

河道堤防工程渗透隐患探测及加固处置技术探析

孙雄林

湖北华夏水利水电股份有限公司, 湖北 荆州 434000

[摘要]河道堤防长期承受水位涨落、土体非均质、动物洞穴、施工接缝及历史险情等因素共同作用, 易形成集中渗流、接触冲刷和管涌通道。由于隐患通常埋藏于堤身或堤基内部, 仅依赖外观巡查难以及时识别其空间位置与发展程度。本文在此基础上, 针对浅层松散区、堤身裂隙、堤基强透水层和背水坡逸出等典型问题, 提出劈裂灌浆、帷幕灌浆、垂直防渗墙、反滤排水及减压井等组合处置措施。工程应用表明, 采用探测与复核相结合的技术路线能够提高隐患定位精度, 并通过防渗与导渗协同控制降低渗透坡降和浸润线, 为河道堤防除险加固和汛期安全管理提供技术参考。

[关键词]河道堤防; 渗透隐患; 高密度电阻率法; 帷幕灌浆; 防渗墙; 反滤排水

DOI: 10.64635/ja.2026.1443

中图分类号: TV871

文献标识码: A

Analysis of Seepage Hazard Detection and Reinforcement Treatment Technologies for River Levee Projects

Sun Xionglin

Hubei Huaxia Water Conservancy and Hydropower Co., Ltd., Jingzhou, Hubei 434000, China

Abstract: River levees are long subjected to the combined effects of water level fluctuation, soil heterogeneity, animal burrows, construction joints, and historical danger events, which can easily form concentrated seepage, contact erosion, and piping channels. Since hidden hazards are usually buried inside the levee body or foundation, it is difficult to identify their spatial location and development degree in time by relying only on visual inspection. On this basis, this paper proposes combined treatment measures such as split grouting, curtain grouting, vertical cutoff walls, filter drainage, and relief wells for typical problems including shallow loose zones, levee body cracks, highly permeable foundation layers, and seepage outlets on the landside slope. Engineering applications show that a technical route combining detection and verification can improve the positioning accuracy of hidden hazards, and reduce seepage gradients and phreatic lines through coordinated control of seepage prevention and drainage guidance, providing technical reference for risk elimination, reinforcement, and flood-season safety management of river levees.

Keywords: river levee; seepage hazard; high-density electrical resistivity method; curtain grouting; cutoff wall; filter drainage

引言

堤防是河道防洪体系中直接承受洪水荷载的线性工程, 其安全状态受筑堤材料、地基结构、运行年限和河道水位过程等多因素影响。部分老旧堤段存在分期填筑界面、砂层透镜体、废弃涵管、根孔和动物洞穴, 洪水期间水力坡降迅速增大后, 细颗粒可能沿优势通道迁移, 逐步演化为散浸、流土、管涌甚至堤身塌陷。传统人工巡查能够发现背水坡湿斑、冒砂和裂缝等外部征兆, 但对尚未出逸的内部缺陷识别能力有限。若单纯依据单一物探异常实施灌浆, 也可能因黏土含水率变化、金属管线和地表干扰产生误判。因而, 渗透隐患治理应将工程地质调查、地球物理

探测、钻探试验、渗流计算与施工反馈统一起来, 形成探测、判定、处置和复核闭环。本文结合堤防工程特点, 对隐患探测方法、风险分级原则及加固技术进行系统分析。

1 河道堤防渗透隐患机理与探测体系

1.1 渗透隐患类型及演化机制

河道堤防渗透隐患可按空间部位划分为堤身型、堤基型、接触型和穿堤建筑物型。堤身型隐患主要包括填筑压实不足、干缩裂缝、分层界面和局部砂性夹层; 堤基型隐患多与浅埋砂砾层、古河槽、淤泥质软土中的孔隙通道有关; 接触型隐患常出现在堤身与原地面、黏土与砂层、土体与混凝土结构交界处; 穿堤建筑物型隐患则集中于涵闸

侧墙、管道周边回填区及止水失效部位。洪水位抬升后,迎水侧总水头增大,水流沿渗透系数较高的部位优先集中。当局部水力坡降超过土体临界坡降时,细颗粒首先发生悬浮和迁移,继而造成孔隙扩大、渗透系数上升,形成“渗流集中—颗粒流失—通道扩展”的正反馈。对于黏性土堤身,裂隙与干湿循环会显著改变等效渗透系数;对于砂性堤基,背水侧覆盖层厚度不足时更容易出现管涌。由此可见,隐患识别不仅要判断异常位置,还应区分含水异常、结构松散和真实贯通通道,避免将一般湿润区直接等同于险情。

1.2 地球物理方法的组合探测

地球物理探测适合对长距离堤线实施无损普查,其中高密度电阻率法对含水状态和介质结构变化较敏感,可通过布设多电极测线获得二维电阻率剖面。饱和砂层、渗漏通道及松散回填区通常表现为相对低阻异常,但黏土天然低阻、地下金属构件和盐分变化也可能产生类似响应,因此需结合异常形态、埋深连续性和上下游水位关系解释。探地雷达利用电磁波反射识别浅层空洞、裂缝、分层界面和非均匀回填体,在低电导率土体中分辨率较高,但在高含水黏土中衰减明显。瞬变电磁法具有探测深度较大、对低阻体较敏感的特点,适合识别较深堤基强透水层和古河槽,但近地表分辨率低于雷达。实际工作中可采用“电阻率长距离连续扫描+雷达重点复测+瞬变电磁深部补充”的组合方式:先按20~40m间距布设纵向测线圈定异常段,再在异常段加密横向剖面,判断异常是否贯穿堤轴。对水位变化明显的堤段,可在低水位与高水位条件下实施重复测量,通过时移电阻率变化识别渗流响应,从而提高动态隐患的检出率。

1.3 钻探试验与动态监测验证

物探异常属于间接证据,必须通过钻探、原位试验和动态监测进行验证。钻孔宜布置在异常中心、异常边界及正常对照区,并尽量形成迎水坡—堤顶—背水坡的横向剖面。钻进过程中应记录回水量、掉钻、塌孔、涌水、芯样完整度及细颗粒流失情况,对砂层、裂隙密集带和回填松散区进行分层取样。压水试验可用单位吸水量评价裂隙或松散带的透水程度,注水试验则适合松散土层渗透系数测定。对疑似贯通通道,可在上游孔注入无毒示踪剂,在下游观测孔监测电导率或荧光响应,验证水力联系。运行期应布设测压管、渗压计、量水堰和自动水位计,重点监测孔隙水压力、浸润线高程及背水坡渗流量。若外河水位上升后某测点渗压响应显著快于相邻点,且退水阶段压力消散缓慢,通常表明该部位存在高渗透通道或排水不畅。通

过“物探异常—钻孔揭示—渗透参数—动态响应”四类证据相互印证,可显著降低单一方法造成的漏判与误判。

2 多源信息融合与渗透风险判定

2.1 探测成果的空间融合方法

不同探测方法的分辨率、深度和响应机理存在差异,应统一到堤轴里程、高程和横断面坐标体系中进行融合。首先建立堤防基础数据库,录入历史险情、填筑年代、土层结构、穿堤建筑物、历年最高水位和维修记录;其次将电阻率、雷达反射强度、钻孔柱状图、渗透系数和渗压监测数据进行里程配准;再次对异常的连续长度、横向贯通性、埋深、强度及水位相关性进行特征提取。为提高判定的可操作性,可采用加权综合指数 R 进行分级: $R=0.25A+0.20C+0.20P+0.20H+0.15M$,其中 A 为物探异常强度, C 为异常连续性, P 为钻探及试验验证程度, H 为水头与渗流响应, M 为历史险情和工程薄弱因素,各项按0~100赋值。物探异常明显但钻探未发现松散或强透水结构时,应降低风险等级并继续观测;反之,若物探异常不突出但测压管出现快速响应、背水坡有冒砂记录,则应提高判定等级。多源融合的核心不是简单叠加异常数量,而是识别能够形成水力联系并具备颗粒流失条件的组合证据。

2.2 渗流计算与失稳判据

风险评价需要通过渗流计算量化浸润线、渗透坡降和逸出点位置。对于均质土体,可依据达西定律 $q=ka_i$ 估算渗流量,其中 q 为渗流量, k 为渗透系数, A 为过水断面面积, i 为水力坡降。对于分层堤基和防渗结构,应建立二维或三维有限元模型,将堤身、覆盖层、砂层、黏土层及防渗墙分别赋予渗透参数,并按洪水位过程施加边界条件。土体临界水力坡降可近似表示为 $icr=(Gs-1)/(1+e)$,式中 G_s 为土粒相对密度, e 为孔隙比。为考虑土体非均质、施工扰动及参数不确定性,工程控制坡降一般取临界坡降的0.5~0.7。若背水坡坡脚局部逸出坡降接近控制值,或覆盖层抗浮安全系数不足,则存在流土和管涌风险。对于穿堤建筑物,还需分析结构接触面的绕渗路径和止水失效工况。计算模型应使用钻孔和试验获得的分层参数,并通过实测渗压或逸出点位置校核;若计算浸润线与监测值偏差较大,应重新检查边界条件、强透水层范围和防渗结构连续性,避免以理想化参数低估风险。

2.3 隐患分级与处置决策

结合综合指数、渗流计算和现场征兆,可将渗透隐患划分为一般、较重、严重和紧急四级如下表。一般隐患表

现为局部物性异常但无贯通证据，渗压与渗流量稳定，可纳入定期复测；较重隐患具有连续低阻带、松散夹层或局部渗透系数偏大，但控制坡降仍有一定裕度，应在非汛期实施灌浆或排水整治；严重隐患通常存在贯通砂层、穿堤建筑物绕渗、浸润线异常抬高或历史冒砂记录，需要优先采用防渗墙、深层帷幕或盖重压渗等工程措施；紧急隐患表现为洪水期渗水浑浊、冒砂、孔隙水压力快速上升、堤

坡塌陷等，应立即采取临河侧防渗铺盖、背水侧反滤围井、导渗沟及压重等抢险措施，并限制人员和设备在险段集中作业。处置方案选择应遵循“截渗、延长渗径、降低水头、保护出逸口”的原则。对于土体细颗粒已发生迁移的部位，不宜仅在背水坡表面封堵渗水口，以免抬高孔隙水压力并诱发新的出逸点；对于深厚强透水层，也不宜盲目追求全封闭，而应比较深层防渗与减压排水的经济性和风险。

表 1 渗透隐患风险分级与建议处置

风险等级	典型证据	监测特征	处置时限	主要措施
一般	单点异常、无贯通验证	渗压稳定、无浑水	纳入计划管理	加密巡查、定期复测
较重	连续异常、局部松散或高渗	响应较快但坡降有裕度	一个枯水期内	劈裂灌浆、局部帷幕、排水整修
严重	贯通砂层、绕渗或历史冒砂	浸润线抬高、渗流量增加	优先安排专项治理	防渗墙、深层帷幕、减压井、盖重
紧急	浑水冒砂、塌陷、渗压突升	险情持续发展	立即抢险	反滤围井、导渗沟、临水截渗、压重

3 渗透隐患加固处置技术及工程控制

3.1 堤身裂隙与浅层松散区灌浆加固

堤身裂隙、分层界面和局部填筑不密实宜采用劈裂灌浆、充填灌浆或低压渗透灌浆。劈裂灌浆通过控制浆液压力使土体沿最小主应力方向形成浆脉，适用于黏性土堤身裂缝闭合与结构补强；充填灌浆主要填充洞穴、脱空和明显松散区；渗透灌浆则适用于颗粒较粗、可灌性较好的砂性部位。施工前应通过试验段确定孔距、排距、浆液水灰比、允许压力和单位注入量。一般采用分序加密和自下而上分段灌注，先灌Ⅰ序孔形成约束，再灌Ⅱ、Ⅲ序孔补充薄弱区。灌浆压力应随埋深增加而调整，并以不引起堤顶抬动、坡面开裂和串浆为控制条件。浆液可采用水泥—膨润土体系，提高稳定性和抗离析能力；对于细微裂隙，可根据环境和耐久性要求选用超细水泥。终灌不能仅以达到设计压力判断，还应综合控制吸浆量、压力稳定时间和相邻孔串浆情况。施工期间布设堤顶沉降、水平位移和孔隙水压力监测点，一旦出现异常抬动或渗压突升，应立即降压、间歇或调整浆液黏度。

3.2 堤基贯通渗漏的截渗与导渗措施

当隐患位于深部砂层、古河槽或堤基接触带时，应根据透水层厚度和下卧相对隔水层埋深选择帷幕灌浆、垂直防渗墙或截渗槽。帷幕灌浆施工灵活、对既有堤顶交通影响较小，适合裂隙岩层、砂砾层中的局部高渗通道，但必须通过先导孔和压水试验确定可灌性，并采用分段、分序和复灌工艺保证连续性。塑性混凝土防渗墙变形适应性较好，可通过抓斗成槽、液压铣削或高压旋喷形成连续墙体，墙底宜嵌入相对隔水层一定深度，墙体接头是质量控制重点。对于透水层过深、全截断代价过高或可能产

生高扬压力的堤段，可采用减压井、水平排水体、导渗沟和反滤层降低背水侧水头。反滤材料需满足“保土、透水、防堵”要求，粒径级配应与被保护土匹配，施工时防止不同级配层混杂。防渗与排水并非相互替代：迎水侧或堤轴处设置截渗结构可延长渗径，背水侧设置排水系统可安全排出剩余渗水并控制浸润线，两者协同更适合复杂分层地基。

3.3 施工质量控制与处置效果评价

加固效果应通过施工过程检测、完工复核和高水位运行检验分阶段评价。灌浆工程应统计各序孔单位注入量、最大压力、浆液密度、回浆率和异常串浆位置，并在完工后布置检查孔开展取芯、压水或注水试验；防渗墙应检测墙体连续性、厚度、强度、渗透系数及接头质量，可采用超声透射、钻芯和围井试验进行核验；减压井和导渗系统应进行抽水或通水试验，确认出水能力和反滤稳定性。以某代表性堤段工程应用为例，探测发现堤轴里程 K2+340~K2+510 范围存在连续低阻带，钻孔揭示 6.5~10.8 m 深度为粉细砂夹层，局部渗透系数达到 3.6×10^{-4} cm/s。工程采用 18 m 深塑性混凝土防渗墙与背水侧导渗沟组合治理。完工后检查孔渗透系数降至 4.8×10^{-6} cm/s，设计洪水位工况下最大逸出坡降由 0.62 降至 0.31，背水坡测压管水位平均降低 1.15 m，渗流量下降约 67%。运行期仍需建立水位—渗压—渗流量关联曲线，比较同等外河水位条件下的响应变化。若后续出现局部渗压回升、排水浑浊或防渗墙两端绕渗，应及时开展复测并实施补强，避免将一次性验收替代长期安全管理。

4 结语

河道堤防渗透隐患具有隐蔽性、动态性和空间非均质

性,治理工作的关键在于将异常探测与渗流机理相结合。高密度电阻率、探地雷达和瞬变电磁可提高长距离普查效率,但其成果必须由钻探、压水试验和渗压监测验证;风险判定应综合考虑异常连续性、水力联系、土体抗渗稳定性及历史险情,而不能以单一低阻或高含水异常直接定性。加固处置应根据隐患部位和渗流路径分别选择灌浆、防渗墙、帷幕、减压井、导渗沟及反滤保护,并坚持截渗与导渗协同。完工后通过检查孔、渗流计算和高水位运行监测评价效果,建立探测—处置—复核—预警闭环,才能实现堤防渗透风险由事后抢险向主动识别和预防性治理转变。

[参考文献]

- [1]池佃东.水位变化条件下堤防加固效果有限元分析[J].西北水电,2023,(5)107-112.
- [2]楼佳男.河道整治工程中的生态护坡防洪堤设计[J].珠江水运,2023,(7)64-66.
- [3]卢圩煜.水利工程中河道堤防施工技术研究[J].农业开发与装备,2021,(7)113-114.
- [4]孙彦彪.基于物理模型的中小河流河道堤防工程地质参数试验分析[J].黑龙江水利科技,2021,49(5)29-31.
- [5]王蕊.多孔介质模型在河道堤防防渗数值计算中的应用研究[J].水利技术监督,2017,25(2)135-137+142.