

复杂地质水工隧洞支护施工工艺优化与稳定性研究

吴启龙

阜宁县水务局 江苏 盐城 224400

摘要:复杂地质水工隧洞普遍存在围岩破碎、地下水丰富、地应力偏高的问题,常规支护工艺适配性较差,施工过程中易出现围岩变形超标、支护开裂甚至局部坍塌等病害。为提升隧洞施工安全性与结构稳定性,本文依托复杂地质隧洞施工实际工况,分析不良地质的工程危害、围岩破坏机理及支护施工难点,梳理传统支护工艺存在的质量缺陷与稳定性隐患。针对核心施工工序开展工艺优化,构建分区差异化组合支护体系,并通过数值模拟对比验证优化方案的支护效果。同时配套完善质量管控与风险防控措施,可为同类复杂地质水工隧洞支护施工提供工程参考。

关键词:复杂地质;水工隧洞支护施工;工艺优化;稳定性;质量保障与防控措施

引言:随着水利工程建设逐步向深部山区及复杂地层推进,水工隧洞面临的地质条件愈发复杂,破碎围岩、富水渗流、高地应力等不良地质大幅增加了隧洞施工难度。传统统一化支护施工工艺较为固化,难以适配多变的围岩条件,经常出现锚固不牢、混凝土开裂、支护受力不均等质量问题,极易诱发围岩失稳事故,影响工程施工进度与运行安全。为解决现场施工痛点,有必要针对性改良支护施工工艺。

1 复杂地质水工隧洞工程特性与支护机理分析

1.1 复杂地质类型及工程危害特征

水工隧洞施工多面临破碎围岩、富水软弱地层与高地应力三类复杂地质,不同地质对应的施工隐患差异明显。破碎围岩裂隙发育、结构松散、整体性差,隧洞开挖后岩面易掉块、脱落,处理不及时易引发局部塌方,是施工现场最为频发的安全隐患。富水软弱地层多含淤泥、砂层,土体承载力低、透水性强,施工中易产生渗水、涌水、流沙等病害,不仅会软化围岩、降低岩体强度,还会持续侵蚀初期支护结构,导致支护变形、失效破坏。高地应力地层岩体应力积聚显著,隧洞开挖打破原始应力平衡后,岩体易出现岩爆、挤压变形、大收敛变形等问题,严重影响隧洞成型质量,直接威胁支护结构整体稳定性。

1.2 水工隧洞围岩变形破坏机理

隧洞围岩变形破坏主要由开挖扰动引发应力重分布所致。原始地层岩体处于应力平衡状态,开挖形成临空面后,围岩应力快速释放与转移,使岩体产生挤压、拉伸及剪切破坏。破碎围岩缺少完整承载体系,应力调整过程中裂隙持续贯通扩张,岩体逐步松散脱落,进而发

展为大面积坍塌。富水围岩受地下水渗透影响,岩体颗粒粘结力大幅降低,塑性变形不断累积,引发围岩持续沉降与断面收敛。

1.3 复杂地质下支护施工核心难点

复杂地质隧洞支护施工主要存在围岩可控性差、支护适配性不足两大难点。不良围岩稳定性弱,开挖后变形速度快、破坏随机性强,有效支护窗口期短,极易因支护滞后引发围岩失稳。常规锚喷与钢拱架支护工艺适配完整围岩效果较好,但在破碎、富水及高地应力地层中,存在支护贴合度差、受力不均、抗变形能力不足等问题^[1]。

2 复杂地质水工隧洞常规支护施工工艺及缺陷

2.1 现阶段主流隧洞支护施工工艺体系

目前水工隧洞施工中,应用最广泛的支护体系以锚喷支护、钢拱架支护及二者组合支护为主。锚喷支护凭借施工便捷、成型速度快的优势,多用于地质条件较好的隧洞段,通过锚杆锚固围岩、喷射混凝土封闭岩面,形成整体承载结构。钢拱架支护刚度大、承载能力强,常单独应用于围岩较差的段落,可快速约束岩体变形。组合支护结合两者优势,将锚喷柔性支护与钢拱架刚性支护相结合,是当前复杂地质隧洞的主流支护形式,能够兼顾初期支护封闭效果与后期整体承载能力,适配多数隧洞施工场景。

2.2 复杂地质条件下常规支护施工工艺应用问题

在破碎、富水、高地应力等复杂地质环境中,常规支护工艺的适配性短板凸显。破碎围岩施工时,锚杆钻孔易出现塌孔、卡钻问题,锚固力难以达标,混凝土

喷射易出现空鼓、开裂。富水地层中,地下水持续渗流会稀释混凝土浆液,降低支护结构粘结强度,同时易造成钢拱架锈蚀。高地应力区域围岩变形量大、变形周期长,常规支护结构刚度与韧性不足,无法适配岩体持续蠕变,常出现支护挤压变形、开裂等病害。

2.3 工艺缺陷对隧洞施工稳定性的影响

常规支护工艺的各类缺陷会直接威胁隧洞整体施工稳定性。锚杆锚固失效、混凝土空鼓开裂,会导致支护结构与围岩无法紧密贴合,整体承载体系松散,难以抵御围岩应力变化,易引发局部掉块、小型塌方。地下水侵蚀造成的支护结构强度衰减,会大幅降低支护耐久性,诱发持续渗水、围岩软化等连锁问题。而高地应力下支护变形失效,会造成隧洞断面收敛超标、围岩塑性区持续扩张,严重时引发大面积失稳坍塌,极大增加施工安全风险与工程返修成本^[2]。

3 复杂地质水工隧洞支护施工工艺优化设计

3.1 工艺优化总体思路与优化原则

本次支护工艺优化结合复杂地质隧洞实际施工条件,针对破碎围岩、富水地层及高地应力区域常规支护成型质量差、贴合度不足、变形控制效果弱等现场问题开展针对性改良。优化摒弃传统统一支护模式,确立“分区适配、工序提质、结构增效”的总体思路,结合不同施工段的围岩完整性、含水条件和应力状态,差异化调整施工工序与支护参数,有效解决传统工艺地质适配性差的短板。本次优化遵循三项核心原则:一是安全性原则,以约束围岩变形、防范塌方及支护失效为核心,保障隧洞整体施工稳定;二是实操性原则,贴合现场设备与施工能力,工序简洁可行,便于现场落地应用;三是经济性原则,在满足安全规范的前提下精简冗余工序,控制材料损耗,兼顾工程施工质量与综合经济效益。

3.2 支护施工关键工序优化改进

结合复杂地质施工难点,对围岩预处理、锚固施工、混凝土喷射、钢拱架安装四大核心工序进行实操优化,整改常规工艺的施工缺陷。(1)围岩预处理工序优化。针对破碎围岩掉块、塌孔问题,取消传统大面积清凿方式,采用小型机械配合人工精细修整隧洞轮廓,规避过度扰动围岩。富水地段增设超前导排水工艺,在开挖轮廓线外布设排水孔,提前疏导围岩积水,降低水体对后续支护施工的干扰,为支护施工提供干燥作业条件。(2)锚杆、锚索施工工艺优化。常规钻孔易出现塌孔、锚固不饱满问题,优化后采用套管跟进钻孔工艺,

钻孔完成后同步推送套管护壁,杜绝孔壁坍塌。针对不同地质调整锚固参数,破碎围岩采用加长锚固方式,富水地层选用速凝锚固砂浆,保证锚杆快速受力,杜绝锚固失效、虚锚等质量问题。(3)喷射混凝土施工工艺优化。优化混凝土配合比,掺加适量速凝剂与防水外加剂,提升混凝土早期强度与抗渗性能。施工采用分层分次喷射方式,首层薄喷封闭岩面,后续分层加厚,严格控制每层喷射厚度,有效解决常规喷射空鼓、开裂、回弹率过高的问题,提升混凝土层密实度。(4)钢拱架安装工艺优化。调整钢拱架加工精度,提前根据隧洞断面尺寸预制加工,现场精准拼接。安装时增设定位垫块与锁脚锚杆,严格控制拱架间距、垂直度与贴合度,对拱架间隙采用混凝土回填密实,避免拱架悬空、受力不均,提升刚性支护的整体成型质量^[3]。

3.3 复杂地质适配性新型组合支护工艺构建

针对单一支护工艺无法适配复杂地质的问题,结合各工序优化要点,构建分区差异化组合支护工艺。(1)破碎围岩地段,采用“超前小导管+锚喷+钢拱架”组合支护,通过小导管超前加固松散岩体,配合锚喷柔性支护与钢拱架刚性支护,约束围岩松散变形;(2)富水软弱地段,采用“排水预处理+防水喷射混凝土+加密锚杆”组合模式,先治水、再支护,杜绝水体持续侵蚀支护结构;(3)高地应力地段,采用“分层喷射+加长锚索+加厚钢拱架”支护体系,通过加长锚索深入稳定岩层,搭配高强度刚性支护,抵御岩体蠕变与挤压变形。该组合工艺摒弃传统统一支护模式,可精准适配不同复杂地质施工需求。

4 基于数值模拟的优化支护工艺稳定性分析

为验证复杂地质条件下支护工艺的优化应用效果,本文采用有限元数值模拟方法,对常规支护与优化支护工艺下的围岩及支护结构受力变形特征开展对比分析,以此判定优化工艺的地质适配性与结构稳定性。本次模拟全部采用工程现场实测地质参数、施工工况及支护参数,摒弃理想化假设,保证计算结果贴合实际施工状态。(1)模拟模型与参数确定。结合工程破碎围岩、富水地层的地质特征,建立三维隧洞开挖支护数值模型,依据隧洞断面尺寸和围岩影响范围确定模型边界,岩体本构关系采用摩尔-库伦屈服准则。按照现场勘察数据赋值岩体容重、弹性模量、黏聚力、内摩擦角等关键参数,同时结合常规工艺与优化工艺的施工标准,分别设置锚杆间距、喷射混凝土厚度、钢拱架规格等差异化支护参数。(2)模拟工况设置。本次研究设置两组对比工况,第一组为传统支护工况,采用常规锚喷与钢拱架组

合支护形式；第二组为优化支护工况，采用分区支护、分层喷射、加密锚固的优化方案。模拟严格按照现场施工流程，依次完成地应力平衡、隧洞分步开挖、支护结构施作等工序。（3）模拟结果对比分析。数值计算结果表明，相较于传统工艺，优化支护工艺可显著降低围岩竖向沉降与水平收敛变形，围岩整体变形更加均匀。优化后支护结构应力分布更为合理，消除了局部应力集中问题，有效避免钢拱架挤压变形、混凝土开裂等病害。同时，围岩塑性区范围明显缩小、扩展速率显著放缓，充分说明优化工艺能够良好适配复杂地质工况，有效控制围岩变形与结构受力，隧洞整体稳定性能优于传统施工工艺^[4]。

5 复杂地质水工隧洞支护施工质量保障与稳定性防控措施

5.1 复杂地质隧洞支护施工质量管控体系

结合复杂地质水工隧洞施工特点，搭建全过程动态质量管控体系，覆盖开挖、支护、监测等各施工环节，摒弃传统事后验收的管控模式。（1）建立分级责任管理制度，明确班组、技术部、质检部各级岗位职责，落实工序终身质量责任制，杜绝违规施工、敷衍施工等问题。（2）推行技术交底常态化制度，针对破碎、富水、高地应力等不同地质工况，提前开展专项技术交底，确保施工人员掌握差异化支护参数与施工要点。（3）落实工序三检制度，每道支护工序完成后，通过自检、互检、专检层层把控，验收合格后方可进入下一工序，从制度层面规避施工质量缺陷。

5.2 关键施工工序质量把控要点

针对支护施工核心工序制定专项质量把控要点，聚焦现场施工薄弱环节精准管控。（1）围岩开挖与预处理阶段，严控隧洞开挖轮廓尺寸，减少对周边围岩的扰动，严格落实排水、岩面封闭预处理措施，规避围岩松散、渗水隐患。（2）锚固施工阶段，统一管控钻孔孔径、深度、间距，保证锚固砂浆饱满密实，杜绝虚锚、漏锚、锚固长度不足等质量问题。（3）喷射混凝土阶段，严格把控材料配比与喷射厚度，采用分层喷射工艺，重点排查墙面空鼓、开裂、回弹超标等缺陷。（4）钢拱架安装阶段，严控拱架间距、垂直度与贴合度，保证锁脚构件安装牢固，杜绝拱架悬空、偏移等施工问题。

5.3 隧洞围岩失稳风险预判与防控措施

结合复杂地质隧洞施工风险特征，建立实时风险预

判与常态化防控机制。（1）依托现场监测数据，实时追踪围岩沉降、断面收敛、支护应力变化情况，数据异常时立即停工排查，提前预判围岩失稳隐患。（2）破碎围岩地段严控单次开挖进尺，坚持短进尺、快封闭施工原则，减少围岩裸露时间。（3）富水地层持续做好排水降压工作，及时疏导围岩渗水，防止水体软化围岩、侵蚀支护结构。（4）高地应力地段合理调整支护节奏，预留微量变形空间，避免支护结构应力集中出现挤压破坏^[5]。

5.4 特殊复杂地质应急支护处置方案

针对隧洞施工突发塌方、涌水、岩爆等险情，制定专项应急处置方案。（1）局部掉块、小型塌方时，立即停止开挖，采用快速喷射混凝土+临时锚杆封闭岩面，再进行补强支护，防止塌腔持续扩大。（2）突发涌水渗水险情，优先增设排水孔导排积水，采用防水砂浆与速凝混凝土封堵渗水通道，必要时增设小导管注浆加固围岩。（3）遭遇岩爆、围岩大变形病害，及时加密钢拱架与锚索支护，强化整体支护刚度，有效控制围岩持续变形，保障隧洞施工安全。

结束语：本文通过分析复杂地质水工隧洞的围岩特性与支护施工缺陷，完成了支护施工关键工序的优化改进，形成了适配不同不良地质的差异化组合支护工艺。数值模拟结果证实，优化后的支护工艺能够有效约束围岩沉降与收敛变形，改善支护结构应力分布，提升隧洞整体稳定性能。通过建立全过程质量管控体系与风险应急处置方案，可有效规避复杂地质施工中的失稳风险。

参考文献

- [1] 陈巧. 水工隧洞支护结构设计与施工方法研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2024(10): 0164-0167.
- [2] 王漪钊. 复杂地质条件下水利项目隧洞施工中的岩土工程技术优化研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2025(9): 117-120.
- [3] 安娜. 水工隧洞衬砌与喷锚支护加固设计及施工研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2025(7): 009-012.
- [4] 蒋卓良. 复杂地质条件下水工隧洞围岩稳定性与支护优化研究 [J]. 江西建材, 2026(1): 248-250+253.
- [5] 宋威. 浅谈不良地质条件情况水工隧洞设计与施工 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2022(7): 216-220.