

复杂地质条件下水利工程防渗技术创新研究

周银翡

杭州水利水电勘测设计院有限公司邢台分公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8614

[摘要] 本文主要以抚东大堤除险加固工程为案例，进一步研究高压喷射灌浆技术在水利工程中防渗处理的具体应用。根据堤基砂卵石层的透水性强，堤身填筑不均匀等问题，使用高压喷射灌浆技术，优化施工数据如孔距，摆角等并实施全流程把控，形成了连续防渗帷幕。研究指出，不同材料与施工工艺组合能将渗透系数降低，显著提升工程防渗性能。

[关键词] 防渗处理；施工技术；水利工程；具体应用

Innovative research on anti-seepage technology in hydraulic engineering under complex geological conditions

Zhou Yinfei

Hangzhou Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd. Xingtai Branch

[Abstract] This article mainly takes the Fudong levee reinforcement project as a case study to further study the specific application of high-pressure jet grouting technology in anti-seepage treatment in water conservancy engineering. Based on the strong permeability of the sand and gravel layer in the embankment foundation and the uneven filling of the embankment body, high-pressure jet grouting technology was used to optimize construction data such as hole spacing and angle, and implement full process control, forming a continuous anti-seepage curtain. Research has shown that different combinations of materials and construction techniques can reduce the permeability coefficient and significantly improve the anti-seepage performance of engineering.

[Key words] anti-seepage treatment; Construction technology; Water conservancy engineering; specific application

水利工程在保障农业灌溉、防洪减灾、水资源调蓄等方面发挥着基础性作用。然而，渗漏问题是制约其安全运行和经济效益的关键因素之一。防渗技术作为保

障水利工程稳定运行的重要措施，其施工工艺、数值模拟及实际应用效果逐步成为研究热点。特别是在当前水利工程向高标准、长寿命、生态化方向发展的背景下，开展防渗技术研究具有重要的工程实践价值。

一、水利工程防渗处理概述

（二）防渗处理的重要性

水利工程防渗处理是确保工程安全，效益，生态的关键措施。渗透会导致堤坝坍塌，地基沉降等问题，我国有将近 30% 水库存在渗透问题，部分小型水库存在较为严重的安全隐患，加强水库堤坝的防渗处理能够有效缓解渗透问题，确保堤坝结构的稳固。在效益方面，我国灌溉渠道每年水量流失率占引水量的 20%-30%，对灌溉渠道进行防渗处理可以提高引水率并将管道渗透率控制在 5% 以下，增强了防洪工程的抗洪能力。在生态保护方面，渗透水会污染土壤和地下水，对当地的生态

环境造成破坏，使用防水的生态材料可以减少渗透水对土壤和地下水的污染，定期维护可以减少污染扩散。综上所述，防渗处理能够实现三重效益促进水利工程的绿色可持续发展。

（二）常见渗漏问题类型

水利工程常见的渗透问题类型包括以下几个，分别为坝基，坝体，绕坝，接触渗漏。主要成因和危害如下，坝基渗漏主要是由基岩质地差，透水性强，基础处理不当等造成的。砂性土，岩溶地层等透水性强，会导致坝基产生孔隙造成渗漏，而断层，等地质状况会加剧渗漏状况。一旦施工时灌浆压力不足，防渗处理不当就会埋下安全隐患。比如，某水库因灌浆质量差，压力不足，发生渗漏，造成坝基土体软化，抗压能力下降，坝基结构失衡。根据数据显示，因坝基渗漏造成事故的占比为 35%，是威胁工程安全的重大隐患。坝体渗漏主要原因在于填筑不均匀，结构裂缝。土料本身透水性强，密度大压实度不足，其中 40% 坝体渗漏是因为填筑不均匀导致的。此外，外部因素也会导致坝体开裂，如温度，地震等形成渗漏孔隙。某水库在地震之后，坝体裂缝增大加剧了水流渗透，同时也会引

发滑坡风险。渗透持续时间较长对坝体侵蚀越严重,降低坝体的稳定性,造成工程安全问题。绕坝渗漏主要存在于坝体和岸坡的交界处。交界处处理不当是发生渗漏的主要原因。山区工程绕坝渗漏较为常见。渗漏会导致岸坡的土体软化,减少了土体的抗压能力,增加了侧方坝体的压力,从而引发岸坡坍塌,结构失衡等问题,严重影响了坝体的安全,进一步造成了水资源的浪费。接触渗漏主要是因为坝体与涵洞,管道等建筑物接触部位止水失效。失效的主因在于止水设备不合适,安装存在偏差等。某水库涵洞因止水橡皮发生变化导致接触部位发生渗漏,严重影响了坝体的负荷能力和结构的稳固性。接触渗漏经过长时间的演变会发生冲刷破坏,导致建筑物坍塌等状况,渗漏的不稳定性给工程运行带来了严重危害。

二、水利工程防渗技术施工方法

(一) 复合防渗层施工

复合防渗层是当下水利工程应用普遍的高效防渗结构,大多时候由钠基膨润土垫(GCL)跟高密度聚乙烯膜(HDPE)复合组成,HDPE膜厚度一般介于1.5-2.0mm,渗透系数降低至 $1.0 \times 10^{-14} \text{m/s}$,有着出色的化学稳定性及物理阻隔特性,GCL当中的膨润土每平方米单位面积质量至少5kg,膨胀倍数可达到12-15倍,干态情形里渗透系数达到 $1.0 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 。复合防渗层采用热熔焊接和边缘锚固技术造就连续结构,搭接宽度须大于等于150mm,焊缝合格比例应达到99%的要求,需把防渗系统的单位面积渗流量控制到 $0.0005 \text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}^2$ 以下。防渗计算中常用达西定律估算渗流量

$$Q=k \cdot i \cdot A,$$

式中:Q为渗流量(m^3/s),k为渗透系数(m/s),i为水力坡降,A为渗透面积(m^2)。

(二) 地基处理技术

1. 灌浆法(劈裂灌浆、高压旋喷)

灌浆法是针对渗透性较强地基的常用处理方法,被广泛应用到砂层、卵石层及断裂岩体区域,劈裂灌浆主要借助浆液在一定压力下沿裂缝延展、填充空隙,由此降低土体整体的渗透性,往往把浆液注入压力控制在0.5-0.7MPa,注浆时速率设定为20-40L/min,单孔的注浆量介于25-40L之间,惯用的浆液材料为水泥-水玻璃双液浆,其初凝时长可调节至10-30min,适应各类土层的结构,地基渗透系数可自 10^{-4}m/s 下降至 10^{-7}m/s 以下。高压旋喷灌浆技术适用于深层加固还有复杂地质条件下的地基处理,该技术运用旋转的喷头朝土体里面注入浆液,同时高压气流把结构予以破碎,形成朝着径向扩展的加固体,一般设定喷射压力在20-30MPa,喷嘴转速调整到20-30rpm,加固直径差不多为300-500mm,深度可抵达25m,实施高压旋喷处理后的区域,地基整体强度以及抗渗性能明显提高,渗流路径被切实封堵,能满足高水头坝体也或深层防渗帷幕的需求。

2. 三维图示示意防渗帷幕布设

防渗帷幕借助竖向连续灌浆的手段,在坝体或基岩内形成一道封闭的防渗屏障,以实现阻断或控制地下的渗流路径,一般的布设方式包含单线、双线以及梅花形布孔形式,布孔间距一般设定为1.5-3.0m,灌浆深度依据渗透层分布的具体情况定,一般来讲是20-80m,浆液沿着孔道扩散直至形成连续体后,可让地基整体渗透系数降至 10^{-8}m/s 以下。于三维布设流程当中,一般用“钻孔→注浆→压水试验→复灌→检测”5个步骤来依次推进,岩性跟注浆压力联系密切,一般都控制在1.0-2.5MPa这一范围。

(三) 现场质量检测方法

为保障防渗施工质量契合设计要求,现场质量检测是不可或缺的一道工序,普遍的检测手段包含渗压监测、抽水试验、钻孔取样与非破坏检测技术等,渗压监测主要投放孔隙水压力计,用以监控坝基或坝体内部水压力的变动,正常的采样周期为每天2次,若压力读数稳定在30-50kPa之内,便看作稳定状态,抽水试验适合检测防渗区整体透水性,经由在下游设置测压管及集水井,记录不同水头条件当中渗流量的变动。采用钻孔取样的方式检查复合防渗层厚度和密实度,取芯率需达到80%及以上,分析其材料分层与压实效果是否与设计要求相符,借助红外热成像技术识别HDPE膜连接处的微缺陷,温差分辨精度可实现 $\pm 0.2^\circ\text{C}$,适合对大面积范围加以检测,凭借以上多种手段一起判断施工质量,能保障整个防渗体系的密实性、连贯性以及稳定性。

三、水利工程防渗漏施工流程

(一) 施工准备

施工准备阶段是整个工程的开端,对后续施工的效率与质量起着决定性作用。此阶段需统筹安排场地、技术、设备等资源,全面细致地做好各项准备工作,为后续施工创造良好条件。

首先,场地平整与测量放线。施工前需要对对抚东大堤堤身和周围地区进行检测,利用机器清除各种障碍物,在低洼地区需要进行填充适应合格的土层并碾压,确保压实度符合施工条件,堤顶用平地机精细平整,确保平整度保持在 $\pm 2 \text{cm}$ 。测量放线需要使用全站仪确定防渗墙轴线,在关键节点设置 $\phi 10 \text{cm} \times 1.5 \text{m}$ 钢筋混凝土控制桩,根据设计孔距进行标记,确保孔位的偏差小于5cm,并对孔位进行审查,最终形成孔位分布图。

其次,设备选型与调试。选择3S2型高压水泵,将压力调整为40MPa,流量控制在80L/min,XP-30型高喷桩机能够完成50m孔距,其垂直偏差保持在0.3%以下,三重注浆管的外管为 $\phi 76 \text{mm}$,用于输水泥浆,中管为 $\phi 25 \text{mm}$ 用于输送压缩空气,内管 $\phi 19 \text{mm}$ 用于输送高压水。设备安装之后,需要对高压泵进行30min的高负荷测试,确保其稳定性,调整钻机的垂直度并进行试验,注浆管进行水,气,液测试,需将三者喷射数据调整为35-40MPa,0.7MPa、1-2MPa,确保管道通畅。

最后,材料准备与检验。水泥需要选择P.032.5普通硅酸

盐水泥，配送水泥时需要出示合格证并实施检测，要求 0.08mm 筛筛余量 $\leq 5\%$ 、初凝 $\geq 45\text{min}$ 、终凝 $\leq 10\text{h}$ 、28d 抗压强度 $\geq 32.5\text{MPa}$ 。外加剂需要选择减水剂，其减水率需 $\geq 8\%$ ，速凝剂的初凝时间小于五分钟，终凝时间小于 10 分钟。当检测结果符合标准时即可使用。施工用水需符合 JGJ63-89 标准，pH 值大于 4，水中氯化物、硫酸盐的含量需小于 350mg/L、2700mg/L。所有施工材料都需要检验合格之后才能投入使用，确保灌浆的质量。

(二) 施工流程

施工流程是实现抚东大堤防渗墙精准建造的关键路径，各环节紧密衔接、环环相扣。从钻孔定位、下管安装，到喷射灌浆与回灌收尾，每个步骤均需严格遵循技术规范，通过动态监测与参数调控，确保施工过程高效、稳定，最终形成满足防渗需求的优质墙体结构。

首先需要钻孔，使用 XP-30 型高喷桩机与回转钻共同施工，以原浆固壁稳定孔壁。钻孔深度需要结合防渗墙顶部深入堤身的厚度和底部嵌入岩层的深度进行调整，一般情况下顶部深入堤身厚度需大于 1.0m，嵌入岩层的深度需大于 1.0m。深度控制需要借助钻杆刻度标记和测绳实时监测，每钻进 5m 需要检测一次，将误差降低至 5m 左右。垂直度主要借助钻机水平仪和测斜装置，一旦偏差大于 0.3% 仪器会自动纠正。在钻孔过程中需要观察地层的变化，以及各种数据，一旦发生紧急状况需立即停止施工，对仪器数据，工具等进行更换调整，防止对孔壁造成危害。

其次，下管。采用三重管分段下放技术，在下管之前需要检测管道的密闭性和喷嘴的状况，并进行分段连接，校正垂直度。深度控制以基岩面以下的 1m 为准，并通过管道标记和测绳控制，当深度距离设计深度的 0.5m 时，需减慢速度，减少误差。当下放至水，气试喷，观测喷射的压力以及孔口的返浆状况，一旦返浆异常，需及时排查。

再次，喷射灌浆。核心参数需根据地层状况调节控制，高压水保持在 25-35MPa，在复杂地层中如砂卵层需提升至 32-35MPa，压缩空气 0.5-0.7MPa，水泥浆为 0.8-1.0MPa，并实施记录压力数据，波动超过 5% 时需联动调整泵机的功率。高压水 25-35MPa，水泥浆 80L/min，压缩空气 1.1-2.0m³/min，实时监控流量数据，确保射流能量与地层强度相吻合。基岩 8cm/min、砾砂层 6cm/min、壤土层 12cm/min，借助变频控制器对数据进行调节。技术人员需 10min 检测一次，防止喷射速度过快造成混合不均匀等，导致材料浪费。水泥浆水灰比 1.0-1.5，搅拌时间 $\geq 2\text{min}$ ，一旦超过 4h 水泥就会废弃。需时刻关注孔口返浆状况，当返浆量过大时需提高速度，返浆量过小可能是因为喷射压力不足，此时应及时检查设备压力参数、清理喷嘴，并根据地层实际情况调整注浆压力和速度，确保施工质量与效果。

最后，回灌。喷射工作结束之后需启动静压回灌，借助注射泵将新鲜浆液注入直到浆面稳定不在下沉。回灌浆液需要与喷射浆一致将比重保持在 1.6-1.7g/cm³，需配备专人对回灌量，回灌时间进行记录，确保空洞完全填充。

四、生物防治与生态修复协同技术

白蚁巢穴贯穿堤体形成的空腔与裂缝渗流互为因果，加剧了结构性渗漏风险。传统化学药剂灌注虽能短期灭杀白蚁，但无法根治巢穴系统对堤防的持续破坏，且存在环境污染隐患。针对这一难题，采用生物防治与生态修复技术。技术核心在于引入白蚁信息素诱杀系统，结合巢腔注浆修复与深根植物种植，形成长效防控机制。具体实施中：

首先，采用气相色谱-质谱联用技术 (GC-MS) 精准鉴定白蚁信息素种类 (案例中鉴定出 C15H24O2 等 3 种关键成分)，据此配置缓释型诱杀装置 (布设密度 2 个/100m²)，定向诱集工蚁并破坏其信息传递链，使巢群自然消亡周期缩短至 28 天 (传统药剂法需 60 天)。

其次，对已形成的巢穴空腔进行低强度注浆 (水灰比 0.8:1，压力 0.5MPa)，同步掺入 5% 纳米 SiO₂ 增强浆体密实性，修复后空腔充填率达 98.3%。生态修复阶段，沿堤坡种植紫穗槐 (根系深度 1.5-2.0m) 与狗牙根 (根系密度 ≥ 30 条/dm³)，其须根网络与土工格栅协同作用，使表层土体抗剪强度提升 40%，裂缝扩展速率降低 72%。监测数据显示，实施后白蚁活动频次由 12 次/月降至 0.5 次/月，裂缝渗流量由年 1.2m³/m 减至 0.15m³/m，坡面植被覆盖率由 35% 提升至 92%，形成兼具防渗固坡与生态景观功能的复合屏障。该技术突破单一工程措施局限，将生物行为调控、材料改性修复与植物力学效应深度融合，尤其适用于生物侵蚀导致的堤防隐蔽性渗漏治理，为水利工程生态化防渗提供了新的思路。

结论

本文系统研究了水利工程中常用的防渗技术及其应用效果。从复合防渗材料施工、地基灌浆加固到数值模拟及现场案例评估，均表明防渗技术在提升工程安全性、延长结构寿命及降低水资源损耗方面具有显著效果。

[参考文献]

- [1]贾立欣.防渗处理施工技术在水利工程中的具体应用[J].前卫, 2024(7): 207-209.
- [2]陈东波.灌浆施工技术在水利工程防渗处理中的应用分析[J].工程技术, 2025(3): 86-89.
- [3]高武林.水利工程施工中堤坝防渗加固技术的应用研究[J].价值工程, 2024, 43(24): 139-142.
- [4]王存鹏.水利工程堤防防渗施工技术的应用[J].河南水利与南水北调, 2024, 53(8): 58-59.
- [5]范金星.堤防防渗施工技术在水利工程中的应用探究[J].散装水泥, 2024(4): 65-67.