

水工隧道衬砌结构加固方案探讨

聂章博 陈精卫

黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 郑州 450003

摘要: 本文探讨水工隧道衬砌结构加固方案。先分析常见问题及成因,包括衬砌开裂、渗漏水、剥落掉块等,成因涉及地质、水文、设计、施工等因素。接着介绍多种加固方法及技术,如表面修补、注浆、粘贴等。然后建立加固方案评价指标体系,对比不同方案。最后阐述施工管理与质量控制要点,为水工隧道衬砌结构加固提供参考。

关键词: 水工隧道; 衬砌结构; 加固方案; 施工管理; 质量控制

引言: 水工隧道在水利工程中发挥着重要作用,其衬砌结构的稳定性直接影响隧道的安全运行。然而,受多种因素影响,衬砌结构常出现开裂、渗漏水、剥落掉块等问题。为保障水工隧道的正常使用,需对衬砌结构进行加固。本文深入探讨水工隧道衬砌结构加固方案,分析问题成因,介绍加固方法,对比不同方案,并阐述施工管理与质量控制要点。

1 水工隧道衬砌结构常见问题及成因分析

1.1 衬砌结构常见问题类型

衬砌开裂是水工隧道普遍病害。纵向裂缝沿隧道轴向延伸,多现于拱顶或边墙,严重时贯穿衬砌,破坏结构整体性;横向裂缝垂直于隧道轴线,降低衬砌局部强度;斜向裂缝方向无规则,由复杂受力导致,威胁衬砌稳定性。这些裂缝不仅削弱衬砌耐久性,还会成为渗漏水通道,加剧结构损坏。衬砌渗漏水依程度不同表现有别。初期渗水仅使衬砌表面潮湿、出现水渍,长期发展会侵蚀混凝土,降低强度;滴水阶段,水珠从裂缝或孔隙间断滴落,影响作业环境,冲刷围岩形成空洞;涌水情况严重,大量水流涌出可能致使衬砌失稳、隧道坍塌。衬砌剥落掉块破坏结构完整性^[1]。混凝土表面在多种因素作用下疏松,小块剥落逐渐发展为大面积掉块,削弱衬砌厚度,降低承载能力,掉落的混凝土块还会威胁设备和人员安全,影响隧道运营。

1.2 问题成因分析

地质因素是导致衬砌结构问题的重要原因。岩性变化对衬砌受力影响显著,当隧道穿越不同岩性地层时,围岩的物理力学性质差异使衬砌承受不均匀荷载,从而产生裂缝。断层破碎带和软弱夹层的存在,使围岩稳定性变差,容易产生较大变形,对衬砌结构施加额外压力,导致衬砌开裂、变形甚至破坏。水文因素在衬砌病害形成中也扮演关键角色。地下水活动频繁,会不断侵蚀衬砌混凝土,降低其强度和耐久性。水压力变化对衬

砌结构影响巨大,当水压力超过衬砌设计承载能力时,会导致衬砌开裂、渗漏水。特别是在高水压地区,地下水对衬砌的渗透、侵蚀和压力作用相互叠加,加剧衬砌结构问题的产生。设计因素同样不可忽视。设计参数不合理,如衬砌厚度不足、配筋率不够,会使衬砌在实际运营中无法承受荷载,引发开裂和变形。结构形式选择不当,未能充分考虑隧道所处地质和水文条件,也难以保障衬砌结构的稳定性和耐久性。此外,对施工和运营过程中可能出现的不利因素预估不足,未采取相应预防措施,也是设计缺陷的体现。施工环节的问题直接影响衬砌质量。施工质量不达标,混凝土配合比不准确、浇筑不密实,会使衬砌存在蜂窝、麻面等缺陷,降低其强度和抗渗性。施工工艺不合理,如模板支撑不牢固、混凝土浇筑速度过快或过慢,易导致衬砌变形、开裂。施工过程中对围岩的扰动过大,未及时进行支护,也会使围岩与衬砌之间的相互作用发生变化,引发衬砌结构问题。

2 水工隧道衬砌结构加固方法及技术

2.1 表面修补加固法

衬砌表面出现轻微裂缝、剥落等病害时,表面修补加固法是有效处理手段。该方法通过涂抹或喷射修补材料,恢复衬砌表面完整性,防止病害进一步发展。表面修补材料种类多样,水泥砂浆凭借良好的和易性与经济性,常用于大面积表面缺陷修复,其强度等级根据衬砌实际需求选择,需具备足够粘结力,确保与衬砌表面紧密结合。环氧树脂材料则以高粘结强度和优异的抗渗性能见长,适用于细微裂缝封闭,固化后形成的坚固薄膜能有效阻止水分侵入,延缓混凝土碳化。施工时,先对衬砌表面进行处理,清除松动混凝土、灰尘等杂物,采用高压水冲洗或喷砂方式保证表面洁净粗糙,以增强修补材料与衬砌的粘结效果。涂抹或喷射修补材料过程中,严格控制施工厚度,确保均匀平整。修补完成后,及时进行养护,覆盖塑料薄膜或土工布,定期洒水,维

持表面湿润,使材料强度正常增长,养护时间根据材料特性确定。

2.2 注浆加固法

衬砌背后空洞、裂缝渗漏水会削弱结构稳定性与防水性能,注浆加固法可针对性解决此类问题^[2]。通过向空洞或裂缝注入浆液,填充空隙、封堵渗漏水通道,增强衬砌与围岩的密实度。注浆材料选择遵循适配原则。水泥浆来源广泛、成本低,适用于较大空洞填充,其水灰比根据空洞大小和渗漏水情况调整。化学浆液如聚氨酯、丙烯酸盐,具有良好的渗透性和遇水膨胀特性,常用于细微裂缝和渗漏水治理。注浆工艺流程包括注浆孔布置、钻孔、安装注浆管、注浆等环节。注浆孔依据病害分布情况合理布置,遵循先外围后内部原则,保证浆液能充分覆盖病害区域。钻孔深度以穿透空洞或到达裂缝源头为宜。注浆过程中,严格控制注浆压力,压力过小浆液无法有效扩散,过大则可能导致衬砌结构破坏,需根据地质条件和空洞大小确定合适压力值,注浆完成后及时清洗注浆设备。

2.3 粘贴加固法

粘贴加固法通过在衬砌表面粘贴钢板、碳纤维布等材料,提高结构承载能力。不同粘贴材料特性各异,适用场景也有所不同。钢板强度高、刚度大,适用于承载能力不足且要求快速恢复使用功能的衬砌结构。粘贴前需对钢板表面进行除锈、打磨处理,提高表面粗糙度,增强与粘结剂的粘结力。碳纤维布质轻高强、耐腐蚀,具有良好的柔韧性,可适应复杂曲面,常用于薄壁衬砌结构加固。其粘贴时需保证表面平整,避免褶皱、空鼓,通过滚压排出空气,使粘结剂充分浸润碳纤维布。粘贴加固施工中,锚固技术至关重要。钢板可采用化学锚栓或膨胀螺栓进行机械锚固,配合粘结剂使用,确保钢板与衬砌协同工作。碳纤维布的锚固则依靠粘结剂的粘结力,施工时控制粘结剂用量和涂抹均匀度,保证碳纤维布与衬砌紧密贴合。

2.4 增设套拱加固法

当原有衬砌结构整体稳定性不足时,在其外侧增设套拱是有效解决方式。套拱可分担荷载,增强结构整体性和抗变形能力。套拱材料可选用混凝土、钢筋混凝土或钢混组合材料。混凝土套拱成本较低,适用于一般工程;钢筋混凝土套拱承载能力和耐久性更好,适用于荷载较大、地质条件复杂的工程。结构设计时,需考虑套拱厚度、配筋率等参数,通过力学计算确定,保证套拱与原有衬砌共同受力。套拱与原有衬砌的连接方式直接影响加固效果。可采用植筋连接,在原有衬砌钻孔植入

钢筋,与套拱钢筋绑扎后浇筑混凝土,实现两者有效连接。施工顺序为先对原有衬砌表面进行凿毛处理,清理干净后植入钢筋,再安装套拱模板、绑扎钢筋,最后浇筑混凝土,确保套拱与原有衬砌紧密结合。

2.5 锚杆加固法

锚杆加固法利用锚杆将衬砌结构与围岩紧密相连,改善衬砌受力状态,提高围岩稳定性。

锚杆类型有普通砂浆锚杆、中空注浆锚杆等。普通砂浆锚杆适用于稳定性较好的围岩,通过水泥砂浆将锚杆与围岩粘结;中空注浆锚杆兼具锚固和注浆功能,适用于破碎、软弱围岩。锚杆布置遵循均匀分散原则,根据围岩级别和衬砌受力情况确定间距和排距。锚固长度依据围岩性质和锚杆类型计算确定,保证锚杆能有效传递荷载。锚杆施工时,先钻孔,孔径、孔深符合设计要求,孔壁保持清洁^[3]。安装锚杆过程中,确保锚杆居中,避免偏斜。采用注浆机注入水泥砂浆或其他锚固剂,保证锚杆与围岩充分粘结。施工完成后,通过拉拔试验检测锚杆锚固质量,确保锚杆承载能力满足设计要求。

3 水工隧道衬砌结构加固方案综合比选

3.1 加固方案评价指标体系建立

构建加固方案评价指标体系以安全性、有效性、经济性、可操作性为核心。安全性聚焦加固后衬砌承受荷载及抵抗病害发展的能力,关注结构承载提升、裂缝控制等方面,避免运营期结构失稳。有效性着重衡量方案对既有病害的治理效果,包括渗漏水封堵、空洞填充以及结构性能长期改善情况。经济性全面考量方案全周期成本,涉及材料购置、设备租赁、人工费用等支出。可操作性围绕施工难度、环境适应性和对运营的影响,涵盖工艺复杂程度、场地需求以及能否在不中断交通下施工等要素。采用层次分析法确定指标权重,通过两两对比指标重要性构建判断矩阵,经运算得出权重值。量化标准上,安全性、有效性依据专业检测评估分级赋值;经济性按成本高低划分等级;可操作性根据施工复杂程度、运营影响时长设定评分区间,实现指标量化评价。

3.2 不同加固方案对比分析

将表面修补、注浆、粘贴、增设套拱、锚杆等加固方法组合,形成多样方案。单一表面修补方案适用于衬砌轻微病害,施工便捷、成本低,但对结构承载提升作用有限。注浆与粘贴结合方案可同时处理渗漏水和承载不足问题,对中等病害修复效果好,不过材料和施工成本高,工艺较复杂。增设套拱与锚杆联合方案能显著增强隧道整体稳定性,适用于衬砌严重损坏、围岩条件差的场景,然而施工周期长、对运营干扰大,成本投入

高。经评价体系综合评估,单一表面修补方案在可操作性和经济性得分较高,安全性和有效性较低;注浆与粘贴组合方案有效性突出,但经济性和可操作性不足;增设套拱结合锚杆方案安全性、有效性占优,却因成本和施工难度导致经济性和可操作性得分低。实际应用中,需依据病害状况、工程预算和施工条件,合理选择适配的加固方案。

4 水工隧道衬砌结构加固施工管理与质量控制

4.1 施工管理要点

施工组织设计是施工管理的核心。需依据加固方案和隧道实际状况,制定详细施工流程。对表面修补、注浆加固等不同工序,明确先后顺序,避免交叉干扰。施工进度安排要考虑各环节耗时,为材料运输、设备调试预留充足时间,采用横道图或网络图直观呈现进度计划,确保施工有序推进。人员分工方面,根据施工人员技能专长,合理分配岗位,如安排熟练工人负责粘贴加固等精细操作,普通工人承担清理、搬运等基础工作,提高施工效率。施工现场安全管理至关重要^[4]。针对隧道内有限空间作业,设置明显安全警示标识,划定危险区域。施工设备进场前进行全面检查,确保性能良好,定期维护保养,防止设备故障引发安全事故。在高空作业、用电作业等危险环节,严格执行安全操作规程,为施工人员配备安全帽、安全带等防护装备,落实安全防护措施,保障人员生命安全和设备正常运行。施工过程中的协调与沟通贯穿始终。建立多方沟通机制,施工单位与设计单位保持密切联系,及时反馈现场实际情况,若发现设计与现场不符,迅速协商调整方案。不同施工班组之间定期召开协调会议,交流施工进度和遇到的问题,如注浆班组与粘贴班组协调作业时间,避免相互影响。对施工中出现的突发状况,如地质条件变化,及时组织各方讨论解决方案,保障施工顺利进行。

4.2 质量控制措施

质量检验制度是保障工程质量的基础。原材料进场时,严格检查质量证明文件,对水泥、钢材、化学浆液等材料进行抽样复检,确保其性能指标符合设计要求。构配件进场同样进行检验,查看尺寸、规格是否达标。

施工过程中,对每道工序进行质量检查,如表面修补完成后,检查修补部位平整度、密实度;注浆过程中,随时检查浆液配比和注浆压力,保证施工质量。关键工序和隐蔽工程质量控制是重中之重。以注浆加固为例,钻孔深度、孔径必须符合设计,注浆时严格控制压力和流量,防止出现注浆不饱满或压力过大损坏衬砌等问题。粘贴加固时,确保粘贴面清洁干燥,结构胶涂抹均匀,碳纤维布或钢板粘贴牢固,无空鼓、气泡。隐蔽工程施工完成后,在覆盖前进行全面检查验收,留存影像资料,确保工程质量可靠。施工记录和质量验收工作作为工程质量提供追溯依据。施工过程中,详细记录各项数据,包括原材料使用情况、施工工艺参数、质量检验结果等。每完成一个施工段落或工序,及时进行质量验收,对照设计要求和质量标准,逐项检查验收。对验收不合格的部位,明确整改措施和责任人,限期整改,整改完成后重新验收,直至工程质量符合要求,保证加固工程质量达到预期目标。

结束语

水工隧道衬砌结构加固是一项技术性强、涉及面广的系统工程。面对多样化的病害类型,应根据实际情况选择合适的加固方法,并注重施工全过程的组织管理与质量把控。随着工程技术的发展,加固材料和工艺不断进步,为提升隧道结构稳定性提供了更多可能。未来应在加固效果评估、新材料应用以及智能化监测手段等方面进一步探索,推动水工隧道加固技术向更高效、更可靠的方向发展,全面提升水利工程的安全性和耐久性。

参考文献

- [1]邱曾浩.水工隧洞衬砌结构加固方案分析[J].黑龙江水利科技,2022,50(07):160-162.
- [2]任睿.高压水工隧洞衬砌承载结构稳定性分析[J].黑龙江水利科技,2022,50(01):11-15.
- [3]刘志勇.水工隧洞衬砌结构设计理论与应用[J].水利学报,2023,45(3):45-52.
- [4]陈伟.水工隧洞衬砌结构安全分析与优化设计[J].水利水电技术,2024,46(2):89-95.