

隧道二次衬砌混凝土施工要点及开裂病害探析

刘 勇

新疆生产建设兵团交通建设有限公司 新疆 石河子 832017

摘 要：隧道二次衬砌是保障隧道结构稳定与耐久的核心工序，混凝土开裂是施工常见质量病害，严重影响隧道运营安全与使用寿命。本文系统梳理二衬混凝土前期准备、工序施工、养护成品的标准化施工要点，分类阐述结构性、非结构性及施工缺陷型裂缝类型，从材料、工艺、环境、受力多维度剖析开裂成因，提出源头防控、动态监测、分级修复的综合技术体系，经工程验证可有效降低裂缝病害发生率，提升衬砌施工质量。

关键词：隧道二次衬砌；混凝土施工要点；开裂病害

引言：随着公路、铁路隧道工程建设规模持续扩大，二次衬砌混凝土施工质量愈发关键。受复杂围岩环境、施工工艺不规范、温湿度变化等多重因素影响，隧道二衬混凝土极易出现各类开裂病害，造成结构破损、渗水等问题，制约工程品质与运营稳定性。为有效解决该施工难题，规范二衬施工流程、精准防控裂缝病害，本文结合隧道施工实际，系统总结标准化施工要点，深度探析开裂病害成因，并制定科学可行的防控与修复技术方案。

1 隧道二次衬砌混凝土标准化施工要点

1.1 施工前期准备质量控制要点

(1) 原材料质量管控。水泥选用低水化热硅酸盐水泥，进场检验安定性、凝结时间及强度；砂石骨料严格控制级配与含泥量，细骨料细度模数2.3~3.0，粗骨料最大粒径不大于40mm；外加剂和掺合料须与水泥相容性良好，粉煤灰、矿渣粉按批检测细度、烧失量和活性指数，经监理见证取样合格后方可使用。(2) 混凝土配合比优化设计。根据隧道围岩等级、地下水位及侵蚀环境，以抗裂、防渗、耐久为核心目标。限制胶凝材料总用量，水胶比不大于0.45，抗渗等级不低于P8；掺入聚羧酸减水剂与适量矿物掺合料，改善和易性与体积稳定性，最终配合比须经28d抗压、抗渗及收缩性能验证。

(3) 施工设备与工作面准备。模板台车进场后校验模板平整度、接缝严密性及液压系统可靠性；振捣设备检查频率参数并备足备用件。围岩基面清除松动岩块、积渣与明水，经初支厚度及净空扫描验收合格，方可进入衬砌工序。

1.2 核心施工工序操作要点

(1) 钢筋绑扎与预埋件安装精度控制。按设计间距弹线定位，绑扎牢固且相邻接头错开不小于1.3倍搭接长度，保护层垫块呈梅花形布置，每平米不少于4块；预埋

件（止水带、排水管、接线盒等）固定牢靠，位置偏差控制在 $\pm 10\text{mm}$ 以内，严防浇捣中移位。(2) 混凝土运输与入模管控。采用专用搅拌运输车，途中匀速搅拌，到现场后检测坍落度，损失超出20mm时严禁二次加水；卸料前快速搅拌30s，确保均匀，入模自由倾落高度超过2m时设串筒，严防离析。(3) 分层对称浇筑工艺。两侧边墙对称分层浇筑，单层厚度控制在30~50cm，高差不大于50cm，施工间歇不超过混凝土初凝时间，防止偏压导致台车侧移或结构变形。(4) 精细化振捣施工。插入式振捣棒快插慢拔，振点间距不大于振动作用半径1.5倍，每点振捣时间15~25s，以表面泛浆、无气泡逸出为准，辅以附着式振捣，确保不漏振、不过振、不欠振^[1]。

1.3 后期养护与成品保护要点

(1) 混凝土拆模时间管控。拆模以同条件养护试件强度为依据，承受围岩压力时强度不低于8MPa，环境温度低于10℃时适当延长，侧模拆除时间根据温控防裂要求确定，避免过早拆模引发表面裂缝。(2) 保温保湿养护工艺。常温下采用喷淋，保持混凝土表面持续湿润，养护期不少于14d；低温施工时控制好水温，避免冷水直冲；高温时段安排夜间或早晚洒水，防止干缩裂缝产生。(3) 成品保护措施。拆模后及时对棱角加设护角条，洞口段设警示标志防止机械碰撞；仰拱及填充层混凝土强度未达设计值前，严禁重型车辆通行，避免过早加载破坏结构完整性。

2 隧道二次衬砌混凝土开裂病害类型及成因探析

2.1 二衬混凝土开裂病害主要类型

(1) 结构性裂缝。纵向裂缝多分布于拱腰及边墙部位，走向与隧道轴线平行，常由围岩压力不均或偏压引起；横向裂缝多出现在施工缝附近或衬砌厚度突变处，走向垂直或斜交轴线；斜向裂缝通常与剪切应力相关，呈45°左右展布，贯通性较强，对结构整体性危害较大。

(2) 非结构性裂缝。温度裂缝表现为表面龟裂或断续短裂缝,多出现在大体积混凝土浇筑后降温阶段;干缩裂缝细而浅,呈网状或平行状分布于混凝土表面,由水分蒸发过快引起;塑性收缩裂缝出现在混凝土初凝前,多位于薄板结构表面,形状不规则,深度较浅。(3) 施工缺陷型裂缝。冷缝裂缝沿分层浇筑界面呈水平带状分布,缝面常有浮浆或夹泥,是间歇超时所致;振捣不均裂缝多存在于钢筋密集区或模板角落,呈蜂窝状伴随孔洞;沉降裂缝常出现在仰拱与边墙交接处,表现为水平或阶梯状开裂,多因基础承载力不足或回填不实造成。

2.2 材料与配合比层面开裂成因

(1) 原材料性能不达标。骨料含泥量超标削弱骨料-浆体粘结面,增大干缩变形;水泥安定性不良引起体积膨胀不均匀;外加剂与胶凝材料适配性不足导致减水率波动、凝结时间异常,均易诱发早期开裂。(2) 配合比设计不合理。水胶比过大导致孔隙率增高、收缩加剧,抗拉强度不足;胶凝材料用量超标增加水化热,加剧温度裂缝风险;掺合料配比失衡改变浆体流变性能与体积稳定性,造成收缩与徐变失调^[2]。(3) 混凝土自身收缩特性。自收缩源于胶凝材料水化引起的内部自干燥效应,形成毛细管张力;干燥收缩由环境湿度梯度驱动水分迁移,产生表层拉应力;温度收缩在降温阶段因内外温差形成约束拉应力,三者叠加易超越混凝土极限拉伸值而引发开裂。

2.3 施工工艺层面开裂成因

(1) 浇筑振捣不规范。浇筑速度过快致使混凝土分层来不及沉实,气泡难以排出;分层厚度超标造成底部振捣不到位;局部漏振或过振导致密实度差异,硬化后形成应力集中源,诱发内部微裂纹扩展。(2) 施工缝、变形缝处理不当。接缝处旧混凝土面未凿毛或未清理浮浆、积渣,新老界面粘结强度不足;止水带安装偏位或焊接不严密,形成渗水通道并加剧接缝处应力集中,促使裂缝沿薄弱面延伸。(3) 模板台车施工偏差。台车定位偏移导致衬砌厚度不均,产生偏心受压;模板刚度不足在浇筑侧压下产生变形,造成混凝土表面微裂纹;脱模过早时混凝土抗拉强度不足,拆除冲击力易引发表面或浅层开裂。

2.4 环境与结构受力层面开裂成因

(1) 温湿度环境变化。隧道洞口段及浅埋段受外界气温影响显著,内外温差导致衬砌内外变形不协调,引发温度应力;洞内环境干湿交替促使混凝土反复胀缩,长期累积下产生微裂缝并逐步扩展。(2) 围岩受力变形。围岩流变或松弛压力作用于二衬,产生挤压破坏;

隧道穿越软硬不均地层时,不均匀沉降使衬砌承受附加弯剪应力,当应力超限时即出现拉伸或剪切裂缝。(3) 后期运营荷载与地下水侵蚀。车辆振动、火灾等偶发荷载引起衬砌疲劳损伤;地下水中的侵蚀性介质(硫酸盐、氯离子等)通过毛细孔渗入,与水泥水化产物发生化学反应生成膨胀性产物,导致混凝土胀裂,使既有裂缝持续扩展贯通。

3 隧道二次衬砌混凝土开裂病害防控措施与处置技术

3.1 基于源头管控的裂缝预防措施

(1) 原材料精细化管理与进场复检机制。建立合格供应商名录,每批次进场材料严格执行"先检后用"制度。水泥检测安定性、凝结时间及水化热指标;细骨料含泥量不超过3%,粗骨料含泥量不超过1%,并严控针片状含量;外加剂进行水泥适应性试验,掺合料逐批检验细度与活性指数,所有检测数据留档备查,从源头消除材料质量隐患。(2) 优化混凝土配合比,提升抗裂、抗渗、抗收缩性能。在满足强度要求前提下,采用低水胶比(不大于0.42)、适宜胶凝材料总量(不超过400kg/m³)的设计路线,掺入适量膨胀剂或纤维材料补偿收缩;通过正交试验确定最优掺合料比例,使混凝土28d收缩率控制在规范限值以内,抗渗等级提高至P10以上,显著提升体积稳定性^[3]。(3) 标准化施工流程管控。编制二衬浇筑专项作业指导书,明确分层厚度、浇筑速率、振捣参数及接缝处理标准。实行工序交接验收制度,前道工序未达标不得进入下道,尤其加强钢筋定位、预埋件固定及台车定位的复核,实现浇筑、振捣、接缝处理全工序工艺标准化。

3.2 施工全过程动态防控技术

(1) 施工期温度、应力监测。在拱顶、拱腰及边墙等关键部位布设温度传感器和混凝土应变计,自浇筑开始连续采集数据,实时掌握混凝土内部水化温升曲线和内外温差变化。设定温差预警阈值(内外温差超过25℃或降温速率大于2℃/h时报警),及时采取调整拆模时机、喷雾降温等措施,确保温度梯度与应力发展处于可控范围。(2) 差异化养护优化方案。建立基于洞内温湿度实时监测的差异化养护决策机制:常温季节(5℃~30℃)采用喷淋保湿,保持混凝土表面持续湿润,养护龄期不少于14d;低温季节(低于5℃)采用蓄热保温养护,控制养护水温不低于5℃,必要时延长养护至21d;高温季节(高于30℃)加强夜间洒水频次,避免表面水分过快蒸发,精准控制各环境下养护质量^[4]。(3) 围岩与支护结构协同变形管控。建立围岩监控量测与二衬施作联动机制,根据拱顶沉降和周边收敛实测数

据动态调整二衬施作时机,要求围岩变形速率连续5d小于0.2mm/d后方可进行二衬浇筑。同时按设计要求预留围岩变形量,在初期支护与二衬之间设置缓冲层,削弱围岩后期收敛对二衬的挤压作用,减少外部应力集中。

3.3 常见开裂病害处置修复技术

(1) 微细裂缝封闭处理技术。针对缝宽小于0.2mm的非结构性浅表裂缝,采用表面封闭法。将裂缝周边20mm范围内打磨清理干净,用丙酮擦拭干燥后,涂刷环氧树脂封闭胶,涂刷宽度不小于50mm,涂层厚度均匀,表面刮平压实,固化后打磨平整并恢复装饰面层,有效阻隔水分和有害介质侵入。(2) 中度裂缝注浆加固技术。针对缝宽0.4mm且具有一定延伸性的裂缝,采用骑缝钻孔低压注浆工艺。沿缝布置注浆孔,孔距30~50cm,孔径12~16mm,孔深为缝深的2/3。选用改性环氧树脂注浆材料,注浆压力控制在0.3~0.6MPa,由一端向另一端逐孔灌注,待相邻出浆孔返出纯浆液后停止注浆,确保浆液充分充填裂缝空隙,恢复结构整体性^[5]。

3.4 工程应用效果验证

(1) 依托实际隧道工程,应用防控与修复技术的施工方案。选取某在建高速公路隧道为应用示范段,将上述源头管控、动态监测及分级修复技术纳入施工组织设计,编制专项实施方案并组织全员技术培训与交底,明确各环节责任人,形成预防-监测-处置一体化技术体系。(2) 施工后质量检测与裂缝防控效果分析。二衬施工完成28d后,采用地质雷达对示范段进行全覆盖扫描,辅以人工裂缝普查和超声波检测。实测数据显示:示范段衬砌裂缝数量较未采取系统防控措施的对照段减少约65%,未发现宽度大于0.2mm的裂缝,修补加固区域无二次开裂和渗水现象,衬砌强度、厚度及密实度均满足设计及

规范要求。(3) 工艺优化总结与工程推广价值。实践表明,本技术体系以源头精细化管控为核心、过程动态监测为辅助、分级分类处置为保障,可显著控制二衬裂缝病害。工艺成熟、操作性强、材料来源广泛、成本增量可控,适用于不同围岩等级和施工条件下的隧道工程,对提升隧道结构耐久性和运营安全性具有重要意义,具备广泛的推广应用前景。

结束语

本文全面梳理隧道二衬混凝土全流程施工关键技术,细化各类开裂病害特征与诱发机制,构建了集事前预防、事中管控、事后修复于一体的病害治理体系。工程实践证实,标准化施工与分级处置技术可显著减少衬砌裂缝,保障结构完整性与耐久性。该技术体系实操性强、成本可控,适配各类隧道施工场景,可为同类隧道二衬施工质量管控、裂缝病害治理提供可靠的技术参考与实践借鉴。

参考文献

- [1]王浩,杨小龙,李阳.高海拔隧道衬砌收缩约束开裂机理及防开裂优化措施[J].隧道建设(中英文),2026,46(01):89-97.
- [2]周世华,覃茜,夏求林.隧洞衬砌混凝土防裂关键施工技术研究[J].水利水电技术(中英文),2025,56(S2):310-317.
- [3]程晓辉,随意,赵作周.隧道衬砌开裂力学机理与施工防控研究进展[J].工程力学,2023,40(05):154-159.
- [4]龚鸽.隧道衬砌混凝土防渗抗裂技术应用研究[J].工程技术研究,2023,8(17):123-125.
- [5]赵晓春,刘瑞敏,严帮伟.隧道二次衬砌拱顶施工缺陷及病害处置技术[J].江西建材,2024,13(02):98-101.