

预应力空腹桁架渡槽施工技术

冯凯, 强蕾

(中磊工程造价咨询有限公司, 北京 102500)

摘要:青海引大济湟工程 39 号渡槽位于拦隆口镇卡阳景区, 全长 178 m, 共 5 跨, 该工程采用空腹桁架整体浇筑逐跨张拉完成后进行槽身施工的方案。其中 4 跨单跨长度为 40 m 的槽身位于桁架下弦杆上方, 共 5 跨。从工程下承式空腹桁架式渡槽所需材料设备、模板和脚手架安装方式、混凝土施工方案、预应力施加过程等方面进行了阐述, 同时对模板施工的稳定性进行了安全演算, 并对工程可行性进行了论证。

关键词:引大济湟工程; 预应力; 空腹桁架; 渡槽; 施工技术

中图分类号:TV741;TV52;TV7

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2024)增 2-0113-04

Construction Technology of Prestressed Vierendeel Truss Aqueduct

FENG Kai, QIANG Lei

(Zhonglei Engineering Cost Consulting Co., Ltd., Beijing 102500)

Abstract: The No. 39 aqueduct of Water Diversion Project from Datong River to Huangshui River in the Qinghai Province is located in Kayang of Lanlongkou town. The total length of the aqueduct is 178m and consists of 5 spans. The project adopts the scheme of integral casting of the hollow truss and the construction of the trough body after the tensioning of each span is completed. 4 spans are through vierendeel trusses with single-span-length 40m, and the aqueduct body is located above the lower chord of the truss, with a total of 5 spans. The thesis mainly discusses the materials required for the project, the installation method of the formwork and scaffolding, the concrete construction plan, and the prestressing process. At the same time, the thesis carries out safety calculations on the stability of the formwork construction and demonstrates the feasibility of the project.

Key words: Water Diversion Project from Datong River to Huangshui River; Prestress; Vierendeel Truss; Aqueduct; Construction technology

1 概述

输水工程中较为常见的渡槽为桁架式渡槽及梁式渡槽, 其以混凝土作为主要材料完成对整个工程的输水及导流工作, 是水利工程建设中不可或缺的重要设施。青海引大济湟工程 39 号渡槽为桁架式渡槽, 位于拦隆口镇卡阳景区, 所处冲沟成“U”型, 左岸坡度为 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$, 局部陡立, 沟底坡度为 5° 左右, 右侧边坡总体坡度为 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。左侧边坡表层为厚 0.3~3 m 的黄土状土, 其坡脚厚度较大, 上部较薄。局部渡槽排架基础的开挖受地下水影响其地基承载力较差, 粉土及黄土状粉土允许承载力为 140 kPa。

39 号渡槽全长 178 m, 共 5 跨, 其中 4 跨单跨长度为 40 m (空腹桁架), 剩余 1 跨的单跨长度为

11 m。39 号渡槽下部为双排架结构, 最高处为 13 m。排架桩基共 20 根, 直径均为 800 mm。渡槽的主拱圈为预应力下承式桁架拱结构, 包含下弦杆、上弦杆、下弦杆拉杆、上弦杆拉杆、上横系杆、竖杆等。下弦杆断面尺寸为 $30\text{ cm}\times 50\text{ cm}$, 每根设 6 束 $3-1\times 7\Phi 15.2$ 钢绞线, 标准强度不小于 1 860 MPa。上弦杆断面尺寸为 $30\text{ cm}\times 60\text{ cm}$ 。槽身断面为矩形, 过水断面净宽 $2.2\text{ m}\times 1.7\text{ m}$, 设 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 倒角, 槽身混凝土厚度为 20 cm。

2 总体施工方案

鉴于 39 号渡槽地处卡阳景区内部, 对环境保护要求较高, 同时受征地影响导致施工场地受限。为在有限的作业空间内完成渡槽的混凝土浇筑施工, 该工程采用空腹桁架先行整体浇筑、逐跨张拉

收稿日期: 2024-02-02

后再进行槽身混凝土浇筑的施工方案。其施工工艺流程为:下弦杆浇筑(包含拉杆)→竖杆浇筑→上弦杆浇筑(包含拉杆)→下弦杆张拉→槽身施工^[1]。

(1)空腹桁架与槽身施工前,在两座排架之间搭设满堂红脚手架作为施工作业平台。

采用碗扣式脚手架,Φ48.3×3.5 mm 钢管,设计横杆步距为 120 cm,立杆横纵间距为 90 cm。在跨路段搭设脚手架时需预留 4.5 m×6.0 m 的门洞,门洞立柱采用外径为 426 mm、壁厚 10 mm 的钢管,排距 1 m,共计 4 排,每两排钢管柱之间设 Φ80 钢管剪刀撑。横梁采用 2 根 I16 工字钢重叠焊接连接,每排横梁之间采用 I16 工字钢焊接连接。门洞支墩基础采用 C20 混凝土条形基础,厚度为 50 cm,宽 80 cm,长度为 5 m。

(2)混凝土拱浇筑完成后,待其混凝土强度达到设计强度的 80% 以上时,利用千斤顶进行下弦杆的张拉,张拉过程采用伸长量与张拉力进行双条件控制。

(3)待整个空腹桁架施工完成并达到设计强度后进行槽身施工。

(4)混凝土在拌和站集中拌制,采用 10 m³ 混凝土罐车运输,根据渡槽排架的高度和地形利用 25 t 汽车吊配合 0.6 m³ 吊罐入仓;对于渡槽两端斜坡段吊车无法浇筑的部位采用混凝土泵车浇筑。

(5)渡槽钢筋的加工在作业面附近搭设的临时加工厂内进行,钢筋模板的垂直运输采用 25 t 吊车实施。

2.1 地基的处理

为充分满足安全施工地基承载力的要求,项目部通过施工荷载计算、分析后得到了最小地基承载力需求,结合施工场地情况进行了地基处理方案设计。荷载计算时,考虑到空腹桁架结构的特殊性对工程结构进行了简化,按照最不利截面组合情况进行了进一步的计算,同时将钢筋混凝土的重量和模板重量作为整体按照均布荷载情况进行分析。

(1)基本计算参数。模板支架搭设的高度为 10 m。脚手架立杆的纵距为 0.90 m,横距为 0.90 m,脚手架步距 $h=1.2$ m。内龙骨采用 40 mm×40 mm×3 mm 方钢管,间距 300 mm,顶托梁采用 40 mm×60 mm×3 mm 方钢管。碗扣式

模板支撑架立面情况见图 1。

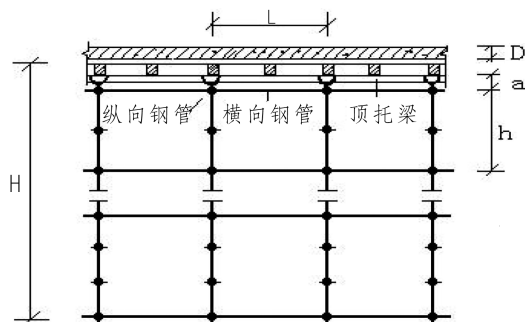


图1 碗扣式模板支撑架立面简图

按照《施工脚手架通用规范》GB 55023—2022 确定荷载组合分项系数。由于该项目中可变荷载效应组合时压强较大,因此,对该工程永久荷载分项系数取 1.2,可变荷载分项系数取 1.4。

(2)地基承载力计算。在该工程中,通过荷载计算分析得知:传导至每根立杆底部的总荷载 $N=12.84$ kN,脚手架基础底面扩展面积 $A=0.250$ m²,因此,每 m² 地基承载力设计值 $p=N/A=51.36$ kN/m²。模板支撑架立杆荷载计算单元情况见图 2。

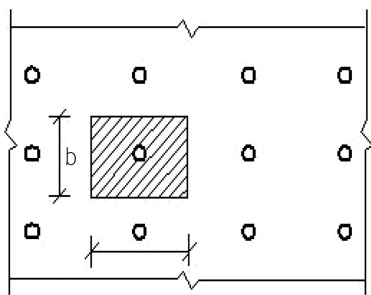


图2 模板支撑架立杆荷载计算单元示意图

根据《施工脚手架通用规范》GB 55023—2022,采用地基承载力调整系数 0.40 计算得出地基承载力标准值 $f=51.36/0.4=128.4$ kN/m²。经过处理后,其地基承载力应大于标准值 128.4 kN/m²。

(3)地基处理方案。槽身地基按每跨为一个平台进行整平处理,地基处理的宽度为 5 m。搭设脚手架的地基基础为洪积淤泥质黏土时,基础高程按支架所需的地面高程填筑洞渣爆破料。当爆破洞渣料换填深度为 2~3 m(填筑高度大于 1 m)时,需采用分层回填,20 t 自行振动碾碾压的方式。根据该工程脚手架的搭设高度,在其表面铺设 10 cm 厚的砂砾石层并整平碾压,分层碾压

的压实度需达到 94% 以上,然后浇筑 10 cm 厚 C15 混凝土垫层。

地基处理完成后,采用重型触探仪进行检测,通过检测得知地基承载力已超过 168 kN/m^2 ,满足脚手架搭建的施工要求。

2.2 模板施工

(1) 受力计算与分析。脚手架正式搭建前,为验证脚手架施工设计的安全性及可行性,对其关键部件和关键位置进行了验算;同时考虑最不利荷载情况从以下几个方面进行了分析与论证:

① 内龙骨受力验证。鉴于模板与混凝土重量置于内龙骨之上,直接承载模板与混凝土的重量,对此,按照均布荷载分布于三跨连续梁上的方式进行计算,分析内龙骨的最大挠度变形。

② 顶托梁受力计算。顶托梁置于立杆顶托之上,按照均布荷载和集中荷载分布于简支梁上的方式进行计算。集中荷载为龙骨最大支座反力,用以分析顶托梁抗弯强度及最大挠度变形情况。

③ 脚手架纵向支撑钢管的计算。纵向钢管按照均布荷载下简支梁计算,用以分析纵向钢管抗弯及挠度变形情况。由于该脚手架设计方案中有顶托梁的存在,因此,横向支撑钢管及纵向支撑钢管均未承受来自空腹桁架混凝土结构和模板的重量,因其受力情况类似,在此不做单独讨论。

④ 脚手架立杆稳定性计算的荷载标准值。作用于模板立杆的荷载包括静荷载、活荷载和风荷载等多种因素。项目部根据立杆长细比首先确定轴心受压立杆的稳定系数 φ , 然后进行立杆稳定性的分析与计算。

⑤ 门洞横梁的计算。横梁立柱按照单跨简支梁进行计算,同时利用最不利情况下的荷载进行分析。由于门洞横梁由两根 I16 工字钢重叠焊接组成,其横梁截面抵抗矩和惯性矩按照组合截面进行计算,用以分析横梁最大弯应力及挠度变形。

⑥ 门洞立柱的计算。门洞立柱作为轴心受压构件进行稳定性验算,分析立柱的抗压强度。

通过对脚手架关键部件及门洞关键位置进行荷载分析和受力计算得知:该脚手架支撑模板设计方案满足相关规范及现场施工需求。架体杆件的搭设必须保证横平竖直,及时使用水平仪等专业设备进行检查校正,特别是随着架体高度的增

加一定要及时检查整个架体的垂直度^[2]。

(2) 支架预压。支架预压系针对每个单跨脚手架分别进行预压。通过预压得到支架平台在实际荷载作用下的弹性和非弹性变形,以消除结构的非弹性变形并正确设置预拱度,以保证浇筑后的槽身结构线形符合设计要求,进而保证模架的正常工作和安全使用^[3]。预压利用水袋进行加载,即根据下弦杆(截面尺寸为 $30 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$)重量的 110% 控制压重。加载预压前,首先布设沉降观测点,加载分级进行,加载过程应尽量模拟混凝土浇筑过程中的状态。第一次加载模拟下弦杆钢筋绑扎完成、钢绞线及各种模板和加固措施安装完毕的荷载;第二次加载模拟下弦杆混凝土浇筑 80% 后的荷载;第三次加载模拟下弦杆混凝土浇筑完成后的荷载。沉降观测应贯穿加载及卸载的整个过程,从首次加载前直到第三次加载完成,每级加载及卸载均应进行测量并详细记录。预压结束、卸载完成后,根据地基沉降观测并记录支架的变形,确定模板的高度,设置预拱度。

(3) 模板的安装。空腹桁架模板采用定型钢模板。模板安装时使用全站仪进行测量定位并挂线施工,采用对拉的方式进行固定。随着排架混凝土模板升高在排架周边搭设满堂红脚手架做为施工平台及防护栏杆,脚手架采用风缆固定。材料的倒运、模板的安装和拆除主要依靠 25 t 汽车吊操作,并在高排架上安装电动葫芦辅助施工。

2.3 混凝土浇筑

空腹桁架的混凝土浇筑采用 C50 混凝土,使用的骨料为一级配,外加剂采用 I 级粉煤灰与高效减水剂。混凝土在混凝土拌和站集中拌和,采用 10 m^3 混凝土罐车运输,25 t 吊车配合 0.6 m^3 吊罐入仓。首先浇筑下弦杆(下横系杆),再浇筑竖杆及上弦杆(上弦杆拉杆),最后浇筑上横系杆。待空腹桁架结构浇筑完成后对混凝土结构进行洒水养护,待空腹桁架结构达到 80% 强度要求后进行下弦杆张拉;待空腹桁架结构达到设计强度要求后进行渡槽槽身的浇筑,最后加盖混凝土盖板。浇筑过程中,采用 $\Phi 50$ 软轴插入式振捣器振捣密实;浇筑至预埋件位置时,应在校正预埋件的位置后继续浇筑至顶面。对于施工缝则采用人工凿毛或电钻冲毛进行处理,以保证新老混凝土结合良

好。混凝土浇筑后及时进行洒水养护,拆模后覆盖塑料薄膜进行洒水养护。

2.4 预应力施工

该工程预应力施工用的钢绞线采用 6 束 3—1×7Φ15.2 钢绞线,其标准强度不小于 1 860 MPa。待下弦杆混凝土构件达到设计强度的 80%后,对预应力钢绞线进行张拉锚固。张拉时利用两跨间隙设置张拉操作台,将钢绞线用砂轮机切割和编束,并按照设计及相关规范要求要求进行张拉、管道压浆及封锚等工作。钢绞线表面不得带有降低钢绞线与水泥黏结力的润滑剂、油渍等物质,不得有锈斑。预应力钢绞线预留孔道与钢筋工程同步进行,张拉时采用应力、伸长值双控以确保施工质量^[4]。张拉顺序分三批进行:第一批为左上角及右下角对角张拉,张拉控制力为 468 kN;第二批为右上角及左下角对角张拉,张拉控制力为 453 kN;第三批为中间两束钢绞线张拉,张拉控制力为 438 kN。张拉时,必须保证千斤顶张拉力作用线与钢绞线轴线一致。预应力筋张拉施工工序为:0→初始应力(0.1σ_k)→100%σ_k(持续 5 min)。张拉过程中应采取应力应变双重标准进行控制。

孔道灌浆采用水泥浆,水泥采用 P. O 52.5 硅酸盐水泥,水灰比为 0.4~0.45。采用 2SNS 型高速搅拌机拌制。灌浆压力为 0.4~0.6 MPa,以保证灌浆的密实性。

2.5 槽身混凝土施工

槽身混凝土模板采用钢支架支撑,槽身端肋、槽身内外模板均采用定型钢模,底板采用厚 2.0 cm 的高强度竹胶板,外钢支架采用 Φ48×3 mm 钢管制作。模板的固定采用内外模定型桁架,底板每隔 2 m 采用拉丝杆进行加固,采用脚手架杆纵横将其连接成整体。渡槽槽身模板加固情况见图 3。施工步骤为:利用已有的空腹桁架支撑系统→安装外桁架→挂外模→绑扎钢筋→拼装槽端、挂内模→挂内桁架及支撑。混凝土由拌和站集中拌和,10 m³ 混凝土罐车运输,采用汽车泵泵送入仓,Φ50 软轴插入式振捣器振捣密实。必须将混凝土坍落度控制在试验室确定的范围内。如果遇到特殊天气,如温度较高或温度较低等情况可适当调整坍落度^[5]。

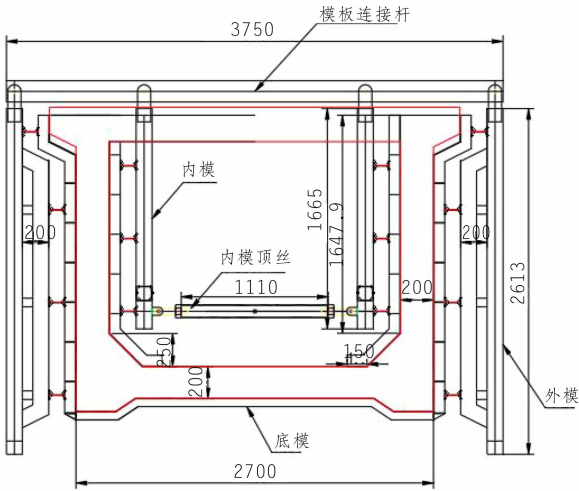


图 3 渡槽槽身模板加固示意图

3 施工机械设备的配置

该工程用于施工的主要机械设备投入情况见表 1。

表 1 主要机械设备表

序号	机械名称	型号与规格	单位	数量	备注
1	汽车吊	25 t	辆	1	吊混凝土罐入仓
2	汽车泵	HNJ5380THB	辆	1	泵送混凝土入仓
3	罐车	10 m ³	辆	3	混凝土运输
4	插入式振捣器	Φ50	台	8	混凝土振捣
5	渡槽空腹桁架模板	定制	套	1	
6	渡槽槽身模板	定制	套	2	

4 结 语

引大济湟工程 39 号预应力空腹桁架渡槽地处青海高原,每年可进行混凝土施工的工期较短。项目部在保证施工质量和施工安全的前提下,未影响到 46 号隧洞的出渣与开挖进度,按时完成了混凝土浇筑施工任务。由于该工程处于景区之内,场地受限,项目部采用搭建碗扣式满堂红脚手架支撑定型钢板的方式进行施工,达到了满足浇筑混凝土结构受力条件的要求;通过模拟浇筑混凝土过程的方法对脚手架施加预压力;通过观测变形结果调整了施工方案,在充分保证施工安全的前提下进行了空腹桁架和槽身混凝土的浇筑工作。按上述要求操作可以在复杂的施工情况下保证施工安全有序进行,即节约了成本,又缩短了工

(下转第 126 页)

中间立柱和中间端部立柱的拉紧螺母,拧紧顺序为自上至下。

5 实验结果分析

(1)未使用应力监控系统的传统工艺流程会导致钢绞线的初应力消散,进而影响工程质量。根据《公路工程质量检验评定标准》JTG F80/1-2017 的规定,初张力的允许误差值为±5%。在本次实验中,3 d 后的初张力下降到 19.4 kN,这一数值超过了设计值 21 kN 的 7.6%,明显属于质量不合格的范畴。

(2)加装应力监控系统后,系统能够持续监测钢绞线的张拉力值,直到张拉的最远端达到设计值后方能结束张拉。实验数据表明:加装应力监控系统后,张拉后 5 h 内张拉力的消散仅为 0.5 kN,相较于未加装监控系统时平均减少了 0.9 kN 的消散。3 d 后,初张力下降至 20.8 kN,与设计值的误差不足 1%。

(3)该研究成果已在金简仁快速路紧凑型缆索护栏施工中得到应用。通过现场实施的施工管理措施,确保了张拉力严格达到设计要求,工程得以顺利开展,不仅保证了施工质量,还在保持稳定进度的同时为紧凑型缆索护栏的施工带来了一定的经济效益,促进了工程项目的正常开展。

6 结语与展望

(1)技术创新与应用

应变片监控系统的引入解决了传统缆索护栏施工中钢绞线初应力消散的问题,进而显著提升了工程质量。实验数据清楚地表明:加装应力监控系统后能够有效地减少应力消散,确保工程施工质量符合《公路工程质量检验评定标准》JTG F80/1-2017。

(2)施工流程的优化

(上接第 116 页)
期,所取得的经验可为类似渡槽施工借鉴。

参考文献:

[1] 包正丽. 浅谈水利工程渡槽施工技术[J]. 建材发展导向(下),2022,20(8):148-150.
[2] 胡娜. 渡槽高大模板支撑工程施工方案[J]. 陕西水利, 2022,28(6):176-177,180.
[3] 廖祖坚,罗帅,覃世果. 海脉渡槽预应力槽身施工关键技术[J]. 广西水利水电,2022,23(6):45-47.

该系统的应用优化了缆索护栏的施工流程,从放样、基础施工、立柱安装到钢绞线张拉,每一个步骤都因监控系统的引入而更加精确和高效。

(3)前景展望

①技术推广与应用:鉴于该监控系统在提高施工质量和减少成本方面具有的显著效果,其在更广泛的土木工程领域中的应用具有巨大潜力。未来可以考虑将该技术推广到更多的高速公路、桥梁等基础设施项目建设中。

②技术迭代与创新:目前使用的应变片监控系统虽然已经相当成熟,但仍有改进和创新的空间,未来可以探索将人工智能和大数据技术整合到该系统中,以进一步提高检测的准确性和效率。

③长期性能的监控与维护:该技术除了在施工阶段应用外,未来可以考虑将该技术应用于长期的结构健康监测和维护中,以实现持续的性能评估和预防性维护。

参考文献:

[1] 李巧真,李刚,韩钦泽. 电阻应变片的实验与应用[J]. 实验室研究与探索,2011,30(4):134-137.
[2] 徐锐. 矿井提升钢丝绳张力传感器的布置及电路设计[J]. 科学技术创新,2020,24(10):183-184.
[3] 郭艳明,周斌,徐小剑,刘亚非. 紧凑型缆索护栏在 G205 浙江段改造示范工程中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016,33(3):80-83.
[4] 洪刚,王亚洲,朱林茂,等. 旋转弯曲疲劳试验机的一种应变测量评定方法[J]. 物理测试,2023,41(6):23-31.
[5] 陈海华. 桥梁装配式防护栏施工质量控制研究[J]. 交通科技与管理,2023,4(20):101-107.

作者简介:

鲁鹏涛(1983-),男,陕西渭南人,副高级工程师,学士,从事建设工程施工技术与管理工
田艳军(1989-),男,河南商丘人,工程师,一级建造师,学士,从事建设工程施工技术与管理工
(编辑:李燕辉)

[4] 白寅虎. 大跨度渡槽三向预应力槽身结构设计和施工要点[J]. 河北水利,2023,17(10):39-40.
[5] 赵明杰. 预应力渡槽施工技术[J]. 四川建材,2023,49(6):129-131.

作者简介:

冯凯(1980-),男,北京房山人,工程师,学士,从事电力行业经营管理工作;
强蕾(1989-),女,陕西西安人,助理工程师,学士,从事电力行业经营管理工作。
(编辑:李燕辉)