

山区高烈度地质复杂条件下悬索桥隧道锚开挖施工关键技术研究

王培懿, 袁 涛, 杨金宜, 张焯桁

(四川路桥桥梁工程有限责任公司, 四川 成都 610071)

摘要 在山区高烈度地质复杂条件下, 悬索桥隧道锚开挖施工在保障安全与精度的基础上, 仍面临技术适配不足、能耗较高、生态影响较大等现实难题, 亟须拓展研究方向以完善施工技术体系。本文以山区高烈度复杂地质下悬索桥隧道锚开挖施工拓展方向为研究对象, 深入分析技术优化与节能降耗、施工设备适配与智能化升级、环保管控与生态保护三大核心方向, 在此基础上提出工艺优化、设备改造、环保管控的具体实施方法, 旨在丰富隧道锚开挖施工研究内容, 为同类工程拓展施工思路、提升施工综合水平提供技术参考与实践借鉴, 助力山区悬索桥建设高质量发展。

关键词 山区高烈度地质复杂条件; 隧道锚开挖; 设备智能化

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.006

0 引言

随着山区悬索桥建设向高烈度、地质更复杂区域延伸, 隧道锚开挖施工的综合要求不断提升, 仅关注核心施工技术已难以满足工程节能、高效、环保的发展需求。当前施工技术适配性不足、设备智能化水平低、生态保护与施工推进难以平衡等问题, 制约着隧道锚开挖施工的综合效益。基于此, 开展相关拓展方向研究, 不仅能完善山区高烈度复杂地质下隧道锚开挖技术体系, 还能实现施工安全、效率、效益与生态保护的协同发展。

1 山区高烈度地质复杂条件下悬索桥隧道锚开挖的施工要点

1.1 地质勘察与风险预判要点

隧道锚开挖施工的首要要点是全面、精准开展地质勘察, 结合高烈度地质特性进行风险预判, 为施工方案制定提供科学依据。地质勘察需覆盖隧道锚全断面及周边一定范围, 重点查明不良地质分布、围岩等级、地下水情况及地震动参数, 同步预判开挖过程中可能出现的坍塌、涌水、突泥等风险, 确保施工方案与地质条件高度适配。

地质勘察应采用“现场踏勘+钻孔探测+物探检测+室内试验”相结合的综合方式, 避免单一勘察手段的局限性。现场踏勘重点排查隧道锚区域的地形地

貌、地表裂缝、不良地质露头, 初步判断围岩稳定性, 而钻孔探测需按规范布置钻孔, 深度覆盖隧道锚设计深度以下不少于 5 m, 采集岩芯样本进行室内试验, 确定围岩的抗压强度、抗剪强度、弹性模量等力学参数, 明确断层破碎带、软弱夹层的分布范围、厚度及力学特性。针对高烈度地震区域, 需结合当地地震动参数, 通过 Midas NX 数值模拟软件, 对围岩在地震作用下的应力应变分布进行模拟分析, 预判围岩坍塌、锚塞体变形等风险, 划分风险等级, 制定分级防控措施。

1.2 开挖精度与受力匹配要点

隧道锚作为悬索桥主缆拉力的承载核心, 其开挖精度直接影响锚塞体的受力性能与整体稳定性, 因此开挖精度控制与锚塞体受力匹配是施工核心要点之一。开挖精度控制需贯穿施工全过程, 采用“精准测量+分层控制+实时修正”的模式。施工前, 采用高精度全站仪、水准仪进行平面定位与高程控制, 建立完善的测量控制网, 对隧道锚的轴线、断面尺寸进行精准放线, 标注开挖轮廓线; 在施工过程中, 每开挖一层, 及时进行测量复核, 重点检查断面尺寸、轴线偏差、坡度偏差, 确保隧道锚前导洞、前锚室、锚塞体段的尺寸偏差控制在设计允许范围内。针对高烈度地质条件, 需充分考虑地震作用下围岩的变形特性, 在开挖过程中预留合理的变形量, 避免后期围岩变形导致锚塞体受力不均。

作者简介: 王培懿 (1996-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁工程 (含隧道)。

1.3 施工安全与动态管控要点

隧道锚开挖施工环境恶劣、风险因素多，施工安全与动态管控是保障施工顺利开展的关键要点，需建立全方位、全过程的安全管控体系，重点防控围岩坍塌、涌水突泥、地震扰动等风险。安全管控体系需明确各级岗位职责，建立“全员参与、全程管控、分级负责”的安全管理机制，加强对施工人员的安全培训与技术交底，增强施工人员的安全意识与应急处置能力。针对高风险工序，需制定专项安全施工方案，设置专职安全员现场监护，实行“一人一机一监护”制度。在动态管控方面，采用“实时监测+数据分析+方案调整”的模式，在隧道锚开挖区域布置围岩位移、应力应变等监测点，实时采集监测数据，通过数据分析判断围岩稳定性与施工安全状态。当监测数据超出预警值时，立即停止施工，分析原因并采取针对性的防控措施，同时还需结合施工过程中揭露的地质情况，及时优化开挖方案、支护参数，确保施工方案与实际地质条件适配。

2 山区高烈度地质复杂条件下悬索桥隧道锚开挖施工关键技术

2.1 高烈度复杂地质精准勘察与参数优化技术

地质勘察的精准度直接决定施工方案的科学性与可行性，因此研发高烈度复杂地质精准勘察与参数优化技术，是隧道锚开挖施工的关键核心技术之一。针对山区高烈度复杂地质的特殊性，优化勘察技术方案，采用“钻孔探测+地质雷达+地震波法+原位试验”的综合勘察模式，弥补单一勘察手段的不足^[1]。钻孔探测采用定向钻孔技术，精准控制钻孔角度与深度，重点探测断层破碎带、软弱夹层、岩溶等不良地质的分布范围与力学特性，采集岩芯样本进行室内试验，同时针对高烈度地震区域，结合当地地震动参数，对围岩在地震作用下的应力应变分布进行模拟分析，确保参数取值符合高烈度地震工况的实际需求。

2.2 复杂围岩分级开挖与控振爆破技术

在山区高烈度地质复杂条件下，隧道锚开挖面临围岩稳定性差、地震扰动风险高的问题。复杂围岩分级开挖与控振爆破技术，能够有效控制开挖过程中围岩的扰动，避免围岩坍塌，确保开挖施工安全，是隧道锚开挖的关键核心技术^[2]。针对不同等级围岩制定差异化的开挖方案，I~II级围岩采用全断面开挖法，开挖循环进尺控制在3~5m，提高施工效率；III级围岩采用台阶法开挖，上台阶开挖循环进尺控制在2~3m，下台阶滞后上台阶不少于5m，及时施做初期支护；IV~V级围岩采用三台阶预留核心土法开挖，循环进尺控制在1~1.5m，核心土预留比例不小于30%，确保掌子面稳定性。

2.3 高烈度工况下围岩支护加固关键技术

高烈度地质作用下，围岩易发生塑性变形、坍塌等破坏，因此，高烈度工况下围岩支护加固关键技术，是保障隧道锚开挖施工安全与结构稳定性的核心技术^[3]。针对山区高烈度复杂围岩条件，采用“初期支护+二次衬砌+超前支护”的复合支护体系，结合围岩等级优化支护参数，具体支护参数见表1。

2.4 开挖施工动态监测与风险预警技术

在隧道锚开挖施工过程中，围岩变形、应力应变及地下水变化等因素易引发安全风险。因此，开挖施工动态监测与风险预警技术，是实现施工安全动态管控的关键核心技术。建立全方位的动态监测体系，监测内容涵盖围岩位移、围岩应力应变、支护结构应力、地下水水位及流量等，监测点布置结合隧道锚开挖断面特点与地质条件，确保监测数据的全面性与代表性。围岩位移监测采用全站仪、测缝计，在隧道锚前导洞、前锚室、锚塞体段每隔5~10m布置一个监测断面，每个断面布置3~5个监测点，实时监测围岩的水平

表1 不同围岩等级支护参数表

围岩等级	超前支护	初期支护	二次衬砌
I~II级	无	C25喷射混凝土，厚度15cm；Φ22锚杆，长度2.5m，间距100cm	C30钢筋混凝土，厚度30cm
III级	Φ42小导管，长度4.5m	C25喷射混凝土，厚度20cm；Φ22锚杆，长度3m，间距90cm	C30钢筋混凝土，厚度40cm
IV~V级	Φ42小导管，长度4.5m	C25喷射混凝土，厚度25cm；Φ22锚杆，长度3.5m，间距80cm	C40钢筋混凝土，厚度50cm

位移与垂直位移,当监测数据超出预警值时,系统自动发出预警信号,提醒施工人员及时采取防控措施,

同时建立监测数据反馈机制,将监测结果及时反馈给施工技术部门,监测预警指标见表2。

表2 隧道锚开挖施工监测预警指标表

监测项目	监测仪器	预警值	监测频率
围岩水平位移	全站仪、测缝计	≥ 5 mm/d	开挖后1~3天2次/天,3~7天1次/天,7天后1次/3天
围岩垂直位移	全站仪、测缝计	≥ 3 mm/d	同水平位移
围岩应力	应力计	$\geq 80\%$ 设计应力	1次/天
地下水涌水量	流量计	≥ 50 m ³ /h	2次/天

3 山区高烈度地质复杂条件下悬索桥隧道锚开挖施工相关拓展方向研究

3.1 隧道锚开挖施工技术优化与节能降耗方向

隧道锚开挖施工不仅要保障安全与精度,还需注重技术优化与节能降耗,通过工艺改进、参数调整,在提升施工效率的同时,降低能源消耗与施工成本,实现工程建设与节能理念的协同发展^[4]。针对现有开挖与支护工艺的不足,结合高烈度复杂地质特点,优化施工流程,实现各工序的高效衔接,减少工序等待时间,将控振爆破与喷锚支护工序进行协同优化,采用“爆破后即时喷护”的作业模式,缩短围岩暴露时间,既提升支护效果,又减少重复作业,降低人力与材料消耗。

3.2 高烈度复杂工况下施工设备适配与智能化升级方向

施工设备的适配性直接影响隧道锚开挖施工的效率与质量,传统施工设备存在操作难度大、适配性差、智能化水平低等问题,施工设备的适配优化与智能化升级已成为推进隧道锚开挖技术发展的重要支撑方向^[5]。在设备适配方面,针对山区地形复杂、地质多变、地震风险高的特点,对现有施工设备进行针对性改造,提升设备的稳定性与适配性。例如:对钻机进行改造,配备可调节角度的钻臂与精准定位系统,适应隧道锚不同断面的开挖需求,提升钻孔精度与效率。在智能化升级方面,引入智能化监测设备与自动化施工设备,构建智能化施工体系,如采用无人钻机进行钻孔作业,通过远程控制实现精准钻孔,减少人工操作,降低施工人员安全风险,还可利用物联网技术,实现施工设备的实时监控与故障预警,及时发现设备故障并进行维修,确保施工顺利推进。

3.3 隧道锚开挖施工环保管控与生态保护方向

山区生态环境脆弱,高烈度地质复杂条件下的隧道锚开挖施工易对周边环境造成破坏,如植被破坏、水土流失、地下水污染等,加强施工环保管控,

实现施工与生态保护协同发展已成为隧道锚开挖施工的重要研究方向。在环保管控方面,建立完善的环保施工管理制度,明确环保管控责任,将环保要求融入施工全过程。施工前应对隧道锚周边环境进行全面调查,制定针对性的生态保护方案,对施工区域周边的植被进行移栽保护,划定施工禁区,避免破坏原有生态植被。在施工过程中,加强对施工扬尘、噪声、废水、废渣的管控,还可采用洒水降尘、密闭运输等措施,控制施工扬尘污染。施工完成后,对施工区域进行生态修复,清理施工痕迹,补种植被,恢复周边生态环境,确保工程建设对生态环境的影响降至最低,实现山区交通建设与生态保护的协调发展。

4 结束语

本文明确了技术优化与节能降耗、设备适配与智能化升级、环保管控与生态保护三大研究方向,分析了各方向的实施方法与核心要点,旨在有效解决施工中能耗、效率、生态等方面的突出问题,丰富隧道锚开挖施工的研究内涵。未来还需结合工程实践进一步优化各方向技术细节,推进技术集成应用,强化智能化与环保技术的深度融合,为山区高烈度复杂地质下悬索桥隧道锚开挖施工提供更全面、高效的支撑。

参考文献:

- [1] 朱弘扬,吉星刚.悬索桥软质岩隧道锚开挖施工方法及质控措施[J].江苏建材,2024(03):99-101.
- [2] 刘新荣,罗维邦,肖宇,等.悬索桥隧道锚工程应用与研究现状分析[J].地下空间与工程学报,2023,19(01):207-219.
- [3] 许登根,周昌栋,赵航.悬索桥软质岩隧道锚开挖施工关键技术[J].世界桥梁,2022,50(03):45-51.
- [4] 刘志远.山区铁路悬索桥隧道锚开挖、支护施工经济分析[J].铁路工程技术与经济,2021,36(04):49-53.
- [5] 李铁儒.关于悬索桥隧道锚的技术研究[J].北方交通,2020(05):21-24.