

富水砂层条件下桩间复合注浆止水技术应用研究

王 波¹ 周 强³ 郭涛涛¹ 苗吉浩¹ 殷恒琪²

1.中建港航局集团有限公司 上海 200080

2.中国建设基础设施有限公司 北京 100080

3.青岛地铁集团有限公司 山东 青岛 266000

【摘 要】在地下工程明挖基坑施工中,富水砂层地质条件常导致桩间涌水涌砂问题,严重影响施工安全与效率。本文结合青岛市地铁 7 号线工程实践,提出一种基于膜袋注浆的桩间复合注浆止水工法,通过聚丙烯膜袋与双液浆的协同作用,实现富水砂层渗漏快速封堵。研究阐述了工法原理、工艺要点、材料设备及质量控制措施,通过工程实例验证其在施工速度、成本控制及环保性能上的显著优势,为类似工程提供技术参考。

【关键词】富水砂层; 桩间渗漏; 膜袋注浆; 双液浆; 止水工法

DOI:10.12417/2811-0528.26.02.034

随着城市化进程加快,地下空间开发向更深层、更复杂地质条件推进。富水砂层因高渗透性、孔隙发育及动态水压影响,成为明挖基坑施工的主要难点,易引发桩间涌水涌砂,导致基坑失稳、周边沉降等风险。传统高压旋喷桩、水泥土搅拌桩等止水技术在富水砂层中存在成桩困难、浆液流失严重等问题,而膜袋注浆工法通过柔性膜袋与速凝浆液结合,针对性解决了渗漏点快速封堵难题。本文结合工程实践,系统分析该工法的技术原理、施工工艺及应用效果,为地下工程富水砂层止水提供新的解决方案。

1 富水砂层桩间渗漏特征与传统技术瓶颈

(1) 地质环境特征:富水砂层的地质条件是桩间渗漏的核心诱因,孔隙结构特殊,孔隙率高且颗粒骨架疏松,土体抗渗能力先天不足,为地下水渗流提供天然通道。渗透系数大且存在各向异性,水平向渗透性往往显著高于竖向,导致地下水渗流方向复杂、流速快。地下水动态性强,水位埋藏浅、补给来源丰富,且随季节、汛期波动明显,形成持续动态水压环境。土体抗冲刷能力弱,水流易携带砂粒形成管涌、流沙,进一步扩大渗流通道,加剧渗漏风险。(2) 传统止水技术局限性:传统止水技术难以适配富水砂层的复杂地质条件,机械成桩类技术成桩质量不稳定,易因砂层塌孔、跑浆导致桩体不连续,深层桩体搭接效果差,形成抗渗薄弱带。注浆类技术浆液控制难度大,流动路径不可控,无法精准匹配渗漏通道形态,且传统浆液易被水流稀释、冲失,封堵效率低。技术适应性不足,难以应对动态水压和高渗透性环境,对渗流通道的针对性封堵能力弱,渗漏点定位与精准处理困难。

2 富水砂层桩间复合注浆止水应用技术原理

(1) 核心技术定义:桩间复合注浆止水技术是指在钻孔

灌注桩支护体系中,结合高压喷射注浆与劈裂注浆的技术优势,通过专用注浆设备将复合浆液注入桩间砂层,利用高压射流切割破坏砂层结构,使浆液扩散填充桩间空隙及砂层孔隙,经胶结硬化形成连续、致密、高强度的止水帷幕,实现桩间防渗与砂层加固的双重目标。

(2) 富水砂层条件下桩间复合注浆止水技术应用机理分析:①高压喷射注浆机理:采用高压泵将复合浆液以 20~40MPa 的高压射流从喷嘴喷出,切割、冲击、搅拌桩间砂层,使砂颗粒与浆液充分混合,形成直径 0.8~1.2m 的柱状固结体。固结体与相邻灌注桩及周边固结体紧密搭接,构成宏观止水帷幕,阻断地下水的横向渗透路径。②劈裂注浆机理:高压喷射注浆完成后,采用 1.5~3.0MPa 的压力进行劈裂注浆,浆液在压力作用下沿砂层天然裂隙或高压喷射形成的孔隙劈裂扩散,填充微小孔隙与固结体间隙,形成微观止水网络。劈裂注浆可弥补高压喷射注浆的盲区,提高止水帷幕的密实度与连续性。③复合浆液胶结机理:复合浆液由水泥、水玻璃、膨润土及外加剂组成,其胶结机理包括水泥水化反应生成水化硅酸钙、氢氧化钙等胶凝物质,将砂颗粒胶结为整体;水玻璃与水泥水化产物发生化学反应,生成硅酸凝胶,缩短浆液凝胶时间(控制在 30~60s),避免浆液流失;膨润土遇水膨胀,填充微小孔隙,提高止水帷幕的抗渗性能;

外加剂优化浆液流动性与强度发展,确保浆液在富水砂层中快速扩散并形成高强度固结体。

3 富水砂层条件下桩间复合注浆止水技术应用技术优势

(1) 止水效能全面且彻底:作为核心技术优势,该技术突破传统单一注浆的止水局限,构建双重协同止水体系,实现

渗漏通道的全方位封堵。通过高压喷射作用对桩间区域进行整体性处理,形成完整的宏观止水屏障,从根源上阻断地下水横向渗透的主要路径,避免出现大面积渗漏通道。借助劈裂注浆的扩散特性,将浆液渗透至砂层微小孔隙及宏观帷幕的间隙中,实现对细微渗漏通道的精准封堵,消除传统技术难以覆盖的止水盲区。宏观帷幕与微观填充形成互补,既阻挡地下水主流渗透,又封堵局部细微渗漏点,从整体到局部形成无死角的止水效果,解决单一技术“要么挡不住、要么堵不细”的难题。

(2) 地质与结构适配性强: 具备广泛的适用场景, 可根据富水砂层的颗粒级配差异, 通过浆液扩散形态的自然调整, 适应从细砂到中粗砂的不同地质条件, 无需更换核心施工设备或调整工艺框架。针对桩间空隙大小不均、形态不规则的问题, 高压喷射可填充较大空隙, 劈裂注浆可渗透较小间隙, 无需额外设置辅助封堵措施, 适配各类桩体施工偏差导致的结构间隙差异。

(3) 功能复合兼具多重价值: 突破“单一止水”的功能局限, 实现止水与加固的一体化效果, 提升工程整体稳定性。以封堵地下水渗透为核心目标, 通过浆液胶结形成的止水体系, 从物理阻隔到化学胶结实现多重防护, 避免出现短期止水有效、长期失效的问题。浆液与砂层颗粒胶结形成的固结体, 能够显著改善砂层松散状态, 增强砂层自身承载能力, 同时与支护桩形成协同受力体系, 减少基坑开挖过程中砂层失稳、坍塌等风险, 实现“止水护砂、加固增效”的双重价值。

4 富水砂层条件下桩间复合注浆止水技术应用实例分析

(1) 项目概况: 青岛市地铁 7 号线鹤山路站为地下双层岛式车站, 基坑总长 260.6m, 开挖深度 18.46m, 换乘节点区域上层为富水砂层, 原高压旋喷桩止水帷幕失效, 导致桩间涌水涌砂, 严重影响施工安全。

(2) 实施过程: 针对 3 处主要渗漏点, 单处涌水量 $3\sim5\text{m}^3/\text{h}$, 采用膜袋注浆技术施工。开挖至桩后 1m, 清理砂土并堆码沙袋形成止水围堰; 膜袋铺设选用 $1.5\text{m}\times1.5\text{m}$ 膜袋, 注浆管预留 20cm 外露长度; 双液注浆水灰比 1:1.5, 水玻璃掺量

10%, 注浆压力控制 1.2~1.5MPa, 单处注浆耗时 90min; 注浆后 24h 渗漏量降为 0, 基坑开挖至基底未出现复渗, 周边地表沉降控制在 2mm/d 以内。

(3) 效益对比: 与传统地面注浆法相比, 膜袋注浆单处渗漏水泥消耗从 5.5 吨降至 2.8 吨, 施工时间缩短 40%, 劳动力减少 30%, 且未出现浆液逃逸污染地下水问题, 综合成本降低 35% (表 1)。

表 1 膜袋注浆与传统地面注浆效益对比表

对比项目	传统地面注浆法	膜袋注浆法	效益提升/变化情况
单处渗漏水泥消耗	5.5 吨	2.8 吨	减少 49.1%
单处施工时间	3h (富水砂层场景)	1~2h (平均 1.5h)	缩短 50% (按平均时长计)
单处施工劳动力	6 人	4~5 人(平均 4.5 人)	减少 25% (按平均人数计)
浆液逃逸污染	存在浆液流失风险, 可能污染地下水	无浆液逃逸, 对地下水无污染	彻底解决污染问题
综合成本	基准值 (100%)	基准值 $\times 65\%$	降低 35%

5 结论

膜袋复合注浆止水工法通过柔性膜袋与速凝双液浆的协同作用, 有效解决了富水砂层桩间渗漏难题, 具备施工快捷、成本低廉、环保高效的显著优势, 尤其适用于地铁基坑等对工期和环境要求高的工程。青岛市地铁 7 号线实践表明, 该工法封堵成功率达 100%, 渗漏复发率为 0, 经济效益与安全性能显著。未来可进一步优化膜袋材料性能, 结合物联网技术开发注浆压力智能监控系统, 实现渗漏预警与自动封堵一体化。同时, 开展长期荷载下浆体与膜袋协同工作机理研究, 为工法标准化、规范化提供理论支撑, 推动其在更多地下工程中的推广应用。

参考文献:

- [1] 陈经棚.滨海岩溶区注浆止水帷幕长期稳定性试验研究[D].山东大学,2022.
- [2] 李雄.深浅孔复合注浆止水工艺研究与应用[J].能源与节能,2022,(01):148-150.
- [3] 李燃炯,蔡冠军,李久坤.复合注浆在深厚大卵石地层止水中的应用[J].岩土工程技术,2020,34(03):158-162.
- [4] 陈城.富水砂卵石地层注浆材料性能及注浆模拟试验研究[D].北京建筑大学,2019.