

# 高原山区导流隧洞施工安全风险致因分析

满睿智 康晓云

中国水利水电第三工程局有限公司 陕西 西安 710000

**摘要:**高原山区导流隧洞施工地处高海拔、复杂地质与恶劣气候叠加区域,安全管控难度远超常规隧洞工程,施工安全事故频发且后果严重。本文结合高原山区特殊环境,梳理导流隧洞施工核心特点,从自然环境、技术工艺、设备材料、人员及组织管理五个维度,全面识别安全风险致因并系统分类,深入剖析各类致因的耦合作用机制,明确关键风险致因链与敏感性因素。在此基础上,针对性提出技术、管理、生态保护三位一体的防控对策,为高原山区导流隧洞施工安全风险精准防控、降低事故发生率提供理论支撑与实践参考。

**关键词:**高原山区;导流隧洞;施工安全;风险致因;防控措施

**引言:**高原山区水利水电工程建设中,导流隧洞是保障工程截流、度汛与主体施工的核心临时构筑物,施工质量与安全直接关系整个项目进度与运营安全。高原山区普遍具备海拔高、缺氧、气候严寒、地质破碎、地形陡峭等特征,叠加隧洞地下作业空间封闭、工序交叉密集的特性,施工安全风险呈现多源性、耦合性、突发性特点。当前针对该类工程的风险致因研究多聚焦单一因素,缺乏系统性耦合分析,风险防控针对性不足。本文立足工程实际,全面拆解各类风险致因,探究内在关联机制,构建完善防控体系,弥补现有研究短板,为高原山区导流隧洞施工安全管控提供理论依据与实践指导。

## 1 高原山区导流隧洞施工特点与风险概述

### 1.1 高原山区环境特征

高原山区环境具有极强的特殊性与恶劣性,是导流隧洞施工风险的核心诱因。区域海拔普遍超过3000米,空气含氧量低,易引发施工人员高原反应,降低身体机能与反应速度,大幅增加作业失误概率;气候昼夜温差极大,冬季漫长严寒,夏季多强降雨与冰雹,极端天气频繁干扰施工节奏,破坏临时设施与作业环境。地质条件尤为复杂,多分布断层破碎带、岩堆体、富水地层,围岩稳定性极差;地形陡峭崎岖,施工场地狭窄,材料运输、机械进场难度大,应急救援通道不畅,进一步放大安全风险。区域生态环境脆弱,施工扰动易引发水土流失,间接加剧地质风险。

### 1.2 导流隧洞施工流程与风险点

导流隧洞施工涵盖洞口开挖、洞身掘进、支护衬砌、通风排水、度汛防护等全流程,各环节风险相互交织。洞口开挖阶段,高陡边坡易发生滑坡、落石;洞身掘进阶段,围岩变形、坍塌、涌水突泥风险最为突出,地下粉尘、有害气体积聚危害人员健康;支护衬砌阶段,锚

杆施工、混凝土浇筑作业不规范,易导致支护失效;通风排水环节,高原缺氧叠加洞内密闭环境,通风不畅会引发人员窒息、中毒隐患,排水不到位则会软化围岩、浸泡基底<sup>[1]</sup>。此外,施工需兼顾汛期导流需求,暴雨导致洞内倒灌、围岩软化,度汛风险与施工风险相互交织,全程风险管控压力极大。

## 2 安全风险致因识别与分类

### 2.1 自然环境致因

自然环境致因属于不可控的先天风险因素,是高原山区导流隧洞施工最核心的外部风险源。地质层面,区域地质构造运动强烈,断层、节理裂隙密集分布,围岩自稳能力差,前期勘察难以全面探明隐蔽不良地质,施工中易突发塌方、涌水突泥等灾害;高原冻土、膨胀岩土等特殊地层,受温度影响易发生冻胀、融沉变形,破坏隧洞结构稳定性。气候层面,严寒天气导致混凝土施工质量难以保障,材料性能衰减;强降雨、暴雪天气会引发山体滑坡、泥石流,阻断施工通道;低气压、缺氧环境直接影响人员体能与设备运行效率,加剧作业风险。昼夜温差大导致反复冻融循环,加速围岩风化,进一步降低结构稳定性。

### 2.2 技术工艺致因

技术工艺不达标是引发施工安全事故的核心人为技术因素。部分工程前期勘察数据不精准,导致施工方案与现场地质条件不匹配,开挖方式、支护参数设计不合理,无法有效支撑围岩;洞身开挖工艺选择不当,爆破参数控制不严格,过度扰动围岩,加速围岩失稳;支护施工滞后、锚杆注浆不密实、混凝土衬砌厚度不足,无法及时约束围岩变形;通风排水、临时支护等配套工艺设计缺失,洞内粉尘、有害气体无法及时排出,积水无法快速疏导,恶化作业环境;缺乏针对高原特殊环境的

工艺优化方案,常规施工工艺难以适配低温、缺氧条件,工艺落地效果大打折扣。

### 2.3 设备材料致因

设备与材料性能不达标、运维管理缺位,直接成为安全风险的重要诱因。高原低气压、严寒缺氧环境下,常规施工机械发动机功率衰减,运行效率降低,易出现故障停机,掘进、支护作业中断会加剧围岩变形风险;通风、排水、供氧等专用设备选型不足,设备功率无法满足洞内作业需求,导致环境管控失效;施工材料质量管控不严,水泥、钢筋、锚杆等核心材料性能不达标,混凝土配合比未针对高原低温环境优化,强度与耐久性不足,支护结构失去防护作用;材料运输与存储过程缺乏防护,受严寒、雨雪天气影响出现性能衰减;设备日常运维不到位,缺乏定期检修保养,故障隐患未能及时排查<sup>[2]</sup>。

### 2.4 人员管理致因

人员因素是施工安全风险管控的核心薄弱环节,直接决定风险防控落地效果。高原地区施工条件艰苦,人员流动性大,专业技术人员与安全管理人员紧缺,部分作业人员缺乏隧洞施工经验,更不熟悉高原特殊环境作业规范,操作技能不达标;施工人员缺乏系统的安全培训与高原作业应急培训,安全意识薄弱,违规操作、违章作业频发;高原反应引发人员头晕、乏力、注意力不集中等症,进一步降低作业精准度与风险反应速度;现场人员未配备专业的高原防护装备,或未规范佩戴使用,面对突发事故时自我防护能力薄弱,极易造成人员伤亡。

### 2.5 组织管理致因

组织管理体系不完善是各类风险失控的关键管理漏洞。部分项目安全管理架构不健全,安全责任分工不明确,各部门、各班组安全职责交叉或缺失,出现问题相互推诿,风险管控落实不到位;施工过程缺乏动态管控机制,现场巡查、风险监测频次不足,未能及时发现初期隐患,小隐患逐步演变为重大安全事故;安全管理制度流于形式,针对高原隧洞施工的专项安全预案、应急处置流程缺失,应急物资储备不足,突发事故时无法快速响应;进度与安全管控失衡,部分项目盲目追赶施工进度,压缩安全投入,简化安全防护与支护工序,忽视现场风险隐患,进一步激化安全矛盾。

## 3 安全风险致因耦合机制分析

### 3.1 致因耦合理论框架

高原山区导流隧洞施工安全风险由多因素耦合、叠加放大所致。基于系统安全理论,构建“环境基础—技

术核心—人本因素—管理保障”四维耦合分析框架。环境基础层包含地质、气候、地形等自然条件,是风险产生的客观背景,对其他层面有基础性制约作用。技术核心层涉及开挖、支护等施工工艺,作为连接环境与人员的中间环节,其适应性影响风险水平。人本因素层涵盖生理、心理、安全意识与操作技能,是风险防控主体,人员行为失当会直接触发事故。管理保障层包括责任体系、制度标准等,是制度保障,管理缺陷是其他因素失控的根本原因。四维度相互交织,形成复杂风险耦合网络,自然环境制约技术选择,技术影响人员作业环境,人员状态影响管理落实,管理水平决定技术应用与人员行为规范。耦合机制体现为协同、叠加与链式传导,使单一因素风险放大成事故风险。

### 3.2 关键致因链识别

结合工程实践与耦合机制分析,梳理出三条核心风险致因链,覆盖绝大多数施工安全事故场景。第一条为地质-技术-管理链式耦合:复杂不良地质与勘察不到位、工艺不合理叠加管理缺位、支护滞后,直接引发洞身坍塌、涌水突泥重大事故。第二条为气候-设备-人员链式耦合:高原缺氧严寒导致设备性能衰减,叠加人员高原反应、违规操作,引发作业中断、设备故障、人员失误,诱发各类安全事故<sup>[3]</sup>。第三条为环境-进度-管控链式耦合:生态脆弱、地形复杂与盲目赶进度、压缩安全投入叠加风险监测缺失、应急不力,加剧地质风险与施工隐患,同时引发生态破坏,形成安全与生态双重风险。

### 3.3 敏感性分析

通过敏感性分析明确各类致因的风险影响权重,为精准防控提供方向。自然环境致因属于高敏感性先天因素,其中围岩稳定性、高原气候两项指标敏感度最高,直接决定整体风险等级,难以彻底消除,需通过技术手段适配规避。技术工艺致因敏感度次之,开挖工艺、支护参数、通风排水设计是核心敏感点,属于可控因素,优化调整后可大幅降低风险。人员与组织管理致因敏感度紧随其后,安全培训、责任落实、应急管理是关键敏感点,管理力度直接影响风险防控成效。设备材料致因敏感度相对较低,但属于基础保障因素,设备运维、材料质量管控不到位,会快速放大其他因素的风险效应。

## 4 安全风险防控对策与建议

### 4.1 技术防控措施

技术防控作为化解高原山区导流隧洞施工风险的关键举措,需紧密贴合特殊环境精准发力。施工前期,要深入开展地质勘察工作,综合运用超前钻探、地质雷达等先进技术,精确摸清不良地质的分布范围与特征,据

此科学优化开挖与支护方案,严格遵循“短进尺、弱爆破、强支护、早封闭、勤量测”的施工原则。面对高原低温环境,需精心优化混凝土配合比,合理添加抗冻、早强等外加剂,并切实做好浇筑与养护过程中的保温措施。洞内施工时,要配备大功率通风、供氧、排水设备,持续改善作业环境,有效降低粉尘与有害气体浓度。同时,搭建智能化实时监测系统,对围岩变形、洞内气体、边坡位移等关键指标进行全程监测,一旦出现异常数据立即预警。此外,还应提前制定地质灾害应急技术预案,针对坍塌、涌水等突发状况,明确快速支护、封堵处置等具体技术流程。

#### 4.2 管理防控措施

管理防控是保障技术措施有效落实的制度基础,应从组织体系、制度标准、教育培训、应急管理等方面系统加强。完善安全责任体系,落实全员安全生产责任制,明确各级岗位安全职责,建立安全责任考核机制,将安全绩效与个人利益挂钩,强化责任追究。健全安全管理制度与标准,针对高原山区特殊环境,制定高原施工安全技术规程、操作规程和管理标准,填补制度空白。加强制度执行监督检查,确保制度落地见效。强化安全教育培训,开展高原适应性专项培训,使作业人员了解高原环境对人体的影响及应对措施;加强岗位安全技能培训,提高高原条件下设备操作、工艺执行能力;开展案例警示教育,增强全员风险意识。创新培训方式,采用VR虚拟现实技术模拟高原施工场景,提升培训实效。加强应急能力建设,制定高原山区专项应急预案,充分考虑高原交通不便、医疗条件差等实际情况,合理配置应急救援物资和设备,建立高原应急救援队伍,定期开展实战演练,提升突发事件响应能力<sup>[4]</sup>。推进安全生产标准化建设,规范现场管理,改善作业环境。建立安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制,实现风险源头管控、过程控制和应急保障有机结合。

#### 4.3 生态保护措施

高原山区生态系统脆弱,施工活动对生态环境影响较大,生态保护是可持续发展的重要要求。施工前开展生态环境现状调查,识别生态敏感目标,科学规划施工场地布局,优化施工便道和临建设施布置,减少临时用

地面积,避让珍稀植物分布区和野生动物栖息地。施工过程中严格控制施工扰动范围,采取围挡、隔离等措施保护周边植被。加强水土流失防治,对开挖边坡及时进行防护,布设截排水沟、沉沙池等设施,减少水土流失;对弃渣场进行科学选址,采取拦挡、排水、植被恢复等综合措施。加强水资源保护,施工废水经沉淀、过滤处理后循环利用或达标排放,生活污水集中处理,防止污染地表水体。加强大气环境保护,采取洒水降尘、覆盖防尘、密闭运输等措施控制施工扬尘,选用低排放施工机械,减少废气排放。噪声振动控制方面,选用低噪声设备,对高噪声源采取隔声消声措施,合理安排爆破作业时间,采用减振爆破技术,降低对周边环境的影响。施工结束后及时开展生态修复,对临时用地进行场地清理和土地整治,采用乡土树种进行植被恢复,促进生态系统重建。建立生态环境监测体系,对施工期和运营期生态环境变化进行跟踪监测,及时调整保护措施。

#### 结束语

高原山区导流隧洞施工安全风险受多因素耦合影响,管控核心在于精准识别致因、理清作用机制、落实针对性防控。本文通过系统梳理自然、技术、设备、人员、管理五大类致因,剖析耦合机制与关键风险链,明确了风险防控的核心要点。实际施工中,需立足高原特殊环境,坚持技术先行、管理兜底、生态兼顾的原则,从勘察设计到竣工交付全程管控,化解各类风险隐患。未来需进一步结合智能化技术,优化风险监测与预警体系,提升高原隧洞施工安全管控的精细化与智能化水平,保障水利水电工程顺利推进,推动高原地区工程建设安全高质量发展。

#### 参考文献

- [1]刘伟.长导流隧洞钻爆法施工安全技术应用优化策略[J].工程技术研究,2025,10(17):49-51.
- [2]李娜.恒河水库导流隧洞设计与施工[J].陕西水利,2025(9):140-142.
- [3]李浪,向鹏.水利工程导流输水隧洞施工过程危险源分析[J].人民珠江,2023,44(z1):161-165,193.
- [4]李洋.特大断面导流隧洞施工技术在水利枢纽工程中的应用[J].科技创新与应用,2024,14(21):193-196.