

公路隧道软弱围岩段注浆加固技术在施工中的应用效果分析

秦 浩

四川川交路桥有限责任公司 四川 广汉 618300

【摘 要】：公路隧道软弱围岩段易出现坍塌、变形等问题，严重影响施工安全与进度。注浆加固技术作为应对该问题的关键手段，其应用效果备受关注。本文聚焦该技术在施工中的实际应用，分析其对围岩稳定性的提升作用、施工参数的优化方式及应用中的常见问题与对策，旨在为同类工程提供参考，明确该技术在保障施工安全、提高工程质量方面的实际价值。

【关键词】：公路隧道；软弱围岩；注浆加固；施工应用；围岩稳定

DOI:10.12417/2811-0528.25.21.023

引言

随着公路建设向复杂地质区域延伸，软弱围岩段隧道施工面临极大挑战。此类围岩强度低、完整性差，施工中易发生失稳，不仅延误工期，还可能引发安全事故。研究注浆加固技术在该类路段的应用效果，可明确其对围岩改良的作用，解决施工难题，对提升隧道施工安全性与经济性具有重要意义，进而为相关工程实践提供有效的技术支撑。

1 公路隧道软弱围岩段施工存在的问题

公路隧道软弱围岩段施工面临的困境，本质上是人类工程技术与复杂地质条件的持续博弈。这类特殊地质区域通常包含破碎岩层、粉质黏土、淤泥质土等低强度岩土体，其物质组成松散、胶结程度差，犹如搭建不稳的积木塔，自身结构强度难以支撑隧道开挖后的力学需求。当施工机械破土而入，原本在地质历史时期缓慢形成的应力平衡瞬间瓦解，脆弱的围岩开始像被扰动的流沙般发生变形。初期支护结构若未能及时给予足够支撑，围岩便会如同失去束缚的弹簧，持续向外扩张，直至超出设计允许的变形阈值，最终导致支护结构不堪重负，出现令人触目惊心的裂缝与破损。地下水的存在，犹如在本就脆弱的围岩中埋下了定时炸弹。从微观层面来看，富含地下水的软弱围岩中，水分子如同无形的侵蚀者，通过毛细作用渗入岩土颗粒间隙，持续溶解颗粒表面的胶结物质，使得岩土颗粒间的黏聚力以肉眼不可见的速度逐渐削弱。

当隧道开挖作业切断地下水径流通道时，犹如打破了微妙的地下压力平衡。积蓄已久的地下水瞬间失去束缚，裹挟着被浸泡软化的泥沙，以高压喷射流的形式奔涌而出，形成破坏力极强的涌水突泥灾害。在某山区公路隧道施工案例中，涌水突泥发生时，泥浆以每秒2立方米的速度喷涌，短短15分钟内便淹没了长30米的作业面，价值百万的混凝土喷射机被泥浆冲至百米外的隧道角落，扭曲变形如同废铁。更令人揪心的是，灾害发生时，3名施工人员被困在掌子面后方，若不是应急逃生通道畅通，后果不堪设想。这类地质灾害不仅会造成直接的

物质损失，瞬间淹没施工区域、冲毁机械设备，更对施工人员的生命安全构成严重威胁。

软弱围岩的节理裂隙发育特性，使其呈现出千疮百孔的破碎状态。这些天然形成的裂隙网络，犹如预先设计好的断裂带，在隧道开挖扰动下迅速扩展贯通。施工过程中，若对围岩的自稳能力评估不足，或支护措施稍有延迟，松动的岩块便会如同山体滑坡般轰然坠落，甚至引发大面积坍塌。坍塌产生的连锁反应不仅会掩埋作业面，中断施工进度，还可能形成次生灾害，如因坍塌引发的粉尘污染、瓦斯泄漏等，严重威胁现场人员的生命安全，使得软弱围岩段施工成为整个隧道工程中最危险的拦路虎。

2 注浆加固技术在施工中的应用方法

注浆加固技术作为应对软弱围岩困境的利器，其核心在于通过精心调配的注浆材料重塑围岩结构。水泥浆凭借其颗粒细腻、流动性强的特性，能够像细密的针线般渗入裂隙较宽的围岩内部。当水泥浆在裂隙中充分扩散并凝固后，原本松散破碎的岩块便被牢牢粘结为一个整体，如同将散落的拼图重新拼合，大幅提升围岩的完整性。而水泥-水玻璃双液浆则堪称应急抢险先锋，两种材料混合后能在数秒至数分钟内迅速凝固，如同快速凝固的胶水，瞬间封堵住地下水的流动通道，尤其适用于地下水丰富、急需止水的复杂地段，为后续施工争取宝贵时间。

注浆参数设计是确保注浆效果的关键环节，需要施工团队像调音师般精准把控每一个参数。注浆压力的设定直接影响浆液的渗透效果，压力过小，浆液如同涓涓细流，无法抵达裂隙深处，导致加固效果大打折扣；压力过大，则会像高压水枪般强行撕裂围岩，引发新的裂隙甚至塌方。注浆孔的布置同样讲究，需根据围岩的破碎程度和地下水分布情况，如同在地图上绘制网格般科学规划。通常采用梅花形或环形布置方式，确保每个注浆孔都能发挥最大作用，使浆液在围岩中形成相互交织的加固网络，避免出现加固盲区。

分段注浆工艺的实施,犹如为围岩进行一场精密手术。在掌子面开挖前,超前注浆率先登场,施工人员通过钻孔将浆液注入前方围岩,这些提前注入的浆液在地下逐渐凝固,形成一道坚固的止水帷幕和加固圈,如同给即将开挖的区域戴上防护罩,有效阻隔地下水并增强围岩稳定性。待隧道开挖完成后,二次注浆紧跟其后,针对开挖过程中可能出现的新裂隙和薄弱点进行查漏补缺,就像给围岩穿上第二层防护服。通过这种先防后补的双重加固策略,使软弱围岩从松散破碎的状态逐步转变为坚实的承载结构,为隧道施工筑牢安全屏障。

3 注浆加固技术应用效果的综合分析

注浆加固技术的应用,犹如为软弱围岩注入了强心剂,从根本上改变了围岩的物理力学特性。曾经松散脆弱的岩土体,在浆液的渗透与胶结作用下,内部结构发生显著重塑。原本彼此分离的岩土颗粒被浆液紧密粘结,形成了类似混凝土的复合结构,使得围岩的抗压强度大幅提升。这种强度增强不仅体现在抵抗垂直压力的能力上,更表现在对侧向变形的约束作用中。当围岩的弹性模量显著提高后,其变形特性也发生了质的变化,从易变形的软泥转变为相对刚硬的结构体,在面对施工扰动时能够保持更好的形态稳定性,为隧道长期安全运营奠定坚实基础。

在施工过程的动态监测中,注浆加固技术的防护效果得到了直观体现。未注浆区域的围岩往往在开挖后迅速出现变形,如同快速泄力的气球般不断收缩,而经过注浆处理的地段,变形速率明显放缓,如同被施加了减速带。这种变形控制能力有

效缓解了初期支护结构的受力压力,使支护结构所承受的应力分布更加均匀合理。以往因局部应力集中导致的支护结构开裂、破损现象大幅减少,支护体系得以充分发挥其承载效能。施工人员无需频繁对破损部位进行修补,既节省了人力物力,又避免了因支护失效引发的安全隐患,显著提升了施工过程的安全性和可靠性。

注浆加固技术对地下水的有效治理,彻底改变了隧道施工的环境面貌。曾经因涌水突泥导致的泥泞作业面,在止水帷幕的保护下变得干爽整洁。地下水的渗漏得到有效遏制,不仅降低了施工设备因长期浸泡导致的损坏风险,更避免了因积水引发的滑倒、触电等安全事故。施工人员能够在相对稳定、安全的环境中高效作业,施工进度不再因地质灾害的干扰而停滞不前。这种施工环境的改善,使得隧道工程得以按照预定计划顺利推进,工期得到有效保障,工程质量也因施工条件的优化而显著提升,最终实现了安全、高效、优质的建设目标。

4 结语

注浆加固技术在公路隧道软弱围岩段施工中,能有效解决围岩稳定、涌水等问题,提升施工安全性与工程质量,是保障此类隧道施工顺利进行的重要手段。未来,随着地质探测技术的进步,可实现注浆参数的精准设计;新型注浆材料的研发将进一步提高加固效果与环保性;智能化注浆设备的应用有望实现施工过程的实时监测与调控,推动该技术在公路隧道工程中发挥更大作用。

参考文献:

- [1] 黄明利,李术才,张庆松,等.隧道超前预注浆加固效果评价方法研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(5):921-933.
- [2] 何川,吴玉刚,汪波.软弱围岩隧道注浆加固对围岩稳定性影响分析[J].中国公路学报,2020,33(8):106-115.
- [3] 仇文革,赵勇,曾东洋.公路隧道富水软弱围岩注浆加固技术应用研究[J].土木工程学报,2019,52(12):86-95.