

水平旋喷桩超前支护配合双层初期支护的隧道开挖施工技术

王 丰 姚启文

中冶建工集团有限公司 重庆 400084

摘 要: 针对超浅埋高密度粉砂质围岩隧道施工中围岩自稳能力差、传统超前预支护方法浆液扩散效果不佳、单层初期支护强度与刚度不足等技术难题,提出了水平旋喷桩超前支护配合双层初期支护的隧道开挖施工技术。该技术在掌子面开挖前采用高压水平旋喷桩形成拱顶及周边封闭围护结构,有效加固地层并防止涌砂坍塌;开挖阶段通过对双侧壁导坑法工序进行优化,采用双层初期支护体系显著增强了支护结构的强度与刚度。工程实践表明,该技术可有效控制洞顶沉降,提高施工安全性,缩短工期并降低造价,在超浅埋、大断面、小净距粉砂质围岩隧道施工中具有广阔的推广应用前景。

关键词: 水平旋喷桩;超前支护;双层初期支护;粉砂质围岩;隧道施工

引言

随着国内基础设施建设的快速发展,隧道工程在公路、铁路建设中所占比重日益增加。隧道施工中常需穿越各类不良地质体,在粉砂质岩层中,传统的超前大管棚、超前小导管注浆、地表注浆等预支护方法因浆液扩散能力有限,难以对围岩起到有效的加固作用。而当隧道面临大跨径、超浅埋条件时,单层初期支护的强度和刚度往往不足,难以保证开挖支护过程的安全。如何在软弱围岩隧道施工中解决围岩自稳能力差及初支强度刚度不足的问题,成为隧道工程界的研究重点。

水平旋喷桩作为一种高效的超前地层加固技术,能够在隧道开挖前形成连续止水帷幕与承载拱,显著提升地层稳定性。双层初期支护技术则通过增加支护层次有效提高初支结构的承载能力。研究团队针对超浅埋粉砂质围岩的特点,将高压水平旋喷桩超前支护与双层初期支护相结合,形成了系统的隧道开挖施工工艺。该工艺已成功应用于银川滨河新区长河大街延伸项目隧道工程(下穿明长城)取得了显著的经济效益和社会效益。

1 技术特点与工艺原理

1.1 核心技术特点

本技术在软弱围岩隧道施工中具有以下五个显著特点。其一,围岩加固效果优异。在粉砂质围岩中,水平旋喷桩超前支护相较于超前小导管注浆等传统工艺,能更有效地在围岩中形成一层具有足够强度的封闭围护结构,大幅提升围岩自稳能力。其二,支护结构安全可靠。采用双层初期支护有效增加了初期支护的强度

与刚度,确保二次衬砌施做前结构的安全。研究表明,相较于单层初期支护,双层初期支护结构的主应力最大值可减少约48%。其三,施工进度快。通过对双侧壁导坑法工序进行优化,实现了循环快、步距短的目标,达到了早封闭、早成环的效果。其四,经济性好。通过保留中下导坑核心土减少了临时支撑的钢材投入,同时提前施工二层初支减少了对下导坑的重复开挖回填。其五,沉降控制效果好。对于粉砂质、泥质围岩的加固能力强,在控制洞顶沉降方面效果理想^[1]。

1.2 工艺原理

本工法的核心技术原理包含超前加固与开挖支护两个层面。

在超前加固层面,掌子面开挖前采用水平定向钻机以一定外插角打设水平孔,钻至设计深度后,高压注浆泵以大于35MPa的压力将制备好的浆液通过喷嘴射出,借助高压喷射流体的冲击力切削土体。钻杆以一定转速旋转并缓慢外拔,使土体与浆液充分搅拌混合,凝结硬化后形成直径均匀、具有一定强度的桩体。当旋喷桩相互咬合后,在隧道拱顶及周边形成封闭的围护结构,起到防流砂、防渗透、抗滑移的作用,从而保证隧道开挖支护安全。

在开挖支护层面,采用短进尺人工配合机械的方式开挖掌子面并及时支护。为减小围岩扰动、尽早成环,对双侧壁导坑法支护工序进行系统优化:先使左导坑优先成环封闭,再使右侧导坑成环封闭;在左右导坑相对成环后开挖中上导坑并施做外层初支,随后拆除临时

支护并施做内层初支,最后开挖中下导坑并施做仰拱初支。通过双层初支体系达到稳固掌子面、提高初支强度和刚度的目的。

2 施工工艺流程

2.1 施工准备与试验段设置

正式施工前需完成设计方案确定、施工参数优化和掌子面封闭等准备工作。以某隧道工程左侧主洞为例,全断面砂层段水平旋喷桩按隧道断面 180° 范围设置,旋喷桩直径600mm,环向间距400mm;每循环施工长度15m,前后搭接3m,有效桩长12m,每循环65根,设计外插角6%,成桩体抗压强度5.08.0MPa。注浆材料采用P.O42.5R普通硅酸盐水泥,水灰比0.81.2,为提高抗剪强度,桩内插 89×4 mm钢管进行加固。

由于围岩等级和性质不同,开挖进尺、旋喷速率、压力及水泥浆配合比均需相应调整。施工前应设置试验段确定相关参数。试验主要对拔管速度、注浆压力、水灰比三个指标进行比选,要求桩体强度能支撑上部覆土压力,桩径适中以保证桩间较好咬合。通过6根试验桩的对比试验,确定最优技术参数为:桩径600mm、桩长15m、外插角5%~7%、拔管速度15~20cm/min、注浆压力35~40MPa、钻杆转速20r/min、水灰比1:1。成桩前还需对掌子面进行网喷混凝土封闭加固(厚20cm),以防旋喷过程中掌子面受压坍塌^[2]

2.2 水平旋喷桩施工

(1) 桩位测量与钻机就位。在隧道两侧测量放线定出同一里程点和隧道轴线,于掌子面测量定出桩位并预留沉降量。钻机安装于轨道上,用水准仪校正轨顶高程,按孔位坐标用全站仪调整钻塔高度、倾角及摆角,使钻杆轴线符合外插角要求。

(2) 浆液制备与钻进成孔。水泥浆液须严格按配合比制备,用高速搅拌机连续均匀搅拌不少于3分钟,一次搅拌使用时间控制在4小时以内,浆液须经筛过滤后方可使用。钻进中采用低压低流量清水或膨润土泥浆循环液从喷嘴喷出,以冷却钻头、减少阻力、防止砂粒堵塞喷嘴。每根桩钻进时均需对钻杆外插角进行复测,确保外插角度在设计范围内。

(3) 旋喷成桩。钻孔至设计深度后开始旋喷作业,先原位旋喷0.5min以保证端头成桩质量,再以20r/min转速后退。旋喷前5m拔管速度保持15~18cm/min,之后调整为20cm/min。需卸管时应先停止回抽,旋转5圈停止送浆后再卸,恢复给浆后先旋转5圈再回抽。每孔旋喷至距孔口0.5m时停止,退出钻头后立即用木塞包土布

堵住孔口。漏浆较多时需采取补充注浆措施。

(4) 插管加固。旋喷完成后封堵孔口,等待30~60分钟待孔内水泥浆泌水完成,再将 89×4 mm钢管沿原桩孔中线用旋喷钻机辅助人工顶入桩内,以提高桩体抗剪强度。

2.3 双层初期支护施工

(1) 开挖轮廓测量与断面检查。初支施工前对轮廓线进行定位,标出外层初支位置并检查超欠挖情况。着重检查旋喷桩桩体咬合质量,空隙较大时需补桩,桩体侵限需剔除,确认桩体无裂纹、断裂、完整性良好后方可进行后续施工。

(2) 左侧导坑开挖及支护。以隧道起拱线为上下导坑分界面,先开挖左侧上导坑(每循环进尺0.5~1m),施做左侧拱墙外层初期支护和右侧墙临时支护;再开挖左侧下导坑(每循环进尺1.5~2m),施做左侧边墙外层初期支护和仰拱外层初期支护。上下导坑掌子面间距控制在3~5m之内。

(3) 右侧导坑开挖及支护。对称开挖右侧上导坑和右侧下导坑,分别施做相应外层初期支护和临时支护。右侧上下导坑掌子面间距3~5m,左右上导坑掌子面间距2~15m。

(4) 中上导坑开挖及内层初支施做。开挖中上导坑(每循环进尺0.5~1m),施做中上拱墙外层初期支护。拆除左右侧墙临时支护后,在拆除区域施做左侧、中上及右侧拱墙内层初期支护。

(5) 中下导坑开挖及封闭成环。开挖中下导坑(每循环进尺5~8m),施做中下仰拱外层初期支护,实现全断面封闭成环。全断面初期支护闭合时间宜控制在15天左右。

3 质量与安全保证措施

3.1 质量保证

质量控制涵盖技术、材料和施工过程三个层面。技术方面,开工前由技术负责人向全体施工人员进行详细技术交底,明确设计要求、技术标准和施工参数;施工中建立严格的测量复核制度,测量资料经换手复核无误后方可用于施工,并对中线桩、水准点建立定期复测检查制度。

水平旋喷桩质量控制需重点关注钻进过程中严格控制进孔角度,机手调好角度后由现场技术员复核确认方可开钻;旋喷过程中严格按参数执行,现场技术员有权纠正不按参数施工的行为;采用18米钻杆施工以减少上

卸钻杆时间和喷嘴堵眼概率。材料控制方面,水泥须冷却后方可使用,运输堆放保持干燥,搅拌时间超过4小时的水泥浆严禁使用。

旋喷桩质量验收采用综合检测方法:单桩采用钻孔取芯、孔内成像与角度测量综合检测,通过角度计算判断桩径,通过孔内成像检测桩体均匀性;待桩体强度达到设计要求后破除掌子面封锚,检查旋喷桩咬合情况,未形成封闭围护结构时需补桩并调整旋喷参数。水平旋喷桩芯样7天无侧限抗压强度不低于5MPa^[3]。

3.2 安全保证

安全管控重点包括安全用电、机械操作和开挖作业三个方面。配电系统实行分级配电,所有电器设备及其金属外壳按规定设置可靠的接零及接地保护,施工现场用电设备按规定设置漏电保护装置。钻机、注浆泵操作严格遵守操作规程,钻机前后移动时派专人盯注意动力管路避免拉伤。高压注浆泵须全面检查清洗,安全阀安全销进行试压检验,压力表定期检查。

开挖作业中,断层破碎带等不良地质段施工前制定详细技术交底和作业指导书;加强监控量测管理,严格按规范布点并及时分析反馈;做好超前地质预报,采用超前水平钻、地质雷达等综合预报手段。施钻人员到达工作面后首先检查工作面安全状态,确认支护、拱顶稳定后方可作业。

4 工程应用与效益分析

银川滨河新区长河大街延伸项目隧道工程下穿明长城,位于银川市滨河新区,隧道横穿明长城及烽火台,生态脆弱。隧道区海拔1145.51~1176.69m,相对高差21.18m,属构造剥蚀、侵蚀堆积地貌单元。围岩等级为VI级,拱顶多为粉细砂层,开挖时极易发生涌砂。隧道采用小净距结构,由两主洞两辅洞组成,4洞并行,具有超浅埋、超小净距、超大断面、偏压的显著特点,全

长510m。

该隧道于因围岩条件差、推进困难多次更换方案,后采用本工艺技术施工后顺利推进。工法实施后,掌子面涌砂、垮塌导致的超挖大幅减少,通过将外插角从12%控制在7%以内,每12m隧道节约C20喷射混凝土46.08m³,节省费用约2.3万元。相较传统双侧壁导坑法,310m隧道共节约下导坑临时支撑工字钢1240根(4216m),节约42.4万元。

5 结语

水平旋喷桩超前支护配合双层初期支护的隧道开挖施工技术,是针对超浅埋高密度粉砂质围岩隧道施工难题提出的系统性解决方案。该技术通过高压水平旋喷桩在隧道拱顶及周边形成封闭的围护结构,有效解决了传统超前预支护方法浆液扩散能力差的问题;通过对双侧壁导坑法工序的优化和双层初期支护体系的引入,显著增强了初期支护的强度与刚度。

工程实践证明,该工法具有围岩加固效果好、支护结构安全可靠、施工进度快、经济效益显著等优势,在粉细砂层、超大断面、超浅埋、小净距隧道施工中具有广阔的应用前景,可为类似地质条件下的隧道工程提供重要参考。随着我国隧道工程向更复杂地质条件延伸,该技术的推广应用将产生更大的经济和社会效益。

参考文献

- [1] 朱安民,马进才,吕鹏.高海拔隧道浅埋段水平旋喷桩施工技术分析[J/OL].路基工程,1-6[2026-08-10].<https://doi.org/10.13379/j.issn.1003-8825.202504057>.
- [2] 陈俊龙.水平旋喷桩在风积沙隧道洞口段的应用分析[J].价值工程,2024,43(14):67-70.DOI:10.3969/j.issn.1006-4311.2024.14.020.
- [3] 张广乾,李向阳,刘先成.风积沙地层水平旋喷桩预支护技术[J].路基工程,2024(6):152-156.