

浅埋暗挖渐变隧道施工关键技术与总结

钟杰

中铁建生态环境有限公司

摘要:随着城市的发展需要,地铁隧道建设越来越密集。其中,浅埋、下穿密集构筑物、变截面、复杂地质环境等工况下如何安全、优质、高效地进行地铁隧道施工成了各方关注的问题。本文将某区间典型浅埋暗挖渐变隧道为例,对超前帷幕注浆、隧道中管棚、隧道渐变断面开挖方法优化、防水工艺优化、渐变隧道二衬台车设计及施工等成套关键技术进行研究,对如何在保证施工及周边环境安全的前提下快速完成浅埋、变截面等复杂工况下的隧道施工进行总结,以供参考。

关键词:浅埋暗挖渐变隧道; 关键技术研究; 技术总结

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.22.039

一、工程概况

(一) 设计概况

该区间段设计为矿山法施工隧道。左隧总长400m,其中渐变段长度为234m;右隧总长383m,其中渐变段长度为120m。隧道为单洞单线及单洞双线,设计采用台阶法、CRD法和双侧壁导坑法施工,区间线间距为11.0~19.0m,隧顶埋深约12.3~57.2m。在某里程处设联络线接入临近线路车站,长约254m。河底与隧道的最小竖向净距为5.08m,覆岩厚度最小为3m。

(二) 水文情况

地表水主要为市西河河水、周边市政管道水及居民生活用水。地下水主要补给来源为大气降水、周围居民生活污水和市西河河水下渗补给,地下稳定水位平均埋深约5.4m。市西河河道宽度约32m。受季节性影响,枯水期与洪水期河水水位变化幅度为2~4m,其中枯水期水位深度为1m~1.5m。隧道下穿河流段为岩溶强发育地段,水文地质条件复杂,地层赋水性差异较大,分布不均匀,规律性差,且隧道下穿市西河段在开挖过程中可能会引起市西河河水的涌入,涌水量为 $63.4\text{m}^3/\text{d}\cdot 10\text{m}$ 洞长~ $1364.435\text{m}^3/\text{d}\cdot 10\text{m}$ 洞长。

(三) 地质情况

(1) 河沙:灰黑色、灰白色,饱和,松散~稍密;由河流搬运堆积而成,砂质混杂,颗粒不均,沙石成分以石灰岩、白云岩、砂岩为主,其余为细砂、黏性土充填。层厚1.6~2.3m,平均厚度1.95m。

(2) 石灰岩:灰色、浅灰色,厚层块状,细~中晶结构,时夹溶塌角砾岩。岩芯敲击声较脆,节理较发育,多呈闭合状,少数张开状节理为方解石细脉胶结,节理面铁质浸染,胶结程度一般,厚度较大,分布较连续、均匀,岩芯偶见蜂窝状溶孔,呈柱状、少量长柱状,局部呈沙状、碎块状。岩块饱和单轴抗压强度标准值 34.4MPa ,为较硬岩。

(3) 岩溶强发育:主要以溶洞、溶槽、岩溶管

道、间断性裂隙为主,钻孔遇溶率为12%。

二、工艺流程及关键施工技术

(一) 工艺流程

施工准备→测量放样→帷幕注浆→挑高中管棚工作室→中管棚施工→超前小导管施工→渐变段挑高开挖→立架喷浆→仰拱初支封闭成环→防水施工→仰拱施工→二衬施工。

(二) 关键施工技术

1. 帷幕注浆关键施工技术

为彻底解决隧道下穿市西河时存在的渗透风险,经现场研究与测试,提出了超前帷幕注浆施工技术,每循环注浆设计长度为30m,开挖25m,预留5m止浆岩盘。每循环共设6环注浆孔,每环注浆孔间距60cm,共91个注浆孔,注浆孔开孔直径不小于108mm,终孔直径不小于90mm。

通过对浆液充填率、注浆量、浆液配合比、胶凝时间、浆液扩散半径、注浆终压等指标经常测试,建立了适用于本项目的注浆参数:液浆水灰比1:1、注浆压力1.5~2MPa、注浆时间不小于15min、注浆量不小于设计注浆量的80%,大幅度提升了帷幕注浆的工作效率。

2. 中管棚及工作室关键施工技术

(1) 中管棚工作室

对穿越线路上方宾馆、酒店、地下商场、地下人行通道总长共计272m段增设中管棚加强超前支护。中管棚工作室位于上台阶范围,纵向长度为3.0m,渐变段总挑高30cm(初支净空、不含开挖),在端头施工中管棚。

(2) 中管棚施工

中管棚单根长9m,搭接2m,采用 $\Phi 76$ 热轧无缝钢管制成。管棚注浆孔孔径8~12mm,孔眼间距200mm,呈梅花型布置,前端加工成锥形。尾部长度的不小于1500mm,作为不钻孔的止浆段,第一节入孔管头焊成圆锥形,便于入孔。注浆浆液采用水灰比1:1单液浆,注浆压力为0.5~1.0MPa。

3. 隧道渐变断面开挖关键施工技术

(1) 小断面渐变至大断面隧道开挖施工

隧道左线渐变段,断面由 39m^2 渐变至 143m^2 。在完成中管棚、超前小导管等超前支护措施后,提前3榀拱架间距进行扩挖,每榀扩挖宽度为前后两个断面宽度之差的三分之一,开挖完成后及时立架、喷浆支护。由于悬臂掘进机最高掘进高度为4.2m左右,小断面掘进至扩大断面时需采用支垫隧渣的方式抬高掘进平台。

隧道右线渐变段,断面由 39m^2 突变至 143m^2 。通过原设计断面从P断面高度以13.9%坡度向上逐榀挑高至N断面高度,挑高高度为2.5m。扩挖段拱架型钢由I18调整为I22b,间距为50cm。挑高段仍按照设计要求施工中管棚($\Phi 76\times 4.5\text{mm}$ 、长度9m、搭接不少于2m、拱部 150° 设置、环向间距40cm、超前小导管和中管棚外插

角以15°)。系统锚杆环×纵间距为1m×1m,并预留30cm长焊接接头;其他初期支护参数依照设计图纸。

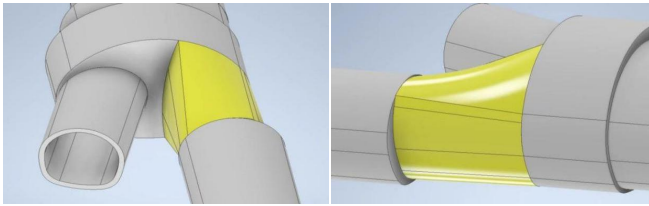


图1 P断面逐步挑顶至N断面模型图(黄色部分)

N断面接头位置端头墙施工完毕并达到设计强度后,扩挖位置利用轻质混凝土进行泵送回填。

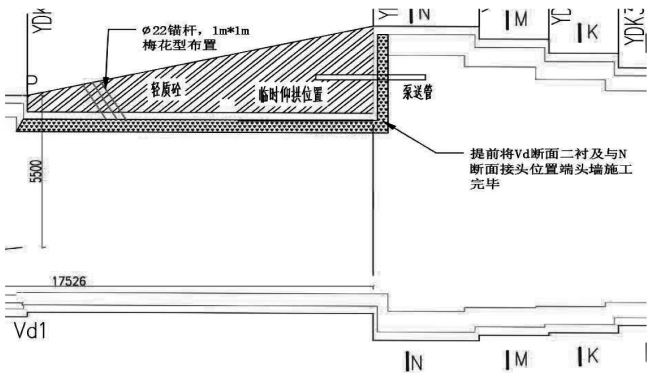


图2 隧道渐变断面编号及轻质混凝土回填示意图

(2) 大断面突变为小断面隧道开挖施工

隧道联络线接入临近线路车站时,此处由大断面(N断面,面积143m²)分出两个等断面小净距交叉洞室(面积39m²),两个等断面交叉洞室小净距段长达55m,两个交叉洞室中岩柱最窄处宽度仅1m。小净距交叉洞室距离桥梁基础最小距离为5m,施工过程带来的空间效应叠加极易危及地面构筑物及洞内人员的安全。通过采取“小净距岩体+交叉洞室初支一体化固结”的方法进行施工。

施工工艺流程:端头墙加固封闭→先行洞中管棚及双排超前小导管施工→先行洞开洞门及支护封闭→隧间中岩柱注浆加固→先行洞施工30m→后行洞施工(工序同先行洞)。

①端头墙加固封闭:在端头墙位置打设Φ22砂浆锚杆,长3m、间距2m×2m梅花型布置。端头墙外立面布设双向Φ22@50cm钢筋层,Φ22钢筋层与砂浆锚杆连接牢固,最后喷射10cm厚C25喷射砼进行封闭。

②先行洞开洞门施工:中管棚及双排超前小导管施作完成后,在洞门位置密立三榀I18钢架、间距25cm。在拱脚上20cm施作锁脚锚管,将钢架与围岩连成整体,锁脚锚管长度根据隧道中岩柱宽度确定,锁脚锚管采用Φ42×3.5mm注浆钢花管,每榀钢架设置16根,施作角度向下插20°,端部采用Φ22“L”型钢筋与钢架焊接牢固。锚管注浆采用单液浆,水灰比1:1~2:1,注浆压力0.5~1.0MPa。其余支护参数按设计要求施工。

④隧道中岩柱加固:待先行洞中岩柱侧壁初期支护喷射砼达到设计强度后,在靠后行洞一侧打设注浆孔,

孔径5cm,间距75×75cm梅花型布置,深度以不打穿后行洞为宜。孔内插入Φ42×3.5mm钢花管进行注浆,注浆压力0.5~1MPa。浆液采用双液浆,水灰比1:1,水泥浆:水玻璃(体积比)为1:0.6~1:1,浆液扩散半径不小于0.8m。

⑤后行洞施工:待先、后行洞开挖掌子面距离错开30m以上,且中岩柱影响范围内的先行洞初支封闭成环施作完成后,开始后行洞施工,后行洞施工工序同先行洞。

4. 渐变段大断面仰拱关键施工技术

针对区间K、M、N断面采用CRD法施工,隧道中竖向中支撑连接初支底部影响仰拱防水板铺设,因断面特殊土工布及防水板在该范围防水施工不能按常规铺设方式铺设,为优化工艺达到防水效果,针对K、M、N断面仰拱防水采取以下工法优化:

(1) K、M、N断面仰拱土工布及防水板纵向铺设放弃原环向布设方式,并预留中支撑底部型钢位置,土工布及防水板紧贴工字钢,按“工”字型预留。

(2) 将遇水膨胀聚氨酯密封胶挤压在型钢周围,单根型钢周围不少于4根,安装过程中严禁遇水。

(3) 遇水膨胀聚氨酯密封胶涂抹后立即安装遇水膨胀止水条,沿型钢“工”字型环绕安装,各转弯点用长水泥钉固定并预留止水条膨胀量,安装过程中严禁遇水。

(4) 基底防水板中支撑型钢上水平安装9mm厚钢板止水片(安装高度K断面基底防水板上32.5cm、M断面基底防水板上35cm、N断面基底防水板上37.5cm,根据不同衬砌断面厚度设置,保证止水片居中布设),安装前止水钢板应切割出“工”字型分为两片,止水钢板与型钢间应满焊无空隙。

(5) 在中支撑型钢四周预埋Φ42注浆管采用连接筋焊接固定在型钢上,预埋高度K、M断面为2.0m、N断面为2.2m(预埋高度根据不同衬砌断面的厚度确定)。

(4) 仰拱防水层施作完毕后浇筑5cm厚C20细石混凝土保护层,防止钢筋施工作业破坏防水板,中支撑底部预留40cm×40cm范围不铺设保护层,施工过程中严禁水泥浆流向遇水膨胀止水条。

5. 连续渐变隧道二衬关键施工技术

针对连续渐变隧道各断面长度小、变化多、变化复杂的特点,通过台车、环型型钢支撑架、支撑杆单元模块化组装施工,对不同断面灵活组装调配,达到高效流水施工作业效果。

施工工艺流程:施工准备→拼装台车的主台架与副台架(根据断面需要组合使用)→利用台车铺设防水层、绑扎钢筋→安装环型支撑工字钢→安装2015型号钢模→安装固定支撑杆模块→验收→浇筑混凝土。

(1) 施工准备:待仰拱达到设计强度,按台车图纸定出各组合台架的安装位置,防止侧偏。

(2) 拼装台车的主台架与副台架模块:主台架利用I40与I20工字钢加工而成,长度9m,净宽4.3m,净高4m,主台架两侧底部采用单轮机构行走驱动装置,在P43钢轨上行走速度5m/min。副台架共计3个,采用I18

加工而成，宽度1.51m，高度3.3m。主台架与副台架通过螺栓连接，台架拼装段在初支施工时预埋 $\Phi 32$ 吊钩，吊钩与钢架焊接成整体，用以安置葫芦及吊装骨架。在区间25m范围人工铺设枕木和钢轨，中线和轨道的相对位置准确无误后，用挖掘机配合葫芦把台车各个台架模块的主骨架和次骨架架立起来，保证骨架之间连接牢固。

(3) 安装环型型钢支撑架模块及钢模模块：二衬防水板与钢筋施工完毕后，立环型型钢支撑架模块。环型型钢支撑架模块采用I18工字钢根据不同断面内弧度弯制而成，钢架各单元之间通过连接钢板采用M24螺栓连接，节点不能设置在拱顶。每1.5m安装一道，与台车侧边立柱模数相匹配。环型工字钢支撑架安装完毕后，在其外侧沿着弧度满铺2015型号钢模（每块20cm宽、1.5m长、2cm厚），钢模之间利用卡扣扣紧。

(4) 固定支撑杆模块安装：固定支撑杆采用 $\Phi 76 \times 4.5$ mm钢管，杆件单元分为2m、1.5m、1m、0.3m。组成支撑杆模块分为两部分：与台车模块相接的可伸缩转动接头、连接杆单元、与环型支撑架模块相接的接头。

杆件单元两端与 $100 \times 100 \times 20$ mm钢板进行满焊连接，钢板四周预留M25螺栓孔，便于不同杆件单元组装连接。M25螺栓需进行一正一反连接，相邻杆件单元接头不可留在同一平面位置。

台车位置接头采用可转动伸缩接头，转动接头部分采用3cm厚钢板焊接在台架工字钢上，活动转头与伸缩杆通过直径4cm螺栓做可靠连接，伸缩杆最大可调整距离为20cm。伸缩杆端头与支撑杆单元进行连接。环型型钢支撑架与支撑杆接头满焊连接。

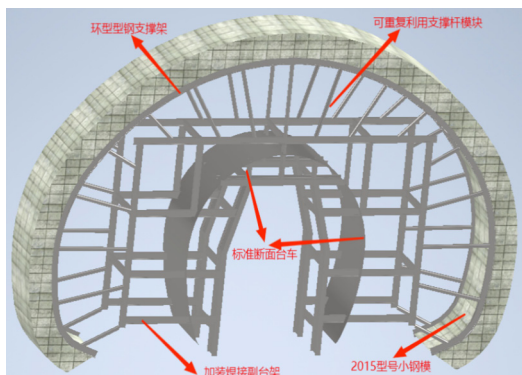


图3 新型模块化二衬台车模型图

(5) 验收及混凝土浇筑：台车安装完毕后，各模块之间采用螺栓连接和焊接部分需严格检查。螺栓应全部上齐拧紧，接头缝隙可采用薄钢板塞密实；采用焊接连接时，对接环向焊缝应满焊，且应在接头处增设加强钢板焊接补强。支撑杆件应顺直，不得沿纵向偏心受压。混凝土浇筑从边墙到拱顶依次浇筑，控制浇筑速度，但应在上层混凝土初凝前浇筑下一层混凝土。混凝土浇筑过程中应对支撑体系进行监控量测，并设置醒目标识观察支撑杆件是否存在下滑、变形。

三、实施效果

(1) 隧道洞身收敛监测效果

通过对隧道洞身1个月收敛进行监测及分析，得到本月净空收敛监测点累计最大位置处于LDK0+166JKJ-01，累计值为4.89mm，月变化量为2.04mm，月变形速率为0.08mm/d。

(2) 隧道洞身拱顶沉降监测效果

通过对隧道洞身1个月的拱顶沉降进行监测及分析，得到本月拱顶下沉监测点累计最大编号为LDK0+160GDC-01，累计值为12.80mm，本月变化量为-1.60mm，本月变形速率为-0.10mm/d。

(3) 隧道洞外地表监测效果

地表沉降监测点累计最大编号为DBC03-09，累计值为-11.43mm，月变化量为0.86mm，月变形速率为0.03mm/d。

(4) 隧道洞外河道挡墙沉降监测效果

挡墙的沉降监测点累计最大编号为HDC-22，累计值为11.20mm，月变化量为2.40mm，月变形速率为0.08mm/d。

(5) 隧道洞外河道挡墙水平位移监测效果

河道挡墙水平位移监测点累计最大编号为ZQS02-11，累计值为-18.10mm，月变化量为-2.20mm，月变形速率为-0.07mm/d。

以上监测值均符合规范要求，隧道内外均未发生任何异常。

结束语

本文研究集成了超前帷幕注浆、隧道中管棚、隧道渐变断面开挖方法优化、渐变隧道二衬设计及施工等成套技术，保证了建造全过程安全，各项监测指标稳定无异常，在保证安全的同时，缩短了工期，降低了资源投入，节约了成本。得出以下结论：

(1) 建立了高渗水环境下的隧道超前帷幕注浆参数，实现了不良地层的加固处理，避免了隧道开挖渗水风险，保证了隧道下穿河流时的安全。

(2) 优化了变断面隧道施工工法，建立了小断面渐变至大断面、小断面突变至大断面、大断面渐变至小断面等成套施工技术，动态优化支护措施、逐榀扩挖、换拱、再回填轻质混凝土的方法，确保开挖及支护工作安全高效。

(3) 研发了多断面隧道新型模块化二衬台车，满足了一车多断面使用，提升了衬砌台车的周转效率；解决了变断面隧道二衬利用传统的满堂支架施工方法效率低、多工序同时作业困难的难题；同步保证了混凝土衬砌的质量、线型、外观，实现了品质安全的目标。

(4) 通过关键技术的组合，达到了在保证施工及周边环境安全的前提下快速完成浅埋、变截面等复杂工况下的隧道施工的目的。

参考文献

[1] 刘德强, 宋战平. 岩溶隧道帷幕注浆止水技术及施工[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(3): 38-42.
 [2] 张旭东. 岩溶隧道帷幕注浆施工技术标准的探讨[J]. 铁道标准设计, 2005(1): 15-17.
 [3] 王新年. 隧洞预注浆技术及其设计方法介绍[J]. 山西水利科技, 1995(2).