

富水地层隧道超前注浆堵水技术优化与应用研究

瞿铭汛

重庆交通大学 重庆 400000

摘要: 在含有大量水分的地层里进行隧道施工时, 涌水问题很容易造成掌子面不稳定、周围岩石坍塌等地质方面的灾害, 这会严重对施工安全构成威胁, 还会影响工程的进展速度。超前注浆堵水技术是解决这个问题的主要办法, 它的技术是否合理、应用是否有效, 直接关系到隧道施工的安全性和经济性。本文根据富水地层的地质特点, 深入分析了传统超前注浆堵水技术在注浆材料选择、参数设计以及施工工艺等方面存在的不足, 从材料改进、参数优化、工艺创新和质量控制四个方面提出了系统的优化策略, 并且结合实际的工程项目案例来验证优化后技术的应用效果。研究显示, 优化后的超前注浆堵水技术能够明显提高堵水的效率和围岩加固的效果, 为富水地层的隧道施工提供了可靠的技术支持。

关键词: 富水地层; 隧道施工; 超前注浆; 堵水技术; 技术优化

引言

随着我国交通基础设施建设向地质条件复杂的区域拓展, 在富水地层进行隧道施工的情况越来越多。富水地层由于含水量高, 岩体中存在孔隙或者裂隙通道, 在隧道开挖过程中很容易出现突然的涌水现象, 这不仅会增加施工时的排水成本, 还可能导致围岩变软、掌子面坍塌等重大安全隐患, 甚至会引发表面沉降等环境问题。超前注浆堵水技术是在隧道开挖之前, 向围岩注入浆液, 填充孔隙和裂隙, 形成连续的止水帷幕, 从而达到堵水和加固围岩的双重目的, 它是富水地层隧道施工的关键技术之一。不过, 传统的超前注浆技术在面对复杂的富水地质条件时, 常常会出现浆液扩散范围不均匀、堵水效果不稳定、施工效率不高等问题, 不能很好地满足工程的需求。所以, 针对富水地层的特点开展超前注浆堵水技术的优化研究, 结合实际的工程情况完善技术应用体系, 对于提高富水地层隧道施工的安全和效益有着重

要的现实意义^[1]。

一、富水地层特性与超前注浆堵水技术原理

(一) 富水地层核心地质特性

富水地层的地质特点直接影响着超前注浆堵水技术的设计和实施效果, 其主要核心特点体现在三个方面。一是岩体中的孔隙和裂隙发育不均匀, 富水地层大多是砂岩、砾岩或者破碎的岩体, 内部存在大小不同的孔隙以及相互连通的裂隙通道, 形成了复杂的渗流网络, 这使得涌水具有突然性和不均匀性。二是含水量和水压力的变化幅度较大, 受到地下水补给条件的影响, 地层的含水量会在饱和状态到过饱和状态之间动态变化, 相应的孔隙水压力也会随着深度和水文地质条件而波动, 这就增加了堵水的难度。三是围岩的力学性能很容易受到水的影响, 在富水状态下, 岩体的含水率升高, 内部的黏聚力降低, 抗压和抗剪强度会大幅下降, 开挖后容易

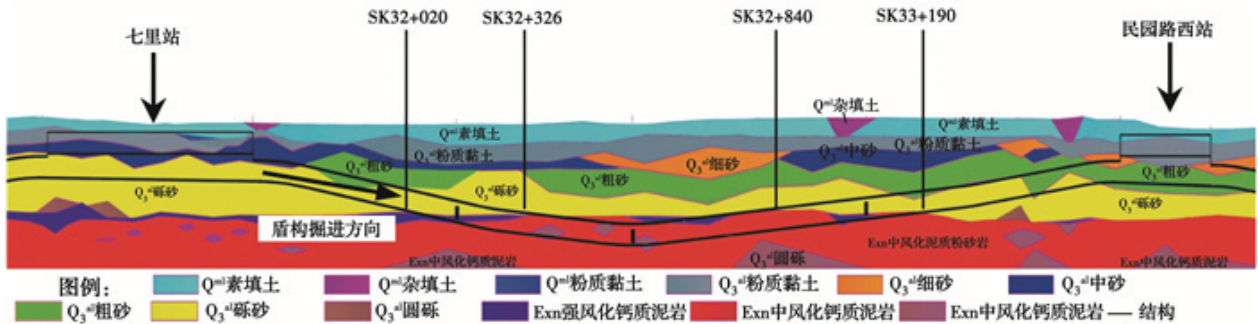


图1 富水地层

出现围岩变形甚至坍塌的情况，这对注浆加固的及时性和有效性提出了更高的要求^[2]。

（二）超前注浆堵水技术核心架构

超前注浆堵水技术以“前瞻洞察、主动阻截、围岩强化”为核心理念，其技术机理可划分为三个关键节点。首先为浆液渗透与充填工序，借助预先设置的注浆孔洞将浆液输送至富水围岩结构，浆液于压力环境下渗入岩体孔隙及裂隙体系，依托浆液的流动特性充填各类渗流通道网络；其次是浆液胶结与固化进程，注入的浆液在围岩内部触发物理化学变化反应，逐步胶结凝固形成具备特定强度的结石结构体，阻塞地下水渗流路径脉络；最后为止水加固帷幕构建环节，固化后的结石体与周边围岩形成紧密连结，在隧道开挖轮廓边界外侧生成连续完整的止水帷幕屏障，同步提升围岩整体力学性能指标，为隧道开挖作业创设安全的施工环境场域。依照注浆范围与实施方式的差异，常见技术类型涵盖超前小导管注浆工艺、管棚注浆工艺及深孔注浆工艺等类别，分别适用于不同特性的富水地质条件与隧道断面规格尺度^[3]。

二、传统超前注浆堵水技术现存的主要症结

（一）注浆材料适配性能欠缺

注浆材料构成决定堵水成效的核心要素集合，传统技术在材料选型与配比设计层面存在显著适配性短板问题。一方面，浆液凝结时间调控灵活程度不足，传统水泥浆液凝结耗时较长，在高流速地下水环境介质中易遭受冲刷稀释作用，难以在裂隙通道内部实现有效驻留状态；而常规化学浆液虽具备凝结速度较快的特点，但成本投入较高且部分材料存在环境安全隐患，不适用于大规模注浆工程实践场景。另一方面，浆液结石体性能指标与地层条件匹配程度较低，针对孔隙发育特征的砂层地质，传统浆液易出现“浆液逃逸”现象情形，难以构建有效填充结构体系；针对高水压地层环境，结石体抗压强度参数不足，易被水压荷载作用破坏进而引发堵水功能失效问题。此外，传统浆液的抗渗性能与耐久性能相对薄弱，长期承受地下水侵蚀作用后易产生裂隙损伤，导致后期涌水问题反复发生状况^[4]。

（二）注浆参数设计缺乏精准特性

注浆参数的合理程度直接关联技术效果与施工成本要素，传统参数设计模式多依赖经验公式体系，缺乏与具体地质条件的精准耦合匹配。其一为注浆压力设计存在不合理性，压力数值过低时浆液渗透范围受到限制，无法形成完整止水帷幕结构；压力数值过高则容易诱发

围岩劈裂破坏现象，导致浆液材料浪费问题并可能对周边地质环境造成损害影响。其二是注浆孔布置参数存在不当之处，孔间距设置过大易形成堵水盲区区域，孔间距设置过小则会增加施工成本投入与工程工期时长；注浆孔角度设计不合理会造成浆液在目标区域分布失衡状况，影响止水效果达成程度。其三为注浆量估算存在较大偏差，传统计算方法基于经验数据估算注浆量数值，未充分考量地层孔隙率指标、裂隙发育程度等动态变化因素，容易出现注浆量不足或过量问题情形，前者导致堵水功能失效后果，后者造成材料资源浪费局面。

（三）施工工艺与质量控制非完善态

施工工艺践行欠充分与质量控制架构欠完整，属于制约传统技艺运用成效的关键薄弱环节。于施工工艺维度，钻孔流程内匮乏有效孔壁防护举措，针对碎裂富水地层易涌现孔壁坍塌、钻具卡阻情形，致使注浆孔洞难依设计深度实施作业；注浆流程中未采纳动态注浆模式，一味按固定速率注入浆液，易催生局部浆液堆积或渗透不彻底状况。于质量控制层面，缺失全流程监测手段，传统技艺仅借由注浆压力与注浆数量判别注浆成效，难以及时掌控浆液扩散范畴与结石体形成品质；注浆完毕后质量检验方式单一，多运用钻孔取芯或压水试验手段，检验范围受限且易对已成型的止水帷幕构成损害，难以全面评判堵水效能。

三、富水地层超前注浆堵水技艺优化策略

（一）注浆材料改良与适配选型

基于相异富水地质状况，借由材料改良与精确选型增强浆液适配能力。针对高流速地下水地层，研发复合水泥—水玻璃浆液，通过调节水玻璃掺入量调控凝结时长，压缩初始凝结时长至30秒以内，同时融入纳米硅粉增强浆液抗冲刷性能，保障浆液在水流作用下仍可有效留存并凝固。针对砂层等孔隙发育地层，采用水泥—粉煤灰—膨润土复合浆液，借助粉煤灰的填充功能与膨润土的保水增稠特性，降低浆液析水比率，规避“浆液逸散”现象；同时优化浆液配合比例，使结石体孔隙比率降低至5%以下，提升抗渗透性能。针对高水压地层，开发高强度环氧水泥复合浆液，以环氧树脂作为改性媒介增强结石体抗压强度，使其28天抗压强度达到30MPa以上，契合高水压环境下的止水诉求。另外，选用环保型化学浆液替代传统高污染材料，兼顾堵水成效与环境效益。

（二）注浆参数精准化设计路径

构建基于地质勘察数据的参数动态设计体系，达成

注浆参数精准匹配。在注浆压力设计方面,采用“地质勘察-数值模拟-现场试验”三级确定方式,通过地质勘察明晰围岩裂隙发育程度与水压分布状况,利用数值模拟软件模拟不同压力下浆液扩散规律,最终借由现场试注浆确定最优压力数值,保障压力既契合浆液渗透需求又规避围岩劈裂风险。在注浆孔洞布置方面,基于围岩渗透性分区成果,采用“差异化间距”设计准则,对高渗透区域缩减孔洞间距至1.5米,低渗透区域扩大孔洞间距至2.5米;通过三维地质建模优化注浆孔洞角度,使浆液在开挖轮廓线外形成厚度不小于2米的均匀止水帷幕。在注浆数量计算方面,引入孔隙体积法与裂隙填充法相结合的计算模型,综合考量地层孔隙比率、裂隙开度、浆液损耗等因素,构建注浆数量动态调整公式,依据现场注浆监测数据实时修正注浆数量,降低估算偏差幅度。

(三) 施工工艺革新与流程重塑

面向传统施工工艺薄弱环节,实施工艺革新与流程重塑操作,促成施工效率与质量提升局面。于钻孔工艺范畴,研发“套管跟进-高压喷气清孔”复合技术体系,针对破碎富水地层结构施行套管跟进钻孔作业,达成防止塌孔现象目标;钻孔作业完成之后借助高压喷气手段清除孔内岩屑与积水物质,保障浆液与围岩实体充分接触状态。于注浆工艺领域,采用“分段注浆-压力反馈”动态施工模式,将注浆孔体划分为多个注浆段落单元,分阶段开展注浆作业流程;通过压力传感器装置实时监测注浆压力波动情况,当压力数值抵达设计标准值时自动切换至下一阶段操作,规避局部注浆过量问题;同时运用双液注浆系统设备,依据地质环境条件实时调节两种浆液混合比例参数,优化凝结时间与扩散范围维度指标。于施工流程层面,构建“勘察-设计-试注浆-正式注浆-检测”闭环流程体系,在正式注浆工序开展之前实施小规模试注浆作业活动,验证参数配置合理性特征并及时进行调整修正,保障技术方案内容适配实际地质条件状况。

(四) 全过程质量监测与控制架构搭建

搭建“实时监测-动态调整-全面检测”的全过程质量控制架构体系。在实时监测环节,引入地质雷达与光纤传感技术手段,通过地质雷达设备实时监测浆液扩散范围区域,生成浆液分布形态图像资料,判断是否存在堵水盲区现象;运用光纤传感器元件埋设于注浆区域空间,实时监测结石体固化进程中的应力变化数据,评

估加固效果等级状况。在动态调整环节,建立监测数据信息与施工参数指标的联动响应机制,当监测结果显示浆液扩散程度不足情况时,及时提升注浆压力数值或缩小孔距间隔距离;当监测发现压力数值异常升高情形时,暂停注浆作业流程并排查是否存在围岩劈裂问题隐患。在全面检测环节,采用“压水试验+声波测试+钻孔取芯”组合检测方法体系,压水试验操作检测止水帷幕结构的抗渗性能指标,声波测试手段评估围岩整体结构加固强度参数,钻孔取芯作业验证结石体物质的完整性与强度数据,保障质量检测工作覆盖注浆全区域范围。

结论

本文针对富水地层环境隧道超前注浆堵水技术展开深度研究工作,通过剖析富水地层地质特性表现与传统技术存在缺陷问题,从材料、参数、工艺及质量控制四个维度层面提出优化策略方案,并结合工程实际案例验证技术应用效果情况。研究得出以下结论内容:富水地层结构的孔隙裂隙发育不均衡、水压数值变化幅度较大等特性构成技术应用实施的核心挑战要素;传统技术体系存在材料适配性能不足、参数设计精准程度不够、工艺控制完善程度欠缺等问题弊端;优化升级后的复合注浆材料物质可提升与地层结构的适配性能和水平,精准化参数设计方案与创新型施工工艺体系可提高堵水作业效率与施工质量标准,全过程质量控制架构体系可保障技术应用效果稳定可靠状态;工程实际案例数据表明优化改进后的技术体系可实现95%以上的堵水效率指标,同时达成提升施工进度节奏与降低施工成本投入的双重目标。

参考文献

- [1]黄融.不同外加剂对富水地层隧道溶洞充填注浆浆液性能影响分析[J].国防交通工程与技术,2025,23(06):91-96.
- [2]张娟,秦鲜卓,蒙国往,李洋溢,虞杨.富水蚀变花岗岩地层隧道施工致灾机制及控制技术研究[J].广西大学学报(自然科学版),2025,50(05):950-960.
- [3]章游斌.富水砂化白云岩地层隧道洞周径向排水施工参数取值模拟[J].交通世界,2025,(25):137-139.
- [4]祝文强.富水砂泥岩地层隧道预加固效果模拟[J].交通世界,2025,(25):143-145.