

隧道混凝土衬砌裂缝成因分析与防治技术研究

申 锐

四川川交路桥有限责任公司 四川 广汉 618300

【摘要】：混凝土衬砌为隧道工程的主要承重防护结构，衬砌裂缝是隧道施工及运营阶段最常见的质量缺陷。裂缝破坏了衬砌的完整性，使混凝土耐久性下降，还会引发渗水、风化、钢筋锈蚀等次生病害，极大地缩短了隧道的使用寿命，给行车的安全带来威胁。本文根据隧道施工经验，把衬砌裂缝基本类型划分为结构受力类、材料性能类、施工工艺类、环境条件类，并从结构受力、材料性能、施工工艺、环境条件等方面剖析裂缝产生的原因，有针对性地提出源头防控、过程控制、后期处置的综合防治技术，并通过工程应用验证技术的实际性，为同类隧道衬砌裂缝防控提供技术借鉴。

【关键词】：隧道工程；混凝土衬砌；裂缝形成原因；防治技术；结构耐久性

DOI:10.12417/2811-0528.26.14.043

1 引言

随着交通基建行业不断发展，山岭隧道、城市公路隧道、轨道交通隧道的建设规模越来越大^[1]。混凝土衬砌由于成型容易、造价低、结构稳定，因此被用在各种隧道工程中。由于地质条件、施工技术、环境温度湿度等各方面的因素影响，隧道衬砌常常会存在或多或少的裂缝，并且这些裂缝也会呈现不同的形式和状况^[2]。大多数裂缝在初期的损害较小，但是如果不及时控制和处理，会慢慢扩展并蔓延开来，破坏衬砌的防水系统，削弱结构的承载力^[3]。为了保证隧道施工质量、延长工程服役年限，系统研究衬砌裂缝的产生原因，完善优化衬砌裂缝防治技术有重大的工程实践意义。

2 隧道混凝土衬砌裂缝主要类型

根据工程外观形态和受力机理可以将隧道衬砌裂缝分为结构性裂缝和非结构性裂缝两类。结构性裂缝是由于外部荷载引起的，多发生在围岩破碎、地质应力复杂的地段，裂缝走向规律明显，裂缝宽度大、延伸性强，会对结构的承载能力造成严重影响^[4]。非结构性裂缝主要为混凝土自身变形、施工养护不善导致的表面细小裂缝，分布较散，初始不会影响结构安全，但会削弱混凝土抗渗抗冻性能，加快结构老化的进程。常见裂缝形态有纵向裂缝、环向裂缝、斜向裂缝、不规则网状裂缝等，在工程中环向收缩裂缝和纵向应力裂缝出现次数最多。

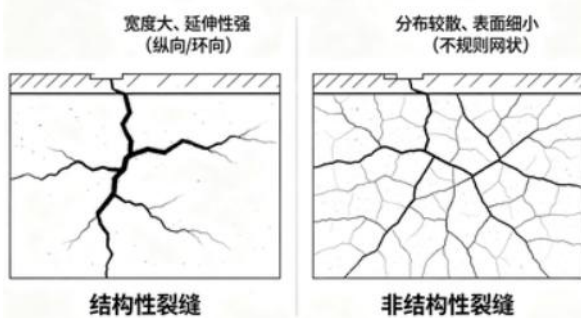


图1 裂缝图示

3 隧道混凝土衬砌裂缝成因分析

3.1 地质与结构受力因素

地质条件属于引发衬砌结构性裂缝的主要因素。隧道穿过软弱破碎岩层、风化岩层的时候，围岩整体性差，围岩应力释放不均，初期支护沉降变形时间较长，二次衬砌浇筑完毕之后，围岩残余应力持续施加在衬砌上，超过混凝土抗拉强度时就会产生裂缝。部分隧道处于偏压地形之下，山体的侧向压力在不同地方是不一样的，衬砌处在这些地方时，就会产生受集中力引起的倾斜状裂缝。地下水发育地段，地下水持续渗透侵蚀围岩，使围岩承载能力变差，静水压力增大，挤坏衬砌结构，促使裂缝产生、蔓延。地基不均匀沉降会造成衬砌受力失衡，产生贯通性纵向裂缝^[5]。

3.2 原材料与配合比因素

混凝土原材料质量不合格会成为产生非结构性裂缝的主要原因。水泥安定性不合格、强度等级和工程设计要求不符都会造成混凝土硬化时出现体积变形异常的情况。砂石骨料含水量高、粒径级配不合理都会使混凝土密实度和抗拉强度下降。拌合用水杂质过多会造成水泥水化作用减慢，混凝土内部粘结强度下降。配合比设计不合理也会加剧裂缝问题，水灰比过大容易使混凝土干缩变形率增加，水泥用量过多会造成水化热峰值提高，内外温差产生温度应力，从而导致温度裂缝。外加剂掺量控制不及时会引发混凝土凝结时间异常，进而提高开裂的几率。

3.3 施工工艺管控缺陷

施工流程不规范，是造成衬砌裂缝频繁发生的最主要原因。混凝土拌合过程中，拌合时间不足造成材料混合不均匀，各部位性能不同。运输过程中没有做好保温保湿保护，造成混凝土离析、坍落度太大等质量问题。浇筑作业时分层浇筑厚度超限，振捣频率、深度控制不合理，造成漏振、过振，混凝土内部留有气泡、空隙，结构密实度不够。施工缝处理不当，接

缝处杂物清理不彻底,新旧混凝土粘结性不好,容易产生贯通裂缝^[6]。部分施工单位为了赶工期,提前拆除模板,当混凝土强度未达到设计要求时,不能承受自身的荷载和外部的压力而产生变形开裂。

3.4 养护与环境气候因素

混凝土浇筑完成后养护工作是决定衬砌成型质量的环节。隧道内通风状况良好,空气相对湿度小,如果不能及时洒水养护,混凝土表面的水分会迅速蒸发,内外收缩程度不一样,从而产生收缩裂缝。高温施工环境,混凝土入模温度偏高,水化热集中释放,衬砌内温度不断上升,表层散热速度快于内部,温差应力造成温度裂缝。在低温寒冷环境下,混凝土硬化速度变慢,内部的水分就会结成冰块,造成内部结构损坏,产生冻胀裂缝。另外隧道长期处在潮湿、腐蚀介质的环境里,混凝土表面慢慢风化剥落,细微裂缝不断扩大。

4 隧道混凝土衬砌综合防治技术

4.1 优化地质处置与结构设计

施工前期做好地质勘察工作,准确查明围岩等级、岩层分布和地下水富集情况,根据地质条件对衬砌结构进行优化设计。对于软弱破碎围岩,采用超前支护、围岩加固技术,用注浆固结提高围岩整体性,减少围岩变形量。在偏压路段增加支护锚杆、加大薄弱处的衬砌厚度,使山体侧向压力趋于平衡。完善隧道排水系统,在隧道衬砌结构里增设排水盲管及泄水孔等排水设施,并且及时排放隧道内的水汽,减轻地下水的渗透作用对于衬砌造成的损坏。合理控制衬砌结构厚度、优化钢筋布设方案,提高混凝土抗拉抗剪性能,从结构上防止裂缝出现。

4.2 严控原材料质量与配合比

建立原材料进场检验制度,选用安定性好、强度达标水泥,优先选择连续级配、杂质含量低的砂石骨料,净化拌合用水,防止污染水体。根据隧道施工环境改善混凝土配合比,在保证施工流动性的基础上,减小水灰比、控制水泥用量,降低水化热释放。适当添加优质缓凝剂、减水剂,改善混凝土的和易性,减小混凝土内外温差。可适量加入粉煤灰、矿粉等矿物掺合料

来改善混凝土内部结构,减小干缩变形率,提高抗裂性能。

4.3 规范现场施工工艺流程

严格控制混凝土拌合、运输、浇筑全过程的施工质量。控制拌合时间以保证原材料混合均匀,运输车辆做好密封防护,防止混凝土离析、失水。浇筑采用分层分段施工模式,控制单层浇筑厚度,配合均匀振捣作业,消除内部空隙。及时清除施工缝表面的浮渣、杂物,浇筑前涂刷界面结合剂,提高新旧混凝土粘结强度。严格按照混凝土强度增长规律来决定合适的拆模时间,不得盲目追求工期而提前拆模。施工期间做好监控量测,实时观测围岩沉降和衬砌应力的变化,发现问题及时调整施工方案。

4.4 完善养护管理与环境保护

根据科学的养护方案进行养护,混凝土浇筑完成后立即覆盖保湿材料,隧道内部定时洒水保持表面湿润,养护时间不应少于规范要求的时长。高温季节施工时对原材料采取遮阳降温措施,使混凝土入模温度降低,通风控制内部环境温度。寒冷季节增加保温防护设施,防止混凝土冻害。运营阶段定时开展衬砌病害巡检,记载裂缝出现的地点、宽限、长度的变化状况,创建起病害监测档案。对已成形的细微裂缝用表面封闭法处理,封堵裂缝使侵蚀介质无法渗透到裂缝里;对宽大的贯通裂缝,用压力注浆技术填充密实,恢复结构的整体性。

5 结论

隧道混凝土衬砌裂缝的产生是由地质、材料、施工、环境等多种因素共同引起的,结构性裂缝主要是由于受力变形造成的,非结构性裂缝则是由于材料变形和施工控制上的问题而产生的。为了有效控制衬砌裂缝的发生,必须坚持预防为主、防治结合的原则,从前期的地质处理及结构设计入手,严控原材料的质量,加强后期的养护和病害的监测修复,保证工程质量。各种防治技术要根据隧道地质情况和施工环境来灵活使用,并不断改进施工方案以提高混凝土衬砌抗裂能力。使用新型抗裂材料、智能化检测技术减少裂缝病害产生来保证隧道工程长久安全稳定。

参考文献:

- [1] 张福平.城市轨道交通暗挖隧道衬砌混凝土施工中裂缝控制技术和质量保障措施[J].中国水泥,2026,(01):109-112.
- [2] 赵晨阳,雷明锋,贾朝军,等.渗流-溶蚀耦合效应对隧道衬砌混凝土裂缝演化的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(06):2335-2345.
- [3] 陈相,林志,冯万林,等.公路隧道素混凝土衬砌裂缝扩展特征及力学行为试验研究[J].现代隧道技术,2025,62(02):212-220.
- [4] 李永德.隧道混凝土衬砌常见裂缝分析和防治措施[J].四川水泥,2022,(08):216-217+221.
- [5] 杨清翔.隧道衬砌混凝土裂缝成因及施工防治措施[J].中国高新科技,2020,(10):113-114.
- [6] 王家赫,黄法礼,李化建,等.铁路隧道衬砌混凝土温度裂缝原因分析与防治措施[J].铁道建筑,2020,60(09):73-77.