

特大断面引水隧洞衬砌全圆针梁台车的设计及应用

杨迪生¹, 梁存绍², 罗勇¹, 孙根江¹, 白庆锋²

(1. 中国安能集团第三工程局有限公司, 四川 成都 611130; 2. 四川华能泸定水电有限公司, 四川 泸定 626100)

摘要:大渡河硬梁包水电站引水隧洞衬砌断面直径为 $\phi 13.1$ m, 主要应用全圆针梁台车、边顶拱钢模板台车完成混凝土模筑衬砌, 笔者结合大渡河硬梁包引水隧洞 C II 标段应用全圆针梁台车一次浇筑成型工艺, 阐述了全圆针梁台车的结构设计和现场使用情况, 可为各类大断面的水工隧洞中应用全圆针梁台车完成混凝土模筑衬砌提供经验参考。

关键词:引水隧洞衬砌; 全圆针梁台车; 设计及应用

中图分类号: TV554

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2023)01-0014-04

Design and Application of Full-circle Needle Beam Trolley for Lining of Extra-large Section Headrace Tunnel

YANG Disheng¹, LIANG Cunshao², LUO Yong¹, SUN Genjiang¹, BAI Qingfeng²

(1. China Anneng Group Third Engineering Bureau Co., Ltd., Chengdu Sichuan 611130;

2. Sichuan Huaneng Luding Hydropower Co., Ltd., Luding Sichuan 626100)

Abstract: The diameter of the lining section of the headrace tunnel of Yingliangbao Hydropower Project on the Dadu River is $\Phi 13.1$ m. The full-circle needle beam trolley and the side and top arch steel formwork trolley are mainly used to complete the concrete formwork lining. This paper describes the one-time casting and forming process of lining using full-circle needle beam trolley in the headrace tunnel of Yingliangbao Hydropower Project, and the structure design and service condition of this trolley are also expounded. It can provide reference for the application of full-circle needle beam trolley to complete concrete lining in large section hydraulic tunnel.

Key words: Lining of headrace tunnel; Full-circle needle beam trolley; Design and application

1 概述

硬梁包水电站两条引水隧洞沿大渡河左岸布置, 隧洞中心间距 60 m, 1 号引水隧洞长度为 14.33 km, 2 号引水隧洞长度为 14.43 km, 全断面钢筋混凝土衬砌, 衬砌后内径 13.1 m, 衬砌厚度: III₁ 类围岩 0.4 m, III₂ 类围岩 0.5 m, IV 类围岩 0.8 m, V 类围岩 1.0 m。引水隧洞后接调压室, 根据引水线路地形、地质条件以及施工要求, 隧洞在平面布置上共设置 5 个转弯点, 转弯半径 200 m 或 80 m, 首部枢纽进水口底高程 1 215.00 m, 调压室处隧洞底高程 1 198.00 m。

2 技术背景

大断面圆形水工隧洞通常按照底拱、边顶拱两序进行施工, 底拱混凝土采用组合定型模板翻模或底模台车进行浇筑, 边顶拱混凝土采用边顶拱钢模台车立模进行浇筑, 分两序施工通常需设

置纵向施工缝, 同时纵向施工需增设止水措施, 缝面处理难度大, 工序相对复杂, 相比全圆针梁台车衬砌耗时长, 进度工期难以保证。因此, 采用全圆针梁台车一次性衬砌是加快混凝土衬砌施工进度最好的选择^[1]。

3 全圆针梁台车主要设计要求

硬梁包引水隧洞 C II 标段 $\phi 13.1$ m 全圆针梁台车进行衬砌, 主要设计要求为:

(1) 能使衬砌隧洞全圆断面底拱、边顶拱一次成型, 采用操作液压站换向阀手柄来完成立模、拆模、定位找正等。

(2) 引水隧洞混凝土衬砌分仓长度 12 m, 因此, 要求钢模台车有效衬砌长度 12 m、纵向搭接 0.1 m, 对于平面转弯段上混凝土衬砌的全圆针梁式台车, 要求台车模板的长度按照“6.1 m + 6 m”的两段连接型式进行设计; 无平面转弯洞段

收稿日期: 2022-06-05

作业面上车按照 12.1 m 整体进行设计。

(3)要求全圆针梁台车按混凝土衬砌厚度 1 m 设计、1.3 m 进行校核,相应荷载取值应按照有关规范要求,台车自身应具备抗浮能力,并在设计中考虑浮力对台车整体结构的影响。

(4)要求针梁台车能够承受混凝土浇筑每小时上升速度 1 m 的浇筑强度,工作作业窗口不少于 64 个,开启方便、闭合密封不漏浆。

4 全圆针梁台车组成

根据上述台车主要设计要求及现场施工实际情况,阐述硬梁包引水隧洞 $\phi 13.1$ m 全圆针梁台车主要总成部分设计情况。

4.1 模板总成

引水隧洞全圆针梁台车每组模板由顶模、左边模、右边模、底模四块组成,模板间采用高强螺栓进行联接^[2]。

每组模板的宽度为 1.5 m,纵向用螺栓和销轴联接,底模两边分别用铰耳销轴连接左、右侧模板,顶模的一边与右侧模板用铰耳销轴连接,另一边与左侧模板用螺栓和销轴联接^[3]。

4.2 针梁总成

针梁总成是钢模的受力支撑平台和台车行走的轨道,宽 5.7 m,高 5.3 m,为装配式桁架焊接结构。为了确保组焊桁架直线度、减少焊接变形,针梁主结构采用 H 型钢,两支点跨度 27 m。针梁上、下有四条行走方钢轨道焊接在针梁上,为了运输和安装方便,分层设计,每层 5 节,用高强度螺栓联接。

针梁端头为整个台车的主要承重部位,为保证其强度,创新性地针梁端头底部加宽设计为双梁结构,增加了结构强度的同时,提高了台车整体的稳定性。

4.3 梁框总成

梁框总成的下部与底模用高强螺栓联接,构成一个门框式构架,框架间距 1.5 m。为了增强框架的强度和稳定性,门架立柱间设计有联接梁和斜拉杆等,门架立柱和横梁均用工字钢制成。

由于台车断面大,边模板高度高,侧压力大,为保证台车衬砌时模板不跑模,对梁框进行了加强,设计为桁架结构,增加了结构的强度及刚度。

4.4 底座与水平垂直对中调整机构

前后支座分别安装在针梁的两端,是针梁的受力支点,衬砌时台车的全部重量都落在两个支座上,每个支座上安装 4 个可承受 78 t 力的液压竖向油缸和 2 个水平油缸,可以完成台车在隧道中的对中调整。

4.5 抗浮装置

抗浮装置安装于钢模板前后两端头,为可调节桁架结构。通过支撑千斤后支撑在已衬砌混凝土面上,前端支撑在开挖面,保证混凝土浇筑时在其浮力作用下,钢模板不会上下、左右移动,造成跑模情况。

4.6 行走导向机构

导向机构是安装在行走机构前后两端,在模板及针梁移动时起导向作用^[4]。

4.7 液压电器系统

液压系统配置三套液压站,竖向油缸及平移油缸分为前后两组,每组采用一台液压站控制;模板油缸采用另外一套液压站控制。每个油缸采用单阀控制。为了防止竖向油缸卸压,不仅 8 件竖向油缸配备液压锁,还在油缸两侧增加锁定机械千斤。

5 平面转弯段模板

硬梁包引水隧洞 CII 标段平面转弯半径为 200 m,为减小转弯段混凝土体型误差,将全圆针梁台车模板按照 6.1 m+6 m 的型式进行加工,直线段混凝土衬砌时,将两节全圆针梁式台车连接为整体,转弯段利用 6.1 m 段全圆针梁式台车进行混凝土衬砌浇筑,平面转弯段模板示意图见图 1。

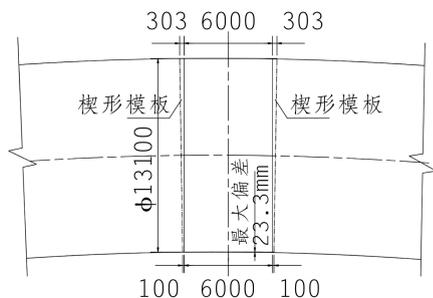


图 1 平面转弯段模板示意图(单位:mm)

6 全圆针梁台车受力分析

6.1 顶模载荷分析

全圆针梁台车顶模受到混凝土自重、施工载

荷及注浆口封口时的挤压力等载荷的作用,其受力条件显然比全圆针梁台车左右边模、底模更复杂、受力更大、结构要求更高,因此对其强度分析时只考虑顶模。

6.1.1 顶模混凝土自重 P_1

台车在浇注顶拱时,门架主要承受顶部混凝土自重。顶部最大衬砌厚度含超挖 1.3 m,台车有效衬砌长度 12 m。衬砌时,顶部整个混凝土的自重由上部圆弧模板承受,顶部模板受力简图见图 2。

图中阴影部分面积即为混凝土截面积,其面积由两部分组成,即由中间扇形圆环的面积 S_1 和两边三角形分别减去扇形后的面积和 S_2 、 S_3 组成,即:

$$S_1 = \frac{34 \times \pi \times (7880^2 - 6580^2)}{360} \\ \approx 5\,577\,479 (\text{mm}^2)$$

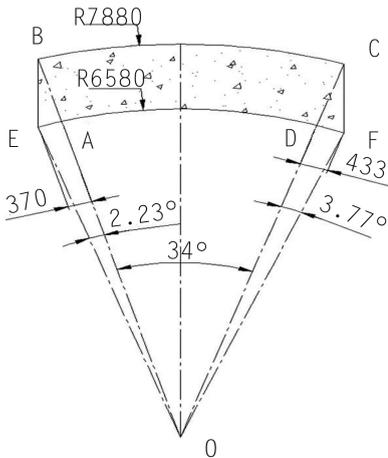


图 2 顶部模板受力简图(单位: mm)

$$S_2 = \frac{7880 \times 370}{2} - \frac{3.23 \times \pi \times 6580^2}{360} \\ \approx 237\,402 (\text{mm}^2)$$

$$S_3 = \frac{7880 \times 433}{2} - \frac{3.77 \times \pi \times 6580^2}{360} \\ \approx 281\,592 (\text{mm}^2)$$

$$\text{总面积 } S = S_1 + S_2 + S_3 = 6\,096\,473 \text{ mm}^2 \approx$$

6.1 m²

则混凝土自重: $W = 12 \times 6.1 \times 24.5 \text{ kN} = 1\,793.40 \text{ kN}$

折算成面载荷: $P_1 = 1\,793.40 / (12 \times 4.709) = 31.737 \text{ kN/m}^2$

6.1.2 顶模挤压面载荷 P_2

模板的侧压力计算有两种方法:

(1)新浇混凝土对钢模板的最大侧压力 q ,具体计算 $q = r_h R' + C = 24.5 \times 0.75 + 2 = 20.375 \text{ kN/m}^2$ 。

式中 q 为混凝土侧压力; R' 为内部插入振捣器的影响半径,取 0.75; r_h 为混凝土的容重, 24.5 kN/m^3 ; C 为混凝土入仓对模板的冲击力,取 2 kN/m^2 。

(2)采用内部振捣器时,新浇混凝土对钢模板的最大侧压力 F ,按下式计算:

$$F = 0.22 r t_0 \beta_1 \beta_2 V^{1/2}$$

式中 F 为混凝土侧压力; r 为混凝土的密度, 24.5 kN/m^3 ; t_0 为新浇混凝土的初凝时间,取 5 h; β_1 为外加剂影响系数,不加外加剂时取 1.0; 掺具有缓凝作用的外加剂时取 1.2; β_2 为混凝土坍落度影响修正系数,当坍落度小于 3 cm 时取 0.85; 当坍落度为 5~9 cm 时取 1.0; 当坍落度为 11~15 cm 时取 1.15; V 为混凝土的浇筑速度 (m/h),取 1.5 m/h。

将上述各值代入, $F = 45.6 \text{ kN/m}^2$ 。综合实际使用条件,为了确保安全,该值取为 47 kN/m^2 。

综合以上分析,顶模板受到 P_1 与 P_2 的作用,两部分的合力 $P = 31.737 + 47 = 78.737 \text{ kN/m}^2$ 。

6.1.3 顶模有限元分析

按实际尺寸和结构对顶模进行三维实体建模并指定材料,模板材料全部采用 Q235B,对顶模实体的 8 个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 ANSYS 软件的自动分析功能,顶模受力分析结果见表 1。

表 1 顶模受力分析结果

名称	最小值	最大值
等效应力	1.831~002 MPa	139.7 MPa
最大主应力	-39.35 MPa	145.0 MPa
最小主应力	-112.3 MPa	22.07 MPa
变形	0.0 mm	1.339 mm
安全系数	1.482	不适用

6.2 针梁载荷分析

6.2.1 针梁受力分析

针梁支承点总长 27 m,承受载荷主要包括模板总成、梁框总成、托架总成、行走机构、抗浮架等

部件自重约 190 t,另考虑 10 t 的工器具及操作人员重量等,载荷总重按 2 000 kN 计算,则单侧针梁上承受的载荷为 $2\ 000\text{ kN}/2=1\ 000\text{ kN}$ 。该载荷通过每边的 6 个支承点传力于针梁上,两边及中间 4 个点的受力是两边受力的一倍,中间受到的力 $F_2=1\ 000/5=200\text{ kN}$; $F_1=200/2=100\text{ kN}$,其受力、弯矩曲线、挠度曲线示意图见图 3。

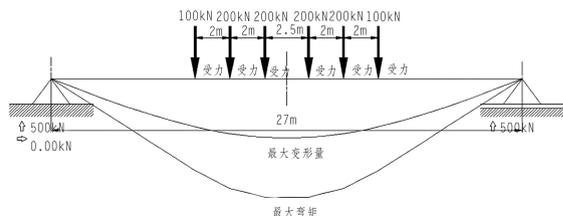


图3 受力、弯矩曲线、挠度曲线示意图

6.2.2 针梁有限元分析

按实际尺寸和结构对针梁进行三维实体建模并指定材料,模板材料全部采用 Q235B,对针梁实体的支撑点作为固定约束处。并对针梁实体加载载荷 F_1 、 F_2 ,最后利用 ANSYS 软件的自动分析功能,针梁受力分析结果见表 2。

表2 针梁受力分析结果

名称	最小值	最大值
等效应力	0.014~650.9 MPa	251.284 MPa
最大主应力	-76.626 6 MPa	168.843 MPa
最小主应力	-242.105 MPa	51.332 2 MPa
变形	0 mm	9.349 44 mm
安全系数	1.392 85 ul	不适用

6.3 全圆针梁台车受力分析结论

通过对全圆针梁台车顶模、针梁进行计算分析,全圆针梁台车模板、针梁的强度和刚度满足要求,现场实测针梁最大挠度值 20 mm。该针梁台车能够满足现场试验,但在使用过程中,应严格按照使用规范要求,并适当控制两侧边顶拱的浇注速度,宜控制在 1.5 m/h,衬砌厚度严格控制在 1.3 m 范围内^[5]。

7 现场应用存在的问题与不足

硬梁包水电站引水隧洞 C II 标段全圆针梁台车主要采用 25 t 汽车吊和 5 t 手拉葫芦配合进行,2022 年 3 月首仓混凝土浇筑,拆模后衬砌效果整体良好,混凝土表面平整光滑,但也存在一些

问题。

首仓混凝土拆模后,在引水隧洞腰线以下部

位混凝土表面仍出现较多气泡缺陷,尤其是底拱 120°范围内气泡较多,分析主要原因:一是引水隧洞衬砌断面大,腰线以下部位混凝土振捣时气泡不容易排出;二是硬梁包引水隧洞衬砌厚度较薄,浇筑振捣人员无法进仓,只能通过全圆针梁台车预留的工作窗口进行混凝土振捣。

通过多仓混凝土浇筑总结后认为,在全圆针梁台车底模 120°模板上增开孔径为 $\phi 30\sim\phi 50\text{ mm}$ 排气孔进行排气,并设置 12 个 $\phi 125\text{ mm}$ 孔直接接混凝土输送泵管,采用 $\phi 50\text{ mm}$ 软轴振捣棒通过工作窗插入仓内加强振捣的方式,可以有效改善腰线部位以下混凝土气泡问题,同时提高混凝土外观质量。

8 结语

设计全圆针梁台车稳定可靠的桁架式针梁承载结构、全圆浇筑模板系统、行走部件、液压脱模装置、模板横移结构,并对全圆针梁台车的强度、刚度、稳定性进行校核判断,得出针梁台车的结构在强度、刚度方面符合使用要求的结果。通过 $\Phi 13.1\text{ m}$ 全圆针梁台车在硬梁包水电站引水隧洞成功应用证明,混凝土衬砌成型后各项指标能够满足设计要求。

参考文献:

- [1] 孟相军, 蹇令芬, 赵纯健, 等. 全圆针梁钢模台车衬砌的设计与应用[J]. 工程机械与维修, 2008(05): 95-99.
- [2] 吴哲. 全圆针梁钢模台车在索普拉多拉水电站工程引水隧洞衬砌中的应用[J]. 技术与市场, 2015, 22(06): 87-89.
- [3] 郝晓宇, 张志和, 李斌华. 针梁台车在柳坪水电站隧洞衬砌中的应用[J]. 贵州水力发电, 2011, 25(02): 29-30.
- [4] 胡志勇. 全圆针梁模板台车施工引水隧洞衬砌的简述[J]. 山西建筑, 2011, 37(01): 152-153.
- [5] 朱晓强. 毛家河水电站引水隧洞全圆针梁式台车的应用[J]. 时代报告月刊, 2012(05X期): 260-261.

作者简介:

- 杨迪生(1987-),男,辽宁营口人,助理工程师,中国安能集团第三工程局有限公司,本科,从事物资装备管理工作;
- 梁存绍(1974-),男,四川成都人,四川华能泸定水电有限公司,高级工程师,大学本科,水工专业;
- 罗勇(1986-),男,湖北赤壁人,工程师,中国安能集团第三工程局有限公司,本科,从事工程项目管理工作;
- 孙根江(1983-),男,河北衡水人,高级工程师,中国安能集团第三工程局有限公司,本科,从事工程项目管理工作;
- 白庆锋(1988-)男,云南昭通人,四川华能泸定水电有限公司,工程师,学士,水电工程机电金结安装管理。

(责任编辑:吴永红)