文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4651 /（中图刊号）：860GL005

复杂地质条件下长距离引水隧洞突涌水风险评估与防控对策

谢伟　罗冉　张博
中国水利水电第七工程局有限公司
DOI:10.32629/btr.v8i6.4845

[摘　要] 随着我国水资源优化配置战略的深入推进,长距离引水工程日益成为解决区域水资源短缺、支撑经济社会可持续发展的关键基础设施。然而,在穿越高山峡谷、断裂带、岩溶区等复杂地质条件区域时,引水隧洞施工与运行过程中面临严峻的突涌水风险,严重威胁工程安全、人员生命及生态环境。本文系统梳理了复杂地质条件下引水隧洞突涌水的主要致灾因子,构建了基于“孕灾环境-致灾因子-承灾体”耦合机制的风险评估框架,并融合定性与定量方法,提出了多层级、全过程的风险评估体系。在此基础上,从超前地质预报、动态设计、分级防控、应急处置及智能监测预警等方面,系统阐述了突涌水风险的综合防控对策。研究表明,建立“识别—评估—预警—防控—应急”一体化的风险管理体系,是保障复杂地质条件下长距离引水隧洞安全建设与稳定运行的核心路径。
[关键词] 引水隧洞；复杂地质；突涌水；风险评估；防控对策；超前地质预报
中图分类号：TV554　文献标识码：A

Risk Assessment and Prevention-Control Measures for Water Inrush in Long-Distance Water Diversion Tunnels Under Complex Geological Conditions

Wei Xie　Ran Luo　Bo Zhang
Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd.

[Abstract] With the advancement of China's water resource optimization and allocation strategy, long-distance water diversion projects are increasingly becoming critical infrastructure for addressing regional water scarcity and supporting sustainable socioeconomic development. However, when traversing areas with complex geological conditions such as high mountains, deep valleys, fault zones, and karst regions, water diversion tunnels face significant water inrush risks during construction and operation, posing serious threats to project safety, personnel lives, and the ecological environment. This paper systematically analyzes the main causative factors of water inrush in water diversion tunnels under complex geological conditions, establishes a risk assessment framework based on the coupling mechanism of "hazard-forming environment, causative factors, and vulnerability of exposed elements," and integrates qualitative and quantitative methods to propose a multi-level, whole-process risk assessment system. Building on this foundation, the paper systematically elaborates comprehensive prevention and control measures for water inrush risks from aspects such as advanced geological prediction, dynamic design, hierarchical prevention and control, emergency response, and intelligent monitoring and early warning. Research indicates that establishing an integrated risk management system encompassing "identification, assessment, warning, prevention and control, and emergency response" is a core approach to ensuring the safe construction and stable operation of long-distance water diversion tunnels under complex geological conditions.
[Key words] Water diversion tunnel; Complex geology; Water inrush; Risk assessment; Prevention and control measures; Advanced geological prediction

引言

水资源时空分布不均是我国的基本国情。为实现水资源跨流域、跨区域优化配置,国家相继规划并实施了一系列战略性调水工程,如南水北调、滇中引水、引汉济渭等。这些工程普遍具有线路长、埋深大、地质条件复杂等特点,其中隧洞作为核心输水建筑物,其安全稳定性直接关系到整个工程的成败。在复杂地质环境中(如高应力、强震区、活动断裂带、富水断层破碎带、大规模岩溶发育区、高地温及有害气体赋存区等),隧洞开挖扰

动极易诱发围岩失稳、突泥、涌水甚至灾难性突涌水事故。突涌水不仅造成直接经济损失，还可能引发次生灾害，如地表塌陷、水源枯竭、生态退化等，社会影响深远。因此，如何科学评估突涌水风险，并制定有效的防控对策，已成为当前水利水电、交通隧道等领域亟待解决的关键技术难题。

1 复杂地质条件下突涌水致灾机理分析

1.1主要孕灾地质环境

复杂地质是突涌水灾害的宏观背景。断裂构造带岩体破碎、胶结差，常成区域性导水通道，兼具储水与导水功能时，被隧洞揭露易引发高压大流量涌水。岩溶发育区，碳酸盐岩受地下水溶蚀形成复杂空腔与管道网络，隧洞与大型暗河或溶洞交汇，会面临极高风险突发性涌水甚至突泥。富水砂卵石层或松散堆积体高渗透、低自稳，开挖后易流砂、管涌并演变成大规模涌水[1]。深埋长隧洞中，高地应力与高外水压力共存，开挖卸荷打破平衡，隐伏含水构造积蓄的水压能可能击穿隔水薄弱带。地表水体通过古河道等与隧洞连通，增加突涌风险。且各类地质环境常相互叠加，加剧突涌水不确定性与危害性。

1.2突涌水发生的力学与水力学机制

突涌水本质是水－岩耦合作用下的失稳演化，分通道形成、水压积聚与临界突破三阶段。地质历史时期，构造或岩溶作用形成潜在导水通道。地下水因上覆隔水层等阻隔在通道上游积蓄，形成承压或半承压状态，储存水压势能。隧洞开挖面逼近或揭露导水通道时，工程扰动破坏围岩结构与水力封闭条件，能量瞬间释放，水流裹挟泥沙碎石高速涌入，形成突涌水。此过程涉及多场强烈耦合，临界判据与多种因素相关，理解其机制是风险评估与防控的理论基础。

2 突涌水风险评估体系构建

科学的风险评估是有效防控的前提。针对长距离引水隧洞，需建立一套系统、动态、可操作的风险评估体系。

2.1风险评估基本框架

本文采用“孕灾环境-致灾因子-承灾体”三维耦合的风险评估框架(图1)。

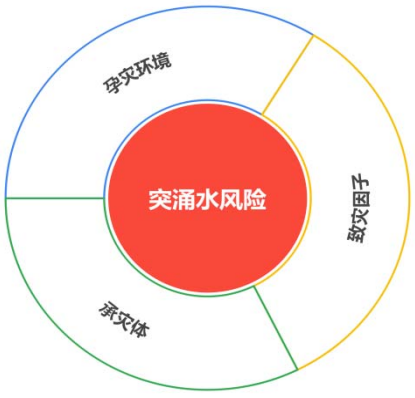

图1 “孕灾环境－致灾因子－承灾体”三维耦合风险评估框架示意图

孕灾环境：指隧洞所处的区域地质、水文地质背景，是风险的宏观基础。

致灾因子：指具体的不良地质体(如断层、岩溶腔体等)及其水文地质参数(水压、水量、水质等)，是风险的直接来源。

承灾体：指隧洞工程本身(结构、设备、人员)及周边环境(地表水体、居民区、生态敏感区)，决定了风险后果的严重程度。

风险值(R)可表示为致灾可能性(P)与后果严重性(C)的函数：R=f(P,C)。

2.2风险识别与信息集成

风险识别是评估的第一步，主要依靠：一是前期勘察资料：区域地质图、水文地质图、钻孔柱状图、物探剖面等。二是超前地质预报(AGP)：TSP、地质雷达(GPR)、瞬变电磁法(TEM)、红外探水、超前水平钻探等，用于施工期动态识别掌子面前方不良地质体。三是施工地质编录：对已开挖段的围岩、出水点进行详细记录与分析。四是遥感与GIS技术：整合多源空间数据，构建三维地质模型，直观展示风险区域。

2.3风险等级划分与评估方法

在完成风险识别与信息集成后，需采用科学的方法对风险进行量化或半量化评价，并据此划分风险等级。定性评估方法，如专家打分法和风险矩阵法，凭借其简便、直观的特点，在工程实践中应用广泛。专家打分法依赖于领域专家的经验判断，适用于资料匮乏或情况复杂的初期评估；风险矩阵法则通过将风险的可能性与后果分别划分为若干等级，交叉确定最终的风险等级，逻辑清晰，便于沟通。然而，面对日益复杂的工程挑战，仅靠定性方法已显不足，定量或半定量方法的应用愈发重要[2]。层次分析法(AHP)通过构建递阶层次结构，将复杂的评估问题分解为多个准则和指标，并计算各因素的权重，实现了多因素的综合评分。模糊综合评价法则擅长处理评估过程中普遍存在的模糊性和不确定性，能将专家的语言描述转化为数学上的隶属度，使评价结果更为客观。对于关键控制性工程段，还可借助FLAC3D、COMSOL等数值模拟软件，对地下水渗流场与围岩应力场进行耦合仿真，预测不同工况下的涌水量及影响范围，为风险的定量评估提供强有力的科学依据。

2.4动态风险评估流程

突涌水风险评估是一个贯穿工程全生命周期的动态闭环过程。在勘察设计阶段，主要依据宏观地质资料进行全线风险的初步分区，为线路比选和总体方案设计提供参考。进入施工准备阶段，则需结合更为详细的补充勘察成果与初步的超前地质预报数据，对高风险段落进行细化和再评估。施工阶段是风险动态演变最为剧烈的时期，必须依托持续不断的超前地质预报、实时的施工地质编录以及自动化监测数据，对掌子面前方及周边的风险状态进行滚动更新和动态预警，实现“边探、边评、边控”。即便工程建成投入运行，长期的运维监测同样不可或缺，通过对隧洞渗漏量、外水压力、衬砌变形等关键指标的持续观测，可以评估工程在长期服役过程中的稳定性，及时发现潜在隐患，确保工程的长效安全。

3 突涌水综合防控对策

基于风险评估结果,应采取“预防为主、防治结合、分级响应、科技赋能”的综合防控策略。

3.1超前精准地质预报(AGP)

超前地质预报是突涌水防控体系的“眼睛”,其精准度直接决定了后续防控措施的有效性。实践证明,单一预报方法往往存在局限性,必须坚持多种方法综合、长短距离结合、物探钻探验证的原则。长距离预报(如TSP、瞬变电磁法)主要用于圈定百米级范围内的不良地质体大致位置,为施工组织提供宏观预警;中短距离预报(如地质雷达)则能进一步探明三十至百米范围内地质异常体的规模与边界;而最关键的是,在开挖前最后三十米范围内,必须进行超前水平钻探,这是唯一能够直接获取岩芯、水样,并精确测定水压、水量的技术手段,是决定是否采取封堵措施的最可靠依据。只有建立起这样一套由远及近、层层递进、相互验证的预报体系,才能最大程度地降低预报的不确定性,为安全施工赢得宝贵时间。

3.2动态信息化设计与施工

传统的“静态蓝图”式设计理念已难以适应复杂地质条件下隧洞工程的不确定性。必须大力推行“动态设计、信息化施工”的现代化工程管理模式。在设计阶段,应充分考虑地质条件的复杂性与未知性,为高风险段落预留足够的安全裕度,例如采用加强型支护结构、设置专门的排水廊道、在衬砌中预埋灌浆管路等。进入施工阶段后,设计不再是不可更改的教条,而应根据超前地质预报揭示的实际情况和开挖过程中暴露的真实地质条件,及时、灵活地调整开挖工法、支护参数及防排水方案[3]。例如,当预报显示前方为软弱破碎带时,可将原计划的全断面开挖法调整为更为稳妥的台阶法或CD法,并同步加密锚杆、增设钢拱架,以确保开挖面的稳定。这种设计与施工的深度融合,是应对复杂地质风险的核心保障。

3.3分级分类防控技术

风险评估的最终目的是指导差异化、精准化的防控实践。应根据风险等级的高低,采取与之相匹配的防控措施。对于低风险区域,重点在于加强常规监测与日常巡查,确保洞内排水系统畅通无阻,做到防患于未然。当中高风险被识别出来时,则需主动出击,采取积极的工程干预措施。预注浆加固是最常用且有效的手段之一,通过在开挖面前方注入水泥浆或化学浆液,可以有效封堵围岩裂隙、固结松散体,并形成一道可靠的止水帷幕。同时,辅以管棚或小导管等超前支护措施,可以在软弱围岩中构建一个稳定的“保护伞”,为后续开挖和注浆作业创造安全条件,并严格控制爆破振动或采用机械开挖以减少对围岩的二次扰动。面对极高风险区域,如无法绕避的大型暗河或高压富水断层,则需要采取更为审慎和创新的策略。在技术和经济条件允许的情况下,线路优化、迂回绕避应作为首选。若无法绕行,则可考虑先施工泄水洞或钻设释能孔群,有计划地释放高水压,从根本上降低主洞施工的风险。在极端情况下,甚至可以探索冻结法等特殊工艺,临时封闭水源后再进行永久结构施工。

3.4应急处置预案

尽管预防措施周密,但工程实践的复杂性决定了突涌水风险无法被百分之百消除,因此一套周密、高效的应急预案至关重要。这要求项目必须建立权责清晰的应急组织指挥体系,明确从现场指挥到抢险救援、人员疏散、后勤保障等各环节的责任人。同时,必须在施工现场常备充足的应急物资与设备,包括大功率抽排水泵组、应急照明与通讯器材、救生装备以及速凝型堵漏材料等。更重要的是,要定期组织针对性的应急演练,让所有参建人员熟悉应急预案的流程和自身的职责,切实提高实战能力和协同效率。此外,必须确保隧洞内任何位置都设有清晰标识、安全畅通的紧急撤离通道,这是保障人员生命安全的最后一道防线。

3.5智能化监测预警系统

随着新一轮科技革命的浪潮,智能化已成为提升工程安全管理水平的必然趋势。应充分利用物联网、大数据、人工智能等前沿技术,构建“空－天－地－洞”一体化的智能监测预警平台。在洞内,通过布设渗压计、流量计、多点位移计及微震监测传感器网络,可以实时、连续地感知围岩应力状态与地下水环境的细微变化。在地表,则可利用InSAR卫星遥感和GNSS地面站,对隧洞上方的地表沉降与形变进行大范围、高精度的监测,为反演地下变化提供宏观视角。最关键的是,要将这些海量、多源的监测数据汇集到统一的数据中心,运用LSTM、随机森林等先进的人工智能算法进行深度挖掘与融合分析,建立起能够预测风险演化趋势的智能预警模型。这标志着风险预警模式正从传统的“阈值报警”向更高阶的“趋势预测”跨越,从而实现真正的关口前移、主动防控。

4 结语

本文得出以下主要结论：突涌水是特定孕灾地质环境、活跃致灾因子与脆弱承灾体三者耦合作用的结果,必须从系统角度进行理解和评估；构建“孕灾环境-致灾因子-承灾体”耦合的风险评估框架,并贯穿工程全生命周期,实现从静态分区到动态预警的转变,是精准防控的基础;单一技术难以应对复杂风险,必须采取“超前预报精准化、设计施工动态化、防控措施分级化、应急体系完备化、监测预警智能化”的综合对策；随着人工智能、数字孪生、新材料等技术的发展,未来的突涌水风险防控将更加精准、高效和智能。展望未来,研究应进一步深化突涌水灾变机理的精细化模拟,发展更高精度、更智能化的超前预报技术,并探索绿色、低碳的新型注浆与堵水材料,为国家水网骨干工程的安全建设保驾护航。

[参考文献]

[1]戴澄,余洁,叶国平.引水隧洞工程施工突涌水灾害处理技术研究[J].建筑安全,2025,40(08):51-54.

[2]唐洪应,吴桃,李明,等.针对引水隧洞突涌水采取的注浆堵水技术[J].四川水力发电,2025,44(01):70-74.

[3]冀国栋,王灿林,廖建炜,等.双护盾TBM引水隧洞高压突涌水处治技术研究[J].施工技术(中英文),2022,51(19):62-65+69.