

水利工程中堤防防渗施工技术的应用研究

朱 璐

河北省水务中心石津灌区事务中心, 河北 石家庄 050051

[摘要] 全球堤防工程普遍面临渗漏隐患, 我国堤防建设规模庞大, 部分区段存在渗漏风险, 尤其在复杂地质与生态敏感区域, 传统防渗手段面临技术瓶颈。国际社会对工程环保性的要求日益严格, 推动防渗技术向低碳化方向转型。当前研究多聚焦单一技术优化, 缺乏对材料性能、结构设计与环境适配的系统性协同机制探索, 导致工程实践中常出现局部有效而整体稳定性不足的问题。突破技术瓶颈需构建系统性思维, 通过材料创新、工艺整合与生态理念融合, 推动防渗技术向绿色化、智能化方向升级, 实现工程安全与生态效益的平衡。

[关键词] 水利工程; 堤防防渗; 施工技术

DOI: 10.33142/aem.v7i4.16368

中图分类号: TV512

文献标识码: A

Application Research on Anti-seepage Construction Technology for Embankments in Hydraulic Engineering

ZHU Lu

Hebei Provincial Water Affairs Center Shijin Irrigation District Affairs Center, Shijiazhuang, Hebei, 050051, China

Abstract: Global embankment projects generally face leakage hazards. China has a large scale of embankment construction, and some sections have leakage risks, especially in complex geological and ecologically sensitive areas. Traditional anti-seepage methods face technical bottlenecks. The international community's increasingly strict requirements for engineering environmental protection are driving the transformation of anti-seepage technology towards low-carbon direction. Current research mostly focuses on optimizing a single technology, lacking exploration of systematic collaborative mechanisms for material properties, structural design, and environmental adaptation, resulting in the common problem of local effectiveness and insufficient overall stability in engineering practice. Breaking through technological bottlenecks requires building systematic thinking, promoting the upgrading of anti-seepage technology towards green and intelligent direction through material innovation, process integration, and ecological concept integration, and achieving a balance between engineering safety and ecological benefits.

Keywords: water conservancy engineering; embankment anti-seepage; construction technology

引言

堤防防渗是水利工程安全的核心要素, 其性能直接影响防洪能力与生态系统的长期稳定。在全球气候变化导致极端水文事件增多的背景下, 传统防渗技术面临多重挑战: 复杂地质条件限制施工可行性、材料耐久性不足引发安全隐患、生态保护要求提高倒逼技术革新。单一技术改良难以应对渗流路径的时空变异性与系统协同需求, 亟需通过材料适配性优化、工艺组合创新及生态效应量化评估, 建立兼顾工程可靠性与环境友好性的综合防渗方案, 实现防洪减灾与生态保护的双重目标。

1 水利工程堤防防渗施工的核心价值

堤防防渗施工是水利工程防洪体系的关键环节, 其作用不仅体现于抵御洪水的直接防护功能, 更在于维持区域生态系统的动态平衡与社会经济的可持续发展。从工程力学视角分析, 堤防长期受高水位渗透作用时, 若防渗体系存在结构性缺陷, 渗流路径将沿土体孔隙或裂隙持续扩展, 导致土体有效应力分布失衡、抗剪强度梯度衰减, 最终可能引发管涌、流土等渐进式破坏, 甚至产生溃堤风险。防

渗施工通过构建连续、稳定的阻渗屏障, 可切断渗流通道, 维持堤身完整性, 避免因内部侵蚀导致的灾变链式反应。这一过程不仅关乎洪水期间堤防的被动防御效能, 更决定了工程在极端气候条件下对下游农田、城镇的主动保护能力——高质量的防渗系统可显著降低洪峰过境时的水位壅高值, 缩短淹没历时, 从而减轻农业减产、居民生命财产损失及湿地生态退化等次生灾害。从生态学维度考量, 科学防渗能减少渗漏水流对地下水系统的扰动, 维持区域水文循环平衡, 避免因长期渗漏引发的土壤盐渍化或河岸植被退化。因此, 堤防防渗施工本质上是实现“工程安全-社会效益-生态健康”三位一体目标的系统性技术支撑。

2 堤防防渗材料特性与技术适配性

2.1 膜材料体系

膜材料作为防渗体系的核心功能层, 其性能直接决定工程抗渗稳定性与服役周期。现代防渗膜主要包括聚乙烯(PE)土工膜与膨润土防水毯(GCL)两大类, 其作用机理具有显著差异性。PE土工膜以高分子聚合物为基材, 通过分子链排列形成致密结构, 具有优异的抗拉强度与延

展性,可适应堤体变形而不易开裂,其致密微观结构能有效阻隔毛细渗流,尤其适用于高水头或复杂地形条件下的连续防渗需求。然而,纯PE膜缺乏自修复能力,对机械损伤或焊接缺陷极为敏感,需依赖高精度施工工艺保障完整性。相比之下,GCL防水毯通过膨润土遇水膨胀形成胶结层,兼具柔性密封与自修复特性,在局部破损时可通过吸附水分再生阻渗功能,且铺设便捷,特别适用于软土地基或生态敏感区。两类材料的协同应用渐成主流趋势:PE膜作为主体防渗层提供连续阻渗面,GCL作为过渡层或局部补强层,通过界面优化形成多重防护体系。值得注意的是,膜材料的耐久性受环境因素制约显著——紫外线照射可能加速材料老化,化学腐蚀会削弱分子链结构,冻融循环可能引发界面脱层。因此,在特殊环境区域需采用抗老化配方或复合防护层。此外,膜上覆土层的级配设计与施工质量直接影响其抗变形能力,过度碾压或尖锐物刺穿可能引发结构性破坏,需同步优化垫层结构并加强质量监控。

2.2 黏土材料体系

黏土材料作为传统防渗介质,凭借颗粒细小($<0.002\text{mm}$)、压实后低渗透性($k<1\times10^{-10}\text{m/s}$)的特性,适用于中低水头($<5\text{m}$)防渗。其压缩性虽高,但通过分层碾压(碾压遍数8~12遍,含水率控制 $\pm2\%$)可形成稳定抗剪强度($c\geq10\text{kPa}$)。然而,黏土性能易受土质成分(如蒙脱石含量 $>30\%$ 时易膨胀)与含水率波动影响,非均质土层中渗透系数可能突变(差异达2个数量级),且抗冲刷能力较弱(临界剪切速率 $<1\text{s}^{-1}$)。现代工程中,黏土常以土石混合形式(掺入30%~50%砂砾石)优化级配,或与土工膜复合使用(如黏土心墙+PE膜覆盖层),在生态敏感区发挥自然降解优势,减少化学污染风险。例如,在河岸护坡工程中,黏土层与植物根系协同固土,既增强抗冲刷能力,又降低断面尺寸需求。但黏土施工仍面临效率瓶颈,分层碾压需严格控制含水率(误差 $<1\%$)以避免“弹簧土”现象,且断面尺寸过大可能增加材料运输成本。为此,部分工程采用土工格栅加筋黏土技术,通过增强界面抗拉强度(提升5~8kPa),减少压实厚度(优化至40~60cm),从而平衡工程经济性与生态效益。

2.3 复合防渗材料体系

复合防渗材料通过多层级协同突破单一材料性能局限,是应对复杂工程条件的优选方案。其核心设计在于融合不同材料优势:例如将高分子聚合物膜的高抗拉强度与膨润土防水毯的柔韧性结合,既可抵抗外部机械荷载,又能适应地基变形;或采用“黏土+防渗膜”叠合结构,利用黏土的低渗透性与膜的密封性形成双重阻渗屏障。此类材料的关键在于界面优化技术,通过黏结剂或过渡层设计解决不同材料间的变形协调问题,避免因热胀冷缩或荷载差异导致剥离失效。在生态敏感区域,复合体系常融入生物降解材料(如植物纤维加筋黏土),降低化学污染风险

并提升自修复能力。然而,复合材料的施工复杂度显著增加,需严格控制各层铺设顺序与压实标准,尤其需关注搭接区域的防渗连续性。其应用场景覆盖高风险堤段、污染防控区及生态修复工程,通过材料适配性设计实现防渗效率与工程经济性的动态平衡。

3 水利工程中堤防防渗施工关键技术

3.1 垂直防渗技术体系

垂直防渗技术通过构建连续阻渗屏障切断堤基渗流通道,适用于处理堤基覆盖层渗透性较强的区域。该技术通过阻断横向渗流路径,降低堤体内浸润线高度,从而提升抗滑稳定性^[1]。深层搅拌桩防渗墙是代表性工艺,通过机械搅拌将水泥浆与原位土体混合,形成具有一定强度的水泥土桩体(28d无侧限抗压强度 $\geq1.0\text{MPa}$),桩体连续搭接宽度 $\geq20\text{mm}$ 后构成墙体,对软土(液限 $>40\%$)、砂壤土地质适应性强,施工效率达20~30m/台班,但需严格控制水泥掺量(15%~20%)与搅拌均匀性(提升速度 $\leq1\text{m/min}$)。高压喷射注浆防渗墙通过高压射流(压力20~40MPa)切割土体,注入浆液(水泥掺量30%~40%)与土颗粒混合固结成墙,可穿透深厚覆盖层(深度 $>30\text{m}$)并适应复杂地层(如礁石、孤石占比 $<10\%$),墙体渗透系数 $\leq1\times10^{-7}\text{m/s}$ 。振动沉模防渗板墙通过高频振动(频率10~15Hz)下沉预制模板并灌注混凝土(坍落度 $180\pm20\text{mm}$),形成渗透系数 $\leq1\times10^{-6}\text{m/s}$ 的板墙,成墙质量稳定(垂直度偏差 $<0.3\%$),尤其适合软土地基中的深水施工(水深 $>5\text{m}$)。垂直防渗技术的核心挑战在于地质适应性,例如在多层含水层中需分层成墙(每层厚度1.5~2.0m),或在深厚砂砾石层中需结合帷幕灌浆(孔距2.0m,扩散半径 $>1.5\text{m}$)。施工中需依托地质雷达(分辨率0.1m)或电阻率成像技术(探测深度 $>30\text{m}$)实时监测墙体完整性,避免因桩体搭接不良(搭接率 $<95\%$)或局部缺陷(孔隙率 $>5\%$)引发渗漏。此外,垂直防渗体系常与水平防渗层协同设计,形成“底部截渗-顶部密封”的立体阻渗网络,例如在防渗墙顶部设置黏土心墙(厚度1.0m,干密度 1.7g/cm^3)以增强整体抗渗能力。针对生态敏感区域,部分工程采用膨润土基浆液替代普通水泥浆,减少化学污染风险,同时提升墙体自修复能力(如膨润土掺量 $\geq20\%$)。未来技术发展需进一步优化材料配比与施工工艺,例如研发快凝低收缩浆液以适应快速成墙需求,或在深厚覆盖层中探索定向钻进防渗墙技术,以降低施工扰动与成本。

3.2 水平防渗技术体系

水平防渗技术通过铺设连续阻渗层切断地表水与堤体的侧向渗流,其核心在于根据工程地质条件选择适配防渗材料与工艺,形成低渗透系数的水平屏障。PE土工膜水平防渗层凭借高抗拉强度($\sigma\geq25\text{MPa}$)与延展性($\epsilon\geq600\%$),可适应堤体不均匀沉降(沉降量 $>30\text{cm}$),尤其适用于高水头($H>20\text{m}$)或地基条件复杂的堤段。铺设时

需采用双缝热熔焊接工艺（焊接温度 $120\sim 140^{\circ}\text{C}$ ，压力 $0.1\sim 0.2\text{MPa}$ ），确保接缝处剪切强度 $\geq 18\text{N/mm}$ ，同时设置保护层（如砂砾石厚度 30cm ，压实度 $\geq 95\%$ ），防止机械损伤（抗冲击强度 $> 50\text{J/m}^2$ ）或紫外线老化（抗紫外线指数 $\text{UPF}>50$ ）^[2]。然而，纯 PE 膜缺乏自愈能力，局部破损（孔径 $>1\text{mm}$ ）可能导致渗漏扩散速率达 $1\times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$ ，因此常与 GCL 防水毯或黏土层复合使用，形成多层级结构。膨润土防水毯作为柔性水平防渗材料，通过膨润土遇水膨胀形成致密封堵层（渗透系数 $\leq 5\times 10^{-11}\text{m/s}$ ），兼具自修复与抗冲刷特性，尤其适合软土地基（承载力 $<30\text{kPa}$ ）或狭窄河道（宽度 $<10\text{m}$ ）的快速防渗，实际工程案例显示其可减少渗漏量达 90% 以上。黏土水平防渗层作为传统工艺，通过分层碾压（碾压遍数 $8\sim 12$ 遍）形成低渗透系数的黏土心墙（ $k\leq 1\times 10^{-10}\text{m/s}$ ），其优势在于材料易获取且能与周边土体自然融合（差异沉降量 $<5\text{mm}$ ），但需严格控制含水率（最优含水率 $\pm 2\%$ ）与碾压标准。现代工程中，土石混合防渗层通过优化砂砾石与黏土的级配比例（如砂砾石占 $60\%\sim 70\%$ ），抗压强度可提升至 500kPa 以上，同时降低材料成本约 30% 。水平防渗技术的选择需平衡工程需求与环境约束，例如在冲刷严重的河岸（流速 $>4\text{m/s}$ ）需结合抗冲刷保护层（如抛石厚度 $>80\text{cm}$ ，粒径 $>200\text{mm}$ ），或在生态修复工程中种植芦苇（根系抗拉强度 $>80\text{MPa}$ ）协同增强抗渗与固土能力。

3.3 组合防渗技术体系

组合防渗技术通过多材料、多工艺的协同作用，突破单一技术的性能局限，是应对复杂工程条件与高标准防渗需求的核心策略。其本质在于将垂直与水平防渗技术有机融合，或通过不同材料的界面优化形成互补性阻渗体系，从而实现“ $1+1>2$ ”的防渗效果。例如，高分子聚合物膜的高抗拉强度与膨润土防水毯的自修复特性结合，前者阻断大部分渗流，后者利用遇水膨胀特性填充接缝缺陷并抵御局部冲刷。与此同时，黏土与高分子聚合物膜的复合应用则通过分层设计实现经济性与抗破坏能力的平衡——黏土层压实后形成低渗透基底，膜作为抗穿刺保护层，既降低施工成本，又提升整体抗破坏能力。在空间布局上，组合防渗技术强调立体阻渗网络的构建：垂直防渗墙阻断堤基深层渗漏，水平防渗层覆盖堤体表层，形成“底部截渗-顶部密封”的闭合体系。此类设计尤其适用于高水头堤段，可同步降低浸润线高度与地表径流冲刷风险。值得注意的是，组合技术的核心挑战在于工艺兼容性——例如

膜焊接与防水毯铺设需分阶段实施，避免施工机械对膜层的碾压损伤^[3]。不同材料的界面渗透特性需通过过渡层设计优化，如在黏土与膜接触面铺设砂砾石，既平衡孔隙水压力，又防止黏土颗粒侵入膜体。这种系统性思维不仅体现在材料与结构的协同上，更贯穿于施工全流程——从地质复核到材料选型，从工艺整合到质量监控，均需围绕“连续、稳定、经济”的目标进行动态调整。组合防渗技术的优势在于其适应性与韧性：在生态敏感区域可融入植物根系固土技术，利用自然材料减少化学污染；在污染防控区通过复合防渗体系阻断污染物扩散路径，兼顾工程安全与生态修复。其价值不仅在于提升单一堤段的防渗效率，更在于通过多维度的体系设计，为高风险堤段、复杂地质条件及生态敏感工程提供兼具可靠性与可持续性的解决方案，最终实现工程安全、社会防护与生态效益的统一。

4 结语

堤防防渗技术的核心在于平衡工程安全、生态保护与社会效益。从材料创新到技术协同，垂直防渗阻断深层渗流，水平防渗覆盖侧向水流，组合技术则通过材料互补与结构联动实现全域渗流管控。高分子聚合物膜、膨润土基防水材料及黏土等材料的特性融合，构建了“刚性-柔性”协同的防渗体系，既抵御极端水文冲击，又降低生态扰动。当前技术仍面临材料长期性能衰减、复杂地质条件下可靠性不足等挑战，未来需聚焦智能化监测（如分布式光纤传感系统实时追踪渗流场）、生态材料研发（如生物基复合材料替代传统高耗能材料）与全周期管理，推动防渗工程向“精准、长效、可持续”升级。例如，荷兰三角洲工程通过智能监测与生态护坡协同，实现防洪标准提升至百年一遇，同时湿地生态恢复率达 75% 。堤防防渗不仅是水利安全的基石，更是人水和谐的实践路径，唯有技术创新与生态理念的深度耦合，方能实现“防洪减灾、资源集约、生态永续”的多重目标，为全球水安全治理提供科学范式。

[参考文献]

- [1] 王印. 水利工程中堤防防渗施工技术的应用研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(19): 96-98.
- [2] 包小红. 水利工程堤防防渗施工技术的应用探讨[J]. 大众标准化, 2024(5): 136-138.
- [3] 蔡慧, 郝世飞. 水利工程堤防防渗施工技术应用探讨[J]. 工程技术研究, 2023, 8(18): 111-113.

作者简介：朱璐（1996—），女，学士学位，当前就职单位：河北省水务中心石津灌区事务中心。