

铁路路基施工质量控制要点研究

罗正洪

中铁五局集团有限公司第二工程有限公司 湖南衡阳 421000

摘要: 岩溶地质是铁路路基施工中典型的不良地质类型,其溶洞、溶蚀裂隙、溶沟等隐蔽性病害,极易引发路基不均匀沉降、塌陷、滑移等质量隐患,直接威胁铁路线路运营安全与长期稳定性。岩溶注浆作为岩溶区路基加固的核心工艺,通过浆液填充、胶结、挤密作用,封堵岩溶通道、加固破碎岩体、提升路基基底承载力与抗渗性,是控制路基施工质量的关键环节。本文结合铁路路基工程施工规范与现场实操经验,系统梳理岩溶注浆施工全流程质量控制要点,分析施工中常见质量问题及成因,提出针对性防控措施与效果检测方法,旨在为铁路岩溶路基注浆施工提供规范化、精细化的质量管控依据,保障铁路路基工程整体质量达标,实现线路长期安全稳定运营。

关键词: 铁路路基; 岩溶地质; 注浆施工; 质量控制; 路基加固

引言

我国西南、华南及华中部分地区岩溶地貌广泛分布,石灰岩、白云岩等可溶性岩体经长期水溶蚀作用,形成大量形态各异、分布不均的岩溶病害,这类地质具有隐蔽性强、不均匀性显著、发育随机性大的特点,给铁路路基施工带来极大挑战。铁路路基作为轨道结构的基础,对沉降控制、整体稳定性、承载力要求极高,岩溶病害若处理不当,会导致路基基底承载力不足、后期沉降超标,甚至引发路基塌陷,严重影响列车运行平稳性与安全性,增加后期运维成本。

岩溶注浆工艺凭借施工便捷、适应性强、加固效果显著等优势,成为铁路岩溶路基处理的首选技术,其施工质量直接决定路基病害整治效果与工程使用寿命。当前部分铁路项目岩溶注浆施工存在勘察不精准、工艺管控粗放、材料把关不严、检测不到位等问题,导致注浆加固失效,返工整改耗时耗力。因此,立足铁路工程建设标准,深入研究路基岩溶注浆施工质量控制要点,构建全流程、全方位的质量管控体系,对提升岩溶区铁路路基施工质量、防范工程病害、保障线路运营安全具有重要的工程实践意义。

一、铁路路基岩溶地质特点及注浆施工核心要求

(一) 铁路路基岩溶地质核心特征

铁路路基范围内的岩溶地质,主要分为裸露型岩溶、覆盖型岩溶与埋藏型岩溶三类,其核心病害特征集中体现为三点:一是隐蔽性,岩溶空洞、溶蚀裂隙多埋藏于

土体或岩体内部,常规勘察易遗漏,施工中易突发漏浆、塌孔问题;二是不均匀性,岩溶发育程度在平面与纵向上分布杂乱,同一路基段可能同时存在完整岩体、破碎带、小型空洞,导致基底力学性能差异极大;三是危害性,岩溶通道易形成地下水渗流路径,冲刷路基基底填料,引发路基沉降、塌陷,且病害具有滞后性,运营期易突发失稳^[1]。

(二) 岩溶注浆施工质量核心要求

铁路路基岩溶注浆施工需满足三大核心要求:第一,精准封堵,通过浆液完全填充岩溶空洞、裂隙,阻断地下水渗流通道,消除路基渗流隐患;第二,均匀加固,确保浆液在岩溶岩体与路基基底土体中均匀扩散、胶结,形成整体性强的加固体,减小基底不均匀沉降;第三,稳定达标,注浆完成后路基基底承载力、压实度、抗渗性需满足设计要求,后期残余沉降控制在规范允许范围内,保障路基长期稳定性^[1]。

二、铁路路基岩溶注浆施工全流程质量控制要点

(一) 施工准备阶段质量控制

施工准备是岩溶注浆质量管控的前提,需重点做好勘察复核、方案优化与资源管控三项工作。首先,精细化地质勘察复核,在初步勘察基础上,采用地质雷达、钻孔探查相结合的方式,加密勘察点位,精准确定岩溶发育位置、空洞大小、裂隙宽度、地下水水位与流量,绘制详细岩溶地质分布图,杜绝因勘察偏差导致注浆范围、参数设计失误。其次,专项施工方案优化,结合勘察结果,明确注浆孔位布置、孔深、孔径、浆液配比、

注浆压力、注浆顺序等核心参数,针对大型溶洞、富水裂隙等特殊工况,制定双液注浆、分段注浆等专项预案,经技术交底与专家论证后实施。最后,施工资源质量管控,严格检验注浆原材料,水泥选用P.O42.5及以上普通硅酸盐水泥,进场需查验合格证、强度检测报告,严禁使用受潮、结块水泥;水玻璃、外加剂等辅料需符合设计指标,浆液配比提前通过室内试验确定;注浆设备(钻机、注浆泵、搅拌机、压力表)进场前调试校准,压力表精度不低于1.6级,确保设备运行稳定、计量精准。

(二) 钻孔施工质量控制

钻孔是岩溶注浆的基础工序,孔位、孔深、垂直度、孔壁完整性直接影响浆液扩散范围与注浆效果,需全程精细化管控,杜绝因钻孔缺陷导致注浆盲区、浆液流失等问题。一是孔位控制,严格按照设计图纸结合现场岩溶分布实况放样,孔位偏差不得大于5cm,放样完成后采用钢筋或油漆做好固定标识,增设防护措施,避免施工机械碾压、人员扰动导致移位;针对岩溶发育不均、局部溶洞密集区域,严格遵循“探灌结合”原则,先导孔先行施工,加密先导孔探查密度,根据先导孔揭露的地层变化、溶洞发育、地下水情况,动态调整周边注浆孔位、孔深与间距,确保注浆覆盖全部岩溶病害区域。二是孔径与孔深控制,开孔直径不小于110mm,终孔直径满足注浆管安装与拔管需求,孔深必须达到设计要求的基岩深度,穿透软弱层、溶蚀带进入完整基岩不小于0.5m,严禁浅孔、短孔、欠深施工,钻孔过程中安排专人全程记录地层变化、漏浆、塌孔、涌水等异常情况,详细标注溶洞顶底板深度、裂隙发育位置,为后续注浆参数调整提供第一手资料。三是垂直度控制,钻孔时采用导向装置与水平仪实时监测,钻孔偏斜率不得大于1%,防止斜孔、弯孔导致浆液扩散不均、注浆管堵塞、相邻孔串孔;四是清孔与管护,钻孔达到设计深度后及时清孔,采用清水循环冲洗孔内岩粉、泥渣、杂物,直至返水清澈无杂质,确保孔道通畅,清孔合格后立即安装注浆管与止浆塞,注浆管底部封堵严实,止浆塞安装到位防止注浆时返浆、漏浆,孔口临时遮盖防护,避免杂物落入孔内造成堵塞。

(三) 浆液制备与注浆施工质量控制

浆液制备与注浆是岩溶注浆质量管控的核心环节,需严格把控配比、压力、流量与顺序四大要点。浆液制备实行定量管控,严格按照室内试验确定的配比配料,水泥浆水灰比控制不超过1:1,富水岩溶段适当减小水

灰比,提升浆液稠度;掺加水玻璃时,控制水泥浆与水玻璃比例,确保浆液凝胶时间适配岩溶地质;浆液搅拌均匀,搅拌时间不小于3min,过滤后使用,杜绝结块、离析浆液进入注浆系统。

注浆施工遵循“分序施工、由外向内、由疏到密、低压慢注”原则,先施工外围封堵孔,再施工内部加固孔,防止浆液流失;注浆压力根据岩溶发育程度、地下水压力动态调整,路基基底注浆压力一般控制在0.2~0.5MPa,严禁超压引发路基隆起、地表冒浆。注浆过程中实时监测压力、流量、冒浆情况,正常注浆时保持压力稳定、流量均匀;若出现漏浆量大、压力不升情况,采用间歇注浆、调整浆液配比、掺加速凝剂等措施;若出现地表冒浆、周边构筑物隆起,立即停止注浆,采取封堵冒浆点、降低压力、延长间歇时间等处理措施。注浆结束标准实行双控原则,一是注浆压力达到设计终压,稳压10~15min;二是注浆流量小于5L/min,满足任一标准即可终止注浆,严禁盲目注浆造成浪费与土体隆起。

(四) 封孔与成品保护质量控制

注浆完成后及时进行封孔施工,封孔质量直接影响路基基底整体性与密实性,是避免孔位后期沉降、渗水的关键工序,不可简化管控。注浆终止后,待孔口浆液初凝、压力完全释放,采用高强度水泥砂浆封孔,水泥砂浆强度不低于设计要求的路基基底土体强度,水灰比控制适中,确保砂浆流动性与密实性,封孔时分层回填、分层捣实,每层回填厚度不大于30cm,采用振捣工具振捣密实,确保封孔段无空洞、松动、缝隙,封孔顶面与原地面平齐,做好收面处理。封孔完成后做好清晰标识,划定注浆成品保护区域,严格管控现场施工机械与人员,严禁注浆完成后72h内扰动注浆区域,禁止重型机械碾压、堆放重物、钻孔开挖等作业,防止浆液未完全凝固、强度未达标导致加固结构受损,影响注浆效果。同时,落实施工全过程质量追溯制度,安排专人详细填写钻孔施工记录表、浆液配比记录表、注浆施工记录表,完整记录孔位编号、孔深、孔径、浆液配比、注浆压力、注浆量、流量、起止时间、异常情况及处置措施、验收结果,所有记录签字齐全、数据真实,形成完整施工技术资料,为后续质量检测、工程验收与后期线路运维提供完整依据,实现施工质量全程可追溯^[2]。

三、铁路路基岩溶注浆常见质量问题及防控措施

(一) 主要质量问题及成因分析

铁路路基岩溶注浆施工常见质量问题主要包括注浆

不密实、浆液扩散不均、漏浆严重、地表隆起、注浆管堵塞五类。注浆不密实多因勘察不到位、岩溶空洞未精确定位、注浆压力不足或间歇时间不合理导致；浆液扩散不均源于钻孔偏斜、浆液配比不当、注浆顺序混乱；漏浆严重主要是岩溶裂隙发育、地下水流量大、止浆措施不到位引发；地表隆起多为注浆压力过高、注浆量过大、浆液凝固过快挤压土体所致；注浆管堵塞则是浆液离析结块、清孔不彻底、注浆中断时间过长造成^[3]。

（二）针对性质量防控措施

针对上述质量问题，结合现场施工经验，制定全方位防控措施：一是强化勘察精度，采用多手段复合勘察，全面掌握岩溶发育情况，动态优化施工参数；二是严控浆液质量，优化配比，加强搅拌与过滤，杜绝离析、结块浆液，富水段采用水泥-水玻璃双液浆，缩短凝胶时间；三是规范注浆工艺，严格执行分序注浆、低压慢注，实时监测压力与流量，及时采取间歇注浆、封堵止浆措施；四是加强设备管控，定期检修注浆设备，注浆中断时及时冲洗注浆管，防止堵塞；五是做好现场监测，注浆过程中同步监测路基地表沉降、周边构筑物变形，发现异常立即停工整改，确保施工安全与质量。

四、岩溶注浆加固效果检测与质量验收

注浆加固效果检测是验证施工质量的关键环节，需遵循“多种方法结合、全面覆盖、精准判定”原则，在注浆完成28d浆液强度达标后开展检测，主要检测方法包括以下四类：

第一，钻孔取芯检测，随机抽取注浆孔总数的5%~10%进行取芯，检查芯样完整性、浆液充填密实度，芯样连续、无空洞、浆液与岩体胶结良好为合格；第二，压水试验检测，采用单点法压水试验，检测注浆后岩体渗透性，透水率小于5Lu为合格，验证岩溶通道封堵效果；第三，物探检测，采用地质雷达、瑞雷波法，对比注浆前后路基基底地质情况，检测浆液扩散范围、岩溶空洞填充情况，判断加固均匀性；第四，承载力与沉降检测，采用平板载荷试验检测路基基底承载力，满足设计承载力要求；布设沉降观测点，进行不少于3个月的沉降观测，残余沉降速率小于0.1mm/d，累计沉降量符合规范要求^[4]。

质量验收需结合施工记录、检测报告、试验数据，按照铁路工程验收标准逐项核查，全部指标达标后方可通过验收；若检测不合格，需分析原因，制定补孔注浆方案，重新施工并复检，直至质量达标。

五、结论与建议

（一）结论

铁路路基岩溶注浆施工质量控制是一项系统性工作，贯穿施工准备、钻孔、浆液制备、注浆、封孔、检测验收全流程，核心在于精准勘察、规范工艺、严控参数、全面检测。岩溶地质的隐蔽性与复杂性，决定了注浆施工必须坚持“探灌结合、动态调整、精细化管控”，只有严把材料关、工艺关、检测关，才能有效封堵岩溶病害，提升路基基底稳定性与承载力，防范路基沉降、塌陷等质量隐患。实践证明，构建全流程质量管控体系，严格遵循铁路工程施工规范，针对性解决施工中常见质量问题，可显著提升岩溶注浆加固效果，保障铁路路基工程质量与长期运营安全。

（二）建议

为进一步提升铁路路基岩溶注浆施工质量，结合工程实践提出三点建议：一是加强施工人员专业培训，提升技术人员对岩溶地质的研判能力与工艺操作水平，落实质量责任制；二是推广智能化监测技术，采用自动化注浆压力、流量监测设备，实现施工过程实时管控，减少人为操作误差；三是完善施工资料归档，建立岩溶路基注浆施工与检测档案，为后期线路运维、病害整治提供数据支撑。同时，针对复杂岩溶地质，可开展现场试验段施工，优化施工参数，再全面推广施工，提升工程质量管控的针对性与有效性。

参考文献

- [1] 林勇. 铁路路基钻孔灌注桩施工关键技术研究[J]. 科学技术创新, 2026, (05): 148-151.
- [2] 姚裕春, 李安洪, 周波. 岩溶地基高速铁路路基关键技术分析[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(8): 35-39.
- [3] 唐夏明. 浅谈高速铁路路基岩溶注浆施工技术[J]. 智能城市, 2020(12): 202-203.
- [4] 蒋良文, 许佑顶, 许模. 高速铁路复杂岩溶地质勘察与灾害防治[M]. 北京: 科学出版社, 2021.