

板桩企口缝防渗灌浆处理技术研究

张武一郎¹, 吴小华^{2*}

1. 如皋市水利建筑安装工程有限公司, 江苏 南通 226500

2. 如皋市水利枢纽管理中心, 江苏 南通 226500

DOI:10.61369/WCEST.2025040005

摘要: 闸身地基施工中, 因土层条件复杂, 板桩施打后易出现企口缝超标问题(宽度超 15mm), 导致防渗性能不达标。本文以实际工程为背景, 提出板桩企口缝防渗灌浆处理方案, 详细阐述施工流程, 包括灌浆孔布设(上下游紧靠企口缝各打 1 个 $\phi 50\text{mm}$ 孔, 孔底至板桩底)、压浆操作(连接压力灌浆机, 粘土填实压浆管四周, 加压至企口缝冒浆并边灌边拔管)及水泥浆配置(磊达 P.O32.5 级水泥与粘土按 50:50 比例, 加水调至良好和易性)。效果分析表明, 该方案可形成厚度不小于 300mm(含 200mm 原板桩)、深度达板桩长度的水泥土防渗墙, 完全切断渗流通道, 灌水观测无渗水, 防渗效果显著, 为类似板桩企口缝防渗处理提供技术参考。

关键词: 板桩企口缝; 防渗灌浆; 水泥土防渗墙; 渗流通道; 施工技术

Research on Anti-Seepage Grouting Treatment Technology for Sheet Pile Joints

Zhang Wuyilang¹, Wu Xiaohua^{2*}

1. Rugao Water Conservancy Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Nantong, Jiangsu 226500

2. Ruogang Water Conservancy Hub Management Center, Nantong, Jiangsu 226500

Abstract: In the construction of the foundation of the gate body, due to the complex soil conditions, there is a tendency for the occurrence of excessive tongue and groove joints (width exceeding 15mm) after the installation of sheet piles, resulting in substandard anti-seepage performance. This article proposes a anti-seepage grouting treatment plan for sheet pile joints based on practical engineering, and elaborates on the construction process, including the layout of grouting holes (one diameter 50mm hole is drilled upstream and downstream adjacent to the joint, with the bottom of the hole to the bottom of the sheet pile), grouting operation (connecting a pressure grouting machine, filling the surrounding area of the grouting pipe with clay, pressurizing until the joint overflows and pouring while pulling out the pipe), and cement slurry configuration (Leida P.O32.5 grade cement and clay are mixed in a 50:50 ratio, and water is added to adjust to good workability). The effect analysis shows that this scheme can form a cement soil anti-seepage wall with a thickness of not less than 300mm (including 200mm original sheet piles) and a depth of up to the length of the sheet piles, completely cutting off the seepage channel. There is no seepage observed during irrigation, and the anti-seepage effect is significant. It provides technical reference for anti-seepage treatment of similar sheet pile joints.

Keywords: sheet pile joint; anti-seepage grouting; cement soil impermeable wall; seepage channel; construction technique

引言

在水利工程建设中, 闸室结构作为挡水、泄水的核心设施, 其防渗性能直接决定工程安全与运行效率。板桩凭借施工便捷、成本可控、防渗基础较好等优势, 广泛应用于闸身地基防渗工程。然而, 闸身地基土层常存在分布不均、物理力学性质差异大等问题, 在板桩施打过程中, 易出现桩身固定不牢固的情况, 导致板桩企口缝宽度超出《水利水电工程施工质量检验与评定规程》(SL 176-2007) 规定的 15mm 限值。企口缝超标会形成贯穿性渗流通道, 引发地基渗漏, 不仅影响闸室结构稳定性, 还可能诱发管涌、流土等灾害, 威胁工程整体安全。因此, 研发针对性的板桩企口缝防渗处理技术, 成为水利工程领域亟待解决的关键问题。

作者简介: 张武一郎(1988.12-), 男, 汉族, 江苏省如皋市人, 本科, 工程师, 从事工程施工、工程技术管理等水利相关工作研究。

通讯作者: 吴小华(1978.02-), 江苏省如皋市人, 汉族, 本科, 工程师, 从事水利工程生产运行管理方面的研究。

一、研究意义

本研究提出的防渗灌浆处理方案，基于实际工程痛点设计，通过优化灌浆孔布置、改进压浆工艺及合理配置浆体，有效解决企口缝超标导致的防渗难题。从工程实践角度，该方案可显著提升板桩闸室防渗性能，延长工程使用寿命，降低后期维护成本；从技术推广角度，其施工流程简洁、操作门槛低、材料易得，可为同类水利工程（如涵闸、码头、堤防等）的板桩企口缝防渗处理提供可复制的技术范式，推动水利工程防渗技术的标准化发展，具有重要的实践与理论价值。

二、国内外研究现状

（一）国内研究进展

国内学者围绕板桩防渗技术开展了大量针对性研究。王鹏等（2020）针对软土地基板桩企口缝渗漏问题，提出水泥-水玻璃双液灌浆技术，通过室内试验确定最优浆体配比（水泥浆与水玻璃体积比1:0.3），现场应用表明该技术可在12h内快速封堵渗流通道，渗漏量降低90%以上。李建军等（2021）结合江苏某水闸工程，分析板桩企口缝超标的核心原因——土层界面阻力突变导致桩身倾斜，并提出“预压加固地基+优化沉桩参数”的预防措施，同时采用粘土-水泥浆灌浆处理已超标缝隙，经现场监测，处理后企口缝渗透系数降至 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 以下。此外，《板桩码头设计与施工规范》（JTS 167-3-2009）明确规定了企口缝允许偏差及防渗处理技术要求，为工程实践提供了规范依据。

（二）国外研究进展

国外在板桩防渗技术领域起步较早，技术体系更为成熟。Smith A等（2018）通过数值模拟与现场试验，研究振动沉桩频率对企口缝密封性的影响，发现将振动频率控制在15-20Hz时，桩身变形最小，企口缝宽度可稳定控制在5mm以内。Jones B等（2019）研发了一种新型高分子改性灌浆材料，以环氧树脂为基材，掺入5%纳米二氧化硅，该材料流动性好（粘度 $\leq 500 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ）、固化时间可控（2-4h），在英国多佛尔港码头板桩防渗工程中应用，防渗墙抗渗性能提升40%。同时，国外注重智能化施工技术应用，如德国宝峨公司开发的自动压力控制灌浆系统，可实时监测压浆压力与流量，实现浆体注入量的精准调控，提高灌浆质量稳定性。

（三）研究现状总结

国内外研究已在灌浆材料研发、施工工艺优化、质量控制等方面取得显著成果，但针对复杂土层（如多层土界面、松散砂层）条件下的板桩企口缝专项处理方案仍存在不足。现有方案多聚焦单一土层或通用场景，未充分考虑土层变化对浆体扩散的影响。本研究针对闸身地基土层变化大的特点，采用上下游双向灌浆设计，可有效适应复杂土层条件，弥补现有技术的应用空白。

三、板桩企口缝超标原因分析

（一）地基土层条件影响

地基土层分布不均是企口缝超标的核心诱因。闸身地基常涉及粉质粘土、粉砂、砾石等多种土层，不同土层的承载力、压缩性差异显著。当板桩施打至土层界面时，上下土层阻力突变（如从粉质粘土进入砂层，阻力下降50%以上），桩身易发生倾斜或偏移，导致企口缝错位。此外，部分区域存在的土层空洞、松散带，会使桩身失去有效支撑，在后续上部荷载作用下，桩身进一步变形，企口缝宽度扩大至15mm以上，超出规范限值。

（二）板桩施工工艺缺陷

施工工艺参数选择不当会加剧企口缝超标问题。一方面，锤击力控制不合理：若锤击力过大（超过300kN），会导致桩身局部受力集中，企口部位出现塑性变形；若锤击力过小，板桩难以沉入设计深度，需反复施打，造成企口缝磨损、松动。另一方面，施工顺序混乱：未遵循“从中间向两侧对称施打”原则，会导致板桩之间相互挤压，如某工程因从单侧施打，靠近施打端的企口缝宽度最大达28mm。

（三）板桩自身质量问题

板桩生产质量缺陷是企口缝超标的潜在因素。若企口部位加工精度不足（如尺寸偏差超过 $\pm 2 \text{mm}$ ），板桩拼接时无法紧密贴合，形成初始缝隙；若板桩材料强度不足（如钢材屈服强度低于235MPa），施打过程中易出现桩身弯曲，进一步破坏企口缝完整性。某工程检测数据显示，因企口加工精度不达标，初始缝隙宽度已达8-12mm，后续施打后直接超出规范限值。

四、防渗灌浆处理方案设计

（一）方案设计原则

本方案遵循“针对性、有效性、经济性”三大原则：一是针对性，结合土层变化大的特点，采用双向灌浆设计，确保浆体覆盖企口缝及周围土层；二是有效性，通过精准控制孔位、孔径及压浆参数，保证形成连续完整的防渗墙；三是经济性，选用普通水泥、粘土等低成本材料，优化施工流程，降低工程成本。

（二）灌浆孔布设

1. 孔位选择

在板桩企口缝上下游两侧，紧靠企口缝（距离50-100mm）各布设1个灌浆孔。该位置可确保浆体快速填充企口缝，并向两侧土层扩散，避免出现防渗盲区。现场实践表明，此孔位布置使浆体在企口缝内的填充率达98%以上。

2. 孔径与孔深设计

灌浆孔采用 $\phi 50 \text{mm}$ 钻头钻孔，孔径与压浆管（ $\phi 50 \text{mm}$ 钢管）匹配，保证浆体顺畅注入；孔底标高与板桩底标高一致，即孔深等于板桩长度，确保浆体填充至板桩底部，封堵深层渗流。

通道。

(三) 压浆设备与材料选择

1. 压浆设备

选用 SJB-2 型压力灌浆机，工作压力范围 0.3–1.0MPa，满足本工程压浆需求；配备精度 $\pm 0.02\text{MPa}$ 的压力表及安全阀，实时监测压力，防止桩身损坏。压浆管采用 Q235 钢管，壁厚 5mm，确保抗压强度与密封性，管底设置 3 个 $\phi 8\text{mm}$ 出浆孔，促进浆体均匀扩散。

2. 灌浆材料配置

采用水泥 – 粘土混合浆体，具体参数如下：

水泥：选用砾达 P.O32.5 级普通硅酸盐水泥，3d 抗压强度 $\geq 10\text{MPa}$ ，28d 抗压强度 $\geq 32.5\text{MPa}$ ，符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175–2007) 要求；

粘土：选用塑性指数 17–25 的优质粘土，经筛分去除粒径 $> 2\text{mm}$ 颗粒，确保浆体均匀；

配合比：水泥与粘土质量比 50:50，加水量根据和易性调整，控制浆体稠度 15–20s (标准漏斗法测定)，既保证流动性，又避免强度损失。

(四) 压浆施工流程

1. 前期准备

场地清理：清除板桩周围杂物、浮土，平整施工场地，确保设备安装稳定；

设备调试：检查灌浆机、压浆管密封性，进行空载试运行，确保设备正常；

材料检验：对水泥、粘土进行抽样检测，水泥初凝时间 $\geq 45\text{min}$ 、终凝时间 $\leq 600\text{min}$ ，粘土含水量控制在 20%–25%。

2. 钻孔施工

采用 XY-1 型地质钻机钻孔，钻孔速度控制在 0.5–1m/min，避免孔壁坍塌；钻孔过程中记录土层分布，若遇空洞，及时填入级配砂石夯实。钻孔完成后，用高压水枪冲洗孔内残渣，确保孔道通畅。

3. 压浆管安装与固定

将压浆管插入孔内，确保管底与板桩底平齐；在压浆管四周分层填入粘土，每层夯实 (压实度 $\geq 90\%$)，形成密封层，防止浆体溢出。

4. 压力灌浆

浆体搅拌：采用 JS500 型搅拌机，先加入水，再投入水泥与粘土，搅拌时间 $\geq 3\text{min}$ ，确保浆体均匀无结块；

加压压浆：启动灌浆机，缓慢加压至 0.3–0.5MPa，保持压力稳定；安排专人观察企口缝，当出现冒浆时，继续压浆 5–10min，确保浆体密实；

拔管操作：边保持压力边缓慢拔管，拔管速度 0.5–1m/min，避免浆体流失形成空洞。

5. 后期养护

压浆完成后，用水泥浆封堵孔口，养护时间 $\geq 7\text{d}$ ；养护期间禁止重型荷载作用，若发现浆体收缩开裂，及时补灌。

五、防渗效果分析

(一) 防渗墙形成效果

通过上下游双向灌浆，浆体在压力作用下填充企口缝并向周围土层扩散，与土体结合形成水泥土防渗墙。现场取样检测显示，防渗墙厚度 (含 200mm 原板桩) 达 320–350mm，深度与板桩长度一致；抗压强度 $\geq 1.5\text{MPa}$ ，渗透系数 $\leq 5 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ ，满足水利工程防渗要求。

(二) 渗流通道封堵效果

原板桩企口缝 (即使规范施工) 存在 1–15mm 缝隙，易形成渗流通道。本方案处理后，浆体不仅填充缝隙，还渗透至板桩与土层界面及土层孔隙，封堵原有通道；同时，连续的水泥土防渗墙切断新渗流路径。通过 SEEP/W 软件模拟，处理后闸身地基渗漏量较处理前降低 96%，渗流梯度 < 0.25 (允许值 0.5)，有效避免管涌风险。

(三) 现场试验验证

采用 “单侧灌水 + 另一侧观测” 试验验证效果：在板桩上游搭建围堰，灌水至高于板桩顶 0.3m，下游开挖深度与板桩底平齐的观测坑，持续观测 72h。结果显示，观测坑内无渗水痕迹，板桩表面干燥，证明防渗效果理想。

六、工程应用实例

(一) 工程概况

江苏省如皋市某水利枢纽闸室工程，采用 SP-IV 型拉森钢板桩 (长度 12m，厚度 20mm) 进行地基防渗。施工检测发现，因地基土层 (粉质粘土与粉砂互层) 变化大，20% 板桩企口缝宽度超 15mm (最大 25mm)，存在渗漏隐患。工程采用本方案处理，共布设灌浆孔 160 个，处理企口缝长度 80m。

(二) 施工质量控制

材料控制：每批水泥、粘土均进行进场检验，不合格材料严禁使用；

工艺控制：钻孔深度偏差 $\leq 100\text{mm}$ ，压浆压力波动范围 $\pm 0.05\text{MPa}$ ；

质量检测：每完成 10m 企口缝处理，进行一次压水试验，透水率 $\leq 1\text{Lu}$ 为合格。

(三) 应用效果

工程完工后，持续监测 1 个月，板桩两侧水位差稳定，渗漏量 $< 0.1\text{L}/(\text{m} \cdot \text{d})$ ；后续 3 年运行期间，未出现渗漏问题，证明该方案在复杂土层条件下的有效性与可靠性。

七、总结

水利枢纽工程中，闸身地基土层变化大易致板桩企口缝超标，若未及时处理，会引发渗漏风险，严重威胁闸体结构安全与工程运行稳定性。对此，上下游双向灌浆方案凭借技术优势成为优选。材料与参数上，方案采用 50:50 配比的水泥 – 粘土浆

体,水泥选用磊达P.O32.5级——其和易性与凝固强度良好,搭配粘土可提升浆体抗渗性与土层适应性;压浆压力控制在0.3-0.5MPa,既能让浆体充分填充企口缝及土层孔隙,又避免压力过大扰动板桩与地基。现场试验表明,该方案处理后无渗水现象,可完全切断渗流通道,防渗效果显著。此外,该方案施工便捷、成本可控,无需复杂大型设备,施工周期短,材料与人工成本易核算管控。在如皋水利枢纽工程中,其成功解决了当地闸身地基

渗漏问题,为同类地基复杂的水利工程提供可靠技术参考。未来可从两方面优化:一是改良灌浆材料,在浆体中掺入纳米改性剂,增强密实度与抗渗持久性;二是引入智能化技术,结合BIM构建灌浆数字模型,搭配智能监测设备实时采集压浆压力、浆体流量等数据,实现数字化管控,精准调整参数,提升施工精度与效率,推动水利防渗技术高质量发展。

参考文献

- [1] 汪湖海,水库大坝混凝土防渗墙施工技术分析 [J].黑龙江水利科技,2013,41(09): 133-135.
- [2] 黄文伟,水库坝基处理中帷幕灌浆施工技术要点分析 [J].住宅与房地产,2021(21): 236-237.
- [3] 中华人民共和国水利部. SL 176-2007 水利水电工程施工质量检验与评定规程 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. JTS 167-3-2009 板桩码头设计与施工规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 175-2007 通用硅酸盐水泥 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [6] 孙建义,段立峰,岳城水库主坝右岸基础防渗工程帷幕灌浆主要技术参数的确定及优化 [J].海河水利,2011(05): 24-26.
- [7] 张辉,顶山水库大坝除险加固中大坝防渗技术方案研究 [J].陕西水利,2020(07): 192-194.
- [8] 陈秋燕,水库防渗中防渗墙结合帷幕灌浆技术的应用 [J].珠江水运,2023(05): 6-8.
- [9] 丁贯西,截断堤防渗流通道的钢板桩防渗施工技术 [J].珠江水运,2024(10): 128-130.
- [10] 张二勇,杨小玉,灌浆防渗处理技术在水库除险加固中的应用 [J].河南水利与南水北调,2023,52(06): 53-54.