal

Reclaimed Water for Cast Iron Material[J]. China Water and Wastewater, 2011, (15): 71-75. (in Chinese))

[4] R E Melchers. Mathematical Modeling of the Diffusion Controlled Phase in Marine Immersion Corrosion[J]. Corrosion Science, 2003, 45: 923-940.

[5] K Jafarzadeh, T Shahrabi, S M M Hadavi, et al. Role of Chloride Ion and Dissolved Oxygen in Electrochemical Corrosion of AA5083-H321 Aluminum-magnesium Alloy in NaCl Solutions Under Flow Conditions[J]. Journal of Material Science and Technology, 2007, 23: 623-628.

[6] 伊帆,李德豪,郎春燕,等.模拟循环冷却水中几种因素对碳钢腐蚀的影响[J].工业水处理,2012,(8):51-55.(YI Fan, LI Dehao, LANH Chur yan, et al. Simulation of Circulating Cooling Water Influence on Corrosion of Carbon Steel[J]. Industrial Water Treatment, 2012, (8): 51-55. (in Chinese))

[7] 胡家元,曹顺安,谢建丽.锈层对海水淡化一级反渗透产水中碳钢腐蚀行为的影响[J].物理化学学报,2012,(5):175-184.(HU Jiayuan, CAO Shuran, XIE Jianli. The Rust Layer on The Desalination Stage Reverse Osmosis Water Impact Corrosion Behavior of Carbon Steel[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2012, (5): 175-184. (in Chinese))

[8] 李敬,刘贵昌,王玮,等.碳钢在反渗透水中耐蚀性研究[J].广州化工,2009,(4):103-105.(LI Jing, LIU Guichang, WANG Wei, et al. Carbon Steel in Reverse Osmosis Water Corrosion Resistance[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2009, (4): 103-105. (in Chinese))

[9] Sarin P, Snoeyink V L, Bebee J, et al. Corrosion Scales in Old Iron Pipes[J]. Water Res, 2001, 35(12): 2961-2969.

[10] 牛璋彬,张晓健,韩宏大,等.给水管网中金属离子化学稳定性分析[J].中国给水排水,2005,(5):23-26.(NIU Zhangbin, ZHANG Xiaojian, HAN Hongda, et al. The Chemical Stability of Metal Ion in Water Distribution Network Analysis[J]. China Water and Wastewater, 2005, (5): 23-26. (in Chinese))

[11] 胡家元.碳钢在海水淡化一级反渗透产水中腐蚀机理及防腐方法研究[D].武汉:武汉大学,2013.(HU Jiayuan. Carbon Steel Desalination a Reverse Osmosis Water Corrosion Mechanism and Protection Method in Water [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. (in Chinese))

(上接第 180 页)

[4] 曹劲绩,杨选波.上公山隧洞破碎富水白云岩地段超前固结灌浆处理[J].小水电,2013,(2):81-86.(CAO Jinnji, YANG Xuanno. Consolidation Grouting Treatment in advance for Broken and Rich Water Dolomite Area in Shanggongshan Tunnel [J]. Small Hydro Power, 2013, (2): 81-86. (in Chinese))

[5] 崔炜,付云升,陈重华,等.浅埋暗挖输水隧洞的施工可行性和安全性研究[J].南水北调与水利科技,2006,4(3):15-19.(CUI Wei, FU Yunsheng, CHEN Zhonghua, et al. Study on Water

Diversion Tunnels With Shallow Tunnel Construction Method [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(3): 15-19. (in Chinese))

[6] 张天明.应用注浆管棚超前支护在高含水量砂土中成洞[J].水利水电技术,2007,38(6):75-77.(ZHANG Tianming. Application of Shed pipe Grouting to Advanced Support for Tunneling in Sandy Soil[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(6): 75-77. (in Chinese))