

黄河下游堤防渗漏处理技术及施工管理关键节点控制研究

韩江涛 石小昊

郑州黄河河务局中牟黄河河务局 河南 郑州 451450

摘 要:堤防渗漏是黄河下游防洪工程中最常见且危害严重的隐患类型,其处理效果直接关系堤防安全与防洪能力。本文立足于黄河下游堤防的工程地质条件与渗漏特征,系统分析堤身渗漏、堤基渗漏及接触带渗漏的主要成因与表现形态,梳理当前主流处理技术(包括劈裂灌浆、高压喷射灌浆、锥探灌浆、铺盖防渗、减压井及导渗沟等)的技术原理与适用条件。在此基础上,重点识别各处理技术施工过程中的关键控制节点,涵盖钻孔定位、灌浆压力与浆液配比、施工顺序、质量检测及异常工况处置等环节,并从全过程质量控制、工序验收、信息化监测与动态调整等维度提出施工管理控制策略。研究认为,渗漏处理成功的关键在于技术方案的针对性选择与关键施工节点的精准管控二者的有机统一。

关键词:黄河下游;堤防渗漏;防渗处理;施工技术;关键节点控制

引言

黄河下游堤防地处宽阔的冲积平原,堤基多为第四系松散堆积层,粉砂、砂壤土及细砂层广泛分布,渗透性强,渗漏问题普遍存在。渗漏不仅造成水量损失,更严重的是可能引发管涌、流土、接触冲刷等渗透破坏,危及堤防整体稳定。历史上黄河下游多次发生因渗漏险情恶化而导致的堤防失事,教训深刻。因此,渗漏处理一直是黄河下游堤防加固和日常维护的重点工作。经过多年实践,黄河下游堤防渗漏处理已形成包含灌浆、铺盖、导渗、减压等多种技术手段的成熟体系。然而,渗漏处理是一项隐蔽性强、影响因素多、质量控制难度大的地下工程。同样的技术方案,在不同工况下的处理效果可能差异悬殊——其分野往往不在于技术本身,而在于施工过程中关键节点的控制是否到位。钻孔偏位、灌浆压力失控、浆液配比失当、施工顺序混乱等看似细微的偏差,均可能导致防渗帷幕出现薄弱带或盲区,使处理效果大打折扣甚至完全失效。本文从渗漏成因与处理技术的系统梳理入手,重点聚焦于施工管理中的关键节点控制,探讨如何通过精细化的过程管理保障渗漏处理技术的有效实施,以期为黄河下游堤防渗漏治理提供理论指导与实践参考。

1 黄河下游堤防渗漏的类型与成因分析

1.1 堤身渗漏的成因与特征

堤身渗漏是指水流通过堤身填土孔隙或裂缝发生的渗透。黄河下游堤防填筑年代跨度大,土料来源不一,压实质量参差不齐,部分老堤段填土松散、干密度偏低,渗透系数较大。更为突出的问题是,堤身中的裂

缝、洞穴和生物孔道为渗流提供了集中通道。此外,不同时期加高培厚形成的新老结合面,若处理不当,往往成为顺层渗漏的薄弱带。堤身渗漏一般表现为背水坡湿润、散浸、沼泽化等,严重时发展为集中渗流和管涌。

1.2 堤基渗漏的成因与特征

黄河下游堤基为多层地质结构,常分布有深厚的粉细砂层或砂壤土透水层,且与黄河水体存在密切的水力联系。当汛期水位升高时,堤基承受的渗透压力增大,若覆盖层厚度不足或透水层与堤后地面连通,则形成渗流通道^[1]。堤基渗漏往往较堤身渗漏更为隐蔽,初期可能无明显表面迹象,一旦渗透坡降超过临界值,管涌即从堤脚或堤后地面突然出现,发展迅速、危害极大。

1.3 接触带渗漏的成因与特征

接触带渗漏发生在堤身与穿堤建筑物(涵闸、管道)的接合部位,或新老堤体的结合界面。由于刚性结构与土体变形特性不一致,接合部位容易产生不均匀沉降和脱开裂缝,形成沿接触面的集中渗流通道。此类渗漏的水力坡降集中,冲刷能力强,常在较短时间内造成严重破坏,是渗漏处理中的重点和难点。

2 渗漏处理的主要技术及其适用条件

2.1 灌浆防渗技术

灌浆是黄河下游堤防渗漏处理应用最广的技术手段,按其原理可分为多种类型。(1)劈裂灌浆是利用压力浆液沿堤身薄弱层面劈开并充填,形成连续防渗帷幕。该技术适用于堤身内部存在松散带、裂缝或不均匀

界面的情况。浆液通常采用水泥粘土浆,通过控制灌浆压力和浆液稠度,使浆脉沿预定方向延伸,最终形成厚度均匀的防渗墙体。其优点是施工简便、成本较低,但对浆液配比和灌浆压力的控制精度要求较高。(2)高压喷射灌浆是利用高压射流冲击切割地层,同时将水泥浆液注入,形成固结体。该技术适用于砂层、砂卵石层等渗透性强的地基,成墙质量可靠,但设备要求高、造价相对较大。在黄河下游堤防中,常用于险工段堤基的垂直防渗处理。(3)锥探灌浆是一种适用于堤身浅层渗漏处理的传统方法,利用锥杆在堤身钻孔后注入粘土浆液,封闭蚁穴、兽洞及裂缝。该方法操作灵活、对堤身扰动小,适用于浅层零星渗漏点的处理,但处理深度有限、防渗范围较小,不宜作为主要防渗手段。

2.2 水平防渗与铺盖技术

当垂直防渗条件受限时,可采用水平防渗措施。粘土铺盖是在堤防迎水坡脚铺设一层低透水性的粘土层,延长渗径长度、减小渗透坡降。铺盖厚度一般不小于1米,宽度根据水头和地基透水层厚度确定^[2]。土工膜铺盖则利用高密度聚乙烯或聚氯乙烯土工膜作为防渗材料,具有重量轻、施工快的优势,但需注意膜下排气和膜上保护层的设置,防止刺破和老化。

2.3 导渗与减压技术

导渗和减压是渗漏处理中“疏”的思路,适用于背水侧渗流出逸坡降偏高的情况。减压井是在堤后一定范围内设置井群,穿透上部弱透水层进入下部强透水层,将承压水有控制地排出,降低堤基渗透压力。导渗沟是在背水坡面上开挖的排水沟,内填反滤料,引导堤身渗水有序排出,避免渗流集中冲刷坡面。

3 渗漏处理施工管理的关键节点识别

3.1 施工准备阶段的关键节点

施工前的准备工作直接决定后续施工的成败,其关键节点包括三个方面。地质复核——利用钻孔取样、原位测试等手段,核验施工区的地层结构、透水层厚度及渗透系数是否与设计相符。黄河下游地质横向变化大,若发现实际地层与设计依据有较大出入,应及时启动设计变更程序调整处理方案。材料检验——水泥、粘土、膨润土等灌浆材料以及土工膜的进场检验,核对其品种、规格和性能指标是否满足设计要求,不合格材料严禁入场。设备调试与参数标定——灌浆设备(搅拌机、灌浆泵、高压泵)的计量器具须经标定,确保压力表、流量计读数准确可靠,这是后续所有质量控制的前提。

3.2 灌浆施工过程的关键节点

灌浆施工的过程控制节点最为密集,主要包括以下环节。

3.2.1 钻孔定位与孔斜控制

孔位偏差应控制在设计允许范围内(一般不超过 ± 5 厘米),钻孔深度须穿透透水层进入相对隔水层一定深度。孔斜度直接影响防渗帷幕的有效搭接,需使用测斜仪在钻孔过程中定时检测,发现超偏及时纠斜或补孔。

3.2.2 灌浆压力与流量控制

灌浆压力是控制浆液扩散范围和防止地层劈裂失控的核心参数。起灌压力应较小,随后分级提升至设计值,每级压力的升幅和稳压时间应根据吸浆率动态调整。严禁一次性升压过高导致地层破坏。流量记录应与压力同步,异常突变(如压力骤降伴随流量陡增)往往意味着发生了劈裂或串浆,应立即限流或暂停灌浆。

3.2.3 浆液配比与密度控制

浆液的配比(水固比、水泥与粘土比例、膨润土掺量)应根据地层孔隙特征和渗透系数现场确定,并根据灌浆过程中的吸浆情况适时调整。浆液密度应每10~15分钟检测一次,确保实际密度与设计值偏差控制在 $\pm 2\%$ 以内^[3]。浆液存放时间不得超过初凝时间,否则应予废弃。

3.2.4 灌浆顺序与施工分段

对于连续防渗帷幕,灌浆孔应分序施工——先施工I序孔,间距较大(形成初步骨架),再施工II序孔加密(填补中间),最后视情况施工III序孔(局部补强)。分序施工可有效避免串浆和地层破坏,保证帷幕的整体连续性。

3.2.5 终灌标准判定

当灌浆孔在达到设计压力后,吸浆率持续低于规定阈值(如小于 $0.4\text{L}/(\text{min}\cdot\text{m})$)并稳定30分钟以上,且灌入浆量达到设计估算量的80%以上时,可视已达到终灌条件。终灌前须进行压力闭浆,防止浆液回涌。

3.3 质量检验与异常工况处置的关键节点

质量检验是验证处理效果的核心手段。灌浆结束后的质量检验关键节点包括:钻孔取芯检查(观察浆脉充填的连续性和厚度)、压水试验测定渗透系数(应不大于设计防渗标准)、物探检测(如跨孔CT)检查幕体的完整性和均匀性。异常工况的处置包括冒浆、串浆、吸浆量过大、压力异常等情况的快速判别和妥善处理,应事先编制异常工况处置预案,明确各种情况的应对措施和决策权限。

4 施工管理关键节点的控制策略

4.1 全过程质量控制体系的建立

针对上述关键节点,建立“事前预防—事中控制—事后检验”的全过程质量控制体系。事前编制详细的施工质量控制计划和作业指导书,将每个关键节点的控制要求、检测方法、责任人及记录格式逐一明确。事中实行“三检制”——操作人员自检、班组复检、质检员专检,每道工序经专检合格后方可进入下道工序。事后按照设计要求的检测方法和频率进行全面质量检验,检验结果作为验收依据。所有质量记录和数据须及时整理归档,做到可追溯、可核查。

4.2 分层分段验收与工序交接管理

灌浆施工具有隐蔽性和不可逆性,分层分段验收是质量把控的重要手段。将灌浆工程按桩号划分为若干验收单元(一般每50米或100米为一个单元),每个单元灌浆完成后即组织阶段验收,验收合格后方可进行相邻单元的施工^[4]。工序交接实行“书面交接单”制度——钻孔工序完成验收后向灌浆工序交接、灌浆完成后向检验工序交接,交接单中需注明已完成工作和存在的遗留问题,明确责任主体,防止工序间的推诿和遗漏。

4.3 信息化监测与动态反馈调整

引入信息化监测手段,提升关键节点控制的精准度和时效性。在灌浆施工中,安装灌浆自动记录仪,实时采集并记录每孔的灌浆压力、流量、密度和时间曲线,数据自动上传至管理平台。当参数越限时,系统即时向施工员和监理推送预警信息。施工技术人员根据记录曲线分析每孔的灌浆响应特征,判断是否存在异常并及时调整相邻孔的施工参数。通过“一孔一分析、一段一调整”的动态控制策略,使每根灌浆孔的施工方案都基于前序孔的实际反馈进行优化,实现从“按设计施工”到“按地层反应施工”的升级。

4.4 关键岗位技能认定与操作标准化

关键节点的控制质量最终依赖操作人员的技术水平。对灌浆机手、司泵人员、浆液配制人员等关键岗位实行专项技能培训和考核认定,未经培训考核合格者不得独立操作。建立标准化的操作流程卡片,悬挂于各作业工位,使每个岗位的操作人员清楚知晓本岗位的关键控制参数和异常情况的第一反应措施。对高频出现的操作偏差(如浆液密度检测不准、升压过快、终灌标准把

握不当)进行专题分析和纠正,将易错环节的防范措施固化为标准操作动作。

4.5 应急预备与异常工况的快速决策机制

渗漏处理施工中异常工况难以完全避免,关键在于建立快速响应机制。在开工前,应针对可能出现的冒浆、串浆、大量漏浆、压力异常、设备故障等典型异常工况,编制应急处置预案,明确每种异常现象的判别标准、处理措施、所需材料和决策权限。现场储备足量的应急材料(如速凝剂、堵漏材料、备用注浆管),确保异常发生时能在30分钟内启动应急响应。建立异常工况的“即时上报—快速会商—现场决策”机制,赋予现场技术负责人适度的决策权限,避免因层层请示而错失最佳处理时机。

结束语

黄河下游堤防渗漏处理是一项技术与管理高度融合的系统工程。本文从渗漏成因与类型出发,系统梳理了灌浆防渗、水平防渗及导渗减压等主要处理技术的特点与适用条件,在此基础上重点剖析了施工管理中钻孔定位、灌浆压力与浆液配比、施工顺序、质量检验及异常处置等关键节点,并从全过程质量控制体系、分层验收、信息化监测、岗位培训和应急机制等维度提出了系统化的控制策略。核心认识在于:渗漏处理技术的有效性不仅取决于方案本身的合理性,更依赖于施工过程中每一个关键节点的精准控制。技术提供的是“做什么”,而节点控制管理解决的是“如何确保做到位”。二者缺一不可。黄河下游堤防渗漏问题复杂多样,未来还应注重各类处理技术的综合比选与组合应用,将隐蔽工程的透明化管理与施工数据的深度分析进一步结合,推动渗漏处理从“经验施工”逐步走向“数字施工”。

参考文献

- [1] 张金良,李勇,王卫东.黄河下游堤防渗透特性与防渗加固技术研究[J].人民黄河,2022,44(11):1-6.
- [2] 刘建伟,陈刚,赵宇.堤防劈裂灌浆技术应用效果与质量控制研究[J].水利水电工程学报,2023(4):102-110.
- [3] 王立成,周明,孙涛.高压喷射灌浆在砂层地基防渗中的应用与参数优化[J].岩土工程学报,2024,46(3):532-539.
- [4] 陈晓东,张华,杨磊.堤防渗漏处理施工质量全过程控制方法研究[J].水利水电技术,2023,54(10):78-85.