隧道二次衬砌混凝土裂缝成因分析与防治技术研究

谢乾坤

湖北交投建设集团 湖北 武汉 430070

【摘　要】：隧道二次衬砌是隧道核心承重与防水结构，施工及运营阶段易出现裂缝病害，严重影响结构耐久性与运营安全。本文以隧道二次衬砌混凝土裂缝为研究对象，阐述各类裂缝的分布特征与工程危害，从原材料配合比、浇筑工艺、养护措施三个施工维度系统分析裂缝成因，针对性提出材料管控、配合比优化、标准化浇筑、精细化养护等防治技术。研究表明，全过程严控施工质量可有效提升混凝土体积稳定性，抑制温度与收缩裂缝产生，可为同类隧道二衬抗裂施工提供工程参考。

【关键词】：隧道；二次衬砌；混凝土裂缝

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.003

引言

随着国内交通基础设施不断推进，隧道工程得到广泛应用，二次衬砌承担着承重、防水及保护内部通行空间的重要作用。受材料性能、现场施工条件、洞内环境约束等多重因素影响，二次衬砌混凝土开裂现象频发。裂缝的出现会破坏衬砌完整性，引发渗水、钢筋锈蚀等连锁问题，缩短隧道使用年限。实际工程中裂缝诱因繁杂，很多开裂问题都源于施工环节管控疏漏。本文分析二衬混凝土裂缝现状与施工层面的形成原因，研究对应的现场防治技术，以期减少衬砌裂缝病害，保障隧道工程施工与运营质量。

1 隧道二次衬砌混凝土裂缝现状

隧道二次衬砌承担隧道主体承重功能，兼顾防水耐久性能，工程现场这类结构易产生裂缝病害。混凝土水化热释放，水分蒸发引发材料收缩，围岩施加的外部荷载形成约束，进而形成温度、收缩、荷载与施工类裂缝。裂缝集中分布在拱顶、拱腰和边墙区域。温度裂缝走向沿纵向延展，收缩裂缝表现为表层细密网状纹路，荷载裂缝在应力集中区域生成放射或斜向纹路[1]。裂缝割裂衬砌混凝土自身完整形态，削弱材料抗拉性能，损伤隧道防水构造。地下水顺着裂隙向内渗透，加快内部钢筋锈蚀进程，对隧道运营周期内结构稳定与耐久性能构成威胁。

2 隧道二次衬砌混凝土裂缝成因分析

2.1 原材料及配合比控制不当

水泥用量偏大提升混凝土水化热释放速率，衬砌内部温度持续攀升。围岩与初期支护形成约束，产生数值可观的温度应力。骨料含泥量、针片状颗粒指标超出限定范围，混凝土抗拉能力出现衰减。水胶比取值偏离适配区间，粉煤灰类矿物掺合料配比失衡，放大塑性收缩与自收缩变形。外加剂添加比例失调，混凝土坍落度快速衰减，和易状态变差，浇筑成型后留存大量微观孔隙。结构变形受到外部限制，孔隙持续扩展，拉应力突破材料抗拉阈值，裂缝逐步萌生延展。

2.2 混凝土浇筑施工工艺不规范

分层浇筑厚度偏大，振捣作业难以覆盖全部区域，层间接触面粘结状态弱化，结构内部留存开裂风险。模板整体刚性偏弱，浇筑阶段产生形变扰动，易形成形态无规律的裂缝；钢筋保护层尺寸出现偏差，骨架位置发生偏移，构件局部受力分布出现改变[2]。混凝土入模阶段缺少温度管控，内外温差带来的影响持续扩大；拆模工序早于强度达标节点，结构体未形成充足抗变形储备即承受外部荷载。输送阶段坍落度产生损耗，混凝土成型品质降低，多项施工缺陷叠加，二衬受温度与收缩应力作用，更易生成施工引发的裂缝。

2.3 混凝土养护施工措施不完善

浇筑完成后养护管控缺失，混凝土表层水分快速散失，表层与内部产生明显湿度差值，触发塑性收缩及干燥收缩。洞内环境湿度偏低，收缩变形持续放大，衬砌被围岩、初衬限制，变形活动受到阻滞，拉应力在构件内部持续累积。温控养护措施缺位，水化热形成的内外温差得不到控制，温差超出限值生成温度裂缝。喷淋保湿作业滞后，养护时长达不到 14d 标准，混凝土早期抗拉强度发展受限，承受收缩、温度应力的性能下降，微观裂缝持续延展，逐步发展成肉眼可观测的衬砌裂缝。

3 隧道二次衬砌混凝土裂缝防治技术

3.1 严格把控原材料与优化配合比

原材料进场后必须依据现行规范完成性能检测，水泥、砂石骨料、外加剂全部检验合格，方可投入拌合生产。为缓解混凝土水化热集中释放问题，对水泥用量进行合理调控，掺入I级粉煤灰改善混凝土内部温

升状态。粗骨料优先选用连续级配碎石，严格管控骨料内泥质杂质含量，细骨料选用质地均匀的天然中砂，降低杂质对混凝土抗裂性能造成的不利影响。在配合比设计工作中，确定适宜的水胶比、砂率与外加剂掺量，保证拌合物拥有优良工作性能，满足二次衬砌泵送浇筑的施工条件。现场留置同条件养护试块，通过检测试块 7d、28d 抗压强度，跟踪掌握混凝土强度发展情况。二次衬砌抗裂施工参考配合比如表 1 所示。通过落实原材料质量管控以及配合比优化措施，提高混凝土的体积稳定性，减弱温度变形与收缩变形带来的作用，从材料源头减少衬砌开裂风险，保障二次衬砌实体施工质量[3]。

表 1 二次衬砌混凝土施工配合比参数

序号	1	2	3
水泥用量/(kg/m³)	400	390	380
粉煤灰用量/(kg/m³)	60	70	80
水胶比	0.40	0.39	0.38
砂率/%	36	35	34
外加剂掺量/%	1.0	1.1	1.2
7d 抗压强度/MPa	28.5	29.2	30.1
28d 抗压强度/MPa	38.6	39.4	40.2

3.2 规范混凝土浇筑施工工艺

浇筑作业开展前，对模板支撑体系开展检查，支架、模板接缝这类结构薄弱位置完成加固，混凝土自重与侧压力不会引发模板变形、跑模位移。钢筋骨架完成定位固定，均匀布设垫块维持 50mm 钢筋保护层，钢筋位置偏移带来的局部受力异常得到控制。分层浇筑作为现场施工手段，单层浇筑厚度维持在 80cm 以内，隧道两侧同步进料，消除模板承受单向偏压。单层浇筑结束随即开展振捣作业，划定振捣覆盖范围，混凝土内部形成密实状态，新旧混凝土接触面保持稳定结合效果。混凝土入模温度维持 25℃以内，冬季施工对拌合系统设置保温防护，拌合物出机温度适配现场施工条件。同条件养护试块实测强度作为拆模判定标准，提前拆模行为会对结构形成损伤。混凝土运输环节做好罐体防护，降低运输阶段坍落度损耗，维持入模阶段物料状态，各工序标准化管控，降低施工工艺带来的衬砌裂缝。

3.3 完善混凝土养护施工措施

二次衬砌混凝土浇筑完毕，衬砌表面及时覆盖塑料薄膜完成封闭，搭配自动喷淋装置持续养护，养护周期维持 14d 以上，减少表层混凝土直接接触洞内空气。拱顶、拱腰、边墙等受力区域埋设温度监测元件，测点设置在 50mm、150mm、250mm 深度位置，采集衬砌内部与表层温度数据，捕捉结构内外温度波动。温度差值突破施工控制阈值，冷却水管启动调控作业，管道布设间距设定 0.5m，采用 25mm 管径管材，管控冷却水温度与水流速度，削减结构内部温度应力。洞内环境同步调整，维持空间湿度水平，放缓衬砌表层水分散失，减轻干燥收缩带来的作用。温度监测、水管调温、保湿养护手段协同运用，支撑混凝土早期强度生成，提升材料耐受温度与收缩变形的性能，完成二次衬砌施工阶段裂缝主动防控。

4 结语

隧道二次衬砌混凝土裂缝的形成是材料、施工、环境多因素共同作用的结果，施工环节管控不足是诱发裂缝较为常见的原因。通过强化原材料进场检验、优化混凝土配合比、规范浇筑流程、推行精细化温控保湿养护，有助于缓解温度、收缩应力带来的开裂问题，降低衬砌出现裂缝的概率。受围岩条件、洞内环境的差异性影响，单一施工控制手段很难完全规避裂缝问题。后续研究可以结合隧道现场监测数据，探索智能化监测预警手段，不断完善适配不同地质条件的抗裂施工体系，为隧道二次衬砌裂缝防控探索更加多元、高效的技术路径。

参考文献：

[1] 张鹏,刘洋.隧道工程衬砌混凝土裂缝的原因与预防[J].科技创新与应用,2020,(19):127-128.

[2] 杨朝帅,王育江,杨睿,等.隧道二次衬砌混凝土收缩开裂机理及影响因素分析[J].混凝土,2025,(4):250-256+262.

[3] 乔建勇.隧道二衬混凝土结构裂缝成因分析及对策研究[J].中国水泥,2025,(2):99-101.