

水利工程

复杂地质条件下水利隧洞开挖与支护技术优化分析

闫芳芳

新疆兵团水科院（有限公司）

DOI：10.32629/jpm.v7i7.8981

[摘要] 水利隧洞是水资源配置、防洪调度、水力发电工程的核心地下构筑物，施工过程中常穿越断层破碎带、软弱风化岩层、裂隙富水地层等复杂不良地质环境。此类地质围岩整体性差、自稳能力弱、渗水通道发育，受施工扰动后极易产生围岩松弛、断面收敛、局部坍塌及涌水涌泥等病害，对施工安全、结构质量与工程进度造成严重制约。传统隧洞开挖支护工艺参数固定、扰动控制不足、支护体系单一，难以适配复杂地质的动态变形特征。本文基于复杂地质隧洞施工难点，系统剖析传统施工技术的局限性，提出适配不良地质的精细化开挖、动态复合支护及时序施工优化方案，并结合实际水利工程案例验证优化技术的应用成效。

[关键词] 水利隧洞；复杂地质；开挖工艺；支护优化

[中图分类号] TV512

[文献标识码] A

Optimization Analysis of Tunnel Excavation and Support Techniques for Water Conservancy Projects under Complex Geological Conditions

Yan Fangfang

Xinjiang Production and Construction Corps Water Science Research Institute (Co., Ltd.)

[Abstract] Water conservancy tunnels are core underground structures for water resource allocation, flood control scheduling, and hydropower generation projects. During construction, these tunnels often traverse complex adverse geological environments such as fault zones, weak weathered rock layers, and fractured water-bearing strata. Such geological surrounding rock exhibits poor integrity, weak self-stabilization capacity, and well-developed seepage pathways, making it highly susceptible to issues like surrounding rock loosening, cross-sectional convergence, localized collapse, and water or mud outburst upon construction disturbance, thereby posing significant challenges to construction safety, structural quality, and project progress. Traditional tunnel excavation and support techniques feature fixed process parameters, inadequate disturbance control, and simplistic support systems, which struggle to adapt to the dynamic deformation characteristics of complex geologies. Based on the construction challenges encountered in tunnels under complex geological conditions, this paper systematically analyzes the limitations of conventional construction methods, proposes refined excavation approaches, dynamic composite support systems, and optimized construction sequencing strategies tailored for adverse geological conditions, and validates the effectiveness of these optimized techniques through practical case studies from water conservancy projects.

[Key words] Water conservancy tunnel; complex geology; excavation techniques; support optimization

引言

水利隧洞开挖属于卸荷扰动型施工，围岩变形具备显著的时效性与空间性，常规粗放开挖、统一化支护模式无法匹配多变的地质条件，易引发超挖超标、衬砌开裂、掌子面失稳等工

程问题，增加施工风险与治理成本。为实现复杂地质隧洞安全、高效、标准化施工，亟需对传统开挖与支护技术进行系统性优化。本文结合工程实践经验与典型案例，从施工技术缺陷、优化方案、工程应用效果三方面展开研究，对提升水利地下工程

精细化施工水平具有重要实践价值。

1 复杂地质隧洞施工特性及传统技术局限性

1.1 复杂地质核心施工特性

水利隧洞遭遇的复杂不良地质主要涵盖断层破碎带、软弱夹层、强风化碎裂岩体与富水裂隙地层四大类型，不同地质的围岩力学特性与施工风险存在显著差异，整体呈现低强度、高流变、强渗水、易失稳的施工特征。断层破碎带岩体结构完全被构造应力切割，岩块离散、空隙发育、无整体承载能力，开挖卸荷后围岩快速松弛，短时间内即可出现拱顶掉块、边墙垮塌，是隧洞施工中风险最高的地质段^[1]。软弱风化岩层岩质松软、塑性变形显著，围岩变形具有长期蠕变特性，开挖后断面持续收敛缩径，易造成初衬挤压开裂、结构变形超标。裂隙富水地层内部渗水通道贯通，地下水持续软化围岩结构，大幅降低岩体摩擦强度与锚固粘结力，同时伴随局部突水、涌泥隐患，严重干扰支护成型与工序衔接。高地应力破碎岩层开挖后应力快速重分布，易产生岩爆、岩体剥落、结构性错位，对支护体系的整体刚度、抗变形能力与封闭时效提出极高要求。相较于常规完整围岩，复杂地质隧洞施工对开挖扰动控制、支护时机、支护结构适配性、水环境治理的精细化要求更高，传统固定化施工工艺存在明显适配短板。

1.2 传统开挖工艺存在的缺陷

传统水利隧洞多采用全断面一次性爆破、固定大循环进尺的开挖方式，适配性单一，在复杂地质条件下暴露诸多技术缺陷。首先，爆破扰动控制不足。传统多孔齐爆模式起爆集中、冲击波能量大，极易加剧破碎围岩裂隙扩张，造成围岩二次损伤，破坏原生岩体的残余承载结构，导致隧洞超挖量大、轮廓成型差，增加后续回填工程量与结构隐患。其次，开挖进尺缺乏动态调整。传统施工不区分围岩好坏，统一采用 1.5m 至 2.0m 大进尺开挖，不良地质段掌子面裸露时间过长，围岩卸荷松弛充分发展，显著提升坍塌风险。再次，开挖方式粗放，未针对破碎、软弱地质采用分层分步施工，一次性全断面卸荷导致围岩整体失稳，变形难以控制。最后，开挖、清渣、支护工序间隔时间久，裸洞长期暴露，受空气风化、地下水浸润影响，围岩稳定性持续衰减，进一步加剧施工隐患。

2 复杂地质隧洞开挖与支护技术优化方案

2.1 低扰动精细化开挖技术优化

摒弃传统粗放爆破、固定进尺模式，采用预裂微差爆破、动态循环进尺、台阶分层开挖的精细化工艺，最大限度保留原生围岩完整性。在爆破工艺优化方面，复杂不良地质段取消集中齐爆，采用周边眼预裂爆破、掏槽眼微差分段起爆方式。通过精准控制炮孔间距、单孔装药量与起爆时差，弱化爆破冲击波对周边围岩的损伤，保证隧洞轮廓平整，将超欠挖误差控制在规范允许范围内，有效保护围岩原生承载结构。在循环进尺优化方面，建立围岩等级动态匹配机制：断层破碎带、富水极

软地层单次进尺控制在 0.8m 至 1.0m；强风化软弱围岩控制在 1.0m 至 1.5m；仅完整性较好围岩采用常规进尺^[2]。通过短进尺掘进缩短裸洞暴露时长，从源头降低围岩松弛风险。在开挖结构优化方面，大断面不良地质段采用上台阶超前、下台阶滞后、核心土预留的分层开挖工法。核心土可有效支撑掌子面岩体，抑制挤出变形与局部垮塌，分步卸荷、分步成型，避免全断面开挖造成的整体应力失稳，显著提升开挖过程安全性。

2.2 多层次动态复合支护技术优化

结合不同复杂地质的变形规律，构建超前预支护止水+初期强支护+围岩固结注浆+动态补强的多层次复合支护体系，实现从被动支护向主动加固转变。超前支护阶段，针对断层破碎带、富水松散段布设超前小导管注浆预支护，采用 $\Phi 42$ 无缝钢管环向布置，配合水泥-水玻璃双液注浆，快速胶结松散岩体、封堵裂隙渗水，在掌子面前方形成连续防护壳体，提前规避坍塌、涌水风险。初期支护阶段升级复合结构体系，采用“中空注浆锚杆+加密钢筋网+型钢拱架+加厚喷砼”联合支护^[3]。选用 $\Phi 25$ 中空注浆锚杆提升锚固深度与围岩握裹力，通过注浆填充深层裂隙；C25 喷射混凝土厚度提升至 12 至 15cm，增强表层封闭效果；危险地段架设 I20a 型钢拱架，缩小拱架间距，大幅提升支护整体刚度与抗挤压能力。围岩加固阶段，对裂隙发育、岩体松散区段实施径向固结注浆，通过浆液扩散填充岩体空隙，将离散碎块胶结为整体，提升围岩自承载能力，形成“围岩自稳+结构支护”的协同受力体系。动态补强阶段，依托现场监测数据，对沉降收敛超标、局部开裂区域及时增补锁脚锚杆、补喷混凝土、加密钢支撑，实现变形动态可控。

2.3 施工时序与现场管控优化

为解决传统工序滞后、裸洞空置过长、治水不到位的问题，优化形成短进尺、快封闭、勤监测、先治水的闭环施工流程。严格把控支护时效，开挖清渣完成后 30 分钟内完成初喷封闭岩面，2 小时内完成系统支护成型，最大程度缩短围岩裸露时间，抑制初期松弛变形^[4]。富水地层严格遵循“先治水、后开挖、再支护”原则，通过排水盲沟导排、裂隙注浆止水，消除水体对围岩与支护结构的软化侵蚀。同步建立全过程信息化监测体系，实时采集拱顶沉降、边墙收敛、围岩应力变化数据，根据变形速率动态调整开挖进尺、支护参数与施工节奏，实现地质条件、施工工艺、支护强度的动态匹配，提升施工精细化管理水平。

2.4 不良地质段风险预判与超前地质预报技术优化

超前地质预报是复杂地质隧洞施工的前置关键环节，传统施工往往将预报作为辅助手段，预报手段单一、解析深度不足，难以提前识别隐伏断层、突水通道、松散囊体等隐蔽地质灾害，经常出现灾害发生后再处置的被动局面。物探层面综合运用地质雷达、TSP 隧道地震波探测开展长距离宏观探测，预判前方 200m 范围内大型断层构造、岩体完整性及地下水富集区分布；

地质雷达侧重掌子面前方 30–50m 短距离精细探测，捕捉小型破碎带、局部含水裂隙异常信号。钻探验证作为物探异常点的校核手段，在物探显示高风险区域布置超前探孔，探孔同时兼具排水泄压功能，当探孔出现涌水、涌砂现象时，立即暂停掘进启动注浆封堵预案。掌子面地质素描则对出露岩体产状、节理裂隙、渗水情况进行记录，校正物探解译结果，降低单一探测手段带来的误判、漏判^[5]。建立预报成果快速转化机制，每一次超前地质预报完成之后，地质、开挖、支护三方技术人员开展联合研判，形成地质简报，直接输出开挖进尺、爆破药量、超前支护类型等施工控制参数，实现预报–研判–参数调整闭环。

3 工程案例应用与优化效果分析

3.1 工程概况

本次案例依托某山区引水隧洞工程，该隧洞为区域水资源调配重点工程，主洞总长 9.2km，标准开挖断面 4.3m×4.6m。隧洞沿线穿越多处地质构造带，其中 K3+050—K3+260 洞段为典型复杂不良地质段，主要以断层破碎带、强风化软岩、裂隙富水地层为主。该段岩体破碎松散、结构完整性差，裂隙贯通性渗水明显，围岩整体稳定性极差。工程前期采用传统爆破开挖、常规喷锚支护工艺施工，施工过程频繁出现拱顶掉块、局部小范围坍塌、初衬开裂、断面收敛超标等问题，超挖现象严重，施工进度缓慢，安全隐患突出、返工成本较高。为彻底解决施工难题，该洞段全面应用本文优化后的开挖与支护成套技术。

3.2 原施工存在的主要问题

优化施工前，该不良地质洞段传统工艺施工暴露出典型技术短板：一是常规爆破扰动大，围岩二次破碎严重，平均超挖深度达 17 至 20cm，隧洞成型粗糙；二是固定大进尺开挖导致掌子面暴露时间长，围岩蠕变变形持续发展，日均变形量超标；三是支护结构单一、刚度不足，无法抵抗软岩挤压变形，初衬多处出现鼓包、开裂；四是未实施超前止水与预加固，富水段渗水冲刷围岩，锚固效果大幅衰减；五是工序衔接滞后，支护封闭不及时，围岩松弛变形无法有效控制。

3.3 优化技术现场实施方案

本洞段严格落地精细化优化施工体系，具体实施内容如下：开挖环节采用台阶分层开挖+预裂微差弱爆破，取消大药量齐爆，单次循环进尺控制在 0.9m，预留核心土稳定掌子面，严控爆破装药量，最大限度降低施工扰动，规范隧洞轮廓成型。支护环节增设超前小导管注浆预支护，封堵裂隙渗水、固结松散岩体；初期支护采用 14cm 厚 C25 喷砼、中空注浆锚杆、加密钢筋网与 I20a 钢拱架联合支护，对深层裂隙岩体实施径向固结注浆，提升围岩整体性与自稳能力。施工管控环节落实快速封闭机制，大幅压缩裸洞空置时间，布设排水系统疏导地下

水，同步开展围岩变形实时监测，根据数据动态微调施工参数，实现全过程安全可控。

3.4 应用成效综合分析

优化技术实施后，该复杂地质洞段施工质量、安全、效率实现全方位提升，整改了原有施工病害，综合成效显著。一是围岩扰动大幅降低，成型质量显著提升。隧洞超挖量由原平均 18cm 降至 6cm 以内，无明显欠挖缺陷，隧洞轮廓平整规范，原生围岩结构完整性得到有效保护，回填工程量大幅减少。二是围岩变形得到有效控制，结构稳定性显著增强。优化复合支护体系有效抵抗软岩蠕变与挤压变形，拱顶最大沉降量由 41mm 降至 14mm 以内，边墙收敛变形稳定控制在 18mm 以下，未再出现初衬开裂、掉块、坍塌等病害，结构长期安全性大幅提升。三是施工效率明显提升，工程成本有效节约。短循环、快封闭的精细化施工模式大幅降低返工概率，隧洞日均进尺由 2.4m 提升至 4.7m，施工效率提升近一倍；超挖回填、病害治理、支护返工成本显著下降，该洞段综合施工成本降低 16%，提质增效成果突出。四是富水地质治理效果良好。超前注浆止水有效封堵渗水通道，围岩不再受水体软化侵蚀影响，锚杆锚固力、喷砼粘结强度稳定达标，支护体系整体性、耐久性显著增强。

工程实践表明，本次优化技术高度适配断层破碎、软弱富水等复杂地质条件，有效弥补了传统工艺的技术短板，安全可靠、经济性强，具备广泛的行业推广价值。

4 结束语

复杂地质条件下水利隧洞施工的核心难点在于围岩稳定性弱、施工扰动敏感、水环境影响突出，传统粗放施工工艺难以满足现代水利工程安全与质量标准。本文系统分析复杂地质隧洞施工特性，从精细化开挖、复合支护体系、现场管控三方面完成技术优化，并依托实际工程案例验证了优化方案可有效控制围岩变形、规避坍塌涌水风险、提升施工效率与成型质量。未来水利隧洞不良地质施工应坚持因岩施策、动态适配、精细管控的原则，持续优化开挖支护参数与信息化监测手段，全面提升地下水利工程施工的安全性、规范性与精细化水平。

[参考文献]

- [1]张招烽.复杂地质条件下隧道超前支护施工技术研究[J].工程技术研究,2025,10(21):76–78.
- [2]陈智涵,高伟杰.不良地质水工隧洞超前地质预报体系构建与应用[J].价值工程,2025,44(29):121–124.
- [3]蔡岸.水利工程隧洞喷锚支护及衬砌加固施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(27):88–90.
- [4]曹博.复杂地质下引水隧洞施工稳定性数值分析[J].地下水,2025,47(5):141–142+169.
- [5]王毅.复杂地质地下洞室开挖支护技术研究[J].科技纵横,2025,(13):15–17.