

铁路隧道衬砌常见缺陷及预防措施浅析

王建宁

中铁二十一局集团第二工程有限公司

摘要：为了提高铁路隧道衬砌施工质量，确保隧道安全运营。本文研究了铁路隧道衬砌工程项目，分析了铁路隧道衬砌结构在施工期间常见的质量缺陷，明确了仰拱上拱、涌水漏水、拱顶掉块、衬砌裂损、空洞缺陷的主要原因。并针对上述常见缺陷阐述了有效的预防措施。旨在最大限度地预防衬砌结构质量缺陷问题，降低衬砌缺陷给铁路隧道运营安全造成的不利影响，保障铁路隧道运营安全。

关键词：铁路隧道；衬砌结构；缺陷问题；预防措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.06.046

引言：近年来，我国铁路交通事业得到快速发展，新建大量铁路工程，铁路营业总里程逐年稳步增长，有利于缓解交通压力、完善路网体系、刺激社会经济发展。隧道作为铁路路网重要组成部分，隧道施工受到复杂地理环境与工艺操作等因素影响，常出现隧道衬砌结构质量问题，危及铁路运输安全。因此，要重点对铁路隧道衬砌缺陷问题进行综合性的防治处理，提升铁路隧道工程质量。

一、铁路隧道衬砌结构常见缺陷类型及形成原因

（一）仰拱上拱

仰拱上拱问题主要出现在铁路隧道运营阶段，仰拱部位以及隧道底板部位出现上拱现象，严重破坏轨道平顺性，上拱程度超过一定标准后，可能会引发铁路列车脱轨等安全事故。仰拱上拱缺陷的形成原因复杂，主要受到客观因素、主观因素的共同影响。第一，客观因素。部分隧道区段地理环境复杂，本身存在较大水平构造地应力，在隧道开挖期间与完毕后，缓倾薄层岩层逐渐形成弯曲应力，因地层弯曲变形导致仰拱结构出现上拱现象。根据已建成铁路隧道运营情况来看，对于分布缓倾泥质岩层的隧道，隧道贯通1-3年内普遍出现仰拱上拱缺陷，持续时间在数年不等^[1]。同时，如果隧道仰拱回填层、找平层间隙空间内残留未清除干净的地下水，在铁路列车通行期间，在上部行车荷载影响下，出现局部水压现象，仰拱在水压作用力下上拱。第二，主观因素。制定工程设计方案时，既没有考虑到隧道底部轨道适应变形敏感性问题，按照强度控制方法来设计隧道底部结构，也没有分析膨胀性围岩作用对隧道结构力学行为造成的影响，后续因隧道变形、围岩作用而导致仰拱变形上拱。此外，在现场施工期间，出现仰拱厚度不达标、仰拱开挖形状有误等施工问题时，也会改变隧道结构受力状态，诱发仰拱上拱。

（二）涌水漏水

涌水漏水缺陷问题主要出现在隧道底部、边墙、拱顶等部位，如果没有在短时间内妥善处理涌水漏水问题，随着时间推移，将会由此引发边墙开裂、仰拱上拱、边墙内挤掉块、拱顶蜂窝麻面与混凝土碳化等一系列质量通病出现。涌水漏水缺陷的形成原因包括分布岩溶地质、排水系统失效、拱部结构状态不佳。第一，岩溶地质。部分铁路隧道现场地理环境较为复杂，存在岩溶等不良地质问题，施工期间并未采取注浆加固等方式处理岩溶问题，也没有建立完善的隧道排水体系，由于地下水位升高，或是出现强降雨天气，使得水压、水量大幅增加，地下水和雨水涌入隧道内部。第二，排水系统失效。现场施工期间仅设置临时排水措施，缺少永久排水设施，在铁路隧道运营期间，实际排水能力不足，没有起到应有的泄水作用，后续因水位升高、静水压力超标而出现涌水渗水现象^[2]。第三，拱部结构状态不佳。隧道拱部混凝土结构本身存在蜂窝、裂缝、空洞等质量问题，在地下水长期侵蚀、浸泡影响下，衬砌结构形成渗水通道，持续向内部空间流入地下水。

（三）拱顶掉块

拱顶掉块问题主要出现在铁路隧道在建、运营阶段，二次衬砌结构拱顶部位出现程度不一的空洞、裂缝、空鼓情况，最终导致拱顶结构疏松掉块，其形成原因包括混凝土工艺不当、施工缝缺陷和衬砌开裂，具体分析如下。第一，混凝土工艺不当。混凝土浇筑温度、浇筑速度、振捣力度等工艺参数控制不当，混凝土没有充分充填隧道拱部空间。同时，浇筑边墙部位时，由于冲击作用力过大，导致防水板出现偏位错位情况，拱顶防水板没有紧密贴合在初期支护结构表面，因形成空隙而致使拱顶部位形成混凝土空洞。第二，施工缝缺陷。由于中埋止水带偏位而切割混凝土结构，引发厚度不足、空鼓问题出现，导致拱顶部位掉块。而在衬砌混凝土浇筑期间出现中断浇筑问题、形成夹层与施工冷缝后，也有可能引发施工缝开裂掉块现象发生。第三，衬砌开裂。衬砌结构受到地形偏压、地应力等外部荷载作用影响，或因提前拆模、养护不到位而形成干缩裂缝与温度裂缝，衬砌内部结构和表面形成裂缝，随着时间推移，裂缝持续发育，最终因破坏衬砌结构完好性而出现拱顶掉块缺陷^[3]。

（四）衬砌裂损

衬砌裂损缺陷是在隧道衬砌结构上形成裂缝，破坏衬砌结构完整性，改变受力状态和形成渗水通道，严重

时出现衬砌变形情况,裂缝类型众多,包括纵向裂缝、环向裂缝和斜向裂缝。隧道衬砌裂损缺陷的形成原因包括地质条件、地下水、施工方法。第一,地质条件。围岩条件对隧道结构施加重要影响,如果存在围岩压力过大、分布不均、超出衬砌结构强度及刚度的情况,衬砌结构在外部压力影响下逐渐形成裂缝,出现变形和位移现象。同时,依山傍水修建铁路隧道时,洞顶覆土层厚度不达标时,衬砌结构也有可能开裂。第二,地下水。地下水动静压作用直接影响到围岩结构,在寒冷冬季因冻胀循环致使衬砌结构周边形成空洞,在不均匀约束作用下使得结构开裂。地下水侵蚀衬砌结构时,衬砌表面逐渐沉淀碱性盐物质,随着时间推移,出现二次返碱现象,加快衬砌结构老化速度。第三,施工方法。施工期间出现错误操作行为,实际情况偏离设计预期,从而形成质量隐患。以衬砌背后空洞问题为例,出现超挖情况后,并未严格按照技术规范开展注浆回填作业,初期支护和围岩结构形成大范围空隙,或是因混凝土振捣不密实而在隧道拱部、拱腰部位形成局部脱空问题。

(五) 空洞缺陷

空洞缺陷出现在铁路隧道衬砌结构背后,主要受到地理环境与施工因素影响。从地理环境角度来看,隧道结构周边环境较为恶劣,长期处于富水环境,或是受到各类化学物质侵蚀,在腐蚀、冲刷作用影响下,逐渐在隧道衬砌背后形成大量细小空洞,各处空洞逐渐联通扩大,形成大范围空隙空间,最终引发钢筋外露、拱顶掉块等质量通病。从施工角度来看,如果出现初期支护混凝土喷射厚度不足、二次衬砌结构不密实与蜂窝麻面等施工问题,都有可能形成空洞缺陷。

二、铁路隧道衬砌结构常见质量缺陷问题的预防措施

(一) 仰拱上拱预防

针对隧道仰拱上拱质量缺陷,具体从改进设计方案、施工现场控制两方面入手,可以采取增加仰拱厚度、隧道基底加强设计、降排水施工、改进隧底混凝土现浇工艺等措施,以此预防仰拱上拱问题发生。第一,增加仰拱厚度。在隧道结构体系内,仰拱部位衬砌层厚度与受力性能成正比,衬砌厚度越大,仰拱基底上拱力抵抗效果越显著,可以把实际上拱程度控制在合理范围内,不会危及到铁路隧道运营安全,要求设计人员根据地质勘察报告,酌情增加仰拱部位衬砌厚度。在无法增加仰拱衬砌厚度的情况下,也可选择对矢跨比进行调整,预留一定安全储备。一般情况下,单线铁路隧道矢跨比控制在1/8以上,双线铁路隧道矢跨比控制在1/12以上。第二,隧道基底加强设计。对于III级和IV级围岩,由于围岩结构松散、质地较软,天然存在上拱风险,必须对隧道底部进行加强设计,通过超前支护来加固地层结构。以型钢钢架作为初期支护形式,把型钢钢

架封闭成环,必要情况下在仰拱下部增设锚杆,充分抵抗基底上拱作用力。第三,降排水施工。隧道底部地层长时间汇集积水与地下水时,因体积扩容膨胀力而形成较大仰拱上拱值,还会持续侵蚀隧道结构,必须做好降排水施工,在底部积聚地下水区域设置泄水洞、深埋水沟等排水设施^[4]。第四,改进隧底混凝土现浇工艺。一次性浇筑隧道底部混凝土衬砌阶段,尽量避免采取分层浇筑方式,避免因此形成“囊状水”现象。如果受限于现场条件,必须采取分层浇筑方式时,严格控制上下层间隔浇筑时间,出现中断浇筑问题后,清理下层混凝土表面积水与杂物,做好凿毛作业,涂抹水泥砂浆后继续浇筑上层混凝土,避免因形成施工冷缝、结构内部进水而使得仰拱上拱。

(二) 涌水漏水预防

针对涌水漏水问题,同时从专项设计、优化施工工艺、加强隧道运维管理三方面着手,从根源上预防此类缺陷问题发生。第一,专项设计。提前做好地质勘察工作,在铁路隧道路线规划环节,尽量绕开沿途分布的岩溶发育地带和岩溶水富集区域,如果无法彻底避开不良地质问题,需制定隧道防排水专项设计方案,增加排水设施种类与数量,提高永久性排水设施占比,并采取劈裂注浆、帷幕注浆等技术来处理不良地质问题。同时,以隧道施工缝作为防水重点,可选择设置中埋式止水带来强化结构抗渗能力。第二,优化施工工艺。改进混凝土浇筑技术和初期支护技术,混凝土浇筑期间注浆回填拱部空洞,初期支护背后注浆回填空洞,避免空洞形成隧道衬砌结构防水薄弱环节。随后,铺设防水板,尽量选用新型防水材料来改善防水效果,并在防水板铺设就位后,检查铺设牢固程度与焊接质量是否达标,返工整改不合格部位。第三,加强隧道运维管理。铁路隧道投运使用期间,以评估隧道防水性能作为管理重点,维修队伍定期前往各处隧道,检查排水设施使用情况、隧道结构是否出现涌水漏水问题,疏通排水设施,修补渗水点,避免隧道结构长时间浸泡水中而引发其他问题。

此外,如果铁路隧道在施工与运营期间出现渗水情况,必须对渗漏部位进行整治处理,根据渗漏程度来选择恰当处理形式,主要分为点漏、缝漏、面漏三种情况。第一,点漏处理。隧道点漏问题表现为射流、线流、股流和滴水形式。隧道结构出现滴水问题后,采取注浆封堵技术,衬砌结构漏水部位钻设孔洞,向孔内高压注水水泥砂浆材料,通过填充内部结构渗水通道来解决。而在隧道结构出现射流、线流与股流情况时,则在漏水部位开凿槽体,埋设排水管,直接引排处理。第二,缝漏处理。根据裂缝宽度来选择处理方式。裂缝宽度在3mm以上时,以凿槽埋管引排作为处理方式。裂缝宽度不足3mm时,多处滴水时以岩体衬砌内部注浆加固作为处理方式,局部少量滴水时以凿槽嵌缝作为处理

方式。第三，面漏处理。在隧道衬砌结构大范围漏水情况下，必须采取衬砌内部注浆处理方式，在集中出水点凿槽引排，必要时，衬砌结构表面额外涂抹一层环氧树脂砂浆作为防水层^[5]。

（三）拱顶掉块预防

针对拱顶掉块缺陷问题，重点把控现场作业质量，利用配备智能衬砌台车、连续浇筑、养护管理等措施，预防此类缺陷问题出现。第一，配备智能衬砌台车。工程现场配备最新研制的智能衬砌台车，安装超声波焊机、喷淋雾炮、注射浆一体机等机械设备，提前在控制系统内导入施工技术方，智能衬砌台车辅助施工人员开展隧道衬砌结构浇筑作业，避免出现错误操作行为，减轻工艺操作对衬砌结构质量造成的影响。同时，智能衬砌台车具备自动检测功能，浇筑期间检测各项工艺参数偏差值，衬砌结构成型后检测成果质量，把质量隐患反馈给施工人员，及时进行修补处理。第二，连续浇筑。必须连续性完成隧道衬砌结构混凝土现浇作业，在拱部背后空洞处开展注浆回填作业，重点控制中断浇筑时间。如果在上段、上层混凝土初凝后，未完成下段下层浇筑振捣作业，则需要对所形成施工冷缝进行处理，以凿毛、涂刷水泥砂浆、植筋作为处理措施^[6]。第三，养护管理。混凝土浇筑完毕后，进入养护阶段，做好保温、保湿养护作业，根据施工情况来确定养护时间，避免中途因干缩、温度应力超标而导致结构开裂掉块。在保温养护步骤，提前布置感温探头，定期测量混凝土温度，施工现场气温不低于5℃，内表温差控制在20℃以内，必要时采取蒸汽养护技术来提高现场气温，采取循环冷却或是表面蓄水方法来控制内表温差。在保湿养护步骤，混凝土表面覆盖保湿锁水材料，均匀喷涂养护剂，或是定期洒水，用于补充水化反应期间的耗水量，始终保持表面湿润状态，不得出现干湿交替情况。此外，也可选择对隧道衬砌结构设计方进行优化调整，通过改善衬砌结构状态来预防拱顶掉块问题出现，具体采取调整下锚段断面型式、衬砌结构内部配置构造钢筋、减少附属洞室数量、预留V型槽结构施工缝等设计措施。

（四）衬砌裂损预防

针对衬砌裂损缺陷，需做好裂缝修补、渗水泛碱处理、衬砌补强等相关处理。第一，裂缝修补。衬砌结构形成裂缝后，立即进行修补，避免因内部渗水而导致钢筋锈蚀、混凝土碳化，根据裂缝宽度来确定修补方法。例如，对于宽度不足0.3mm的细小裂缝，清理裂缝表面，均匀涂抹环氧树脂浆液来封闭裂缝表面，如果裂缝深度较大，则在裂缝内部灌满低黏度环氧树脂浆液，后续在裂缝两侧30cm范围内擦拭酒精等有机溶剂。第二，渗水泛碱处理。确定渗水泛碱位置，清除表面碱性沉淀

物，使用清水冲刷或是钢丝刷反复打磨，后续对缺陷部位进行凿缝填充堵漏处理。如果常规方法无法完全去除碱性沉淀物，则采取酸洗法，制备浓度为3%的嗅酸、盐酸溶液，清洗衬砌结构表面。第三，衬砌补强。对于出现裂损问题的衬砌结构，裂缝处理完毕后，在衬砌表面挂设钢筋网与喷射混凝土层，将其作为补强层，起到改善衬砌结构受力状态的加固作用。

（五）空洞缺陷预防

针对空洞缺陷问题，具体采取衬砌背后回填灌浆、衬砌套衬加固两项措施，充填现场施工期间形成的空洞部位。第一，衬砌背后回填灌浆。主要采取工艺成熟的回填注浆法，选用泡沫混凝土或是水泥砂浆作为灌浆材料，在背后存在空洞的衬砌结构部位钻设注浆孔，以隧道纵断面高程较低位置作为起始点，从下到上开展注浆作业，注浆压力控制在0.5MPa左右，直至浆液完全填充衬砌背后脱空部位。第二，衬砌套衬加固。强调在铁路隧道既有衬砌结构的内表面继续灌注混凝土，衬砌结构和新浇筑混凝土结构共同承担围岩压力，起到阻止衬砌结构继续裂损变形的作用。施工人员提前测量净空与调查裂缝情况，在衬砌结构表面进行凿毛冲洗处理，植入钢筋形成外部钢筋网，随后立模浇筑混凝土，养护一段时间等待混凝土结构硬化成型。

结语：综上所述，质量缺陷问题防治处理效果是铁路隧道工程建设质量的决定性因素。施工单位必须提高对缺陷问题的重视，深入了解各类型缺陷问题形成原因，确定问题症结，制定针对仰拱上拱、涌水漏水、拱顶掉块等典型质量缺陷问题的专项防治处理方，提高铁路隧道衬砌施工质量，确保隧道安全运营，为铁路隧道建设质量提供有力支撑。

参考文献

- [1] 汪婕舒. 青藏铁路格拉段昆仑桥隧道衬砌裂损机理及整治技术研究[D]. 北京交通大学, 2010.
- [2] 余东洋. 铁路隧道衬砌背后空洞缺陷安全性评价及处治对策研究[D]. 中国铁道科学研究院, 2019.
- [3] 肖广智. 从当前铁路隧道衬砌典型病害谈设计施工改进措施[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(09): 1416-1422.
- [4] 赵天成. 高速铁路隧道衬砌缺陷整治措施探讨[J]. 工程建设与设计, 2020(03): 101-103.
- [5] 赵建彪, 姜涛, 孙捷城. 高速铁路隧道衬砌质量缺陷及整治措施分析[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(09): 131-133.
- [6] 龚成明, 罗永君, 张军. 隧道衬砌缺陷防治技术研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(06): 210-216+221.