

# 复杂地质条件下深埋隧道围岩稳定性分析与支护优化

王志鉴

中铁二院工程集团有限责任公司 四川成都 610000

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19695

**[摘要]** 复杂地质环境中,深埋隧道围岩受高地应力、断层破碎带及富水软岩等多重作用,稳定性管控面临较高挑战,易诱发变形、坍塌等工程灾害,科学的支护优化是工程安全的核心支撑。围绕这一关键命题,剖析复杂地质对深埋隧道围岩稳定性的作用特征,厘清围岩失稳的主要类型及演化趋势,梳理传统支护技术在适配性上的欠缺,构建针对性的支护优化路径并明确实施关键,相关研究可切实改善深埋隧道围岩稳定性,降低工程灾害隐患,为复杂地质背景下深埋隧道施工提供坚实技术支撑。

**[关键词]** 深埋隧道; 复杂地质; 围岩稳定性; 支护优化

## 引言

基础设施建设逐步向复杂地质区域拓展,深埋隧道工程规模持续扩大,穿越的地质环境愈发复杂,高地应力、断层破碎带、富水软岩及膨胀岩等不良地质体分布广泛,这类复杂地质会造成围岩结构力学性能发生剧烈波动,力学环境呈现高度不确定性,施工扰动极易诱发围岩大变形、滑移、坍塌及涌水等灾害,进而干扰工程推进、威胁施工安全并抬升维护成本。传统支护理念与技术复杂地质场景下往往存在适配性欠缺、响应迟缓等问题,需依托系统的稳定性分析优化支护方案,破解工程瓶颈,衔接后续围岩稳定性影响因素、失稳机理及支护优化的深度探究。

## 一、复杂地质条件下深埋隧道围岩稳定性核心影响因素

### (一) 地质构造因素对围岩稳定性的作用

地质构造是调控深埋隧道围岩稳定性的核心要素,断层、裂隙、节理等构造的发育状况直接决定围岩完整性与承载效能,断层破碎带作为典型不良地质构造,内部岩体松散且胶结薄弱。常伴随地下水富集,深埋环境下的高地应力作用易诱发岩体滑移、坍塌等失稳情形,裂隙与节理的分布密度、延伸走向会割裂围岩整体结构,形成应力集中区域,施工扰动下原有应力平衡被打破,局部岩体变形加剧并影响整体稳定,不同地质构造的组合效应会进一步提升围岩复杂性,褶皱与断层叠加区域的围岩受力状态更为复杂,稳定性管控难度相应提高。

### (二) 地下水因素对围岩稳定性的扰动

地下水是扰动深埋隧道围岩稳定性的重要外在要素,其影响集中于软化、侵蚀与压力作用三方面,富水区域地下水渗入围岩内部,软化岩体泥质成分,降低黏聚力与内摩擦角,导致围岩强度大幅下滑,进而引发岩体变形、剥落,地下水

长期侵蚀会破坏围岩内部结构,可溶性岩体区域易形成溶洞、溶蚀裂隙。进一步削弱围岩承载能力,深埋环境下地下水形成的水压力作用于隧道围岩表面,打破原有应力平衡,增加失稳风险,断层破碎带等透水性较强区域的地下水扰动效应更为突出。

### (三) 施工扰动因素对围岩稳定性的影响

施工扰动是诱发深埋隧道围岩失稳的直接要素,开挖方式、支护时机、施工进尺等施工环节均对围岩稳定性构成重要影响,不合理开挖会导致围岩应力释放过快,形成较大应力差,引发岩体剧烈变形,支护时机滞后使围岩在无支撑状态下持续变形,错失最佳加固节点,增加后续支护难度<sup>[1]</sup>。施工进尺过大会扩大围岩暴露面积、延长暴露时间,使围岩长期处于不稳定状态,频繁爆破作业产生的振动会进一步破坏围岩完整性,加剧失稳隐患,复杂地质条件下施工扰动的影 响会被放大,需重点管控。

## 二、复杂地质条件下深埋隧道围岩失稳类型及演化特征

### (一) 围岩失稳的主要类型及表现形式

复杂地质条件下深埋隧道围岩失稳形态多样,不同失稳类型展现出各异特征与破坏样式,软岩大变形是深埋软岩与膨胀岩地段的典型失稳形态,拱顶下沉、侧壁收敛、衬砌推移均为其主要表现,变形持续周期长且量级大,易造成支护结构扭曲、失效,结构面滑移多见于断层、裂隙发育区域,拱部与侧壁局部岩体滑移会引发局部坍塌,严重时可能蔓延为大范围滑坡。岩爆是高地应力环境下的特殊失稳形态,岩体突然破裂、弹射的短时能量释放对工程施工安全构成严重威胁,富水破碎带区域则常出现塌方、突泥、涌水等失稳情形,既干扰施工推进,也对隧道后期运营安全埋下隐患。

### (二) 围岩失稳的演化阶段及特征

复杂地质条件下深埋隧道围岩失稳并非突发,而是历经循序渐进的演化历程,可划分为初始变形、加速变形、失稳破坏三个阶段,初始变形阶段多发生于隧道开挖后,围岩受扰动影响出现应力重分布,伴随轻微位移与变形,此时岩体结构仍保持相对完整,变形处于可控范围,加速变形阶段围岩应力差持续攀升。岩体内部裂隙不断扩展、贯通,变形速率大幅加快,支护结构开始承受较大荷载,出现轻微开裂、位移等情况,未及时采取有效措施便会快速进入失稳破坏阶段,失稳破坏阶段围岩岩体发生大面积破碎、滑移或坍塌,支护结构彻底失效,还可能诱发涌水、突泥等次生灾害,造成严重工程损失。

### (三) 不同复杂地质下失稳演化的差异

不同复杂地质条件下,围岩失稳的演化历程存在显著差异,核心症结在于地质体力学特性与环境条件的不同,高地应力区域围岩失稳演化速率较快,多以岩爆、岩体弹射等突发形式呈现,初始变形阶段持续时间短,易快速过渡至加速变形与失稳破坏阶段,富水断层破碎带区域围岩失稳演化与地下水作用紧密相关<sup>[2]</sup>。初始变形阶段主要体现为岩体软化、轻微滑移,随着地下水持续侵蚀与应力扰动,变形逐步加速,最终引发坍塌、突泥等灾害,膨胀岩区域围岩失稳演化具有持续性,初始变形阶段较长,变形量随时间逐步累积,即便施加支护,仍可能出现长期缓慢变形,易导致支护结构疲劳损坏。

## 三、复杂地质条件下深埋隧道传统支护技术存在的问题

### (一) 传统支护技术的适配性不足问题

传统支护技术大多依托常规地质条件开展设计,在复杂地质场景中适配性短板突出,难以达成深埋隧道围岩稳定性管控需求,软岩大变形区域内,传统刚性支护结构缺乏充足可伸缩性,无法适配围岩持续变形态势,易出现开裂、折断等状况,难以有效约束围岩变形发展,富水破碎带区域里。传统支护的防水防渗效能欠缺,地下水易渗透至支护结构内部,软化围岩及支护材料,削弱支护强度,最终引发支护失效,高地应力岩爆区域中,传统支护结构抗冲击性能薄弱,难以承受岩爆产生的瞬时冲击力,易被损毁,无法发挥有效防护效能,整体适配性与复杂地质条件下的工程需求存在明显差距。

### (二) 支护参数设计不合理的问题

支护参数设计不合理是传统支护技术的核心短板,直接关联支护成效与围岩稳定性,部分支护设计未充分考量深埋

环境下的高地应力、地下水等复杂要素,仅参常规地质条件确定支护参数,要么导致支护强度不足,无法抵御围岩压力,要么形成过度支护,造成工程资源浪费,支护参数中锚杆长度、间距及喷射混凝土厚度等设置不合理,难以充分调动围岩自身承载潜能,无法构建高效可靠的支护体系。锚杆长度不足则无法深入稳定岩体,难以发挥锚固效能,喷射混凝土厚度过薄难以抵御围岩压力,过厚则增加工程成本,且易因收缩产生裂缝,进一步影响整体支护成效,制约支护作用的充分发挥。

### (三) 支护施工工艺不规范的问题

即便支护方案设计科学合理,不规范的施工工艺仍会严重削弱支护效果,埋下围岩失稳隐患,锚杆施工环节中,钻孔深度、孔径与设计不符,锚杆安装不牢固、注浆不饱满,导致锚杆无法有效发挥锚固作用,难以将围岩与稳定岩体衔接为整体,喷射混凝土施工时,原材料配比失衡、喷射厚度不均,且养护不及时,会造成混凝土强度不足、表面开裂,降低支护结构的整体性与承载能力<sup>[3]</sup>。支护施工与开挖作业衔接失调,支护时机滞后、施工顺序混乱,会延长围岩暴露时间,加剧围岩变形,进一步弱化支护效果,显著提升围岩失稳风险,影响工程施工安全与进度。

## 四、复杂地质条件下深埋隧道支护优化路径及实施要点

### (一) 基于地质特性的支护方案针对性优化

支护方案优化需立足不同复杂地质的固有特性,实现精准化设计。软岩大变形区域宜采用柔性 with 刚性协同支护,引入可伸缩结构适配围岩持续变形,并搭配预应力锚杆强化承载效能。富水破碎带区域应重点优化防水防渗性能,采用超前注浆封堵通道,选用防水材料并完善排水系统。高地应力岩爆区域需采用抗冲击支护,增加层厚并搭配缓冲垫层以吸收瞬时冲击力<sup>[4]</sup>。针对软岩大变形难题,福州大学吴学震团队研发了成套控制技术:恒阻锚索可承受35吨拉力、单次冲击吸能102千焦,抗剪锚杆变形量较传统提升85%,让压拱架承载力达传统钢架20倍,可缩混凝土能压缩20%而不开裂。该成果已成功应用于兰海高速木寨岭隧道等重大工程,有效控制了围岩变形,将坍塌风险降至最低。

### (二) 支护参数的科学优化与动态调整

支护参数优化需立足地质勘察,科学确定锚杆长度、间距及喷射混凝土厚度,激发围岩自承能力,构建“围岩-支护”协同体系。施工中应强化动态监测,发现变形超标时及时加密锚杆、调整厚度,并优化材料配比以提升强度与耐久性。

以宜兴高铁兴山东隧道为例, 面对极高地应力软岩大变形挑战, 项目团队创新采用锚索主动支护与双层体系, 针对炭质页岩特性将锚杆优化为 4.5~5.0m、间距加密至 1.0~1.2m, 喷混凝土增至 25cm 以上。当监测变形速率超 50mm/d 预警值时, 及时增设锁脚锚杆动态调控, 成功遏制围岩变形, 保障了这条全长 16.88 公里的特长隧道于 2026 年 1 月顺利贯通。

### (三) 支护施工工艺的规范化与精细化控制

规范且精细化的施工工艺是保障支护优化成效的核心, 需从施工准备、作业实施到后期养护全流程严格管控, 施工前期对作业人员开展专项技术培训, 明确施工标准与操作规范, 全面检查施工设备性能与原材料质量, 确保施工条件满足设计要求。锚杆施工环节严格控制钻孔深度与孔径, 保障锚杆安装牢固, 注浆过程中确保注浆饱满、均匀, 提升锚固可靠性。喷射混凝土施工严格按照原材料配比搅拌, 控制喷射速度与厚度, 保证混凝土表面平整密实, 施工完成后及时开展养护作业, 确保混凝土强度达标。优化施工流程, 保障开挖与支护衔接顺畅, 缩短围岩暴露时长, 降低施工扰动对围岩稳定性的不利影响。

## 五、复杂地质条件下深埋隧道支护优化效果保障措施

### (一) 完善地质勘察与超前预警体系

地质勘察与超前预警是支护优化成效的重要前提, 需构建完善的勘察预警体系, 提前识别各类地质风险, 施工前期采用多种勘察技术手段, 全面排查隧道沿线地质构造、地下水分布等情况, 明确复杂地质的分布范围与核心特性, 为支护方案优化提供精准可靠的基础依据。施工过程中建立超前探测体系, 运用孔内声波、电视定量分析等技术方法, 精确评估掌子面安全厚度, 提前预判地质风险, 对可能出现的围岩失稳隐患提前部署防控措施。强化围岩变形、应力及地下水动态监测, 建立健全预警机制, 异常情况出现时迅速启动应急处置流程, 防止灾害进一步扩大蔓延, 为支护优化实施筑牢安全防线。

### (二) 强化施工全过程质量管控

施工全过程质量管控是保障支护优化效果的核心环节, 需建立全方位、多层次的质量管控体系, 明确各施工环节的质量标准与责任分工, 加强对支护材料、施工工艺、施工流程的全程监督检查, 杜绝不合格材料进入施工现场, 严禁各类不规范施工行为。重点强化锚杆安装、注浆、喷射混凝土

等关键工序的质量验收, 每道工序验收合格后方可进入下一工序作业, 加强施工过程现场巡查力度, 及时排查并整改施工中出现的各类问题, 确保支护施工质量严格契合设计要求, 保障支护结构的稳定性与可靠性, 为围岩稳定性控制提供坚实保障。

### (三) 建立支护效果跟踪与优化完善机制

支护效果跟踪与优化完善是确保支护体系长期有效的重要支撑, 需建立常态化跟踪优化机制, 施工完成后持续跟踪支护结构工作状态, 监测围岩变形与应力变化情况, 系统评估支护优化方案的实施成效, 及时发现支护体系存在的短板与不足。针对支护效果不佳的区域, 深入分析问题成因, 结合现场地质条件与监测数据, 进一步优化支护方案, 调整支护参数与施工工艺, 切实提升支护效能<sup>[5]</sup>。总结不同复杂地质条件下支护优化经验, 形成可推广的技术规范, 为后续类似深埋隧道工程支护优化提供参考, 持续提升复杂地质条件下深埋隧道围岩稳定性控制水平。

## 结语

本文围绕复杂地质条件下深埋隧道围岩稳定性与支护优化展开系统探讨, 明确地质构造、地下水、施工扰动为核心影响因素, 梳理围岩失稳演化特征, 剖析传统支护在适配性、参数设计及施工工艺上的短板, 据此提出针对性支护优化路径与实施要点, 建立效果保障措施, 形成完整研究思路, 可破解稳定性控制难题, 提升支护适配性与可靠性, 为工程安全及同类项目提供支撑与参考。

## [参考文献]

- [1] 张法利, 刘盛. 深埋复杂地质条件下特长隧道平导快速施工技术[J]. 工程建设与设计, 2026, (04): 114-116.
- [2] 耿招, 黄纲领, 雷安平. 深埋特长隧道地应力反演与围岩稳定性分析[J]. 路基工程, 2025, (03): 225-231.
- [3] 高帷峻. 深埋复杂地质条件下隧道开挖监测技术研究与应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (27): 94-96.
- [4] 牛星. 复杂地质条件下深埋非圆形隧道稳定性分析[D]. 石家庄铁道大学, 2024.
- [5] 任洋, 李天斌, 张佳鑫, 等. 复杂地质条件深埋特长隧道地应力场智能反演研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(02): 47-53+72.