

# 水利工程中堤防防渗施工技术的应用与探讨

文 / 杨 芳 湖北江润建设集团有限公司

王 冲 湖北华夏水利水电股份有限公司

刘一波 湖北江润建设集团有限公司

**摘要：**堤防作为水利工程防洪减灾的关键设施，其防渗性能直接关系到工程安全与周边区域的稳定。本文结合堤防工程的地质条件与运行需求，系统分析了堤防渗漏的成因及危害，探讨了主流防渗施工技术的应用原理与适用场景。通过对比不同技术在复杂地质条件下的实施效果，提出了基于地质勘察的技术选型方法与施工质量控制策略。

**关键词：**水利工程；堤防防渗；施工技术；防渗墙；质量控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.070

## 引言

堤防工程是抵御洪水、保障城乡安全的重要屏障，广泛分布于江河湖海沿岸。由于长期受水流冲刷、地下水渗透及地质沉降等因素影响，堤防易出现管涌、裂缝、渗漏等病害，若处置不当可能引发溃堤风险，造成严重的生命财产损失。近年来，随着新材料、新工艺的发展，堤防防渗施工技术从传统的土料压实向多元化、高精度方向演进，防渗墙、高压喷射注浆等技术在大型堤防加固工程中得到广泛应用。本文基于堤防工程的实践经验，梳理主流防渗施工技术的应用要点，分析技术选型的影响因素，提出优化策略，旨在为同类工程提供参考，推动堤防防渗施工向精细化、高效化方向发展。

### 一、堤防渗漏的成因及防渗施工的技术需求

#### （一）堤防渗漏的主要成因

堤防渗漏可分为地基渗漏、堤身渗漏与接触渗漏三类。地基渗漏源于堤基土层的渗透性差异，如砂卵石层因孔隙率大（可达30%-40%），易形成集中渗流通道，在水头压力作用下引发管涌；堤身渗漏多因施工时土料压实度不足（压实度低于93%），或堤身存在裂缝、生物洞穴（如白蚁巢穴），导致雨水或河水沿缺陷渗透；接触渗漏则发生在堤身与地基、堤身与穿堤建筑物（如涵管）的结合部位，因接触面处理不当形成渗漏通道，尤其在涵管周边，混凝土与土体的变形差异易导致缝隙产生。

#### （二）防渗施工的核心技术指标

一是渗透系数，根据堤防等级不同，防渗体的渗透系数需控制在 $1 \times 10^{-6}$ ~ $1 \times 10^{-8}$ cm/s之间，一级堤防要求更高（ $\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s）；二是耐久性，防渗结构需抵抗水流冲刷、冻融循环等作用，使用寿命不低于30年；三是变形适应性，需与堤身、地基协同变形，避免因沉降差异产生裂缝，防渗体的弹性模量宜与周边土体匹配（相差不超过1个数量级）。

#### （三）不同地质条件下的防渗需求

地质条件是影响防渗技术选择的关键因素。砂土地基渗透系数大、承载力低，防渗需兼顾截渗与地基加固，

宜采用能形成连续防渗体且具备一定强度的技术（如防渗墙）；黏土地基因渗透性低但易产生裂缝，需注重防渗体的抗裂性，可选用柔性材料（如复合土工膜）；卵石地层因粒径大（最大可达500mm）、级配不均，对施工设备的穿透力要求高，需采用高压喷射注浆等大功率技术；岩溶发育区则需先填充溶洞，再进行整体防渗处理，避免浆液流失。

## 二、水利工程中主流堤防防渗施工技术的应用分析

### （一）防渗墙技术

防渗墙技术通过在堤身或堤基中建造连续不透水墙体阻断渗流，适用于各类地质条件，是高等级堤防的首选技术。按材料可分为：混凝土防渗墙（抗压强度15-30MPa，渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s），适用于水头高、地质复杂的堤段；塑性混凝土防渗墙（弹性模量100-1000MPa），变形适应性强，适合软土地基；钢筋混凝土防渗墙（如图1），用于需兼顾防渗与结构承载的场景（如穿堤建筑物周边）。

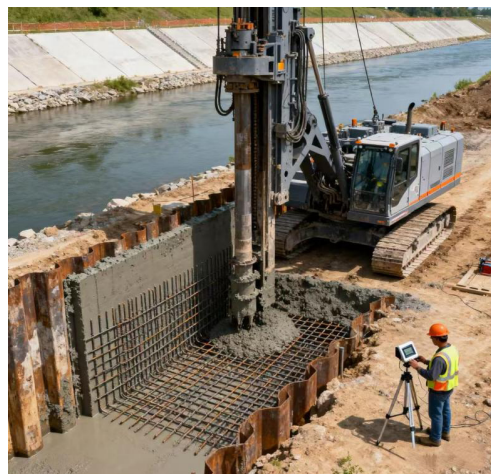


图1 某工程防渗墙技术

施工工艺包括钻挖成槽、泥浆护壁、混凝土浇筑等环节：冲击钻适用于卵石层，通过冲击破碎卵石形成槽孔；液压抓斗适用于砂土与黏土，成槽效率高（每日可达100-200m<sup>2</sup>）；双轮铣槽机适用于坚硬岩层，成槽精

度高（垂直度偏差 $\leq 1/500$ ）。某一级堤防加固工程采用800mm厚塑性混凝土防渗墙，墙深35m，施工后堤基渗漏量减少95%，渗透系数稳定在 $5 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ ，满足设计要求。

### （二）高压喷射注浆技术

高压喷射注浆技术通过高压泵将水泥浆液以20-40MPa压力从喷嘴喷出，切割搅拌地层土体，形成水泥土防渗体，适用于砂土、粉土及粒径 $\leq 150\text{mm}$ 的卵石层。按喷射方式可分为单管法（成桩直径0.5-1.0m）、双管法（0.8-1.5m）、三管法（1.0-2.5m），其中三管法因高压水先行切割土体，在卵石层中应用效果更优。

施工时需控制关键参数：喷射压力（砂土20-25MPa，卵石层30-40MPa）、提升速度（10-20cm/min）、旋转速度（10-20r/min），确保桩体均匀连续。相邻桩体需搭接20-30cm形成封闭帷幕，注浆材料可选用水泥浆（水灰比1:1-1:1.5），必要时掺入膨润土（掺量5%-10%）改善浆液流动性。

### （三）劈裂灌浆技术

劈裂灌浆技术利用堤身自重或附加压力，将堤身沿轴线方向劈裂，灌入水泥黏土浆液形成防渗帷幕，适用于均质土堤或黏土地基，尤其适合堤身渗漏修复。其原理是通过灌浆压力（0.2-0.5MPa）使堤身产生径向裂缝，浆液在裂缝中扩散并胶结土体，同时挤压周边土体提高密实度。

### （四）复合土工膜防渗技术

复合土工膜由土工织物与聚乙烯/聚氯乙烯膜复合而成，渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-10} \text{cm/s}$ ，具有重量轻、施工便捷等特点，适用于堤身表面防渗或堤基浅层处理。常用规格为两布一膜（土工布+膜+土工布），膜厚0.3-0.8mm，土工布单位面积质量 $\geq 200 \text{g/m}^2$ ，增强抗穿刺能力。

### （五）水泥土搅拌桩技术

水泥土搅拌桩通过特制搅拌机械将水泥浆液与地基土强制搅拌，形成柱状水泥土防渗体，适用于淤泥质土、黏性土、砂土等，适合低水头堤防的堤基防渗。桩径通常为500-600mm，桩距300-500mm，通过搭接形成防渗帷幕，水泥掺量为土体重的10%-15%，28天抗压强度可达1-2MPa，渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 。

### （六）模袋混凝土技术

模袋混凝土通过高压泵将混凝土灌入机织模袋（聚丙烯或聚酯材料），形成连续防渗体，适用于堤岸迎水面防渗与护坡，尤其适合水下施工。混凝土强度等级为C15-C20，坍落度20-25cm，模袋规格根据坡长选用，长度20-50m，宽度3-6m，接缝采用搭接（宽度 $\geq 50\text{cm}$ ）或缝制处理。

### （七）帷幕灌浆技术

帷幕灌浆通过在堤基或坝肩钻孔，灌注水泥浆液形

成防渗帷幕，适用于岩基或砂砾石地基，尤其在岩溶地区应用广泛。按灌浆孔排列可分为单排、双排或多排，孔距1-3m，排距0.8-2.0m，灌浆压力根据地质条件确定（岩基0.3-1.0MPa，砂砾石地基0.2-0.5MPa）。

## 三、堤防防渗施工技术应用中的典型问题

### （一）技术选型与地质条件适配性不足

技术选型缺乏针对性是导致防渗效果不佳的首要问题。部分工程忽视地质勘察的深度，仅凭经验选择防渗技术，导致技术特性与地质条件不匹配。

### （二）施工工艺执行不规范与质量缺陷

施工过程中的工艺偏差是产生质量缺陷的主要原因。防渗墙施工中，槽段开挖时泥浆护壁性能不足（黏度 $< 18\text{s}$ ），导致孔壁坍塌，形成蜂窝状缺陷；混凝土浇筑时导管理深过浅（ $< 2\text{m}$ ），引发断桩或夹泥，某工程检测发现20%的防渗墙存在此类缺陷。高压喷射注浆施工中，因提升速度过快（ $> 25\text{cm/min}$ ）或压力不足（ $< 20\text{MPa}$ ），导致桩体强度不均，渗透系数超标（ $> 1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ ）。

### （三）质量检测方法滞后与验收标准模糊

质量检测手段难以全面反映防渗体实际性能。传统检测多依赖钻孔取芯（破坏性检测），样本量有限（每100m取1组），难以发现局部缺陷；注水试验仅能测定表层渗透系数，对深层防渗效果评估不准确。

### （四）后期运维缺失与防渗结构老化

运维监测体系不完善加速防渗结构失效。多数堤防未建立长期监测系统，仅在汛期进行人工巡查，难以发现早期渗漏（如堤后湿润带、管涌雏形）；对防渗体的变形监测不足，某堤防因未及时发现问题导致汛期发生集中渗漏。

## 四、堤防防渗施工技术的优化与质量控制

堤防防渗施工的效果取决于技术选型的合理性与施工过程的规范性，需从地质勘察、工艺优化、质量检测等方面建立全流程管控体系，确保防渗体性能达标。

### （一）基于地质勘察的技术选型方法

技术选型需以详细的地质勘察为基础，勘察内容包括土层分布、渗透系数、地下水位、岩土力学参数等。对于砂卵石堤基，优先选用防渗墙或高压喷射注浆技术，若卵石粒径超过150mm，需采用冲击钻配合高压喷射注浆的组合工艺；黏土地基可选用劈裂灌浆或复合土工膜，若存在深层裂隙，则需结合高压喷射注浆处理；岩溶地区需先进行溶洞填充（采用水泥砂浆或级配砂石），再施工防渗墙封闭。

### （二）施工工艺的优化策略

针对不同技术的短板进行工艺优化：防渗墙施工中，对易塌孔的砂层采用优质泥浆（黏度25-30s）护壁，同时缩短清孔与混凝土浇筑的间隔时间（ $\leq 4$ 小时），减

少孔底沉渣；高压喷射注浆在卵石层施工时，采用“跳打”工艺（间隔1-2孔施工），避免相邻孔施工时的相互干扰，同时提高注浆压力至35-40MPa，确保浆液充分扩散；劈裂灌浆中，采用“少灌多复”的方式（每次灌浆量控制在50-100L/m，重复灌浆3-4次），避免单次灌浆压力过大导致堤身开裂。

### （三）质量检测与验收标准

验收标准需符合《堤防工程施工规范》，主要指标包括：防渗体渗透系数≤设计值，完整性检测无连续缺陷，与周边结构的连接密封严密。对重要堤段，需进行现场抗渗试验，在设计水头作用下观察24小时，不得出现渗漏现象。施工现场环境与安全管理的关键措施与监测标准如表1所示。

表1 施工现场环境与安全管理的关键措施与监测标准

管理项目	管理措施	数据要求/标准
环境保护	土壤与水体污染防治	防渗材料储存时不可溢出，化学物质符合环保标准
	噪声控制	噪声水平应低于85 dB(A)
	粉尘控制	最大粉尘质量浓度应小于0.15 mg/m <sup>3</sup>
安全管理	高空作业安全	配备安全带、护栏，施工人员无违规操作
	机械设备安全	设备检查合格率不低于95%
	施工人员安全培训	所有操作人员均通过安全培训，合格率为100%
施工隐患排查	地质条件评估与检查	软土、松散土层区域需特别标明，确保加固处理
	风险评估与应急预案	应急预案每年修订一次，应急响应时间小于等于5 min

### （四）后期运维与监测

防渗体的长期有效性需通过运维监测保障：定期巡查堤身有无裂缝、隆起、渗漏点，尤其在汛期前后增加巡查频次；在防渗体关键部位布设渗透压力计、位移计，实时监测渗压变化与变形量，当渗透压力超过设计值的80%时发出预警；对复合土工膜等易老化材料，每5年进行一次抽样检测，评估其力学性能与防渗性能，必要时进行修复或更换。

## 五、堤防防渗施工技术的应用案例与发展趋势

### （一）典型工程应用案例

案例一：某一级堤防加固工程，堤长10km，堤基为砂卵石层（渗透系数 $1 \times 10^{-3}$  cm/s），采用800mm厚塑性混凝土防渗墙，墙深25m，施工后通过抽水试验测得渗透系数为 $3 \times 10^{-8}$  cm/s，满足设计要求。汛期运行时，堤后渗流量从加固前的 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 降至 $0.02 \text{ m}^3/\text{h}$ ，未出现管涌等险情。

案例二：某二级土堤修复工程，堤身存在多处裂缝，

采用劈裂灌浆技术，灌浆孔距2.5m，浆液配比为水泥：黏土=1:5，共灌浆3次。施工后堤身压实度从88%提升至95%，渗透系数降至 $8 \times 10^{-7}$  cm/s，经3个汛期考验，渗漏现象完全消除。

案例三：某湖泊堤防工程，堤坡为砂质土，采用复合土工膜（两布一膜，膜厚0.6mm）防渗，铺设面积5万m<sup>2</sup>，接缝采用热熔焊接，焊接合格率98%。膜上覆盖30cm厚砂土保护层，施工后堤坡渗漏量减少95%，且适应了堤身的轻微沉降。

### （二）技术发展趋势

一是材料创新，研发高性能防渗材料，如自修复型水泥（掺入微胶囊，裂缝产生时释放修复剂）、耐候性复合土工膜（添加抗紫外线添加剂，使用寿命延长至50年以上）；二是智能化施工，推广无人摊铺机、自动灌浆机器人等设备，结合BIM技术模拟施工过程，提前优化方案；三是绿色环保技术，采用低碳水泥、再生骨料等环保材料，减少施工对周边生态的影响；四是监测一体化，将传感元件预埋入防渗体，实现施工质量与运行状态的实时监测，构建“施工-监测-维护”闭环体系。

### （三）应用推广的建议

一是完善技术标准体系，针对不同地质条件制定专项施工指南，明确技术参数与验收要求；二是加强技术培训，提升施工人员对新材料、新工艺的掌握能力，尤其注重复杂地质条件下的应急处理技能；三是建立技术数据库，收集不同技术的应用案例与效果数据，为技术选型提供参考；四是加大科研投入，鼓励高校与企业合作研发适用于特殊地质（如深厚砂层、岩溶区）的新型防渗技术。

## 结语

堤防防渗施工技术是保障水利工程安全运行的核心技术之一，其应用效果直接关系到防洪减灾能力。实践表明，基于地质勘察的精准选型、施工过程的严格管控及后期的科学运维，是提升堤防防渗效果的关键。随着新材料、智能化技术的发展，堤防防渗施工将逐步实现“材料高性能化、施工精准化、监测智能化”，为水利工程的长效安全运行提供更坚实的保障。未来，需进一步加强技术创新与工程实践的结合，不断完善技术体系，推动堤防防渗施工技术向更高水平发展，为国家水安全战略的实施贡献力量。

### 参考文献

- [1] 李乔. 水利工程中河道堤防施工技术应用研究[J]. 水上安全, 2024(22): 25-27.
- [2] 徐超. 水利工程堤防防渗施工技术应用[J]. 水上安全, 2024(16): 169-171.
- [3] 郭涛. 防渗处理施工技术在水利工程中的具体应用[J]. 科技与创新, 2024(14): 182-184.