

# 轨道交通隧道施工中地下水控制关键技术研究与实践

李金宝 张家栋

中国水利水电第十一工程局有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i7.18235

**[摘要]** 在轨道交通隧道施工中,地下水作为核心风险源,直接威胁着结构耐久性及施工安全。本文基于孔隙水、裂隙水、岩溶水的赋存特性与危害机制,构建“勘察监测-预处理-工法适配-应急处置”全流程控制技术体系,通过系统梳理注浆堵水、降水疏干、冻结加固等核心技术的适用场景与实施要点,结合深圳地铁12号线工程案例验证方案有效性。研究成果为富水地层隧道施工提供了可操作的技术路径,对降低涌水突泥等灾害风险具有重要实践价值。

**[关键词]** 轨道交通隧道; 地下水控制; 预处理技术; 施工工法; 应急处置

中图分类号: TU94+3.1 文献标识码: A

## Research and Practice on Key Technologies of Groundwater Control in Rail Transit Tunnel Construction

Jinbao Li Jiadong Zhang

China 11th Water Conservancy and Hydropower Engineering Bureau Co., Ltd.

**[Abstract]** In the construction of rail transit tunnel, groundwater, as the core risk source, directly threatens the structural durability and construction safety. Based on the occurrence characteristics and hazard mechanism of pore water, fissure water and karst water, this paper constructs the whole process control technology system of "investigation and monitoring-pretreatment-construction method adaptation-emergency treatment", and systematically sorts out the applicable scenarios and implementation points of core technologies such as grouting water plugging, dewatering and freezing reinforcement, and verifies the effectiveness of the scheme by combining with the engineering case of Shenzhen Metro Line 12. The research results provide an operable technical path for tunnel construction in water-rich strata, and have important practical value for reducing disaster risks such as water inrush and mud outburst.

**[Key words]** rail transit tunnel; Groundwater control; Pretreatment technology; Construction method; Emergency disposal

### 引言

随着城市化发展进程的逐步推进,城市轨道交通建设规模日益扩大,隧道工程逐渐向深层、复杂地质条件延伸,导致隧道施工面临围岩失稳、涌水突泥、地面沉降等灾害。其中,地下水问题严重威胁施工安全,是导致安全事故和工期延误的主要因素之一。由此可见,深入研究地下水赋存规律,优化控制技术体系,对提升轨道交通隧道施工安全水平、保障工程建设质量具有重要现实意义。本文围绕地下水控制全流程,从赋存规律、关键技术、工程实践三个维度展开分析,为富水地层隧道施工提供技术支撑。

#### 1 轨道交通隧道施工地下水赋存规律与危害机制

##### 1.1 地下水赋存类型与工程特性

轨道交通隧道施工中,常见的地下水主要有孔隙水、裂隙水

与岩溶水三类,各类地下水的赋存状态和地层岩性息息相关。孔隙水广泛分布于砂层、砂砾石层等松散沉积物地层,受颗粒级配影响,透水性差异较大,砂卵石层渗透系数可达10-1-100m/d,富水性强且流动性大;裂隙水主要赋存于基岩裂隙中,分布受地质构造控制,裂隙发育区域易形成富水通道,透水性具有明显方向性<sup>[1]</sup>;岩溶水存在于碳酸盐岩地层,因岩溶洞穴、管道的发育,呈现集中性、突发性的赋存特征,水位变化幅度大,对隧道施工威胁显著。不同类型地下水的工程特性直接决定控制技术的选择,需结合地层勘察结果精准判断<sup>[2]</sup>。

##### 1.2 地下水对隧道施工的危害机制

地下水对隧道施工的危害体现在整个施工过程,可总结为以下三个方面:其一,施工安全风险,富水地层中隧道开挖会破坏地下水原有平衡,受水压作用影响,很容易引起涌水突泥问题,

造成掌子面坍塌,当水压大于0.3MPa时,掌子面坍塌概率将显著增加。其二,结构耐久性影响,地下水携带的盐分、酸性物质会侵蚀钢筋混凝土,加速材料劣化进程,从而降低结构强度与使用寿命。其三,周边环境破坏,地下水过量疏排会使地下水位下降,造成地面沉降、地下管线变形、周边建筑物开裂等问题,如果沉降量大于30mm将威胁建筑物安全性。此外,地下水还可能产生间接危害,导致电气系统短路、施工设备锈蚀等,进一步加剧施工风险<sup>[3]</sup>。

## 2 地下水控制关键技术体系研究

### 2.1 地下水勘察与动态监测技术

精准掌握地下水的赋存规律,是控制地下水的的核心。对此,应根据地质条件合理选用对应的勘察技术。地质钻探作为基础勘察方法,通过取芯分析地层岩性与含水性,配合抽水试验确定渗透系数、富水程度等关键参数;高密度电法与地质雷达技术可实现无损探测,精准识别地下富水区域与岩溶通道,探测深度可达50m,分辨率优于0.5m;跨孔CT技术适用于深层地层,通过多钻孔数据反演,构建地下水三维分布模型。动态监测技术采用自动化监测系统,在隧道施工影响范围内布设水位监测孔,监测频率根据施工阶段调整,开挖期间每30min采集一次数据,通过无线传输至监控平台,实时跟踪水位变化<sup>[4]</sup>。监测指标包括地下水位、水压、流量等,当水位变化速率超过5cm/h时触发预警,为施工决策提供依据。

### 2.2 隧道施工地下水预处理关键技术

为降低地下水出现概率,需要用到地下水预处理技术。技术的选用,应综合考虑地下水类型及地层条件等相关因素。如表1所示为三种主流预处理技术的核心参数与适用场景:

表1 主要地下水预处理技术对比

技术类型	适用地层	核心技术参数	技术优势	局限性
注浆堵水	裂隙地层、岩溶地层	注浆压力 0.5-1.5MPa,浆液扩散半径 1-3m,凝固时间 3-30min	堵水效果显著,可形成隔水帷幕	对浆液配比要求高,施工工艺复杂
降水疏干	孔隙地层、松散砂层	井点间距 10-15m,井深超含水层底板 2-3m,抽水量 5-20m <sup>3</sup> /h	施工便捷,成本较低,适用范围广	可能引发地面沉降,需控制抽水量
冻结加固	极软弱富水地层、砂卵石层	冻结壁厚度 1.5-3m,冻结温度 -10~-20℃,冻结周期 20-40天	加固效果好,隔水性较强	能耗高,施工周期长,成本较高

注浆堵水技术以水泥-水玻璃双液浆、丙烯酰胺类化学浆等作为常用材料,通过向地层注入浆液,填充孔隙与裂隙,形成隔水帷幕。施工作业开展,需根据地层渗透性调整注浆压力与浆液配比,裂隙发育地层采用分段前进式注浆,岩溶通道区域采用定向注浆技术,确保浆液充分扩散。降水疏干技术分为井点降水与深井降水,砂层、粉质黏土层优先采用轻型井点或喷射井点,降水深度可达6-12m;砂砾石层等富水性强的地层采用深井降水,井径300-500mm,通过真空泵或深井泵抽水,将地下水位控制在隧道开挖面以下1.5-2.0m。冻结加固技术适用于极软弱富水地层,通过布置冻结管,通入低温盐水将周边地层冻结形成刚性冻结壁,兼具隔水与支护功能,在上海地铁10号线穿越黄浦江隧道施工中,该技术成功解决了富水砂卵石层的开挖难题<sup>[5]</sup>。

### 2.3 不同施工工法下的地下水控制技术

#### 2.3.1 盾构法隧道地下水控制

使用该方法控制地下水,关键在于保证盾尾密封及同步注浆质量。盾尾密封使用三道刷密封结构,注入专用密封油脂,控制注入压力高出地下水压力0.2-0.3MPa,确保密封效果;同步注浆是控制地下水渗入的关键,采用惰性浆液,配合比为水泥:砂:碎石:水=1:3:4:0.8,注浆压力控制在0.3-0.5MPa,填充管片与围岩间隙,形成隔水层。针对富水地层,可采用二次注浆技术,在管片拼装完成后72小时内注入水泥浆,进一步强化隔水效果。此外,盾构机掘进参数需与地下水条件适配,掘进速度控制在30-50mm/min,刀盘转速保持在1.0-1.5r/min,避免因掘进过快破坏地层稳定性。

#### 2.3.2 矿山法隧道地下水控制

矿山法隧道施工必须严格遵循先治水、后开挖的原则,采取超前支护和排水措施相结合的方法。使用超前小导管注浆加固,小导管长3-5m,间距30-50cm,呈10-15°外插角布置,注入水泥-水玻璃双液浆,形成超前隔水帷幕;在隧道周边设置排水盲管,将地下水引入中心排水沟,集中排出洞外,盲管坡度不小于3%,确保排水顺畅。开挖过程中采用台阶法施工,缩短开挖循环进尺,每次进尺控制在1-1.5m,及时喷射混凝土封闭围岩,减少地下水渗透时间。对裂隙发育富水区域,增设径向注浆孔,补充注浆加固,防止局部涌水。

#### 2.3.3 明挖法隧道地下水控制

明挖法隧道地下水控制主要围绕降水工作进行,支护作为辅助。降水方式的选择,以基坑深度与地层条件为依据,基坑深度不足6m时使用轻型井点降水方法,深度为6-15m时采用喷射井点,深度大于15m时采用深井井点。降水井布置在基坑外侧,距基坑边缘1.5-2.0m,井间距根据渗透系数计算确定,确保地下水位降至基坑底面以下1.0-1.5m。基坑支护结构采用地下连续墙或钻孔灌注桩,地下连续墙厚度不小于600mm,嵌入不透水层2-3m,兼具挡土与隔水功能;灌注桩支护需配合止水帷幕,采用高压旋喷桩或水泥搅拌桩,形成封闭隔水体系,防止地下水从桩间渗入基坑。

#### 2.4 地下水控制应急处置技术

对于突水突泥问题的处理,应建立四级应急响应流程,严格遵循快速封堵、分级响应、综合治理的原则。预警阶段通过监测系统发现水位异常或微小涌水,立即停止施工,启动现场巡查;一级响应针对瞬时涌水量小于10m<sup>3</sup>/h的情况,采用沙袋封堵掌子面,配合局部注浆加固;二级响应针对涌水量10-50m<sup>3</sup>/h的情况,启用专用堵水材料,如聚氨酯快速封堵剂,同时加大排水力度,布置临时排水泵;三级响应针对涌水量大于50m<sup>3</sup>/h的重大突水,立即撤离施工人员与设备,采用双液注浆快速形成封堵墙,注浆压力高于水压0.5-1.0MPa,待涌水控制后再进行后续处理。涌水控制后,需及时采取排水措施,采用大功率排水泵降低水位,同时加强围岩支护,通过喷射混凝土、增设锚杆等方式稳定掌子面,防止二次坍塌。应急处置完成后,需重新勘察地下水赋存状态,调整控制技术方案,方可恢复施工。

### 3 工程实践案例分析

#### 3.1 工程概况

深圳地铁12号线某区间隧道全长2860m, 隧道埋深0~31m, 主要地层为素填土、填砂、粉质黏土、含有机质砂、中砂, 地下水类型为孔隙水, 含水层厚度25~30m, 渗透系数 $3 \times 10^{-4} \sim 0.5 \text{ m/d}$ , 地下水位埋深2.5~3.0m, 水压0.2~0.3MPa。该区间隧道采用盾构法施工, 沿线穿越多条地下管线与既有建筑物, 地面沉降控制要求严格, 允许沉降量不超过30mm, 地下水控制难度较大。

#### 3.2 地下水控制技术方案设计

结合工程地质条件, 制定“预处理+过程控制+动态监测”的综合控制方案。预处理阶段采用深井降水, 在隧道两侧布置降水井, 井径400mm, 井深穿透含水层底板, 通过分组抽水将地下水位稳定控制在开挖面以下。过程控制中, 盾构同步注浆采用惰性浆液, 注浆压力根据地下水压动态调整, 富水砂层段在管片拼装后实施二次双液注浆以强化隔水效果; 盾尾采用密封结构并持续注入密封油脂。动态监测沿隧道布设水位监测孔, 同步设置地面沉降监测点与管线变形监测点, 实现实时预警。

#### 3.3 实施效果评价

该区间施工全过程未发生涌水突泥事故, 地下水控制效果显著。监测数据显示, 地下水位稳定在开挖面以下, 地面沉降最大累计值满足不超过30mm的允许标准, 周边建筑物及管线变形均符合规范要求。衬砌完工后经检测无渗漏点, 达到防水标准。盾构掘进平稳, 未因地下水问题延误工期, 实现了安全、质量与效益的统一。

### 4 结束语

轨道交通隧道地下水控制需坚守“勘察精准、预处理适配、过程精细、应急快速”原则, 工程实践表明, 本文基于“勘察精准、预处理适配、过程精细、应急快速”原则, 构建的全流程技术体系合理可行。此研究成果为同类地质条件下轨道交通隧道地下水控制提供了可复制的技术范式, 对推动隧道施工技术规范化、安全化发展具有重要参考价值, 可为后续深层复杂地层隧道工程提供坚实技术支撑。

#### [参考文献]

- [1]曾垂成. 轨道交通隧道盾构施工主要技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (31): 138-140.
- [2]侯本申. 岩溶地区暗挖轨道交通隧道水压力及衬砌结构优化分析[J]. 中国市政工程, 2024, (03): 127-131+161.
- [3]昌国勇. 深埋城市轨道交通隧道内衬屈曲稳定性研究[D]. 湖南工业大学, 2024.
- [4]周新庆. 浅析紧邻城市轨道交通隧道的超深基坑围护施工[J]. 建筑科技, 2024, 8(03): 89-94.
- [5]莫尉美, 郑恒, 何小英. 轨道交通隧道防水堵漏技术探析[J]. 居舍, 2022, (03): 54-56+60.

#### 作者简介:

李金宝(1996--), 男, 汉族, 河南省开封市祥符区人, 本科, 助理工程师。

张家栋(199--), 男, 汉族, 湖南省浏阳县人, 本科, 助理工程师。