

复杂地质条件下水利隧洞施工风险防控与施工工艺改进

刘成成

新疆水发建设集团有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 本文聚焦复杂地质条件下水利隧洞施工风险防控与工艺改进, 结合新疆水发建设集团有限公司的工程实践, 分析断层、岩溶、突水突泥等典型地质风险, 提出地质勘察、超前预报、动态监测等防控策略, 并从开挖、支护、衬砌等环节探讨工艺优化方向。研究表明, 通过“地质预判—动态防控—工艺改进”的闭环管理, 可显著提升复杂地质隧洞施工的安全性及经济性, 为类似工程提供参考。

关键词: 复杂地质; 水利隧洞; 施工风险防控; 工艺改进; 新疆水发建设集团

Risk Control and Construction Process Improvement of Hydraulic Tunnels under Complex Geological Conditions

Liu Chengcheng

Xinjiang Water Conservancy and Construction Group Co., Ltd., China Xinjiang Urumqi 830000

Abstract: This paper focuses on the risk control and process improvement of hydraulic tunnel construction under complex geological conditions. Based on the engineering practice of Xinjiang Shuifa Construction Group Co., Ltd., it analyzes typical geological risks such as faults, karst, and sudden water and mud gushing, and proposes control strategies including geological prediction, advanced forecasting, and dynamic monitoring. It also explores the direction of process optimization from aspects such as excavation, support, and lining. The research shows that through a closed-loop management of "geological prediction - dynamic control - process improvement", the safety and economy of tunnel construction under complex geological conditions can be significantly enhanced, providing a reference for similar projects.

Keywords: Complex geological conditions; Hydraulic tunnels; Construction risk control; Process improvement; Xinjiang Shuifa construction group

0 引言

水利隧洞作为水资源调配、防洪减灾的关键基础设施, 其施工安全与质量直接影响区域水安全保障能力。然而, 我国西部地区地质条件复杂, 断层、岩溶、高地应力等不良地质现象普遍存在, 导致隧洞施工面临围岩失稳、突水突泥、岩爆等高风险, 严重威胁人员安全和工程进度。以北疆供水工程双三段IV标隧道为例, 该工程总长43.787km, 主洞设计全长37.355km, 其中盾构主洞22.23km, 采用3台 $\Phi 5.5\text{m}$ 土压平衡盾构机施工, 配套1处管片预制厂; 钻爆隧洞14.62km, 根据围岩类别分为普通钻爆法和人工、机械开挖施工; 埋涵段505m, 采用明挖法施工。标段共设置6个支洞, 支洞总长6.432km, 划分为6个支洞, 其中6#、7#支洞长3.465km(含明洞), 5#、9#、10#、11#支洞长3.633km(钻爆)。在施工过程中, 遭遇了塌方、突泥涌水等险情多次, 累计延误工期超4个月, 凸显复杂地质条件下施工风险防控的紧迫性。

新疆水发建设集团有限公司作为新疆水利建设的主力

军, 在复杂地质隧洞施工中积累了丰富的经验。本文结合公司承建的北疆供水工程等, 系统分析复杂地质条件下的施工风险特征, 提出风险防控策略与工艺改进方向, 为同类工程提供技术参考。

1 复杂地质条件下水利隧洞施工风险特征

在复杂地质条件下开展水利隧洞施工, 如同在充满未知的地下世界探险, 面临诸多难以预料且破坏力强的风险, 关乎工程推进、人员安全及周边环境稳定。以下对常见风险详细剖析:

1.1 断层破碎带风险

断层破碎带堪称隧洞施工的“隐形杀手”。其岩体破碎不堪, 节理裂隙如同蜘蛛网般肆意发育, 导致岩体自稳能力极差。在开挖过程中, 这种脆弱的岩体结构极易引发坍塌事故。以北疆供水工程双三段IV标隧道为例, 当施工穿越某断层时, 由于前期地质预报工作不够充分, 对断层破碎带的情况了解不足, 同时支护措施未能及时跟上施工进度, 结果拱顶出现了严重垮塌。这次垮塌不仅造成了大

量设备的损毁,还使得工程工期延误了近1个月之久,给整个项目带来了巨大的损失。

断层破碎带风险具有多方面显著特点。其一,突发性强。由于其地质隐蔽性极高,常规的地质勘察手段很难完全揭示其分布情况。施工人员往往在不经意间揭露断层破碎带时,就会突然遭遇塌方,让人猝不及防。其二,连锁反应明显。一旦发生塌方,原本脆弱的支护结构很容易被破坏,进而引发一系列次生灾害,如地表沉降、地下水水位变化等,这些次生灾害又会进一步加剧施工的难度和风险。其三,修复难度大。由于岩体破碎,在进行注浆加固等修复工作时,注浆效果会受到裂隙连通性的严重影响,导致修复周期漫长,而且修复成本高昂。

1.2 岩溶地质风险

岩溶地貌,特别是独具特色的喀斯特地貌,一直是水利隧洞施工过程中令人头疼不已的难题。在岩溶发育区域,存在着溶洞、溶隙以及地下暗河等错综复杂的结构,这些结构就像隐藏在地下的一颗颗“定时炸弹”。一旦施工揭露这些结构,就极易触发突水突泥的险情。曾经在北疆供水工程某段施工中,由于未提前精准探测到溶腔与含水层之间的水力联系,当掌子面被揭露的瞬间,突水汹涌而至,瞬时流量高达150L/s。大量涌水瞬间淹没了施工设备,造成价值超过200万元的损失,施工人员不得不紧急撤离现场,工程工期也因此被严重延误。岩溶地质风险同样具有隐蔽性极强、突发性显著且危害巨大的特点,时刻威胁着施工安全与工程进度。

面对这些复杂地质条件下的风险,我们必须高度重视,采取科学有效的措施加以应对,以确保水利隧洞施工的安全与顺利进行。

1.3 突水突泥风险

突水突泥,堪称复杂地质条件下水利隧洞施工中的“头号杀手”,多现身于高压富水区或者岩溶发育段,其形成与地下水压力以及岩体渗透性紧密交织、息息相关。

在隧洞开挖进程中,一旦触及富水区或者溶腔,原本维持平衡的地下水压力体系瞬间被打破。开挖产生的扰动,如同在平静湖面投入巨石,激起层层涟漪,使地下水压力急剧变化。当这股压力突破岩体的抗剪强度极限,地下水便会如挣脱牢笼的猛兽,裹挟着大量泥沙、石块等物质,以排山倒海之势汹涌而出,瞬间形成突水突泥的灾难性场景。

这一风险具有鲜明的动态性。地下水压力并非恒定不变,而是如同善变的精灵,随着季节的更替、降雨量的增

减而频繁波动。春季冰雪消融、夏季暴雨倾盆,都可能使地下水压力骤增。这就要求施工团队在施工过程中,必须构建全方位、多层次的动态监测体系,实时掌握地下水压力的变化情况,依据监测数据及时、精准地调整施工策略,将风险扼杀在萌芽状态。

突水突泥的破坏性更是令人胆寒。其强大的冲刷力能在瞬间使隧道结构失稳,如同多米诺骨牌般引发一系列连锁反应,甚至导致地表塌陷。这不仅会严重威胁地面建筑的安全,更可能使周边人员陷入生死危机。

1.4 高地应力与岩爆风险

深埋隧洞或硬质岩区,如花岗岩、石英砂岩地段,高地应力可能导致岩爆。围岩应力接近或超过岩石强度时,弹性应变能突然释放,岩体片状剥落或弹射。北疆供水工程双三段IV标隧道在采用盾构机掘进至深部硬岩段时,发生中等程度岩爆,刀盘前方围岩环向张裂,片状剥落深度30厘米,部分岩块飞溅超5米,威胁设备和人员。岩爆风险有滞后性,可能开挖数小时甚至数天后发生,监测困难;破坏范围广,引发大面积围岩松动,增加支护难度和工程量;预测精度低,目前主要依赖经验公式,准确性受地质条件影响大,难以提前准确预警。

复杂地质条件下的水利隧洞施工风险多样,深入了解其特征和成因,才能采取有效防控措施,保障工程顺利推进和人员生命安全。

2 复杂地质条件下水利隧洞施工风险防控策略

在复杂地质条件下开展水利隧洞施工,面临着诸多难以预料且极具破坏力的风险,如断层破碎带引发的坍塌、岩溶地质导致的突水突泥、高地应力造成的岩爆等。为了有效防控这些风险,保障施工安全与工程顺利进行,需采取一系列科学合理的防控策略。

2.1 加强地质勘察与风险预判

地质勘察是风险防控的基石,为后续施工提供关键依据。施工前,要综合运用多种勘察手段,全方位掌握隧洞沿线的地质状况。钻探能直接获取地下岩土样本,精准了解其物理力学性质;物探中的地质雷达可快速探测地下介质分布,TSP地震波反射法能对前方地质情况进行长距离预测。通过这些手段,建立三维地质模型,清晰呈现可能遇到的地质风险。以北疆供水工程双三段IV标隧道为例,施工前进行了1:2000地质测绘,精心布设120个钻孔,总进尺超5000米,成功揭示了断层破碎带、岩溶发育区等高风险段的空间分布,为制定科学合理的施工方案奠定了坚

实基础。

2.2 实施超前地质预报与动态监测

超前地质预报是规避突水、塌方等重大风险的关键环节。施工中采用“TSP + 钻探验证”的组合模式,充分发挥各自优势。TSP 技术适用于 100 - 150 米范围内的长距离断层带定位,空间定位精度约 ± 5 米,能提前发现潜在的地质异常;超前钻探则每开挖循环至少布置 3 个验证孔,单孔深度不小于 30 米,通过取芯观察与涌水量记录,对地质信息进行实证校核。北疆供水工程双三段IV标隧道在穿越岩溶区时,通过超前钻探发现单孔涌水量超 50L/s,立即停止掘进并采用超前帷幕注浆封闭水流通道,成功避免了突水事故。

动态监测如同风险防控的“眼睛”,实时掌握围岩稳定性。施工中建立收敛变形、拱顶沉降、锚杆轴力、微震等多参数监测体系,全方位监测围岩变化。北疆供水工程双三段IV标隧道在V级围岩段布置了每 5 米一个的监测断面,收敛变形速率预警阈值设为 8 毫米/天,当监测数据超限时,立即启动加固措施,有效控制了围岩失稳风险。

2.3 制定针对性应急预案

应急预案是风险防控的“最后一道防线”。施工单位要结合工程特点,制定塌方、突水、岩爆等专项应急预案,明确应急组织架构、处置流程、资源配置等关键内容,并定期开展应急演练。北疆供水工程双三段IV标隧道在施工期间组织了 3 次突水应急演练,模拟掌子面突水场景,检验排水系统、人员撤离、设备抢修等环节的响应能力。通过演练,不断优化应急流程,将应急响应时间从 30 分钟缩短至 15 分钟,大大提高了应对突发事件的能力。

3 复杂地质条件下水利隧洞施工工艺改进方向

3.1 开挖工艺优化

开挖工艺需根据地质条件灵活选择。对于断层破碎带或软弱围岩,推荐采用短进尺、弱爆破、强支护的施工原则,每循环进尺控制在 0.8—1.0 米,减少对围岩的扰动。例如,北疆供水工程双三段IV标隧道在穿越某断层时,将循环进尺从 1.5 米缩短至 0.8 米,并采用光面爆破技术,周边眼间距控制在 40—50 厘米,线装药密度为 70—100g/m,有效控制了超挖欠挖,减少了对围岩的二次扰动。

对于岩溶发育区,可采用“先探后挖、先治后掘”的工艺。即通过超前钻探探测明溶腔位置、规模及充填物性质后,采用注浆加固、混凝土封堵等措施治理溶腔,再进行开挖。例如,北疆供水工程双三段IV标隧道在穿越岩溶区时,对溶腔采用双液帷幕注浆,注浆压力控制在 1.0—

1.5MPa,浆液扩散半径不小于 1.5 米,形成连续防水圈,成功避免了突水突泥。

3.2 支护工艺改进

支护是控制围岩变形的关键。对于断层破碎带或软弱围岩,推荐采用“系统锚杆 + 双层钢筋网 + 钢拱架”联合支护体系。锚杆采用 $\Phi 25$ 中空注浆锚杆,长度不小于 4.5 米,间距 1.0 米 \times 1.0 米;钢筋网采用 $\Phi 8$ 钢筋,网格尺寸 20 厘米 \times 20 厘米;钢拱架选用 I18 型钢,间距 0.8 米,并通过连接板牢固对接。例如,北疆供水工程双三段IV标隧道在V级围岩段采用该支护体系后,拱顶沉降量从开挖后的 15 厘米控制在 5 厘米以内,围岩稳定性显著提升。

对于高地应力区,需采用“强初支、及时封闭”的支护策略。初期支护采用高韧性喷射混凝土(纤维掺量 $\geq 40\text{kg/m}^3$),厚度不小于 25 厘米,配合全长粘结型锚杆(间距 0.8 米),并在必要时增设让压锚杆以吸收释放能量。例如,北疆供水工程双三段IV标隧道在盾构机掘进至深部硬岩段时,在刀盘前方围岩布置了让压锚杆,允许锚杆轴向变形量达 10 厘米,有效缓解了岩爆对支护结构的冲击。

3.3 衬砌工艺优化

衬砌是隧洞结构的最后一道防线。对于复杂地质条件下的衬砌施工,需重点关注混凝土质量与施工工艺。混凝土配合比需通过试验优化,确保强度、抗渗性等指标满足设计要求。例如,北疆供水工程双三段IV标隧道在衬砌混凝土中掺入了 10% 的粉煤灰,降低了水化热,减少了收缩裂缝,提高了混凝土的耐久性。

施工工艺方面,推荐采用“先仰拱、后拱墙”的施工顺序,仰拱与边墙衔接处需设置锁脚锚杆,防止仰拱上浮。衬砌混凝土浇筑需分层进行,每层厚度不超过 30 厘米,采用插入式振捣器振捣密实,避免出现蜂窝麻面。例如,北疆供水工程双三段IV标隧道在衬砌施工中采用了定制钢模台车,模板刚度大、拼接严密,混凝土浇筑后表面平整度误差控制在 ± 3 毫米以内,显著提升了衬砌质量。

4 结论与展望

复杂地质条件下,水利隧洞施工风险防控与工艺改进是保障工程安全、提升质量的核心。新疆水发建设集团构建“地质预判—动态防控—工艺改进”闭环管理体系,在北疆供水工程等工程中,凭借精准预判提前洞察风险,动态防控实时调整措施,针对性工艺改进化解难题,积累宝贵经验。

但水利隧洞施工技术发展不止。未来,智能化监测技

术是突破口，引入物联网等构建实时监控平台，提升风险预警准确性与及时性；绿色施工工艺刻不容缓，研发低噪低尘设备工艺，实现工程建设与环保和谐共生；新材料应用带来新契机，探索高韧性混凝土等提升隧洞结构性能。复杂地质施工要坚持“预防为主、综合治理”，推动创新优化，迈向安全高效绿色目标，筑牢区域水安全根基。

参考文献：

[1] 吴佳龙. 浅析拉森钢板桩在水利工程基坑支护中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2023,51(12):115-117.DOI:10.14122/j.cnki.hskj.2023.12.005.

[2] 刘怡美. 裂缝对隧洞结构应力与变形的影响研究[J]. 水利科技与经济, 2023,29(12):25-28.

[3] 郭新强. 超特长深埋引水隧洞安全管理风险与对策[J]. 人民黄河, 2023,45(S2):146-147.

[4] 曾淑珍. 输水隧洞开挖过程中围岩受力变形分析[J]. 水利科技与经济, 2023,29(12):60-63.

[5] 张贤德, 罗宗军, 张成强等. 小断面水工隧洞超欠挖控制技术研究[C]/《施工技术》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司.2023年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册). 云南建投第一水利水电建设有限公司, 2023:638-640.DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.105196.