

倒虹吸技术在隧洞与公路交叉施工中的应用

钱 玉

(山东水总有限公司, 山东 济南 250014)

【摘要】为解决引水工程中隧洞与公路交叉段工程空间冲突问题,通过分析后头坪隧洞与绵西高速交叉工程的具体情况,综合考虑了选址条件以及现有技术条件,提出了倒虹管的布置方案和施工技术路线,详细分析了桩基保护施工、土石方开挖、边坡锚喷土钉墙施工等关键技术要点。结果表明:倒虹吸技术能够有效地解决交叉工程中的技术难题,合理的设计和施工方法能够保障结构的稳定性和安全性,为水利工程的复杂施工环境提供了参考。

【关键词】金龙分干渠;倒虹吸技术;交叉工程;基坑监测

【中图分类号】TV672.5

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-02-0028-04

Application of Inverted Siphon Technology in the Cross Construction of Tunnel and Highway

QIAN Yu

(Shandong Water Conservancy Group Co., LTD., Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: To solve the problems of engineering space conflict in the cross section of tunnel and highway in water diversion projects, this study analyzes the specific situation of the cross project between Hou Touping Tunnel and Mianxi Expressway. It considers the site selection conditions and existing technical conditions comprehensively, puts forward the layout scheme and construction technical route of the inverted siphon, and analyzes in detail the key technical points such as pile foundation protection construction, earth and rock excavation, and slope anchor-shotcrete soil nailing wall construction. The results show that the inverted siphon technology can effectively solve the technical problems in cross projects, and reasonable design and construction methods can ensure the stability and safety of the structure, providing references for the complex construction environment of water projects.

Key words: Jinlong branch canal; Inverted siphon technology; Cross project; Foundation pit monitoring

倒虹吸结构作为水利工程中一种特殊构筑物,由进口段、管身段、出口段三部分组成,具有结构简单、易于维护、适应性强和成本效益高等优点^[1]。倒虹吸技术利用水位差实现水流的有压输送,避免了水流对交叉结构的直接冲击,保障了输水安全和结构稳定^[2]。近年来,众多学者对倒虹吸技术的基本理论、水力特性分析以及结构设计等开展了大量研究。张倩倩^[3]以实际工程为例,结合 ANSYS 研究了倒虹吸结构易产生的施工病害并提出了加固方案。张帅康等^[4]通过对倒虹吸水力特性研究,发现在倒虹吸系统中,水流速度的峰值通常出现在管道的下降段,而压力的最大值则多出现在管道的水平段。陈进华等^[5]结合滇

中引水工程,对倒虹吸进出口结构进行了设计与布置。

虽然已有诸多文献对倒虹吸技术进行了探讨,但不同的工程地质、选址条件不同,针对一些特定条件下的交叉工程相关研究仍然较少,且由于工程不同,需具体问题具体分析。该研究结合后头坪隧洞与绵西高速交叉工程,通过综合考虑工程实际需求和现有技术条件,探讨倒虹吸技术在隧洞与公路交叉工程施工中的应用,旨在为类似工程和相关领域的技术进步和工程实践提供参考和指导。

收稿日期:2025-09-18

作者简介:钱玉(1992—),男,工程师

1 工程概况

金龙分干渠一标段起止桩号为 K0+000—K19+940,原设计渠道总长 19 940 m,渠道包括 7 座渡槽、17.5 座隧洞和 25 段明渠。后头坪隧洞位于绵阳市盐亭县金孔镇,是金龙分干渠最长的一个隧洞,位于第一流量段,设计流量 $8.7 \text{ m}^3/\text{s}$,加大流量 $10.44 \text{ m}^3/\text{s}$ 。设计隧洞进口桩号 K2+574.87,出口桩号 K4+296.69,长度 1 721.82 m。隧洞纵坡为 1/1800,采用园拱直墙式断面,高 3.35 m,宽 3.0 m,全断面钢筋混凝土衬砌。施工过程中,发现后头坪隧洞中段与绵西高速公路麻安山隧道完全交叉,工程相互冲突。经各方协调,最终决定对后头坪隧洞进行变更,变更方式为,将隧洞方案调整为“隧洞+倒虹管”方案。后头坪隧洞原长度 1 756.812 m 变更后自桩号 K3+257.776~K3+696.922 段变更为倒虹管,将后头坪隧洞分割为后头坪 1# 隧洞、后头坪倒虹管、后头坪 2# 隧洞。

2 倒虹管布置方案

倒虹吸作为一种无需外部能源的流体输送结构,其工作原理基于大气压力与重力的协同作用,通过 U 形或倒 U 形管道结构,使流动路径克服重力势能,通过管道内局部真空的形成以及两端液面之间的高度差驱动水流通过密闭管道,实现了液体在封闭系统中的自流动。根据工程施工状况及周边地形、地质条件,线路从上游掌子面附近 3+199.81 起对线路进行调整,改线从线路左侧山体出洞,经倒虹管后,再右经隧洞至 3+660 处接原隧洞轴线位置。经现场实测倒虹管下穿绵西高速大石沟大桥第二跨,跨绵西高速公路段长约 50 m。倒虹吸与桥梁交叉布置图如图 1 所示。

倒虹管纵剖面图如图 2 所示,管道介于南北侧 1#、2# 桥墩间,大桥跨度 30 m,1# 桥墩墩径 1.4 m,2# 桥墩墩径 1.6 m。在高速公路大石沟大桥桥墩外约 53 m 处的倒虹管 6# 镇墩处设置倒虹管放空、冲沙管,水流经原溪沟排入下游水库中。

倒虹管与绵西高速公路大桥位置布置参数见表 1。

新建倒虹管长 409.052 m,进、出口段长 30.094 m,最大承压水头 328 kPa。倒虹管为地

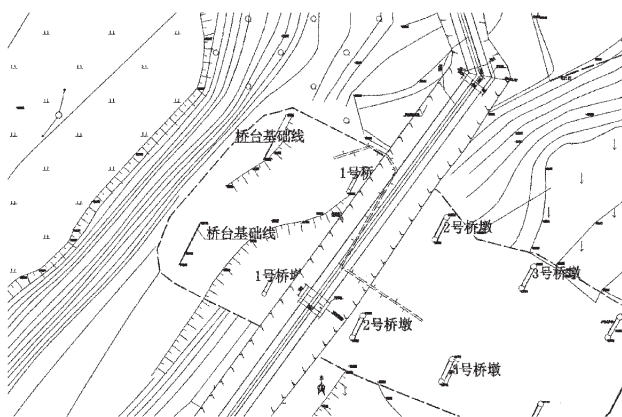


图 1 倒虹管与桥梁交叉布置图

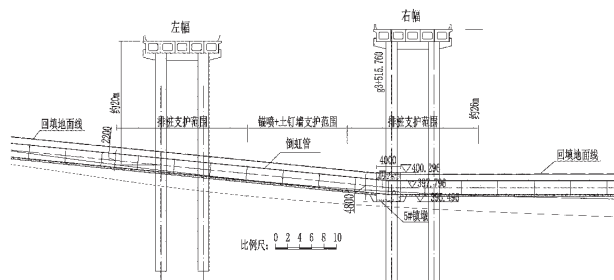


图 2 倒虹管穿纵剖面图

表 1 倒虹管与绵西高速大桥位置布置参数 m

项目名称	左幅		右幅	
	1# 桥墩	2# 桥墩	1# 桥墩	2# 桥墩
桥墩处地面高程	406.9	396.5	400.9	398.4
倒虹管中心距桥墩距离	11.5	18.5	15.4	14.6
倒虹管基底高程	399.6		395.5	
基底开挖宽度	7.6		9.2	
开挖建基面底线距桥墩距离	7.7	14.7	10.8	10
开挖边坡高度	6.2	1	5	3.5

下埋管形式,双管布置,管径 2.2 m,中心间距 4.0 m,基底开挖宽度为 7.6 m,局部 9.2 m。下设混凝土鞍座,管道安装完后回填至原地面。

3 倒虹管施工方案及要点

3.1 施工方案

该工程施工主要为管道及镇墩涉及土石方开挖及回填、后头坪倒虹管 4#、5# 镇墩及玻璃钢夹砂管管道安装。工程开挖方量约 3 000 m^3 ,镇墩为现浇混凝土施工。其中施工难点和要点为桩基保护施工、土石方开挖施工、边坡锚喷土钉墙施工。为保证高速路通行安全,在施工前制作彩钢防护挡板包裹下穿段桥墩,避免机械与现有桥墩发生碰撞,并设置相关警示标志,专人值守。

施工作业全部在桥下进行,不影响上部高速

路正常安全通行。玻璃钢夹砂双排管横穿绵西高速大石沟大桥第一跨南北两侧 1#、2# 桥墩，需在两桥墩间进行机械开挖作业，距离 1# 桥墩最近距离为 7.5 m，距离 2# 墩最近距离为 9.5 m。

由于基坑开挖线距桩基边缘小于 4 倍桩径，高速公路范围内基础开挖采用对桥梁桩基保护性方式开挖，其中桥墩内侧各 20 m 范围采用排桩保护，其余地段采用土钉墙保护开挖。高速公路范围以外采用大开挖方式开挖，开挖坡度岩石为 1:0.5，覆盖层为 1:1.25。倒虹管施工完成后及时回填基坑。

3.2 桩基保护施工

支护段地层自上而下分别为粉质黏土、强风化砂岩，中风化砂岩，其中粉质黏土钻探揭露厚度 1.5 m，强风化砂层层顶埋深为 1.5~5.0 m，中风化砂岩层为青灰色，局部呈灰紫色，砂质结构，中厚层状构造，钙质胶结为主，岩质较软，岩体较完整，层顶埋深为 5.0~16.0 m。

综合工程地质情况及周边环境条件，右侧 1# 桥墩采用排桩支挡保护，排桩间及左侧边坡采用“放坡+锚喷+土钉墙支护”，支护范围如图 3 所示。共设 38 根保护桩，采用钢筋混凝土桩，桩身直径 1.0 m，桩长 10.5 m，嵌固段长 5.0 m，桩中心间距 1.2 m，采用 C30 混凝土浇筑。桩身主筋为 22 根 $\Phi 28$ mm HRB400 钢筋，箍筋间距 0.1 m，为 $\Phi 12$ mm HPB300 钢筋。经理正岩土分析软件计算，该方案可确保基坑边坡稳定安全。

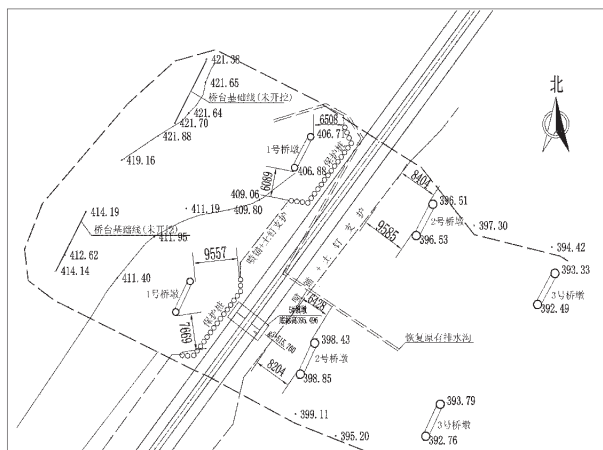


图 3 桩基保护平面布置图

3.3 基坑土石方开挖及喷锚施工

3.3.1 基坑土石方开挖

开挖采用液压破碎机、挖掘机和装载机等施

工机械联合作业。中风化砂岩采用 1:0.5 坡比，强风化砂岩采用 1:0.75 坡比进行放坡。基坑开挖采用分层、分段的方式从上至下进行，横向采取分块挖掘，根据锚管的排列间距确定每次挖掘高度。开挖与喷锚网支护同步进行，确保挖掘区域得到及时支撑。

3.3.2 挂网锚喷施工

锚杆施工采用先注浆后插杆件的施工工艺。锚杆选用长 4 m $\Phi 25$ mm 的钢筋，布置为 1.5 m 间距的梅花形排列。在边坡表面，需精确标定锚杆孔位并进行钻孔作业，钻孔深度 3.5 m，孔径 91 mm，钻孔角度 15°。

钢筋网片网格尺寸 15 cm×15 cm，采用 $\Phi 10$ mm 的钢筋，预先埋设标志，随后铺设钢筋网片。网片与锚杆牢固连接，连接点处设置交叉布置 $\Phi 16$ 的连接筋。网片后侧设置反滤层，网面布置直径为 50 mm 的排水孔，间距 3.0 m×3.0 m，网片的底部高出地面线 200 mm。

边坡表面采用喷射细石混凝土防护，喷射层厚度为 10 cm，混凝土强度等级为 C20。喷射作业采用湿式喷射机进行，通过移动式电动空压机提供压缩空气。喷射混凝土按由下至上的顺序分段、分片进行，施工前，对机械设备、供水、供风和电路系统进行检查，确保所有系统均符合要求。

3.3.3 土钉墙施工

边坡挂网锚喷完成后按土钉布置位置进行土钉施工。坡面设置 3 排预成孔土钉，采用根管钻进成孔，孔径 91 mm，孔深 3.5 m。土钉采用 HRB400 $\Phi 25$ 钢筋，长 4 m，土钉锚固采用 2 $\Phi 16$ 的螺纹钢作为联系筋。成孔置入土钉后，孔内压入 0.5 水灰比的纯水泥浆，注浆压力 0.5~1.0 MPa。坡面披挂 8@250 双向钢筋网片，喷射 8 cm 厚 C20 混凝土护面，截水沟外地表采用 10 cm 厚 C15 混凝土封闭。

3.4 基坑监测方案

该工程土方开挖基坑监测应由建设方委托具有相应资质的第三方对基坑实施第三方监测。监测工程布置：采用精密水准仪和全站仪，设专门的监测人员，每天对基坑开挖施工实施动态监测。在桥墩桩基处的稳定位置设置 4 个基准监测点，在基坑顶面设 6 个监测点；水平及垂直位移采用极坐标法。

在基坑施工阶段及后续使用期间,应每日指派专职人员执行基坑的巡查工作。此外,在支护结构施工、基坑挖掘以及支护结构使用期间,也应每日指派专职人员对支护结构周边环境进行实时监控。巡查内容包括:基坑外部地面及道路的裂缝和沉降情况;基坑周边桩基的沉降监测;挡土构件的表面裂缝情况;以及基坑侧壁的渗水和漏水现象。巡查人员应使用专业监测工具和方法,同时应具备相应的专业知识和技能,以便发现异常情况时能迅速做出判断和响应。

3.5 排水沟恢复方案

施工活动中横穿绵西高速大石沟大桥,经现场查看,将破坏高速原有排水沟,采用设置截排水沟和完善排水系统等措施,将破坏的排水沟重新埋设混凝土管,同时保证车辆通行及排水通畅,防止对在在建工程造成冲刷;下穿段计划安排最晚施工,管道安装完成后及时对管道沟进行回填,按照原有高速排水沟尺寸进行恢复,新建排水沟与永久性排水设施相连接,避免引起淤积和冲刷,防止水土流失。

3.6 倒虹管施工对桥梁安全影响分析

倒虹管跨越大石沟大桥埋深较浅,覆盖层不厚,对桥墩的侧向土压力影响不大。采用桩基保护方案开挖方式后基坑开挖线距桩基边缘大于4倍桩径的安全要求。倒虹管轴线高程距桥面约20~25 m,施工安装作业空间较大。施工时土石方开挖应禁止放炮,土方不得堆放在两侧对桥墩造成测压,采取防止吊装触碰桥墩、桥面措施,安排专人负责安全,安装后尽快回填处理,恢复原地

貌。施工结束后恢复原地貌,基本不改变桥墩所处的地理环境,运行期不会对大桥的安全造成影响。运行期应加强倒虹管的巡视、检测,确保倒虹管、桥梁的安全运行。

4 结语

在复杂工程环境中,倒虹吸技术需要综合考虑地质条件、施工技术、环境保护等多方面因素。文章以后头坪隧洞与绵西高速交叉工程为例,基于实际施工条件,通过对倒虹管的布置、施工方案及施工中的关键技术要点进行分析,提出了一套切实可行的施工技术路线,探究了倒虹吸技术在隧洞与公路交叉工程中解决工程冲突问题的有效性,为类似工程提供了参考。随着工程科技的不断革新与发展,倒虹吸技术将在更广阔的应用领域发挥其潜力,为水利工程的构建与维护提供更加强有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 吴勇信,罗宝鑫,张文全,等.基于大型振动台试验的拱式倒虹吸抗震性能[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(7):1193-1202.
- [2] 魏周会,雷克刚,王军进,等.大落差倒虹吸管底部设置分水口的消能方案研究[J].中国农村水利水电,2022(11):113-117.
- [3] 张倩倩.大型预应力倒虹吸结构施工病害与补强技术研究[D].郑州:华北水利水电大学,2018.
- [4] 张帅康,韩雷,叶昆河,等.大流量倒虹吸水力特性研究[J].水电能源科学,2024,42(8):114-118.
- [5] 陈进华,林华.滇中引水工程九道河倒虹吸工程建筑物布置[J].水利技术监督,2022(9):224-230.

(责任编辑 崔春梅)

《山东水利》来稿须知

1. 本刊已被中国知网、万方数据库等全文收录,其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付(稿酬已在论文发表费中扣除)。凡向本刊投稿,即表明全体作者同意本刊发布的来稿须知和加入“知网”“万方”等数据库的声明。如作者不同意文章被收录,请在来稿时注明,本刊将作适当处理。

2. 来稿字数一般为4000~5000字,题名不超过20个字。来稿须将第一作者简介、通讯地址,所有作者的工作单位、邮政编码填写清楚,并附200字左右的摘

要和5~8个关键词。文末须按《信息与文献 参考文献著录规则》(GB/T 7714—2015)依次注明参考文献。

3. 来稿一律不退原稿,请自留底稿。来稿如果拟被采用,本刊编辑部将发出用稿通知,在2个月内收不到用稿通知,作者可自行处理。

4. 特别声明:本刊唯一指定官方投稿路径为登录“山东省水利科学研究院”官网后点击“《山东水利》杂志在线投稿系统”

联系电话:(0531)55763595,55763398。