

注浆技术在公路桥梁隧道施工中的应用分析

宋茂锋, 刘增龙

(山东省公路桥梁建设集团有限公司, 山东 济南 250100)

摘 要 注浆技术是公路桥梁隧道施工中应用最广的加固和防渗技术, 具有针对性强、适应复杂地质环境等优势, 在工程质量保障及施工安全防控中起着不可替代的作用。本文立足于公路桥梁隧道施工实际难点, 以实操技术上的技术突破为依托, 对注浆技术的核心应用理念、适用场景、科学的应用途径进行剖析, 突出科技创新和实际操作难度, 避免出现只强调理论而忽略实际的弊端, 以期为同类型工程注浆施工提供可以借鉴的操作思路, 促进公路桥梁隧道工程注浆技术的规范化、精细化、创新化发展。

关键词 注浆技术; 公路桥梁; 隧道施工; 注浆方案; 注浆质量管控

中图分类号: U445; U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.017

0 引言

公路桥梁隧道工程施工常常会遭遇复杂的地质状况, 高水压、断层破碎带、软弱围岩、结构脱空等状况时有发生, 既影响施工进度, 又给工程结构稳定及耐久带来很大危险。注浆技术是用特制浆液向地层或者结构缝隙内注入, 以达到填充、胶结、加固、防渗等多方面作用的技术方法, 是解决这类施工难题的主要手段。由于公路桥梁隧道工程向着深部、复杂地质区域延伸, 传统的注浆技术存在着明显的不足之处, 对于注浆技术的要求也越来越高, 即注入注浆技术的创新性、技术性以及适用性均需得到提高。因此, 针对公路桥梁隧道施工中的注浆技术应用逻辑、适用场景和改进途径展开研究, 解决施工过程中的技术难题, 提高注浆施工质量和效率, 对推动公路桥梁隧道工程高质量发展具有重大的现实意义。

1 注浆技术在公路桥梁隧道施工中的核心应用理念

注浆技术在公路桥梁隧道施工中的主要应用理念是立足于工程地质实际操作的难点, 以“精准适配、按需注浆、刚柔并济、长效防控”为主要方向, 摒弃传统的注浆“一刀切”的粗放方式, 突出技术的新颖性以及实操的困难程度。其主要意义并不是单纯的浆液注入, 而是在工程实际情况结合工程地质情况, 准确判断围岩裂隙、结构缺陷的分布及受力状况, 依靠浆液配比及施工工艺的革新来达成注浆效果同工程需求的有效契合, 攻克高水压、复杂断层、软弱地层

等施工禁区的技术难题^[1]。不同于纯粹的理论加固思想, 该技术思想更倾向于实际操作和针对性, 既要依靠超前注浆形成坚固的防护体系, 抵御地层变形和地下水侵蚀, 还要考虑施工效率和成本控制, 避免浆液浪费、注浆不密实等问题出现, 并加入智能监测与动态调节的考量, 依照施工过程中出现的地质信息及时调整注浆参数, 实现由“被动补救”到“主动防控”的转变, 凸显注浆技术对于复杂工程的重要支撑作用。其技术难点主要体现在地质精确判断、浆液匹配改良以及动态调节的有机融合之中, 对于施工技术水平有着极高的标准。

2 注浆技术在公路桥梁隧道施工中的适配应用场景

2.1 公路桥梁施工中的注浆场景

公路桥梁施工中的注浆场景主要关注结构病害控制和承载能力提高, 打破了传统注浆只做基础加固的限制, 契合桥梁桩基、墩台、桥面以及伸缩缝等各种部位复杂施工的需要, 体现出科技创新性和实践上的困难。对于岩溶地区、砂卵石地层等复杂地质造成的桩底沉渣、桩侧泥皮等, 采用高压旋喷注浆加超细水泥注浆的方法, 将桩底空隙、破除桩侧泥皮、提高桩基与周边地层的结合, 解决桩基承载力不够、沉降大的问题, 防止传统注浆易出现的串浆、漏浆现象^[2]。在墩台施工中, 对软土地基引发的墩台不均匀沉降、裂缝隐患, 创新使用复合高强聚合物注浆工艺, 经由精准调配浆液的凝结时间和粘结强度, 针对墩台基础

作者简介: 宋茂锋 (1985-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路、桥梁、隧道。

及其周边的地层开展分层注浆加固工作,力求达到加固的效果并且保持结构的韧性,防止注浆过程中对墩台结构带来第二次损害。桥面养护施工时,在路面裂缝、层间脱空等病害处用智能注浆设备把浆液准确注入进去,填充裂缝和脱空的地方,使桥面结构完整,克服传统人工注浆配比不均、注浆不饱满的技术难题,达到注浆施工的精细化、高效化目的,满足不同等级公路桥梁的施工和养护需求。

2.2 隧道施工中的注浆场景

隧道施工中注浆场景大多用来增强围岩、阻止漏水堵漏等,对高水压、断层破碎带、强风化岩层这类地质情况的地区来讲,有着较强的新奇性和施工操作难度。在隧道超前支护上,对断层破碎带、软弱围岩容易坍塌的问题,提出超前小导管注浆与帷幕注浆相结合的施工方法,在隧道开挖之前形成稳定的防护帷幕,封堵围岩裂隙、加固软弱地层,防止地下水渗透和围岩变形,克服了隧道开挖过程中坍塌、突水突泥等重大安全隐患。在海底隧道等特殊环境里,利用海上注浆平台搭建和快凝胶材料前置封堵技术,解决了高压海水冲释浆液、浆液难渗入深层裂隙的技术难题。在隧道衬砌施工阶段发现隧道衬砌有裂缝、管片间隙等缺陷的时候,利用智能二次注浆技术对注浆浆液的比例及注浆压力实施精确控制,可填充衬砌内的空隙,堵住漏缝之处,杜绝了传统注浆方法引发的管片错位、注浆管被堵塞等情况。对全断面硬岩、软硬不均地层等复杂工况下的隧道掌子面加固,用分段前进式注浆工艺加间歇注浆法,使浆液均匀填充裂隙,提高掌子面的稳定性,解决盾构掘进过程中刀具磨损、掌子面溃口等技术难题,保证隧道施工的安全和进度。

2.3 公路桥梁隧道衔接段注浆场景

公路桥梁隧道衔接段注浆场景是注浆技术应用难点和创新之处。该区域受力复杂,地质状况多样,衔接部位容易产生沉降差、裂缝、渗漏等问题,传统注浆技术很难实现精准匹配,须依照衔接段的结构属性和受力规律来革新运用。衔接段注浆是解决桥梁和隧道过渡区刚度突然变化、地层不均匀下沉、防渗薄弱等问题的重要手段,采用分层注浆、分区控制、刚柔结合的创新工艺,兼顾衔接部位的结构韧性与整体性。在衔接段地基处理中,针对桥梁桩基和隧道围岩衔接处的地层不同,采用渐变式注浆工艺,改变浆液强度、注浆压力来达到地基刚度平缓变化的目的,防止因为刚度突然变化而造成结构开裂^[3]。衔接段衬砌与桥台

衔接处,用柔性注浆材料和刚性注浆材料相结合的方法来填充衔接缝隙,封堵渗漏通道,又能适应衔接段的微小变形,防止注浆层开裂失效。对衔接段地下水分布不均、渗漏隐患严重的地段,用超前探孔注浆与同步注浆相结合的办法,准确封堵地下水渗透途径,克服衔接段因为渗漏引发的结构腐蚀、强度下降等问题,达成公路桥梁和隧道衔接部分的无缝衔接,保证整个工程结构的稳定与耐用。

3 注浆技术在公路桥梁隧道施工中的应用路径

3.1 精准化注浆方案设计路径

精准化注浆方案设计是注浆技术高效应用的基础,关键在于冲破传统方案设计地质研判不准、参数设定不妥的束缚,创建起“地质精确探查—参数科学匹配—方案不断改进”的全部过程设计线路,突出技术创新性以及实践操作难易程度。方案设计之前使用二维探地雷达、超前钻探等多种检测手段联合起来,对施工区域的地质情况展开全方位排查工作,精确找出围岩裂隙的分布情况,同时查明地下水含量及结构上的瑕疵等内容,从而防止因为只依靠经验来规划而出现的设计同实际情况相偏离的问题。摒弃传统固定参数模式,在施工部位、地质类型的基础上,精准调配浆液配比、注浆压力、注浆速度等核心参数,根据不同的地层孔隙率、渗透性来优化注浆量分配方案,防止出现“一刀切”的现象而造成浆液浪费或者注浆不密实的情况发生。同时,把数字化设计的理念渗透进去,创建注浆方案的数字化模型,模拟浆液扩散途径及填充情形,预见施工期间可能会浮现的难题,预先制订出对应的解决办法,借助施工过程中所得地质回馈以及监测数据,及时对注浆方案加以调整,保证方案的设计同实际施工相契合,破解复杂地质条件下的注浆方案设计技术难题,为注浆施工提供科学引领。

3.2 标准化注浆施工实施路径

标准化注浆施工实施路径,就是冲破传统注浆施工操作不规范、流程杂乱的困局,塑造起“设备标准化—操作规范化—过程精细化”的运作架构,突出技术创新性以及实操难易度,保证注浆施工品质的稳定。抛弃传统的人工注浆设备,采用智能注浆设备来完成浆液的自动配比、注浆压力的智能调节、注浆量的准确计量等工作,从而消除由于人工操作而产生的配比偏差、压力失控等问题,并且定期对注浆设备的计量器具进行检定、校核,保证设备性能与施工需求相匹配^[4]。施工操作上制定标准化操作程序,对钻孔、封孔、注浆、

凝固等各个环节的操作方法作出规定,钻孔结束后用高强度水泥砂浆封孔,静置达到要求再进行注浆作业,注浆过程中以“慢注慢压”为原则,根据地质情况调节注浆速度,大孔隙、宽裂隙采用间歇注浆法,防止跑浆、串浆。分区控制、分层注浆,明确各个施工环节的责任分工,做好施工记录,保证每一个工序都符合规范要求,根据现场实际情况的变化情况灵活地调整施工工艺来解决复杂施工环境下的注浆施工操作难题,实现注浆施工的标准化、规范化和高效化。

3.3 精细化注浆质量管控路径

精细化注浆质量管控途径,就是冲破传统质量把控“重结果,轻过程”的束缚,创建起一个由事前防范、事中监督、事后检验所构成的全流程管控架构,突出技术革新性和实操性,从而保证注浆成果符合设计要求。事前防控阶段严格把控注浆材料质量,对进场的注浆材料做严格的检测,核查质量合格证和检测报告,保证材料性能符合要求,对施工人员进行专业培训,提高操作技能和质量意识,防止因材料不合格、操作不规范造成质量隐患。事中监测阶段用智能监测设备,实时观测注浆压力、注浆量、浆液扩散速度等主要参数,并且创建监测数据台账,一旦出现参数异常,立刻改变施工方案,同时留意周边地层及结构的变动状况,迅速找出坍塌、渗漏等危险问题,实现注浆进程的动态管理。事后验收阶段,放弃传统的单一验收方式,采用钻孔取芯、无损检测等多手段相结合的方式对注浆饱满度、芯样完好率、抗压强度恢复率等进行检查,保证注浆效果达到要求,对不合格的部位制定出相应的返工方案,实施补注浆处理,并且创建起质量追溯体系,使注浆质量可以实现全过程追溯,解决注浆质量管控难度大、效果无法保障的技术难题。

3.4 创新化注浆技术升级路径

创新化注浆技术升级路径,就是针对公路桥梁隧道施工复杂的需求,从材料、工艺、设备、理念四个方面入手,对传统注浆技术进行革新,形成具有全面性的技术升级模式,强调技术创新性和实践操作难度,促使注浆技术向着精细化、智能化、长效化迈进。研发复合高强聚合物、快凝胶等新型注浆材料,优化材料配比,提高材料的粘结强度、抗渗性、耐久性,适应不同的复杂地质工况要求,重视材料的环保性,不给周围环境带来污染。工艺上采用超前注浆、同步注浆、二次注浆等多种方式,在高水压、复杂断层等困难地质条件中,提出渐变式注浆、围封注浆等多种新注浆

工艺,提高注浆效果。就设备而言,采用智能注浆设备,并且融入物联网、大数据技术,在注浆过程中对注浆情况进行自动化、智能化的监管,注浆参数的调节更加准确,减少了人工操作,施工难度得到下降。在理念上确立“主动防控、长效运维”的观念,把注浆技术同工程运维结合起来,创建起注浆效果的长期监测体系,迅速察觉并处理注浆层的老化、开裂等状况,实现注浆技术由施工阶段向运维阶段的延伸,助力注浆技术在公路桥梁隧道中应用的不断更新,契合工程高质量发展的要求^[5]。

4 结束语

注浆技术是公路桥梁隧道施工的关键技术之一,其应用直接影响到工程结构稳定性、耐久程度以及施工安全性,适应复杂地质环境,可破解施工技术难题。通过对注浆技术主要应用理念、应用场合、应用路径进行分析,得出注浆技术要从实际操作出发,体现创新思维和技术难度,实现精准化、标准化、精细化、创新化的应用。随着公路桥梁隧道工程向着复杂的地质、深部区域扩展,在注浆技术发展过程中,需要不断地克服传统的不足之处,并且通过材料、工艺、设备、理念全方位的升级来满足不同的施工环境需求,从而解决高水压、断层破碎带、衔接段沉降等技术难题。未来要结合工程实操不断积累经验,促使注浆技术规范化和持续创新发展,把注浆技术与数字化、智能化技术深度融合起来,提高施工效率和质量,为公路桥梁隧道工程高质量发展提供有力的支撑,充分发挥注浆技术在工程安全控制与质量保证中的关键作用。

参考文献:

- [1] 王建国. 注浆技术在公路桥梁隧道施工中的具体应用[J]. 汽车周刊, 2026(03):73-75.
- [2] 杨振雷. 灌浆加固技术在公路桥梁隧道施工中的应用研究[J]. 汽车周刊, 2025(12):77-79.
- [3] 谢志丹. 灌浆加固技术在公路桥梁隧道施工中的应用[J]. 工程技术研究, 2025,10(20):59-61.
- [4] 许晓天. 注浆技术在公路桥梁隧道施工中的应用研究[J]. 科技资讯, 2025,23(14):119-121.
- [5] 达姜维. 注浆技术在公路桥梁隧道施工中的具体应用探究[J]. 产业创新研究, 2024(02):106-108.