

小断面长隧洞针梁台车衬砌混凝土施工成本的管理

杜进军

(中国水利水电第五工程局有限公司,四川成都 610066)

摘要:四川省向家坝灌区北总干渠一期一步工程内江供水管道工程自贡段石塔村隧洞为圆形小断面隧洞,长度为 1 227 m,采用针梁台车衬砌混凝土施工。阐述了通过人、机、料、环、法等精细化管理措施的实施,在加快施工进度、降低成本等方面取得了一定的成效,所取得的经验可供类似隧洞衬砌混凝土施工时借鉴。

关键词:向家坝灌区;小断面;长隧洞;针梁台车;衬砌;混凝土;成本

中图分类号:TV7;TV554;TV51;TV52

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2024)04-0066-05

Construction Cost Management of Needle Beam Trolley Lining Concrete in the Long Tunnels with Small Section

DU Jinjun

(Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd, Sichuan Chengdu 610066)

Abstract: The Shita village tunnels, which are the part of Zigong section of the Neijiang water supply pipeline project of the first phase one-step project of the North Main Canal in Xiangjiaba Irrigation Area, Sichuan Province, are long tunnels with small section with a length of 1227 m, which are constructed with the needle beam trolley lining concrete. Through fine management measures such as people, machines, materials, environment and methods, certain results have been achieved in speeding up progress and reducing costs. And the experience gained can be used as a reference for similar tunnel lining concrete construction.

Keywords: Xiangjiaba Irrigation Area; Small section; Long tunnel; Needle beam trolley; Lining; Concrete; Cost

1 概述

向家坝灌区北总干渠一期一步工程是以灌溉为主,兼顾城乡生活、工业供水的引水工程,其由取水枢纽、输水及灌溉渠系、围蓄水库、提水工程及田间工程五大部分组成。内江供水管道工程自贡段线路长 26.81 km,其中设计隧洞 15 条,总长度为 6 766.3 m。隧洞沿线村庄、村道密布,穿越 9 处公路、铁路、高铁等交通干线;3 处河流,多处高压电线塔等,工程实施环境条件复杂。

石塔村隧洞长 1 227 m,初支后交通界限为底宽 2.4 m、高 2.55 m 的马蹄形断面。该隧洞底板已浇筑 15 cm 厚的垫层混凝土,隧洞坡降为 1:627~1:1 259,采用全圆自行式全液压针梁台车衬砌混凝土,衬砌后为直径 2.4 m 的圆形断面。衬砌台车的模板长 12.1 m,每仓的搭接长度为 0.1 m,针梁长 28 m,为典型的圆形小断面长隧洞针梁台车衬砌混凝土^[1]。

石塔村隧洞的建设为非关键线路,项目部经多方案对比后最终选择了单套台车的衬砌混凝土方案。

2 影响小断面长隧洞衬砌混凝土施工成本的主要因素及采取的管控措施

小断面长隧洞衬砌混凝土施工与成本有关的主要因素包括:单套台车衬砌与两套台车衬砌方案、洞内钢筋运输方案、台车设计方案、铜止水加工、混凝土水平运输垂直入仓方案、混凝土供料渠道、钢筋材料下料及损耗控制、钢筋连接方式、电焊条选型及施焊措施、洞内通风及作业面散烟、验收、模板清理、钢筋仓位超前、施工机械设备保养管理等^[2]。笔者对小断面长隧洞针梁台车衬砌混凝土施工成本的管理情况进行了分析与研究。

2.1 单套台车衬砌与两套台车衬砌方案比较

方案 1:单套台车。从隧洞进口往出口方向衬砌(顺坡),其便于自流排水,混凝土、钢筋等材料从隧洞出口方向运输进洞,可以利用隧洞出口

收稿日期:2024-03-14

现有的加工场地和其他临时设施。按照月浇筑10仓的进度该台车在石塔村隧洞衬砌混凝土完成后不再用于其他隧洞,其月台车摊销成本为40 098元 $[(400\ 000\text{元}/\text{套}\times(1-\text{残值}15\%))+\text{安装拆除成本}70\ 000\text{元}/\text{套}]\div(1\ 227\text{m}\times4.326\text{m}^3/\text{m})\times(10\text{仓}/\text{月}\times12\text{m}/\text{仓}\times4.326\text{m}^3/\text{m})]$ 。

方案2:两套台车。从隧洞中间分别向进口(反坡)、出口(顺坡)两个方向进行衬砌。进口方向采取堵水及抽排水措施,出口方向则为自流排水。混凝土、钢筋等材料分别从进口、出口两个方向运输进洞,可以利用隧洞出口现有的加工场地和其他临时设施,但其进口必须增设必要的临时设施。按照月浇筑20仓的进度,两套台车在石塔村隧洞衬砌混凝土完成后还要用于其他隧洞的衬砌混凝土施工。根据台车配置方案,其单套台车计划衬砌的长度为728 m。月台车摊销成本为80 196元 $[2\text{套}\times(400\ 000\text{元}/\text{套}\times(1-\text{残值}15\%))+\text{安装拆除成本}70\ 000\text{元}/\text{套}]\div((1\ 227\text{m}\times2)\times4.326\text{m}^3/\text{m})\times(2\text{套}\times10\text{仓}/\text{月}\times12\text{m}/\text{仓}\times4.326\text{m}^3/\text{m})]$ 。

单套台车和两套台车的人员配置成本对比^[3]:

(1)洞外钢筋下料、弯曲加工2人,焊接2人,常白班作业;

(2)洞外止水加工1人,常白班作业;

(3)洞内钢筋和铜止水的安装。单套针梁台车单班作业需要2个焊工、1个普工,两大班作业,两套台车共12人;

(4)模板、混凝土浇筑。单套针梁台车2组 \times 4人/组=8人,两大班作业,两套台车共16人;

(5)长隧洞两套台车同时作业、洞内洞外全部作业人员以33人为宜;

(6)长隧洞单套台车作业、洞内洞外全部作业人员以17人为宜;

长隧洞两套台车衬砌,直接作业人员成本节约 $(17\text{人}/\text{台}\times33\text{人}/2\text{台})\times10\ 000\text{元}/\text{人}\cdot\text{月}=10\ 000\text{元}/\text{月}$ 。

经综合分析得知:单套台车方案节约台车摊销成本、人工配置成本为30 098元/月。

2.2 洞内钢筋运输

2.2.1 纵向分布钢筋

纵向分布钢筋:直径为12 mm,单根长11.9 m,100根/仓,总重量为1 066 kg。隧洞断面较大时,可

以采用9 m随车吊,装卸车、运输全部采用机械化作业。对于小断面隧洞可以考虑采用以下方案:

方案1:人工抬运,2人一组,每次抬运5根,总重量为55 kg,抬运20次。

方案2:在洞外加工焊接成11.9 m长后采用农用车运输进洞。

经对比分析得知:方案2不可行,最终只能采用方案1。

2.2.2 环向钢筋

内外圈环向钢筋考虑采用以下措施:

(1)内圈环向钢筋在洞外加工成型后的环向直径为2.5 m。可供选择的方案有2个:

方案1:采用小三轮农用车运输进洞。

方案2:采用3 t叉车前置支架运输进洞。

经比较后最终选用方案1,其在工期、成本方面均优于方案2。

(2)外圈环向钢筋。

方案1:在洞外加工焊接成整圈后采用小三轮农用车运输进洞。

方案2:在洞外加工焊接成整圈后采用3 t叉车前置支架运输进洞。

内圈钢筋采用3 t叉车运输支架的情况见图1,外圈钢筋采用3 t叉车运输支架的情况见图2。

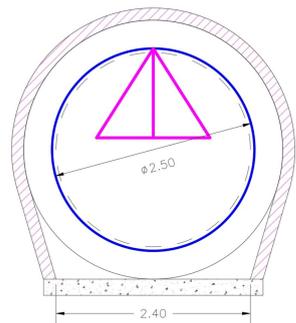


图1 内圈钢筋采用3 t叉车运输支架示意图

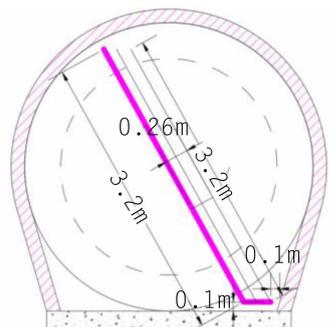


图2 外圈钢筋采用3 t叉车运输支架示意图

外圈钢筋的直径为 22~25 mm,一次可运输 20 根左右,重量为 600~773 kg;

方案 3:在洞外加工成半圈后采用出渣运输车运输进洞。因其需要在洞内焊接两个接头,进而增加了洞内焊烟,延长了仓位准备时间。项目部经比较后认为:方案 1 在工期、成本方面均优于方案 2、方案 3。

经综合比较后得知:内外圈环向钢筋经方案优化后共节约成本为 15 000 元/月。

2.3 铜止水加工

现场通过试验自制了一套简易加工装备用于圆形小断面铜止水加工,提高了工效,减少了人工投入,每月节约直接作业人员成本 10 000 元/人。

2.4 衬砌台车的设计及改进

(1)钢模台车方案:鉴于该工程隧洞断面小、衬砌后呈圆形,且采用一次性整体衬砌成型,故钢模台车方案不适用该隧洞工程。

(2)针梁台车方案:根据工程工期及隧洞数量,该项目策划投入 7 套针梁台车。由于首台台车针梁截面大,但其钢材壁薄,重量轻,需要用手动葫芦辅助脱模。项目部在与厂家沟通后对其余台车进行了改进。针梁台车纵剖面见图 3,横剖面见图 4。改进后的模板工序缩短为 31 h/仓,按照每天两大班工作制,每个班工作 10 h,每月缩短 10 仓/台 \times 1 h/仓=1(工日),每月节约成本 1 工日 \times 17 人 \times 330 元/工日=5 667 元。

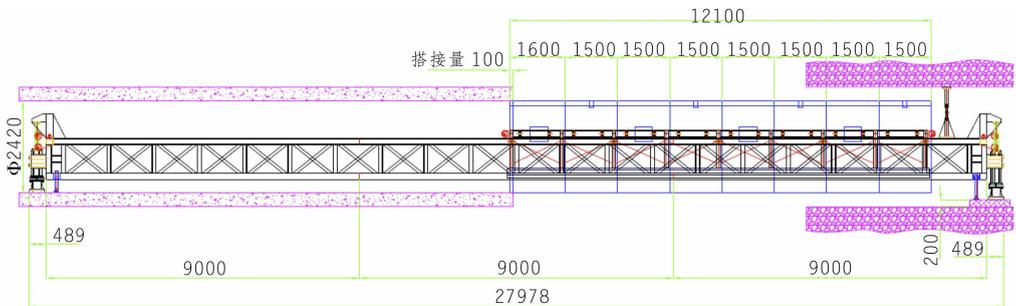


图 3 针梁台车纵剖面图

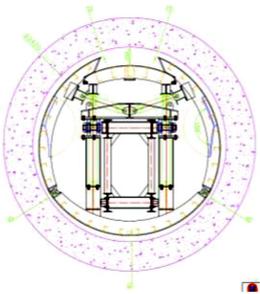


图 4 针梁台车横剖面图

2.5 混凝土水平运输及入仓方案选择

(1)方案 1:由商混站采用 9 m³ 罐车将混凝土运输到各隧洞洞口,采用 3 m³ 罐车转运进洞至浇筑仓位附近用 HBT 40.8.45ES 卧泵入仓。石塔村隧洞混凝土衬砌前期选用 HBT40.8.45ES 卧泵,泵管直径为 125 mm,存在泵送压力小、对混凝土坍落度及和易性要求高、浇筑时间长、混凝土损耗大等问题,遂在工程后期改用了 HBT 6013 卧泵,保证了混凝土浇筑质量。

(2)方案 2:自商混站采用 9 m³ 罐车运输到洞口,采用多台 HBT 40.8.45ES 卧泵接力入仓,每台卧泵的输送长度为 300 m 左右。该方案混

凝土损耗大,泵管安装拆除工作量大,其不适用该工程施工,最终舍弃。

经估算,3 m³ 罐车配 HBT 40.8.45ES 卧泵每月的费用较多台 HBT 40.8.45ES 卧泵接力入仓可节约的成本为 5 000 元/月。

2.6 混凝土供应

方案 1:自建混凝土站。自建混凝土站方案优于商混站方案。但由于该工程地处自贡市沿滩区,且沿滩工业园区政府已批准建成商混站 4 处,故自建站方案未审批通过。

方案 2:商混站供料。其存在供料不及时、长距离运输后混凝土和易性差、坍落度损失大、配合比优化材料节约归商混站、混凝土原材料价差调整损失(合同约定使用商品混凝土不调差)等问题。项目部结合运距、路况以及运输时间与两家商混站签订了供料合同,同时加强了与商混站的沟通,充分考虑了仓位准备及验仓时间,采取提前几小时预约商混站等措施后取得了较好的效果。

经估算对比得知:自建站每月可节约 8 元/ m³ \times 10 仓/月 \times 12 m/仓 \times 4.326 m³/m=4 153

元。但其因客观原因不能实现。

2.7 钢筋

石塔村隧洞使用的系统锚杆为 $\Phi 22$, $L = 2$ m, 共计 5 889 根; 锁脚锚杆为 $\Phi 25$, $L = 2$ m, 共计 4 112 根; 二衬分布钢筋为 $\Phi 12$, $L = 12$ m; 二衬内圈环向钢筋为 $\Phi 25$ 、 $\Phi 28$, $L = 8.2$ m; 二衬外圈环向钢筋为 $\Phi 22$ 、 $\Phi 25$, $L = 10$ m。锚杆和衬砌钢筋的总重量为 834 t。

2.7.1 采用双面搭接焊以节约钢筋

单面焊接连接和双面焊接连接之对比: 优先选择双面焊接连接。

内外圈钢筋、分布钢筋全部采用双面搭接焊, 一个钢筋接头的搭接长度可节约 $6d$ (d 为钢筋直径, mm) 长度的钢筋原材料。石塔村隧洞长 1 227 m, 可节约钢筋 $12.767 \text{ t} \times 4\,500 \text{ 元/t} = 57\,452 \text{ 元}$; 折合每月节约成本 5 619 元 ($57\,452 \text{ 元} \div 1\,227 \text{ m} \times 10 \text{ 仓/月} \times 12 \text{ m/仓}$)。

2.7.2 洞外钢筋的加工

(1) 分布筋: 洞外接长焊接成型后运输进洞;

(2) 内外圈环向钢筋: 洞外加工成整圈后运输进洞;

(3) 减少洞内的焊烟, 降低施工的难度, 减少洞内焊接的时间, 缩短直线工期, 改善洞内的空气环境条件, 降低通风散烟的成本, 节约焊接成本。经估算与比较得知: 每月可节约成本 5 000 元。

2.7.3 余料的综合利用与节约钢筋

隧洞采用的系统锚杆、锁脚锚杆分别为 $\Phi 22$, $L = 2$ m 和 $\Phi 25$, $L = 2$ m, 钢筋原材长度为 9 m, 下料余长为 1 m, 用于支撑定位筋;

衬砌内圈的环向钢筋为 $\Phi 25$ 、 $\Phi 28$, $L = 8.2$ m, 钢筋原材长度为 9 m, 下料余长为 0.8 m, 用于支撑定位筋;

衬砌外圈的环向钢筋为 $\Phi 22$ 、 $\Phi 25$, $L = 10$ m, 钢筋原材长度为 9 m, 缺 1.25 m, 使用 9 m 长的钢筋切 7 根, 余料为 0.25 m;

采用锚杆筋、工字钢连接筋、衬砌环向筋与支撑定位筋相结合的措施可以降低钢筋损耗率 1% 以上^[4]; 节约钢筋原材料 3 375 元 ($7.5 \text{ t/仓} \times 1\% \times 10 \text{ 仓/月} \times 4\,500 \text{ 元/t}$)。

2.8 电焊条

(1) 电焊条的选择: 项目部对大西洋、金桥、大桥等几种焊条的使用情况进行了比较, 最终选用

焊烟相对较小的大西洋焊条。

(2) 施焊措施: 焊条烘干; 采用焊烟净化器; 风机散烟。

(3) 控制电焊条损耗的措施^[5]。内外圈钢筋、分布钢筋全部采用洞外焊接、平焊、双面搭接焊等措施, 改善了工人施焊的操作条件, 有效地降低了焊条损耗。采用先大电流、后正常电流焊接, 其焊条废弃的长度最短, 浪费最少, 还能保证焊接速度; 改进焊钳, 缩短焊条废弃的长度, 减少了浪费。

采用以上综合措施后, 每月可节约电焊条成本 5 000 元。

2.9 作业面散烟及洞内采用的通风措施

洞内作业首选电动设备以减少燃油尾气的排放; 其次, 在台车及钢筋作业面使用电风扇散烟。在隧洞长、洞内自然通风条件差的情况下, 可以采用轴流通风机间隔通风。

鉴于石塔村隧洞长 1 227 m, 考虑到洞内作业人员多、焊接钢筋产生的焊烟等, 在针梁台车的一端安装了功率为 2 kW 的轴流电风扇散烟, 根据监测结果得知: 其效果能够满足洞内作业人员安全施工的条件。

2.10 仓面验收

严格执行三检制。对于自检、复检需严格把关, 以保证终检一次验收合格、满足开仓浇筑条件; 线性工程因监理工程师驻地距离各隧洞口较远且洞口分散、后期同时进行衬砌作业的隧洞面较多, 若监理工程师验仓不及时亦将严重影响到隧洞衬砌的进度和成本。

2.11 施工方法

(1) 浇筑过程与时间的控制。每仓以 5~6 h 为宜; 若包含前后准备、收尾时间则每仓以 8~10 h 为宜。

(2) 模板清理。每仓浇筑完成后必须认真清理模板板面; 对比选择出适用的脱模剂类型; 对比选择出适用的喷或涂脱模剂工艺; 考虑 2 仓清理一次模板板面的优化方案等。

(3) 脱模时间。以 12 h 为宜。

(4) 每仓循环时间。钢筋安装超前 2 仓, 其钢筋安装工序不占用衬砌的直线工期, 将每仓的循环时间控制在 3 d 内为宜。

(5) 端头封堵。根据已有经验, 在针梁台车端头采用钢管焊接 L 型整圈端头封堵支架以便于

堵头模板的快速施工;针对端头封堵时间占用直线工期的问题,采取上下两层、左右两侧 4 人同时封堵,2 人地面辅助配合的措施以加快端头的封堵速度,缩短封堵时间;对于端头封堵的时间,应控制在 4 h 内为宜,以确保开仓浇筑后作业人员不疲惫。对于堵头模板做法的比较:组装式、单片堵头模板主要是从节约时间考虑;堵头模板采用 5 cm 厚的木板,宽度以 20 cm 为宜,因其止水到迎水面的尺寸相对固定,宜做成定型弧形组装片、按顺序编号使用;模板与木楔子以周转 5 次为宜。

3 实施效果

石塔村隧洞衬砌混凝土施工期间,通过对人、机、料、环、法等实施精细化管理措施,在加快进度、降低成本等方面取得了一定成效,每月可节约成本 88 912 元。所取得的隧洞衬砌施工成本影响因素控制效果见表 1。

表 1 隧洞衬砌施工成本因素控制效果表

序号	影响因素	节约成本 (元·月 ⁻¹)
1	单套台车衬砌与两套台车衬砌方案比较	30 098
2	洞内钢筋运输	
2.1	纵向分布钢筋	
2.2	环向钢筋	15 000
3	铜止水加工	10 000
4	衬砌台车的设计及改进	5 667
5	混凝土水平运输及入仓方案	5 000
6	混凝土供应	4 153
7	钢筋材料	
7.1	双面搭接焊节约	5 619
7.2	洞外钢筋加工	5 000
7.3	余料综合利用节约	3 375
8	电焊条	5 000
	合计	88 912

(上接第 60 页)

参考文献:

- [1] 朱亚洲. 碗扣式模板支撑体系设计施工及稳定性研究[D]. 重庆大学, 2021.
- [2] 袁雪霞, 金伟良, 鲁征, 等. 扣件式钢管支架稳定承载能力研究[J]. 土木工程学报, 2006, 53(5): 43-50.
- [3] 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范: JGJ 130-2011[S].
- [4] Peng J L, Chen W F, Chan S L. Structural modeling and analysis of scaffold systems [J]. Advances in Steel Structure, Hong Kong, 1996, 123(9): 251-256.
- [5] 余宗明. 钢管脚手架铰接算法[J]. 建筑技术开发, 1997, 24(3): 25-28.
- [6] 刘宗仁, 涂新华, 丁永胜. 扣件式钢管脚手架临界力下限计算方法[J]. 建筑技术, 2001, 32(8): 541-543.
- [7] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

4 结 语

向家坝灌区北总干渠一期一步内江供水管道工程自贡段石塔村隧洞为非关键线路小断面长隧洞, 影响其衬砌混凝土施工成本的主要因素及施工期间采取的管控措施包括: 合理确定衬砌台车的数量、洞内钢筋的运输手段、混凝土水平运输及入仓方案、混凝土自拌或附近商混站供应、钢筋损耗控制、电焊条材料选择、施工通风、混凝土浇筑方法及循环时间等。通过上述措施的实施, 缩短了工期, 降低了成本, 所取得的经验可供类似工程参考。

参考文献:

- [1] 杜进军. 小断面浅埋软岩隧洞悬臂掘进机施工成本管理[J]. 四川水力发电, 2023, 42(2): 140-144.
- [2] 杜进军, 左祥. 浅谈海外 EPC 水电项目降本增效管理[J]. 四川水力发电, 2016, 35(增刊 1): 78-82.
- [3] 杜进军, 左祥. 服务指导监督共赢理念在境外分包管理的应用[J]. 工程技术(全文版), 2016, 8(7): 107-108.
- [4] 杜进军, 左祥. 卡鲁玛隧洞钻爆施工超挖原因分析及控制措施[J]. 中国科技期刊数据库. 科研, 2016, 6(9): 225-226.
- [5] 杜进军, 杨玉银. 自制多臂钻扶钎胶套在乌干达卡鲁玛尾水隧洞工程钻孔施工中的应用[J]. 四川水力发电, 2016, 35(3): 80-82.

作者简介:

杜进军(1970-), 男, 甘肃靖远人, 项目副经理, 副高级工程师, 中级爆破工程师, 从事水利水电工程施工技术与经营管理工作。

(编辑: 李燕辉)

- [8] Zhang H, Chandransu T, Rasmussen K J R. Probabilistic study of the strength of steel scaffold systems[J]. Structural Safety, 2010, 32(6): 393-401.
- [9] 林立, 周康喆, 张首飞. 碗扣式钢管脚手架节点受力性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(3): 336-339.
- [10] 陈志华, 陆征然, 王小盾. 钢管脚手架直角扣件刚度的数值模拟分析及试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(9): 100-108.
- [11] 建筑施工临时支撑结构技术规范: JGJ 300-2013[S].
- [12] 周奎, 宋启根. 钢结构几何缺陷的直接分析方法[J]. 建筑钢结构进展, 2007, 9(1): 57-62.
- [13] 汪冬. 扣件式钢管模板支架稳定承载力理论分析与试验研究[D]. 天津大学, 2009.

作者简介:

付伟(1972-), 男, 重庆市人, 副高级工程师, 学士, 从事水利水电工程施工技术与管理工。

(编辑: 李燕辉)