

钢模台车在引江补汉输水隧洞出口 渐变段中的应用

张可炎¹, 胡其林¹, 王琪¹, 罗伟¹, 张贤²

(1. 中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066; 2. 宁夏水务投资集团有限公司, 宁夏 银川 750000)

摘要:引江补汉输水隧洞出口渐变段顶拱受不良地质条件的影响,出现了出口边坡变形过大引起不收敛的问题。由于施工合同工期短,若采用传统支架平面模板的方式浇筑边顶拱,则该出口段施工工期不能达到合同要求。阐述了应用定制钢模台车成功完成该输水隧洞出口渐变段边顶拱混凝土衬砌施工的过程,较平面模板的施工方式节约工期 7 d。采用钢制模板施工其混凝土,外观质量优于传统平面大模板衬砌渐变段边顶拱混凝土,不仅节约了施工成本,而且为后续隧洞掘进争取了时间,所取得的经验可供类似工程借鉴。

关键词:引江补汉;输水隧洞;渐变段;钢模台车;衬砌混凝土

中图分类号:TV741;TV7;TV554;TV52

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2024)增 2-0104-04

Application of Steel Formwork Trolley in the Outlet Gradient Transition Section of the Diversion Tunnel from the Yangtze River to the Han River

ZHANG Keyan¹, HU Qilin¹, WANG Qi¹, LUO Wei¹, ZHANG Xian²

(1. Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610066;

2. Ningxia Water Investment Group Co., Ltd., Yinchuan Ningxia 750000)

Abstract: The top arch of the outlet gradient transition section of the diversion tunnel from the Yangtze River to the Han River is affected by adverse geological conditions, resulting in excessive settlement and non-convergence of the outlet slope of the tunnel. Due to the short period of the construction contract, if the traditional support plane template method is used to pour the edge and top arch, the construction period of the outlet section cannot meet the safety and schedule requirements of the contract. The article elaborates on the successful application of customized steel formwork trolley in the construction process of the concrete lining for the outlet gradient transition section of the diversion tunnel, which saves 7 days of construction time compared with the flat formwork. The appearance quality of the steel formwork concrete is better than that of the traditional flat large formwork lining for the transition section, which not only saves construction costs but also saves time for subsequent tunnel excavation. The experience and achievements obtained can be used as a reference for similar projects.

Key words: Water Diversion from the Yangtze River to the Han River; Diversion Tunnel; Gradient section; Steel formwork trolley; Lining concrete

1 概 述

引江补汉工程做为南水北调中线工程的后续水源工程,起点从长江三峡库区宜昌引水至丹江口市的汉江,目的是提高汉江流域的水资源调配能力,增加南水北调中线工程的北调水量,提升中线工程的供水保障能力,并为引汉济渭工程达到远期调水规模、向工程输水线路沿线地区城乡生活和工业补水创造条件。

引江补汉工程输水总干线出口段工程(K189

+226~K194+786)位于湖北省谷城县与丹江口市,其中包括 5.085 km 长的输水隧洞(K189+226~K194+311)、出口段水工建筑物和桐木沟检修交通洞。

输水总干线出口段输水隧洞采用有压单洞输水方式,断面为圆型,过水洞径为 10 m,纵坡坡比为 $-1/2\ 300$ 。其中出口渐变段长 15 m,桩号范围为 CK5+085~CK5+070,断面形式由城门洞型渐变为圆型。渐变段开挖断面尺寸为 11.60 m (宽)×11.60 m (高),隧洞围岩以Ⅲ类围岩为主,

收稿日期:2024-01-10

渐变段衬砌成型后的断面尺寸为 11.40 m(宽)×11.40 m(高)。

自泵站基坑开挖以来,由边坡日监测数据和月收敛累计曲线可以看出:边坡变形并未收敛,加之出口渐变段(15 m)的地质条件较差,故在洞口明挖完成后优先安排锁口衬砌混凝土施工,之后的渐变段紧随开挖进行衬砌施工并与洞外的管棚套拱衔接在一起以形成有效的安全防护。但若采用传统支架模板浇筑渐变段边顶拱的方式,将直接影响到围岩收敛及隧洞施工,进度目标的实现。经项目部技术人员研究决定使用定制钢模台车进行渐变段的浇筑。笔者阐述了项目部对采用钢模台车的可行性进行的分析研究与应用过程^[1]。

2 对渐变段使用定制钢模台车进行浇筑衬砌的可行性分析

钢模台车是根据隧洞内轮廓的不同形状和隧洞衬砌混凝土的浇筑方法,在隧洞内浇筑衬砌混凝土板的专用施工机械设备,在水利、公路、铁路、水电等工程建设中已得到广泛应用。

引江补汉输水隧洞出口渐变段的设计长度为 15 m。为使用定制钢模台车浇筑输水隧洞出口渐变段,首先需要使用自行式液压栈桥模板将渐变段仰拱及矮边墙浇筑完成。项目部在与引江补汉参建各方沟通后,依照输水隧洞出口渐变段的结构形式,在输水隧洞渐变段部位 4.5 m 处设置了一处结构缝,并在该结构缝处设置了一道环形紫铜止水。经各方研讨后将渐变段整体划分为两段:第一段长 4.5 m,断面形状为城门洞型;第二段长 10.5 m,断面形状为圆型,底板高程由 75 m 渐变为 74.493 m,底板宽度由 10 m 渐变为 4.5 m。笔者从分仓、工期、结构可靠性等方面进行了分析。

(1)扩散段基坑及出口段边坡开挖以来的安全监测数据表现为不收敛,加之出口渐变段开挖造成边坡岩体自稳能力较差,洞壁周围周向应力增加后大于围岩强度时,围岩出现断裂而无法达到新的平衡状态,故对出口渐变段进行衬砌施工迫在眉睫。对此,合理规划渐变段仓位、尽可能地使钢模台车的模板改动次数变少,以提升钢模台车的组装效率成为工程施工的重点。若搭设满堂支架、使用大模板浇筑出口渐变段,仅满堂支架的搭设及模板安装至少需要 7 d 时间,且支架搭设

期间势必造成掌子面开挖停工,必将延误输水隧洞的开挖工期。项目部结合出口渐变段的工程特点,将出口渐变段整体分为三仓:第一仓为仰拱及矮边墙;第二仓为 4.5 m 直线段;第三仓为 10.5 m 渐变段。利用自行式液压栈桥模板将 15 m 渐变段仰拱及矮边墙浇筑完成,仰拱及矮边墙钢筋绑扎、模板安装及混凝土浇筑各个工序的实施过程均不影响输水隧洞的开挖与出渣。考虑到钢模台车浇筑第二仓 4.5 m 直线段时不需要改动模板,故在浇筑完仰拱及矮边墙后待混凝土强度达到 2 MPa 后即可开始绑扎第二仓 4.5 m 直线段的钢筋,随后向直线段推进钢模台车,其模板校准就位时间仅需 1 d。该段浇筑完成并拆模后,在绑扎第三仓 10.5 m 渐变段钢筋的同时,将第二仓 4.5 m 直线段钢模台车推出至输水隧洞门口安装平台位置,将直线段钢模台车模板改成渐变段模板;待第三仓钢筋绑扎完成后,沿铺设好的钢轨将渐变段钢模台车推送至仓位处,待使用全站仪校准完二衬模板后方可浇筑渐变段混凝土;第二仓直线段混凝土浇筑完成后,将直线段模板修改成渐变段模板的时间仅需 2 d,拆除钢模台车的时间仅需 1 d,而拆除满堂支架模板则需要 5 d 时间。经比较后得知:使用钢模台车施工比使用传统满堂支架大模板形式可节约 7 d 工期。

(2)引江补汉输水隧洞出口段的施工依据输水隧洞渐变段的结构尺寸特别定制了钢模台车,该定制钢模台车由钢模板、模架、车架及行走部分组成。渐变段中的直线段钢模台车的模板面板分直线段部分与渐变段部分。直线段直墙采用普通型号钢模,其钢模与钢模台车的模架使用螺栓连接;直线段的顶拱模板采用特制钢模。为便于钢模台车模板的拼装,将顶拱模板等分成 4 块弧形模板。对于渐变段腰线以下采用定制异型模板,而顶拱部位的模板和直线段顶拱的模板相同。

在钢模台车的支撑桁架中,与行走部分连接的矩形框架为固定桁架,而与模板连接的模架则可以通过螺栓或液压千斤顶调节,为活动的部分。

钢模台车使用电机、通过链条驱动钢轮实现行走,其行走系统安装在支腿的底部。钢模台车移动时,施工人员通过预先调整轨道方向角度的方式进行纠偏。使用钢模台车浇筑渐变段二衬不仅可以避免干扰掌子面开挖、提高作业效率,而且

可以更进一步提高渐变段混凝土衬砌的施工质量,同时亦提高了渐变段施工的安全性^[2]。

3 渐变段衬砌混凝土施工

3.1 施工顺序

渐变段起止桩号为 CK5+085~CK5+070,全长为 15 m,截面形状由城门洞型渐变为圆型标准截面,底板高程由 74.500 m 变为 74.493 m(逆水流方向),二衬为 70 cm 厚的 C35W12F100 钢筋混凝土结构。

输水隧洞渐变段的衬砌施工顺序整体分为三仓:第一仓为底板和矮边墙浇筑施工;第二仓为直线段墙板和拱顶浇筑施工;第三仓为渐变段墙板和拱顶浇筑施工。矮边墙施工采用定制钢模板施工,拱顶采用二衬台车施工。在使用钢模台车衬砌第二仓直线段墙板和拱顶混凝土时,同时进行第三仓渐变段墙板和拱顶钢筋的安装^[3]。输水隧洞出口渐变段的衬砌分仓情况见图 1。

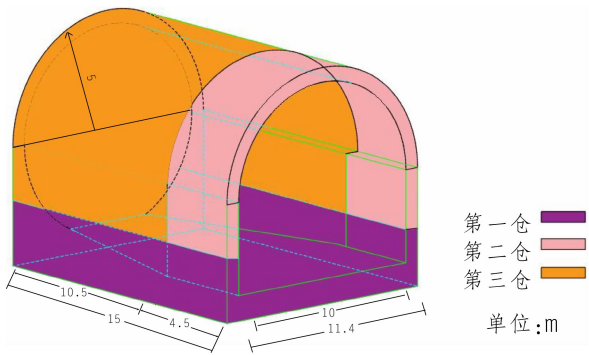


图 1 输水隧洞出口渐变段衬砌分仓示意图

3.2 施工工艺

标准段衬砌台车长 12.1 m(符合设计图纸要求),出口渐变段利用标准段衬砌台车改装后进行施工。衬砌台车由专业厂家定制,能够满足设计要求的隧洞结构尺寸。

3.3 台车轨道的布置与台车行走

(1)台车轨道的布置。由于渐变段隧洞底板宽度仅为 4.5 m,而钢模台车的行走轨道宽度为 5 m,其大于渐变段隧洞底板的宽度。针对这种情况,项目部技术人员经与设计单位、钢模台车厂家进行沟通,最终确认的方案是将输水隧洞底板采用开挖细渣料垫高 89 cm 后形成宽度为 6.95 m 的路面,能够满足钢模台车轨道的铺设要求。输水隧洞出口渐变段采用钢模台车衬砌,渐变段中直线部分的左右边墙混凝土过流面距离行走轨道

2.53 m,在仰拱底板面上铺设 2.5 cm 厚的钢板,台车的行走轨道采用标准火车钢轨。钢模台车沿洞口直线段轨道行走至直线段边顶拱仓位、待直线段边顶拱浇筑完成后钢模台车退回到洞口位置,将钢模台车的边模修改为渐变段边模,待其修改完成后,将钢模台车再次推进至隧洞渐变段位置,从而达到使用钢模台车衬砌渐变段边顶拱混凝土的目的。

(2)台车的行走。输水隧洞出口渐变段长 15 m 的底板纵坡坡比为 0.047%。由于钢模台车自带电机系统,故其不需要外部动力牵引。当仰拱底板混凝土的抗压强度满足钢模台车行走要求后,打开行走动力系统按钮使钢模台车前进。应尽可能地将输水隧洞左右两侧两根轨道之间的误差控制在 ± 2 cm 内。受回填石料压实度影响,钢模台车在行走过程中因轨道钢板不均匀沉降将引起台车存在较大的偏差,此时应将钢模台车往返行走用以调整轨道位置,直到输水隧洞渐变段钢模台车的衬砌模板到达预设位置时为止。钢模台车到达指定位置后用锁轨器将钢轮与轨道锁定牢固。

3.4 钢模台车的定位及模板验算

(1)钢模台车的定位。输水隧洞渐变段钢模台车到达预定位置后,使用全站仪对钢模台车进行测量定位,使边顶拱模板的边缘(即浇筑后的混凝土轮廓线)与设计图纸中的高程一致,使模板下边缘与矮边墙紧密贴合,将各个模板高程的固定千斤顶打至设计位置,最终将整个模板加固结实。

(2)台车模板的验算。由于该结构形式为自行式台车,其门架仅用于台车行走时支撑模板及托架自重,浇筑混凝土时其门架系统不参与受力,所有混凝土侧压力及自重均由模板及托架总成承担,因此其受力分析仅对台车模板及托架进行。鉴于渐变段混凝土浇筑的自重及施工载荷直接作用在顶模上,故渐变段顶板的受力情况要比其他位置模板的受力情况更为复杂,对结构的要求更高,受力更大。渐变段边模受混凝土侧向压力的影响,其侧向压力较小,故在对渐变段钢模台车强度进行分析时仅需考虑顶模即可。

模板面板的厚度为 12 mm;顶模弧长为 9.656 m;纵向长度为 12 m,直线段长度为 4.5 m,渐变段长度为 10.5 m;模板材料为 Q235B, σ_s

$=235\text{ MPa}$; $\sigma_b=375\sim460\text{ MPa}$; $[\sigma]=170\text{ MPa}$;
混凝土密度为 2.45 t/m^3 ;混凝土衬砌厚度为 1 m
(含超挖厚度)。

按照现场实际施工情况,边顶拱爆破开挖过程中其最大超挖厚度为 1 m ,则其顶部模板承受的荷载即按最大超挖厚度 1 m 考虑。包括混凝土的自重及浇筑混凝土时的冲击力,渐变段混凝土浇筑采用 HBT80 地泵通过 10 m 长的水平管和竖直管道泵送至钢模台车向每个浇筑窗口泵送混凝土,因此,在强度计算时,仅需考虑自重载荷的压力对模板的影响,对于这一点在工程计算中是可行的。在实际设计时,设计人员对顶部模板进行了局部加强,提高了一些安全系数^[4],则:混凝土自重 $W=10.5\times9.656\times1\times2.45=248.4\text{ t}$;折算成单位面载荷 $P_1=2\,484/(10.5\times9.656)=24.55\text{ kN/m}^2$;顶模挤压面载荷 P_2 取 47 kN/m^2 。

结合以上公式得知输水隧洞渐变段钢模台车顶模板受到 P_1 和 P_2 两个力,其两部分的合力为: $P=P_1+P_2$ 。

代入数值, $P=24.5+47=71.5\text{ kN/m}^2$ 。

根据设计要求,按照实际尺寸和结构使用 Autodesk Inventor Professional 对渐变段顶模建立三维实体模型并指定材料(渐变段模板材料为 Q235B),其性能参数见表 1。

表 1 Q235B 材料性能参数表

项目	数值
材料	Q235B
质量密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	7.86
常规	
屈服强度 /MPa	235
极限拉伸强度 /MPa	450
杨氏模量 /GPa	220
应力	
泊松比	0.275
切变模量 /GPa	0

分析采用最先进的软件 Autodesk Inventor Professional 自带的 ANSYS 模块对顶模实体的联接盒作为固定约束处,并对顶模实体加载载荷 P ,最后利用其自带的 ANSYS 模块自动分析功能求解。顶模实体的每一项分析结果见表 2。

通过有限元分析可知:模板的位移、应力、安全系数均满足工程使用要求,完全能够保证混凝土的表面质量,且台车的使用安全。

3.5 衬砌混凝土浇筑

表 2 分析结果表

名称	最小值	最大值
Mises 等效应力 /MPa	0.003	125.733
位移 /mm	0	1.439
安全系数	1.650	

待渐变段钢模台车固定和仓位钢筋、预埋件等自检合格后向监理工程师申请验收并待其合格后开仓^[5]。

浇筑使用厂拌合格的混凝土,由 3 辆 9 m^3 的混凝土罐车运输至输水隧洞渐变段施工场地,使用 1 辆 HBT80 地泵入仓。混凝土由低到高从每层的下料口送入,必须将每层的垂直下料高度严格控制 在 1.2 m 以内; 4.5 m 直线段仓内混凝土上升的速度在 $0.6\sim1.0\text{ m/h}$ 以内,该段内的混凝土连续浇筑宜控制在 8 h 以内; 10.5 m 渐变段仓内混凝土上升的速度为 $0.5\sim0.8\text{ m/h}$,该段内的混凝土连续浇筑宜控制在 12 h 以内。如此实施能够最大限度地减少因混凝土浇筑时入仓过快而导致的模板侧压力过大引起的模板变形或模板跑样^[6]。

每层浇筑时均配备了专门的振捣施工人员,使用 $\Phi50$ 软轴振捣棒由下料口伸入,每次振捣插入混凝土的深度宜为下料高度的 $2/3$ (即 80 cm)左右,振捣时间为 25 s ,通过手电筒照明看到混凝土不再有明显下沉、不再出现气泡、开始有泛浆为准。

脱模的时间^[7]根据输水隧洞的洞内气温、混凝土终凝时间、混凝土强度等综合因素确定。经相同条件下的混凝土试块验证的脱模时间为 12 h 。

该输水隧洞出口渐变段的边顶拱混凝土浇筑分为两段,实际总历时为 15 d ,与采用大块支架模板浇筑混凝土相比工期提前了 7 d 。实践证明:引江补汉项目成功应用钢模台车衬砌输水隧洞出口渐变段边顶拱、拆除模板后其混凝土表面平整度和外观质量较好。

4 结 语

为压缩引江补汉输水隧洞出口渐变段混凝土衬砌施工的工期,项目部优化了输水隧洞渐变段二次衬砌施工工艺,采用钢模台车分两次衬砌渐变段边顶拱。鉴于钢模台车定位速度快,整体刚度好,较好地适应了引江补汉工程快节奏、高标准

(下转第 146 页)

统,笔者对系统存在质量问题的原因展开了分析,并针对主要原因提出了改进对策和实施方案,成功解决了该系统开发效率不高的问题。水利工程建设项目数字化管理系统作为水利部“数字孪生水利”、支撑保证“四预”的重点布局方向,也是国家“智慧水利体系”的一项重要支撑,期望此次研究取得的成果能够为后续数字化管理系统的开发借鉴与参考。

参考文献:

[1] 冶运涛,蒋云钟,曹引,等.智慧水利理论体系与数字孪生流域虚拟模型研究成果述要[J].中国水利,2024,75(5):41-51.

[2] 严小建.质量问题解决之标准定量分析模型[J].中国质量,2022,12(11):123-127.

(上接第 107 页)

的施工特点,极大程度地减少了渐变段边顶拱衬砌仓位的数量,节约了周转材料和人力资源的投入,有效降低了施工成本和安全风险,施工后的外观质量较好,为后续隧洞开挖、衬砌等工序争取了时间,所取得的经验可为南水北调后续工程及类似工程借鉴。

参考文献:

[1] 张显为,丁善锋,刘文明.钢模台车在巴塘水电站导流洞渐变段中的应用[J].四川水力发电,2023,42(3):40-41.

[2] 路桥工艺工法.钢模台车技术在隧洞衬砌中的应用及施工工艺[R].土木论文网.2022.01.

[3] 《水利水电工程施工手册》编委会,编.水利水电工程施工手册(第3卷),混凝土工程[M].北京:中国水利电力出版社,2002.

[4] 赵增耀,谷立臣,等.有限元分析在工程机械钢结构设计及结构优化中的应用[D].西安:长安大学.2009.

(上接第 138 页)

参考文献:

[1] 郭海,邹家撇,张飞跃,等.近海区工程地下室结构底板疏水层施工技术[J].施工技术,2017,46(1):43-45,50.

[2] 梁钜宁. HIPS 塑料疏水板的施工技术[J].施工技术,2010,39(增刊1):424-425.

[3] 刘文娟,姚智宏.新型塑料疏水板防水施工工艺与控制探讨[J].福建建材,2014,32(1):29-30.

[4] 谢旭烨,夏杨杰,齐攀,等.塑料疏水板在住宅地下室底板面上的应用探讨[J].中国标准化,2016,58(24):251-252.

[5] 王琛,王金阳,彭宇峰,等.沿海地区筏板基础塑料疏水板施

[3] 刘嘉琛,董磊,陈曦,等.基于改进 STPA-DEMATEL 的智能航电系统致因要素分析[J].系统工程与电子技术,2023,11(5):1-15.

[4] 软件质量量化评价规范:GB/T 32904-2016[S].

[5] 黄诗铁,李明捷,迟越杰.基于 PCA-DEMATEL 方法的运输机场机坪安全评价指标体系分析[J].中国民航飞行学院学报,2024,35(3):53-58.

作者简介:

但凯(1972-),男,四川大英人,副高级工程师,从事水利水电工程项目管理工作;

彭昱坤(1997-),男,贵州兴义人,工程师,硕士,从事水利水电工程项目管理及数字化工作;

孙周辉(1980-),男,陕西宝鸡人,正高级工程师,工程硕士,从事水利水电工程项目管理及数字化工作.

(编辑:李燕辉)

[5] 水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准—混凝土工程:SL 632-2012[S].

[6] 水工混凝土施工规范:DL/T 5144-2015[S].

[7] 何文战,等.导流洞边顶拱衬砌混凝土脱模时间研究[J].人民长江,2018,49(增刊2):161-163.

作者简介:

张可炎(1994-),男,宁夏固原人,项目工程技术部副主任,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工;

胡其林(1987-),男,湖北黄冈人,项目总工程师,副高级工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工;

王琪(1984-),男,甘肃天水人,项目质量部主任,工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工;

罗伟(1999-),男,四川泸州人,助理工程师,从事水利水电工程施工技术工;

张贤(1995-),男,宁夏固原人,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工.

(编辑:李燕辉)

工技术应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2019,8(10):119.

作者简介:

罗林(1989-),男,四川南充人,工程师,学士,从事房屋建筑施工技术与管理工;

张俊彦(1995-),男,四川成都人,助理工程师,学士,从事房屋建筑施工技术与管理工;

赵启强(1975-),男,四川巴中人,正高级工程师,从事建设工程施工技术与管理工.

(编辑:李燕辉)