软弱围岩隧道施工安全风险管理分析

庞清华

（四川省交通建设集团有限责任公司，四川 成都 610041）

摘 要 为提高施工安全管理水平，本研究系统分析了软弱围岩的工程特性及其对隧道施工安全的影响机制，并在此基础上采用风险识别分析与分级管控相结合的方法，评估软弱围岩隧道施工中主要安全风险，并围绕地质预判、支护动态优化、施工监测预警及应急管理等方面，提出针对性的安全风险管理要点。结果表明，建立动态化、信息化的风险管理体系，能够降低施工安全事故发生概率，提高软弱围岩隧道施工的安全性。

关键词 软弱围岩；隧道施工；安全风险管理

中图分类号：U455.1 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.028

0 引言

软弱围岩隧道因其结构松散、稳定性差、变形大，在施工过程中容易引发坍塌、突水突泥等安全事故，施工安全风险显著高于一般围岩条件。随着交通基础设施建设规模的不断扩大，软弱围岩隧道工程数量持续增加，其安全风险管理问题日益突出。因此，如何在复杂地质条件下有效识别、控制施工风险，已成为隧道工程建设中的关键技术难题。

1 软弱围岩隧道施工安全风险管理要点

针对软弱围岩隧道施工中地质条件复杂、安全风险高的特点，必须建立科学、系统的风险管理体系。施工单位可基于“预判—控制—监测—应急”的核心主线，形成贯穿施工全过程的风险闭环管理机制[1]。

1.1 地质预判先行，精准探明围岩性状

在软弱围岩隧道施工中，施工单位的首要任务是在开挖前建立系统的地质预判体系，其核心依据是中华人民共和国行业标准《公路隧道施工技术规范》（JTG/T 3660-2020）与《公路工程地质勘察规范》（JTG C20-2011）中确立的“动态设计、信息化施工”原则。地质预判是贯穿工程始终的主动探测与动态反馈过程[2]。施工单位需基于勘察设计资料，建立“宏观预判→超前探测→实时验证”三级递进预判机制，以精准识别掌子面前方至少1倍洞径至3倍洞径内的地质风险[3]。

1.1.1 建立分级地质预判框架

施工单位需依据设计阶段的地质纵断面图、区域地质构造分析和《公路水运工程施工安全风险评估指南第1部分：总体要求》（JT/T 1375.1-2022），将隧道划分为不同风险等级区段，旨在指导后续差异化、预案资源配置（如表1所示）。

1.1.2 实施多源数据融合分析

预判的关键在于分析探测数据。超前水平钻探获取的岩芯，其单轴饱和抗压强度（R_c）与岩体完整性系数（K_v）是评价围岩稳定性的核心指标。依据《公路隧道设计规范》（JTG 3370.1-2018），可计算岩体基本质量指标（BQ）：

$$BQ=100+3R_c+250K_v \quad (1)$$

式（1）中，当 $R_c > 90K_v+30$ 或 $K_v > 0.04R_c+0.4$ 时，需按规范进行限制性取值。同时，要实时记录钻探过程中的钻进速率、冲洗液颜色等异常现象，并结合TSP解译的波速、波幅异常区，建立地质—物探异常关联模型，精准圈定软弱夹层、富水区及破碎带的空间位置[4]。

1.1.3 实现掌子面地质动态反馈

施工单位需配备数字地质编录系统，对每一循环开挖揭露的掌子面进行高清摄影、岩体结构面数字测量，并利用图像识别技术，对比岩性、节理产状、渗水点与超前预报结果。此过程形成的“预报—揭露—修正”闭环，可不断优化后续区段的预报参数。

1.1.4 严格遵循预警联动管理流程

地质预判的最终目的是指导施工决策。当超前钻探揭示前方存在高压富水、极其破碎的Ⅴ、Ⅵ级围岩时，施工单位要立即启动《隧道施工安全风险预警与应急处置预案》。预报成果要以书面形式及时报送监理、设计与建设单位，并共同会商，确定是否调整开挖工法、

作者简介：庞清华（1990-），男，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁。

表 1 软弱围岩隧道施工地质风险分级预判框架

风险等级	风险等级判定内涵	分级依据	典型地质特征	预报原则	主要技术手段
Ⅳ级风险（重大风险）	事故一旦发生，可能造成群死群伤或特别重大经济损失，且发生可能性高	1. 设计或施工揭示为极不稳定软弱围岩，连续长度较大；2. 预报或揭露存在大型断层破碎带、富水溶腔、暗河等；3. 可能引发大规模坍塌、突水突泥、整体失稳	1. 地表存在大型塌陷坑、显著沉降；2. 高地应力区可能发生大变形或岩爆	综合预报、钻探为主，长短结合，全过程跟踪	TSP/TGP 长距离探测 + 超前水平钻 + 地质雷达 + 孔内成像 + 水文监测
Ⅲ级风险（较大风险）	事故可能造成 1 人以上死亡或较大经济损失，需重点控制	1. 存在高风险软弱围岩区段；2. 可能发生突水、突泥、局部坍塌；3. 浅埋、偏压或下穿重要建筑物	1. 中等规模断层、节理密集带；2. 富水软弱夹层或不良地质组合	中短距离预报，物探与钻探结合，重点验证	TSP/TGP 中距离探测 + 超前水平钻 + 地质雷达 + 加深炮孔
Ⅱ级风险（一般大风险）	事故可能造成人员受伤或一般经济损失	1. 地质条件基本明确，但存在不确定性；2. 围岩破碎、节理发育，局部渗水	1. 局部软弱、破碎；2. 稳定性受施工扰动影响明显	短距离预报为主，必要时钻探验证	地质雷达 + 单孔超前钻探 + 加深炮孔系统观察
Ⅰ级风险（低风险）	事故后果较轻，风险可接受	1. 围岩条件良好，结构完整；2. 无明显不良地质影响	地质条件简单、均一	常规预报、宏观判断	地质素描、掌子面观察、加深炮孔，必要时快速地质雷达扫描

加强支护参数等措施，以保证预判信息能直接、迅速地转化为具体施工指令，真正实现“岩变我变”的主动控制。

借助上述地质预判体系，施工单位可将未知的地质风险转化为可识别、可量化的工程问题，为后续支护、开挖与监测工作的精准实施奠定不可替代的科学基础。

1.2 支护动态优化，匹配围岩形变速率

支护动态优化的本质是使支护结构的强度、刚度与施作时机，能够主动适应围岩在开挖扰动后的应力重分布与时效变形特征，从而将变形控制在安全、可控范围内，防止出现失稳坍塌。

1.2.1 建立基于变形速率的支护响应分级体系

施工单位要依据全断面收敛、拱顶下沉等关键监测数据，建立支护响应分级调控机制：该分级体系能够保证支护响应与围岩变形在时间与强度上的精确匹配，实现从“被动承受”到“主动控制”的转变（见表 2）。

1.2.2 推行差异化的支护强化技术

针对软弱围岩变形速率快、自稳时间短的特点，支护优化要采取差异化、组合化的技术策略。时机差异化：强调支护的“及时性”与“紧跟性”。对于变形速率高的区段，要坚持“短进尺、快封闭、紧支护”，压缩初喷混凝土、架立钢拱架等工序的间隔时间，采用“一掘一支护”的微台阶工法，尽早形成封闭受力环。刚度组合化：采用“刚柔并济、多层叠加”的组合支护体系。例如：在初喷混凝土层中掺加钢纤维以提高其抗裂与韧性。空间协同化：注重支护结构在三维空

表 2 软弱围岩隧道施工支护动态响应分级调控阈值表

变形速率等级	日变形速率（mm/d）	累计变形量（mm）	核心响应措施
Ⅰ级（正常控制）	＜ 2	200 ～ 300	按原设计支护参数施工，加强观测
Ⅱ级（重点关注）	2 ～ 5	300 ～ 500	缩短开挖进尺至 1 榀 / 循环；加密锁脚锚杆；喷射混凝土初支及时封闭
Ⅲ级（主动干预）	5 ～ 10	500 ～ 1 000	立即暂停开挖，实施径向注浆；提高钢架规格；评估调整预留变形量
Ⅳ级（紧急加强）	＞ 10	＞ 1 000	全断面暂停施工，采取超前注浆、增设大刚度临时支撑等强力预加固措施；启动变形异常应急程序

间上的整体性，增设临时仰拱，将开挖断面尽快转化为稳定的闭合结构，并借助系统锚杆与超前小导管的结合，在隧道周边形成纵深加固的“承载拱”，有效控制围岩的松弛范围。

借助这一动态优化实践，施工单位可将支护从静态的“设计图纸”转化为动态的“安全屏障”，保证软弱围岩隧道施工安全。

1.3 监测数据驱动，预警分级实时响应

软弱围岩隧道施工的监测体系，其核心是建立以数据为驱动、以预警为核心的风险感知与决策支持系统，其核心目标是利用自动化的监测手段，实时捕捉围岩与支护体系的力学行为演变，依据科学阈值精准识别控制风险[5]。

1.3.1 建立多源融合的自动化监测网络

监测的有效性首先依赖于覆盖全面、响应迅速的感知层。施工单位需建立“地表—洞内—支护体”三位一体的自动化监测体系。地表监测：针对浅埋段的建筑物，布设静力水准仪与GNSS自动监测站，实时监测地表沉降与水平位移。洞内收敛与沉降监测：在隧道洞内关键断面布设自动全站仪，实现拱顶下沉、水平收敛等净空位移的无人化、高频次自动采集。监测断面布设密度要依据围岩级别动态调整。支护结构内力监测：在初期支护钢拱架内缘、外缘关键部位焊接表面应变计，在锚杆杆体安装钢筋计，在二次衬砌内埋设混凝土应变计与土压力盒，直接监测支护结构的内力、轴力与接触压力变化。

1.3.2 建立数据驱动的智能预警响应机制

原始数据要经过处理、分析与判识转化为决策信息，并建立“监测—预警—响应”智能闭环流程。预警一旦触发，需要执行标准化的应急响应动作。蓝色预警（注意）：现场技术员加强巡视，监测频率提高至2次/天，数据每日分析报告。黄色预警（预警）：项目技术负责人组织现场会商，分析原因，调整施工参数，监测频率提高至4次/天。橙色预警（报警）：项目经理立即到位，启动应急预案，必要时暂停掌子面开挖，采取加固措施，监测频率提高至1次/2小时，并报告监理。红色预警（控制）：全面停止施工，撤离危险区人员，成立应急指挥部，采取强力工程措施控制变形，同时进行不间断实时监测。

借助这一监测预警体系，施工单位能够实现对软弱围岩隧道施工安全风险的“全天候、数字化、可追溯”精准管控。

1.4 应急实战演练，强化灾变处置能力

应急管理是软弱围岩隧道施工安全风险管控的最后一道防线，其实效性直接决定了灾变后果的严重程度。施工单位要严格遵循《生产安全事故应急预案管理办法》（应急管理部令第2号），建立“基于情景、聚焦实战、动态优化”的应急能力建设体系，保证在突发塌方、涌水、变形失稳等险情时，能够实现快速、科学的应急处置。

施工单位需要依据隧道不同施工阶段及主要风险类型，编制针对性的《专项应急处置情景脚本》。脚本要明确灾变征兆、预警信号等。接着，施工单位每季度至少组织一次综合性实战演练，由项目部应急指挥部在不预先通知的情况下，随机触发模拟险情。演练需完整覆盖施工全链条。最后，要建立“演练—评估—修订”的闭环提高机制。每次演练后，施工单位要立即组织复盘评估会，依据演练记录与评估表，对标《生产经营单位生产安全事故应急预案评估指南》的要求，查找预案缺陷、协调漏洞与操作短板。评估结论要在一周内形成正式的《应急预案修订建议书》，并完成对预案文本、资源配置与培训方案的迭代更新。

借助这一应急实战锤炼，能够将应急响应能力固化为项目组织的核心韧性，保证施工单位在真实的灾变面前能够迅速启动、高效执行，最大限度降低伤亡损失。

2 结束语

软弱围岩隧道施工安全风险管理是工程建设顺利推进的技术保证，体现着现代隧道工程安全理念。未来，施工单位要更加注重风险管理的前瞻性，依托精细化勘察成果，推动施工风险识别、动态评估与过程控制的深度融合，并加强多专业协同管理，提高风险应对的科学性，从而推动隧道工程向安全高质量方向发展。

参考文献：

[1] 毛立厦.软弱围岩隧道开挖支护优化与施工安全风险管理[J].科技创新与生产力,2025,46(10):81-84.
[2] 刘亚枫.软弱围岩隧道施工安全风险管理研究[J].现代工程科技,2025,04(05):165-168.
[3] 刘宁.软弱围岩隧道施工安全风险管理分析[J].工程技术研究,2025,10(08):150-152.
[4] 吕宏宇,李琳.隧道施工安全风险评估及防控措施研究:以晋阳高速牛王山隧道工程为例[J].工程技术研究,2025,10(07):146-148,191.
[5] 方义清.软弱围岩隧道施工安全风险管理分析[J].工程建设与设计,2022(04):206-209.