

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 3~5m³/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 1.5m×1.5m 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×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] 李燃垌,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.