

隧道洞身开挖过程中围岩稳定性控制技术研究

苏 盼

(中交一公局第十一工程有限公司, 云南 昆明 650000)

摘 要 在复杂地质条件下进行隧道与地下工程施工, 围岩的稳定性是决定项目成败的关键因素。围岩的稳定性不仅直接影响施工进度和质量, 还关乎施工过程中的安全风险和长期使用的可靠性, 特别是随着城市化进程的加快和交通基础设施需求的增加, 越来越多的隧道工程需要穿越不同的地质层面和复杂地应力环境。本研究以东天山隧道工程为例, 分析了隧道洞身开挖过程中围岩的影响因素, 并提出了对应的控制技术, 以期优化隧道洞身开挖效率提供参考性意见。

关键词 隧道; 洞身; 围岩稳定性; 开挖过程; 控制技术

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.01.019

0 引言

本项目所在区域地质条件复杂, 围岩类型多样且裂隙发育, 岩层倾角和层理方向变化显著, 影响开挖后的围岩力学特性和应力重分布。同时, 由于项目处于深埋环境, 应力集中现象较为显著, 围岩的变形、破坏以及应力释放过程较为敏感。这些特点对施工过程中围岩的支护工艺设计和应力控制提出了更高要求^[1]。此外, 随着现代施工技术的发展, 物联网监测系统在隧道工程中得到了广泛应用, 通过传感器网络实时采集围岩变形、位移和应力等数据, 实现风险预警和施工优化。

1 项目概述

东天山隧道工程是新疆维吾尔自治区交通规划中“五横七纵”重要交通干线之一, 隧道全长 11 885 m, 是全线的重点和难点工程之一。该项目的主体工程为横穿天山山脉的特长隧道, 采用左右分离式设计。左线起讫桩号为 ZK8+809 ~ ZK20+576, 全长 11767 m; 右线桩号为 K8+783 ~ K20+558, 全长 11775 m。本项目我方主要负责隧道出口段施工, 包含左线 ZK13+680 至 ZK20+576 段和右线 K13+885 至 K20+558 段, 总计 13.57 km。施工规划如表 1 所示。

出口段隧道位于天山山脉以南的西山乡葫芦沟区域。隧道内设计了一个辅助斜井, 其接入点位于 K16+900, 斜井全长 1 250 m, 作为施工期间的辅助坑道使用。斜井布置于主线沟谷一侧, 山体坡陡、基岩裸露, 覆盖层较少, 与主洞的地质条件相似。施工区域交通便利, 施工便道已铺设至井口附近, 洞口区域基本无植被覆盖。本隧道的设计遵循国家一级公路标准, 采用双向

四车道单向行车模式, 设计时速 80 km/h, 设计荷载为公路 -I 级标准。隧道内建筑限界为净宽 10.25 m、净高 5 m; 紧急停车带的净宽 13.25 m、净高 5 m; 车行横洞的净宽为 4.5 m、净高 5 m; 人行横洞的净宽为 2 m、净高 2.5 m, 二次模筑衬砌混凝土的抗渗等级要求不低于 P8, 以确保隧道的防水性能。

表 1 施工规划

序号	项目名称	时长 (月)
1	左洞二衬 (ZK17+670 ~ ZK20+573)	25
2	右洞二衬 (K17+610 ~ K20+558)	26
3	斜井二衬	10
4	左洞二衬 (ZK16+900 ~ ZK17+670)	15
5	右洞二衬 (K16+900 ~ K17+610)	15
6	左洞二衬 (ZK14+049 ~ ZK16+900)	27
7	右洞二衬 (K14+043 ~ K16+900)	28

2 二衬施作工法

2.1 钢筋表面处理与安装要求

钢筋表面必须保持洁净。在使用前, 需要彻底清除油渍、漆皮、锈蚀及其他污染物, 确保钢筋质量符合施工标准, 且在施工阶段钢筋应保持平直状态, 不得出现局部弯折, 如遇成盘钢筋或已弯曲钢筋, 需进行调直处理后方可使用^[2]。

钢筋接头双面焊缝长度不得小于 5d (d 为钢筋直径), 单面焊缝长度不得小于 10d, 焊缝应饱满、焊渣应清理干净, 施工过程中禁止使用 422 焊条, 以确保焊接质量。焊接过程中应对周围进行遮挡, 避免火花

烧损防水板,并在钢筋台车上配置不少于2个灭火器,防范火灾风险。

2.2 钢筋保护层施工控制

在绑扎钢筋前,需要对隧道初支净空进行测量和放样,确定隧道轮廓线并根据实际长度下料,避免浪费原材料,并从源头控制保护层厚度,完成第一层钢筋绑扎后,再次进行测量,确定第二层主筋的具体位置,并在第一层钢筋上焊接定位筋以控制层距。

钢筋布设阶段,先在两端头绑扎钢筋,通过水平线和粉笔标记环向主筋的位置,依次完成中间部分钢筋的绑扎^[3]。交叉处钢筋均需绑扎牢固,确保结构稳定,外层钢筋绑扎完毕后,应以梅花形布置高强度砂浆垫块,每平方米布置不少于4个,并使用细铁丝绑牢在钢筋上,确保稳定。安装衬砌台车后应检查垫块的完好性,发现损坏或掉落时需立即更换,并调整主筋位置,确保垫块紧贴模板。

2.3 模板台车施工工艺

隧道施工采用台车作业,台车总长12.1 m,搭接长度10 cm,每循环衬砌段长为12 m,环向施工缝设置为每12 m一道。混凝土通过输送泵自地面泵送至台车处,再使用人工配合插入式振捣棒进行振捣,确保混凝土密实和衬砌质量。

2.4 围岩稳定性与衬砌施作时间

III~IV级围岩:需待围岩及初期支护变形基本稳定后进行二次衬砌施工。判断标准为:拱脚水平净空变化速度小于0.2 mm/d,拱顶相对下沉速度小于0.15 mm/d。

V级浅埋围岩:二次衬砌施作时间需根据现场情况进行调整,确保稳定性。

深埋地应力复杂围岩:允许较大变形并释放应力后,根据设计和监测结果确定二次衬砌的施工时间。

3 项目开挖围岩稳定性影响因素

3.1 围岩级别与节理裂隙

本项目中,主要涉及III~V级围岩,其中V级围岩稳定性最低,施工难度较大,低等级围岩通常具有较高的裂隙密度、较多软弱结构面,极易在开挖过程中发生坍塌或大范围变形。

节理较发育的围岩,其块体之间缺乏有效联结,可能导致松动或剥落,这些裂隙也为地下水渗透提供通道,进一步降低岩体的力学性能。在本项目中,施工时需要通过喷射混凝土、钢拱架及锚杆支护,尽早控制围岩的松动区域,减少开挖扰动对节理裂隙的影

响。此外,在施工初期需加强监测和勘察,识别裂隙密集区域,以便制定有针对性的支护方案。对于V级围岩,施工队伍需加密初支和监测频率,确保围岩变形稳定后才能进行二次衬砌。

3.2 岩层倾角与层理方向

若岩层倾角与隧道轴线平行或存在一定夹角,则容易出现岩层沿层面滑移的风险。特别是软弱夹层或片理岩的层面光滑,摩擦力较小,可能导致岩体在重力和应力作用下发生剥落或塌方。在本项目中,若隧道与岩层呈平行或顺层关系,施工时需特别注意层面滑移和坍塌风险。对于可能滑动的岩体区域,需采用锚杆或钢筋网加固,并通过分层开挖和缩短循环长度来减少扰动。在倾斜岩层中,侧壁的稳定性和相对较弱,施工时应在两侧设置临时支撑以避免开挖面失稳。当岩层倾角较陡时,岩块间的重力作用会增大失稳风险,因此施工中需及时采用钢拱架和喷射混凝土加固,防止围岩失稳^[4]。在一些软弱地段,需结合工程监测数据及时调整支护方案,避免施工过程中因应力集中导致的不稳定。

3.3 埋深

本项目中的浅埋段需特别关注开挖扰动带来的地表沉降,并采取分步开挖与及时支护的施工工艺,以减小围岩变形。相比之下,深埋隧道受到的地应力复杂,施工过程中围岩会经历较大的应力释放,易导致岩体开裂或大面积变形。过深的埋设可能还会引发应力集中和岩爆等风险,增加施工难度。项目团队需根据不同埋深制定合理的支护方案,并采用分区段施工与监测同步调整的方法,以确保围岩的稳定。此外,埋深还决定了衬砌的时机。在深埋段,围岩需要经过足够的时间释放应力和完成变形,才能开始二次衬砌。若衬砌过早,会因围岩变形未稳定导致衬砌结构破坏,在浅埋段施工时,则需加密监测地表和隧道内的变形情况,避免因沉降过大影响隧道结构的稳定性。

3.4 应力条件

围岩的应力条件不仅受埋深影响,还与地质构造和岩体性质密切相关。对于深埋段围岩,开挖后岩体会经历较大的应力释放,若应力释放速度过快,可能导致岩体崩裂或岩爆。应力集中通常发生在隧道拱顶和拱脚附近,这些部位的岩体在受到外力后易发生剥落或开裂。施工团队需通过监测应力变化情况,及时调整支护形式,避免局部应力集中导致的坍塌。在一些地应力较高的区域,还需采取预加固和注浆等措施,增强岩体的承载能力。此外,应力条件的复杂性还体

现在隧道穿越断层或软弱带时。断层区域的应力状态不均,开挖后易发生失稳。

4 围岩稳定性控制技术

4.1 支护工艺优化

本项目中的支护工艺优化应结合围岩的节理发育程度和层理结构特点,采用多种支护手段的组合来提升稳定性。喷射混凝土与钢筋网结合能在开挖后第一时间封闭表层裂隙,有效减少围岩脱落和表面风化。喷射混凝土厚度和强度应根据围岩级别选择,软弱围岩区域应适当增加喷射层厚度,配合耐腐蚀钢筋网以提升耐久性。

锚杆适用于浅层围岩的加固,通过锚固力将岩层内部锁定在一起,提高岩体的整体性。而在深埋段,建议使用长锚索作为超前支护,提高对深层应力释放的控制,避免隧道或地下空间周围岩体的滑移和变形。此外,钢拱架或格栅拱架支护对大跨度隧道尤为重要,在地层较软、支护结构受力较大的区域,钢拱架能有效分散荷载,防止开挖断面变形,钢拱架可与混凝土二次衬砌形成复合结构,大幅提升支护的整体刚度。

4.2 应力控制技术

在隧道或地下工程开挖过程中,应力的释放和重分布可能导致围岩失稳,甚至引发岩爆等危险。因此,应力控制技术对保障围岩稳定具有重要作用。本项目需要结合围岩的力学特性,采取多种应力控制策略以实现安全施工。

首先,分步开挖法和交替开挖法是常用的应力控制手段。在本项目中,对复杂围岩可采取“导坑法”或“台阶法”分区域开挖,逐步释放应力,防止一次性开挖导致应力集中。此方法尤其适用于软岩和倾斜层理地层。其次,超前支护与超前锚杆在开挖前可以提供初期支撑,减少前方岩体变形和松弛,提高围岩的自承能力。在高应力区域设置预应力锚杆,不仅可以控制初期变形,还能减少二次变形的风险。此外,采用弱爆破技术也是应力控制的重要方法。在隧道开挖时,使用小药量和短延时爆破,避免冲击波对围岩造成不必要的扰动。同时,爆破后的支护应及时跟进,减少围岩的暴露时间,避免围岩失稳。

4.3 基于物联网的稳定性监测

随着物联网技术的发展,通过在项目施工和运营阶段部署物联网监测系统,可以实时掌握围岩的变形和应力变化,及时发现潜在的稳定性问题。本项目可在施工区布设光纤传感器、应力计、位移传感器和水压监测设备,将各类监测数据通过无线传输至中央控

制系统^[5]。光纤传感器能沿隧道全线监测围岩的应变情况,而应力计则能捕捉围岩内部的应力变化。这些数据将自动上传至云端,供监控人员实时分析。

所构建的物联网系统应与预测模型相结合。通过历史数据与实时数据的对比分析,系统能预测围岩的变形趋势,并在发现异常时及时发出预警。例如,当位移监测设备检测到围岩的位移超出设定阈值时,系统将自动触发预警,并建议施工人员采取加固措施。此外,物联网技术还能与建筑信息模型(BIM)技术系统结合,实现对支护结构和围岩稳定性的三维可视化管理。施工过程中,监测数据与BIM模型实时联动,帮助工程师准确判断施工进度与围岩状态,优化支护设计和施工策略。

5 结束语

本项目围岩稳定性研究从围岩级别与节理裂隙、岩层倾角与层理方向、埋深和应力条件四个关键因素入手,全面分析了围岩特性与施工过程中面临的主要稳定性挑战。不同级别的围岩、裂隙发育程度、岩层倾角与应力集中区域的特征直接影响开挖后的变形与破坏模式。在深埋或高应力区,围岩变形和应力重分布可能带来严重风险,因此需要采用分步开挖、预应力锚杆等应力控制措施。此外,优化支护工艺,如锚杆、喷射混凝土与钢拱架组合支护,可有效提升围岩的承载力与长期稳定性。与此同时,基于物联网的实时监测系统的实施,基于传感器网络与BIM技术的结合,可实现数据驱动的施工管理和风险预警,结合多层次技术的协同应用,工程能够在复杂地质条件下保持施工安全与效率,并为后续管理提供科学支持,确保项目长期的稳定性和经济性。

参考文献:

- [1] 马统洲,孙纬宇,严松宏,等.片岩隧道围岩稳定性与断面轮廓分形维数关系[J].兰州交通大学学报,2024,43(04):79-86.
- [2] 包焯明,陈子全,周子寒,等.高地应力软岩隧道快速施工围岩稳定性分析[J].现代隧道技术,2024,61(03):25-34.
- [3] 施伯超.浅埋隧道围岩稳定性与支护效果分析[J].福建建设科技,2024(03):55-58.
- [4] 徐红玉,焦治豪,毕志刚,等.降雨入渗对防军隧道浅埋小净距段围岩稳定性的影响[J].河南科技大学学报:自然科学版,2024,45(03):69-76.
- [5] 陈二平.既有大断面交叉洞室衬砌拆除控制及围岩稳定性研究[J].公路,2022(03):67.