

Research on the Control Technology of Tunnel Surrounding Rock Stability for High-Speed Railways under Complex Geological Conditions

Cunping Zhang

China Railway No.12 Engineering Group Co., Ltd. Second Engineering Company, Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract

High-speed railway tunnels have a wide range of passages and are affected by various factors such as geological stratum evolution. They are prone to encountering complex geological conditions such as karst, soft rock, fractured fault zones, and high ground stress. Each type of geological feature has distinct engineering characteristics: karst geological formations have developed caves and underground rivers; soft rock geological formations have low rock strength and are prone to softening when exposed to water; fractured fault zones have loose rock masses and abundant groundwater; high ground stress geological formations have exceeded the standard of ground stress. Different complex geological conditions correspond to different potential stability hazards of surrounding rock, mainly including water and mud gushing, surrounding rock collapse, large deformation, and rockburst, which pose risks to construction safety and project quality. This paper, based on engineering practice, classifies and summarizes the types and core characteristics of complex geological formations, analyzes the manifestations and hazards of surrounding rock stability hazards under various geological conditions, and proposes targeted control technologies, which can ensure the safety of high-speed railway tunnel construction.

Keywords

high-speed railway tunnels; complex geological conditions; control of surrounding rock stability

复杂地质条件下高速铁路隧道围岩稳定性控制技术研究

张存平

中铁十二局集团第二工程有限公司, 中国·山西 太原 030000

摘 要

高速铁路隧道穿越范围广, 受地层演变等多种因素影响, 易遭遇岩溶、软岩、断层破碎带、高地应力等复杂地质。各类地质具有鲜明工程特性: 岩溶地质溶洞、暗河发育, 软岩地质岩体强度低、遇水易软化, 断层破碎带岩体松散且地下水富集, 高地应力地质地应力超标。不同复杂地质对应差异化围岩稳定性隐患, 主要包括突水突泥、围岩坍塌、大变形、岩爆等, 危害施工安全与工程质量。本文结合工程实际, 分类梳理复杂地质类型及核心特性, 剖析各类地质下的围岩稳定性隐患表现与危害, 提出针对性的控制技术, 能保障高铁隧道施工安全。

关键词

高速铁路隧道; 复杂地质条件; 围岩稳定性控制

1 引言

随着高速铁路建设向山区延伸, 隧道穿越的地质条件愈发复杂, 复杂地质引发的围岩稳定性问题成为制约施工安全、进度与质量的核心瓶颈^[1]。系统分类复杂地质类型、明确各类地质下的围岩稳定性隐患, 是开展风险防控、优化支护技术的前提。本文基于高铁隧道施工实际, 重点分析常见复杂地质类型及对应围岩隐患, 能为后续围岩稳定性控制提供科学依据, 助力高铁隧道工程安全高效推进。

【作者简介】张存平(1996-), 男, 中国山西大同人, 本科, 助理工程师, 从事高速铁路隧道建设研究。

2 复杂地质条件分类及围岩稳定性隐患

2.1 高速铁路隧道常见复杂地质类型

结合实际施工情况, 高铁隧道最常见的复杂地质类型主要有岩溶地质、软岩地质、断层破碎带地质、高地应力地质四类, 各类地质均有鲜明工程特性, 对隧道施工及围岩稳定性造成较大影响。

岩溶地质是高铁隧道中较为多发的复杂地质, 多分布在碳酸盐岩地层区域, 主要特点是溶洞、溶蚀裂隙、暗河发育, 由地下水长期溶蚀形成。这类地质里, 溶洞大小不一, 小的仅数十厘米, 大的可形成长数十米、宽数米的大型溶腔, 部分溶洞内填充黏土、碎石或积水。溶蚀裂隙呈网状分布, 破坏岩体整体性, 成为地下水渗透的主要通道。暗河分布区

域水流持续,水压与涌水量不稳定,施工风险极高,部分隧道单日最大涌水量可超5万立方米。

软岩地质在高铁隧道建设中十分常见,主要包含膨胀岩、软弱夹层、泥质岩层三类,核心特点是岩体强度低、遇水易软化、变形性强。膨胀岩遇水膨胀、失水收缩的特性明显,岩体结构松散,遇水后强度大幅下降,易产生膨胀变形。软弱夹层多处于岩层之间,厚度从几厘米到数米不等,由泥质、页岩等软弱物质构成,力学性能差,易发生滑动变形。泥质岩层以泥质成分为主,岩体致密性差、渗透性强,遇水后呈软塑状,承载力大幅降低,给隧道开挖和支护带来很大挑战。

断层破碎带地质由地壳构造运动形成,主要特点是破碎岩体分布广、地下水富集。破碎带内岩体被断层切割得十分破碎,多呈碎块状、粉末状,整体性差、力学强度低、稳定性弱。

2.2 不同复杂地质下围岩稳定性隐患

不同复杂地质的岩体结构、力学性能、水文条件差异明显,使得围岩稳定性隐患呈现不同特点。明确各类地质对应的隐患类型、表现形式及危害,是做好风险防控的关键。

岩溶地质的围岩稳定性隐患主要体现为突水突泥、围岩坍塌、溶洞顶板失稳三类,且隐患发生突然、危害程度高。突水突泥是最主要的隐患,多因开挖揭露溶洞、暗河或溶蚀裂隙,地下水携带泥砂、碎石涌入隧道,导致施工停滞、设备损坏,严重时引发人员伤亡。围岩坍塌源于溶蚀裂隙破坏岩体整体性,加之地下水渗透软化,岩体强度下降,开挖后失去支撑引发,多为局部塌方或大规模冒顶。溶洞顶板失稳则是由于顶板岩体受上覆岩层压力和开挖扰动,当顶板厚度不足、强度不够时,易发生坍塌,进而影响隧道整体稳定。

软岩地质的围岩稳定性隐患核心是围岩变形和支护结构损坏,主要包括围岩大变形、蠕变、支护结构受压破坏。围岩大变形是最典型的隐患,因软岩强度低、塑性强,开挖后岩体应力重新分布,易产生明显收敛变形,超出允许范围会缩小隧道断面,影响施工运营。蠕变是软岩在长期应力作用下的缓慢变形,持续时间长,会逐步累积并作用于支护结构。支护结构受压破坏则是因为软岩变形产生的压力超过支护承载力,表现为钢拱架扭曲、混凝土衬砌开裂剥落等,严重威胁施工安全。

断层破碎带地质的隐患主要是岩体松散易坍塌、地下水渗透软化围岩,两类隐患相互叠加,风险极高。破碎带内岩体破碎、强度低,开挖后易发生边墙坍塌、掌子面塌方,且范围大、治理难。

3 不同复杂地质条件下围岩稳定性控制技术

3.1 岩溶地质隧道围岩稳定性控制技术

岩溶地质隧道围岩稳定控制的核心的是防范突水突泥、围岩坍塌及溶洞顶板失稳,施工需严格遵循先探测、后加固、

再开挖原则,搭建超前探测预判、超前支护加固、溶洞专项处理、衬砌优化防护全流程管控体系,兼顾堵水防渗与岩体加固双重需求。

超前地质探测是首要环节,核心是精准捕捉岩溶分布、发育规模及水文状况。掌子面围岩数码成像技术依托高清设备与智能识别算法,可快速判定岩体完整性、溶蚀裂隙及充填物类型,实时反馈地质动态。随钻测量系统结合钻孔作业,同步采集钻孔轨迹、岩体强度等数据,精准定位溶洞、暗河位置,提前预判风险,两类技术协同应用能实现岩溶地质精准探测^[2]。

超前支护是核心手段,针对溶蚀裂隙、溶洞周边岩体及地下水开展预先加固。超前注浆堵水采用水泥-水玻璃双液注浆材料,注浆压力1.5至2.5MPa,范围覆盖掌子面前方10至15米,形成注浆帷幕阻断渗水、提升岩体整体性。管棚支护用于大型溶洞区域,选用直径108毫米无缝钢管,长度15至20米,间距30至50厘米,构建刚性支护体系。小导管注浆适用于中小型裂隙,直径42毫米、长度3至5米,梅花形布置,形成稳固加固圈。

溶洞处理采用差异化方案:直径<3米的小型溶洞用C25混凝土分层回填,清理松散充填物并振捣密实。直径≥3米的大型溶洞,且积水丰富时,先泄水降压,再用钢筋混凝土框架结合回填混凝土加固,必要时设迂回导坑。初期支护采用C25以上钢纤维喷射混凝土,I20b型钢拱架配合锚杆,二次衬砌采用C30钢筋混凝土,受力集中区加密钢筋并铺设防水层,保障长期稳定。

3.2 软岩地质隧道围岩稳定性控制技术

围岩改性是基础,通过物理化学方式改善软岩结构。注浆加固应用最广泛,采用水泥-水玻璃双液浆,膨胀岩注浆压力1.0至1.5MPa,孔间距1.5至2.0米。泥质岩层注浆前预喷水湿润,掺入粉煤灰优化浆液,增强黏结性。经改性处理后,软岩抗压强度提升30%至50%,有效遏制遇水软化,为后续施工奠定基础。

抗大变形支护采用刚柔结合体系,可缩性型钢拱架为关键构件,设置可缩接头,可缩量50至100毫米,释放应力避免拱架损毁。锚喷网联合支护作为辅助,C25喷射混凝土厚度20-25厘米,8毫米钢筋网间距20×20厘米,22毫米中空注浆锚杆长度4-5米,梅花形布置,形成协同受力体系。二次衬砌延后施作,待形变速率≤0.5毫米/天再施工,采用C30钢筋混凝土,提升整体承载能力。

蠕变控制采用分级支护、应力释放与监测反馈协同方式:分级支护分初期、临时、二次衬砌三级,逐步释放应力。应力释放孔孔径100毫米、深度5-8米,间距2-3米,减缓蠕变速率。每5-10米设监测点,实时监测围岩收敛与拱顶下沉,动态调整参数。施工工法遵循“短进尺、弱爆破、快封闭、勤量测”,进尺0.5-1.0米,爆破震动速度≤1.5cm/s,开挖后4小时内封闭支护,每天监测2-3次。应用表明,围

岩收敛量可控制在 50 毫米内, 支护无损毁。

3.3 断层破碎带隧道围岩稳定性控制技术

断层破碎带隧道控制核心是防止岩体坍塌及地下水软化围岩。遵循超前加固、强化支护、控水防渗、优化工法原则, 结合岩体松散、地下水富集特点, 搭建全流程管控体系, 保障施工安全。

超前加固是前置环节, 根据断层规模采用差异化技术。中小型断层用 42 毫米小导管注浆, 长度 3-5 米、间距 30-40 厘米, 水泥-水玻璃双液浆压力 1.2-2.0MPa, 胶结松散岩体形成加固圈。大型断层采用深孔注浆, 钻孔深度 10-15 米、孔径 108 毫米, 压力 2.0-3.0MPa, 扩大加固范围。地下水丰富断层用帷幕注浆, 环形布置注浆孔, 帷幕厚度 ≥ 3 米, 实现堵水与加固双重效果。

破碎岩体支护采用刚柔协同体系, 格栅拱架加 C25 喷射混凝土为核心, 快速封闭岩体防坍塌。22 毫米全长粘结式锚杆长度 4-6 米, 间距 1.5-2.0 米, 深入稳定岩体, 增强支护整体性。破碎极严重区域增设临时钢支撑, 强化支护效果。

地下水控制采用排水降压与堵水防渗结合: 排水孔孔径 80 毫米、深度 5-8 米, 间距 2-3 米, 将地下水引入排水系统, 压力控制在 0.5MPa 内。初期支护与二次衬砌间铺设 ≥ 1.5 毫米 EVA 防水板, 设置止水带, 涌水量大区域增设集水坑抽水。施工工法按需选择: 断层宽度 < 5 米用台阶法, 进尺 1.0-1.5 米。5-10 米用 CD 法, 分左右分步开挖支护。 > 10 米用 CRD 法, 分四部分交叉开挖。应用表明, 无坍塌、涌水事故, 围岩形变量 ≤ 40 毫米。

3.4 高地应力地质隧道围岩稳定性控制技术

高地应力隧道控制重点是控制岩爆、挤压、压裂和支护开裂, 秉承卸压为先、支护合适、动态控制原则, 根据深埋、集中应力的特点, 建立岩爆防控制衡、支护水平适应、施工支护卸压一体化防控机制^[3]。岩爆防控采取应力释放、超前

卸压和柔性支护方法。钻孔卸压法采取于掌子面、边墙打径向钻孔, 口径 100-120 毫米, 深 5-8 米, 间距 2-3 米, 减小弹性应变能释放, 防控即时型岩爆。超前卸压采取 10-15 米深的超前钻孔和预裂爆破, 控制炸药量, 防止应力瞬间释放。柔性支护采用可缩性型钢拱架和 C25 以上钢纤维喷射混凝土等包容岩爆的冲击能量。

支护优化以增强承载能力, 提高匹配能力为关键, 选用较硬的材料: 初期支护用 C30-C35 钢纤维喷射混凝土、I22b 以上的型钢拱架、25mm 强度高的中空注浆锚杆等。优化初始受力方式, 拱架间距为 60-70 厘米, 锚杆梅花布置, 应力集中区加密。二次衬砌加厚 C30 钢筋混凝土, 加强方钢、优化断面受力等。

施工卸压同样采用分步开挖、施工卸压槽的做法: 台阶法施工或 CRD 法施工, 台阶法进尺 1.0-1.5 米, CRD 每一分部进尺 ≤ 1.0 米, 开挖后立即封闭。巷帮卸压槽深 600 毫米、高 400 毫米, 间距 2-3 米。底部卸压槽在中上部、留 1.5 米以上的稳定区, 充填矸石后再浇筑混凝土, 传导应力。

4 结语

结合高速铁路隧道施工实践, 系统梳理了岩溶、软岩、断层破碎带、高地应力四类常见复杂地质的工程特性, 深入剖析了各类地质下的围岩稳定性隐患及危害, 明确了不同复杂地质的隐患差异与控制技术。

参考文献

- [1] 祝塘, 李剑. 复杂地质条件的隧道围岩稳定性分析[J]. 交通科技与管理, 2021 (35): 100-101.
- [2] 马文华, 张堂杰, 范鹏举, 等. 断层破碎带几何参数对公路隧道围岩稳定性的影响研究[J]. 国防交通工程与技术, 2026 (02): 28-34.
- [3] 武剑峰, 王建, 赵震. 埋深对高地应力软岩隧道围岩稳定性的影响机制研究[J]. 科技资讯, 2025 (24): 156-160.