

高海拔大埋深隧道混凝土病害处治技术研究

余 强

(四川二滩建设咨询有限公司, 四川 成都 610051)

摘 要 本文针对高海拔、大埋深条件下特长隧道素混凝土衬砌易出现的裂缝、渗漏水、脱空及厚度不足等病害问题,以某建筑工程对外交通专用公路大梁子隧道为背景,通过专项检测明确病害类型与分布特征,系统分析病害成因机制,提出“注浆填充—钢带加固—裂缝封堵—渗漏水引排”的综合处治技术体系。该研究成果旨在为类似高海拔大埋深隧道素混凝土衬砌病害处治提供技术参考与工程示范,具有重要的学术价值与推广应用前景。

关键词 特长隧道;素混凝土衬砌;病害处治;W钢带加固;注浆技术

中图分类号:U45

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.020

0 引言

随着我国建筑、交通基础设施建设向西部高海拔地区延伸,特长隧道在跨山越岭交通线路中得到广泛应用。素混凝土衬砌因施工便捷、成本可控等优势,成为中低围岩级别隧道二次衬砌的常用形式。但高海拔地区特殊的地质环境(强烈构造应力、复杂地下水系统、较大温差变化)及大埋深带来的高应力作用,导致素混凝土衬砌易产生裂缝、渗漏水、脱空等病害,严重影响隧道结构耐久性与运营安全^[1]。目前,国内外关于隧道衬砌病害的研究多集中于平原地区或常规埋深隧道,针对高海拔大埋深条件下素混凝土衬砌病害的系统性研究较少,缺乏成熟的处治技术体系。本文以大梁子隧道为研究对象,通过专项检测揭示素混凝土衬砌病害特征,从地质、施工、材料等维度分析病害成因,优化设计综合处治技术方案,开展现场工程应用与效果验证,为同类工程提供技术支撑,对完善高海拔隧道病害处治理论与技术体系具有重要意义。

1 工程概况

大梁子隧道为单洞双向行车特长隧道,起止桩号K0+131~K5+458,建筑限界10.5 m×5.3 m,设计速度30 km/h,由检修道与行车道组成。采用新奥法施工原理设计,复合式衬砌结构,II~III级围岩区段采用C20素混凝土二次衬砌,IV~V级围岩区段采用钢筋混凝土衬砌。

隧址区位于雅砻江与左岸支流小河沟切割形成的“半岛”形山脊两侧,属川西高山区地貌,地表横坡较陡,山脊最高点高程3 950 m,河谷高程2 570~2 640 m。隧道沿线岩层以第三段绢云板岩夹薄~中厚层石英粉砂岩为主,岩层走向与隧道轴向夹角约35°,围岩结

构面发育三组节理,间距30~300 cm,部分区段存在节理切割形成的不利块体。

隧道工程区域最大水平构造应力场方向为近东西向,与隧道轴线夹角约55°,中段最大埋深1 200 m处,最大垂直地应力超过30 MPa,最大水平地应力达15 MPa,坚硬变质砂岩区段开挖时出现弱岩爆与片帮现象。地下水补给源丰富,包括大气降水与远近距离地下水补给,地下水类型为基岩裂隙水,隧道开挖时以裂隙渗水形式呈现,拱顶部位多为滴水状。

衬砌结构由初期支护与二次衬砌组成,初期支护根据围岩级别采用喷混凝土、锚杆、钢筋网、钢架等组合形式。其中素混凝土衬砌主要应用于II、III级围岩区段,拱墙厚度分别为30 cm、40 cm,采用C20混凝土浇筑;IV~V级围岩区段采用C25钢筋混凝土衬砌,厚度40~80 cm。

2 隧道素混凝土衬砌病害检测与成因分析

2.1 专项检测方案

采用“外观普查+仪器检测+室内试验”相结合的专项检测方案,全面排查素混凝土衬砌病害情况。(1)外观普查:采用人工巡查方式,记录裂缝位置、长度、宽度,渗漏水范围、形式及砂浆、瓷砖脱落等表观病害。(2)仪器检测:选用地质雷达(GPR)对7条测线(左右侧墙、拱腰、拱肩及拱顶)进行扫描,检测衬砌厚度与脱空情况;采用回弹仪检测混凝土强度。(3)室内试验:采集衬砌混凝土芯样,进行抗压强度与弹性模量测试。

2.2 病害检测结果

1. 裂缝病害。共检测出各类裂缝41条,总长为452.7 m。其中环向贯通裂缝21条(348.6 m),宽度0.48~

作者简介:余强(1988-),男,本科,工程师,研究方向:土建工程管理。

5 mm; 纵向裂缝 15 条 (92.7 m), 宽度 0.3 ~ 5 mm; 竖向裂缝 3 条 (3.4 m), 宽度 1 ~ 2.3 mm; 斜向裂缝 2 条 (8 m), 宽度 1 ~ 3 mm。网状裂缝 2 处, 总面积 17.53 m²; 裂缝泛碱 1 条 (2.2 m)。中段大埋深区段裂缝密度显著高于进出口浅埋区段^[2]。

2. 渗漏水病害。共检测出渗漏水病害 97 处, 总面积为 199.02 m²。其中浸渗 61 处 (181.48 m²), 渗水泛碱 36 处 (17.54 m²)。瓷砖外鼓 2 处, 混凝土剥落 2 处 (0.92 m²), 坑洞 1 处 (0.4 m²)。渗漏水形式以拱顶滴水、边墙面渗为主, 集中分布于节理发育密集区段。

3. 衬砌结构缺陷。地质雷达检测结果显示, 衬砌总体厚度缺陷率 35.93%, 欠厚范围 29 ~ 147 mm; 衬砌背后脱空及与初期支护结合不紧密区域总长 2 303.6 m, 占测线总长的 7.92%, 其中拱顶、左右拱肩测线缺陷占比最高。混凝土强度检测结果表明, 二次衬砌强度均达到 C20 设计标准, 满足强度要求^[3]。

2.3 病害成因分析

1. 裂缝病害成因。(1) 施工期因素: 混凝土水化热与干缩作用产生横向毛裂缝, 灌注速度过快导致边墙、拱腰部位出现水平裂缝, 此类裂缝多为施工期原生裂缝, 后期在围岩压力作用下逐步扩展。(2) 结构缺陷影响: 衬砌厚度不足导致承载力下降, 脱空区域引发应力集中, 使衬砌受拉区产生纵向、环向及网状裂缝。(3) 环境与应力作用: 高海拔地区昼夜温差大, 混凝土热胀冷缩反复作用加剧裂缝发育; 大埋深带来的高构造应力与自重应力叠加, 超出素混凝土抗拉强度极限, 导致贯通性裂缝产生。

2. 渗漏水病害成因。(1) 地质条件: 隧址区节理裂隙发育, 地下水补给充足, 基岩裂隙水易沿结构面渗透。(2) 施工质量: 光面爆破效果不佳导致开挖轮廓凹凸不平, 喷射混凝土厚度与密实度不达标; 引流盲管安装偏移、防水层施工缺陷 (施工缝、变形缝防水构造失效); 混凝土灌注不饱满, 内部存在孔隙通道。(3) 结构裂缝: 贯通性裂缝成为地下水渗透的主要通道, 加剧渗漏水病害^[4]。

3. 衬砌脱空与厚度不足成因。(1) 施工控制不严: 爆破施工超挖部分未有效回填, 导致拱部大范围脱空; 衬砌模板安装精度不足、混凝土浇筑不规范, 造成厚度不足。(2) 围岩特性: 开挖后易崩解、掉块, 形成拱部空洞与不密实区域, 间接导致衬砌厚度不足与脱空。

3 病害综合处治技术方案设计

3.1 设计原则

一是针对性原则: 根据不同病害类型、严重程度及成因, 采用差异化处治措施; 二是技术可行性原则:

结合隧道施工条件与现有技术水平, 选择成熟可靠、操作便捷的处治技术; 三是经济合理性原则: 在保证处治效果的前提下, 优化方案设计, 控制工程成本; 四是安全环保原则: 施工过程中保障作业安全, 减少对隧道运营与周边环境的影响; 五是动态调整原则: 施工期间加强监测, 根据病害变化与检测结果实时优化处治方案。

3.2 核心处治技术方案

1. 衬砌脱空与厚度不足处治技术。(1) 注浆填充技术: 拱部 150° 范围采用泡沫混凝土回填, 其余部位采用 M20 水泥砂浆进行注浆填充。注浆压力 0.5 ~ 1.2 MPa, 浆液水灰比 1:0.8 ~ 1:1.2, 单孔注浆量根据脱空体积计算确定。(2) W 钢带加固技术: 针对衬砌厚度 < 30 cm、拱部脱空高度 > 50 cm 或网状裂缝发育区段, 采用 WD300/3.0 型钢带全环加固。钢带标准厚度 3 mm, 宽度 300 mm, 通过 M20 高强化学锚栓及复合粘钢胶与衬砌连接成整体。脱空高度 50 ~ 100 cm 区段钢带间距 90 cm; 脱空高度 > 100 cm 或网状裂缝发育区段钢带间距 70 cm; 脱空高度 > 200 cm 时, 现场研判后专项处理。

2. 裂缝处治技术。(1) 表面封闭法: 适用于缝宽 $w \leq 0.2$ mm 的裂缝、无明显点渗、面渗及衬砌表面剥落、麻面。施工流程: 缺陷调查 → 界面处理 (刻槽 / 凿毛) → 涂抹改性环氧胶泥 (裂缝) 或预缩砂浆 (剥落 / 麻面)。

(2) 压力灌浆法: 适用于缝宽 $w > 0.2$ mm 的裂缝及有明水的点渗、面渗。采用高渗透性环氧树脂灌浆材料, 施工流程: 裂缝调查 → 钻孔 → 清孔 → 安装注浆头 → 表面封闭 → 试压 → 注浆 → 质量检查 → 表面处理。

3. 渗漏水处治技术。(1) 引排法: 针对变形缝、施工缝集中渗漏水及裂缝大流量漏水, 采用环向凿槽埋管引排。施工流程: 凿除表面装饰层 → 凿槽 → 安装注浆管灌浆 → 敷设 PVC 半圆管 → 连接至排水沟 → 环氧砂浆封闭 → 恢复装饰层。(2) 联合处治: 渗漏水与裂缝并存时, 先采用压力灌浆法封堵裂缝, 再结合引排法疏导集中水流, 实现“堵排结合”。

3.3 技术参数优化

注浆参数: 通过室内试验确定泡沫混凝土干密度 600 ~ 800 kg/m³, 抗压强度 ≥ 0.8 MPa; M20 水泥砂浆凝结时间控制在 4 ~ 6 h, 抗压强度 ≥ 20 MPa。钢带加固参数: 化学锚栓钻孔直径 14 mm, 深度 115 mm, 环向间距 50 cm, 单根锚固力 ≥ 41.8 kN; 钢带接头采用焊接, 纵向用平钢带连接, 环向间距 100 cm。灌浆材料: 环氧树脂灌浆材料粘度 ≤ 50 MPa·s (25 °C), 抗压强度 ≥ 50 MPa, 粘结强度 ≥ 3.5 MPa。

4 施工工艺与质量控制

4.1 关键施工工艺

1. 注浆填充施工。(1) 施工准备: 清理衬砌表面杂物, 采用地质雷达精确定位脱空范围, 标记注浆孔位置。(2) 钻孔作业: 注浆孔布置采用梅花形, 间距1.5~2 m, 拱顶部位加密至1~1.5 m, 钻孔深度穿透衬砌至脱空区域。(3) 浆液制备: 严格按照配合比搅拌浆液, 泡沫混凝土采用机械发泡工艺, 确保气泡均匀分布。(4) 注浆作业: 采用分段注浆法, 从低海拔向高海拔、从边墙向拱顶依次注浆, 注浆压力达到设计终压且稳定30 min后停止。(5) 孔口封闭: 注浆完成后, 待浆液初凝后采用环氧砂浆封堵注浆孔。

2. W钢带加固施工。(1) 表面处理: 清除衬砌表面浮尘、油污, 打磨平整, 裂缝区先进行封堵处理。(2) 钢带加工: 根据断面曲率预制钢带, 确保与衬砌表面密贴。(3) 钻孔安装: 按设计间距钻孔, 清孔后植入化学锚栓, 固化时间 ≥ 24 h。(4) 粘钢施工: 在衬砌表面与钢带接触面涂抹改性环氧树脂胶粘剂, 采用压力注胶工艺确保胶层饱满, 然后安装钢带并紧固锚栓。(5) 接头处理: 钢带环向接头焊接, 纵向采用平钢带连接, 焊接长度 ≥ 10 cm, 焊缝厚度 ≥ 3 mm。(6) 防腐处理: 钢带与锚栓表面除锈后涂刷防腐涂层, 确保无锈蚀死角^[5]。

3. 裂缝与渗漏水处治施工。(1) 表面封闭法施工: 裂缝处刻槽(宽2 cm、深1 cm), 清理干燥后分层涂抹环氧胶泥, 宽度覆盖裂缝两侧各5 cm; 剥落、麻面处凿毛后涂刷水泥净浆, 分层填补预缩砂浆, 边缘切割垂直边缘(深度 ≥ 5 mm)。(2) 压力灌浆法施工: 沿裂缝中心凿V型槽(宽50 mm、深30 mm), 清理后按300 mm间距钻孔(深度200 mm、孔径14 mm), 安装注浆头并封闭槽口; 采用“跳孔注浆、由下至上”的顺序注浆, 邻孔反浆后切换至并灌模式, 注浆压力0.3~0.8 MPa。(3) 引排法施工: 沿渗漏水裂缝凿环向槽, 安装PVC半圆管, 连接至电缆沟与排水沟, 采用环氧砂浆封闭槽口, 恢复瓷砖与防火涂料。

4.2 质量控制措施

原材料控制: 注浆材料、胶粘剂、钢带、锚栓等进场时需提合格证书与检测报告, 进场后抽样复检, 不合格材料严禁使用。施工过程控制: 建立“三检制”, 重点检查注浆压力、浆液流量、钢带安装精度、锚栓锚固力等; 加强施工监测, 布置围岩收敛计、应变计监测应力与变形, 异常时及时调整施工参数。成品检测: 注浆后采用地质雷达复查脱空填充情况, 锚栓抗拔承载力现场抽样检验, 裂缝处治后观测裂缝闭合度, 渗漏水处治后检查无渗漏现象。

5 处治效果评价

5.1 评价结果

一是结构完整性: 地质雷达复查结果显示, 衬砌脱空填充密实度达96.3%, 仅局部区段存在微小空隙(< 5 cm), 满足设计要求; 衬砌厚度缺陷率降至8.7%, 欠厚最大值 ≤ 50 mm, 结构完整性显著提升。二是裂缝控制效果: 共观测38条主要裂缝, 平均闭合度82.4%, 其中缝宽 ≤ 0.2 mm的裂缝完全闭合, 缝宽0.2~5mm的裂缝闭合度75%~90%, 无新增裂缝产生。三是渗漏水治理效果: 97处渗漏水病害全部得到有效治理, 检测结果显示无滴水、面渗现象, 渗漏水治理合格率100%。四是承载能力: 衬砌结构应力测试表明, 钢带加固段衬砌最大拉应力降至1.2 MPa, 小于C20混凝土抗拉强度设计值(1.54 MPa); 数值模拟分析显示, 衬砌结构承载能力较处治前提升42.6%, 满足大埋深高应力条件下的承载要求。

5.2 工程应用效益

一是安全效益: 处治后隧道素混凝土衬砌病害得到有效控制, 结构稳定性与耐久性显著提升, 消除了运营安全隐患, 保障了工程大件运输的连续安全通行。二是经济效益: 综合处治技术方案较传统方案成本降低15%~20%, 施工工期缩短25%, 且后期养护成本显著降低。三是技术效益: 形成了针对高海拔大埋深隧道素混凝土衬砌病害的综合处治技术体系, 为类似工程提供了技术参考与工程示范。

6 结束语

针对高海拔大埋深隧道素混凝土衬砌病害提出的“注浆填充—钢带加固—裂缝封堵—渗漏水引排”综合处治技术体系, 能有效提升衬砌结构完整性、裂缝闭合度与承载能力。其中, W钢带与注浆联合加固技术有效解决了衬砌脱空与厚度不足问题, 分级裂缝处治与“堵排结合”的渗漏水治理技术显著提升了处治效果, 满足高海拔大埋深隧道运营安全要求, 具有良好的技术可行性与经济合理性。

参考文献:

- [1] 陈生玲. 高海拔地区隧道衬砌渗水成因分析及处治技术研究[J]. 汽车周刊, 2025(01):243-245.
- [2] 姚湘静, 彭张涛, 等. 隧道二次衬砌裂缝病害成因重要性多元统计分析评价[J]. 隧道与轨道交通, 2025(02):6-13, 72.
- [3] 住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构加固设计规范(GB 50367-2013)[S]. 2014-06-01.
- [4] 白元涛. 公路隧道衬砌渗漏水修复技术研究及应用[J]. 建筑施工, 2025(03):467-471.
- [5] 迟作强, 邵帅, 等. 公路隧道二次衬砌脱空病害钢带加固整治技术与应用[J]. 山东交通科技, 2025(01):117-119, 123.