

水利工程堤防渗漏问题与防渗漏加固施工技术

陈闯¹ 杨杰¹ 张良² 袁鹏¹ 李鹏举¹

1 宿迁市水务勘测设计研究有限公司, 江苏省宿迁市, 223800;

2 宿迁市水利局, 江苏省宿迁市, 223800;

摘要: 堤防渗漏是水利工程运行期最常见且危害性最强的病害之一, 其形成受地质结构、施工质量与运行环境等多因素耦合控制, 具有隐蔽性强、发展迅速与破坏链条复杂等特征。本文在系统分析渗漏成因的基础上, 结合典型工程实例, 对浅层散浸、深层渗透以及结构裂缝渗流等多类型险情进行了综合诊断, 明确了地基透水性差异、堤身压实度不足、施工接缝缺陷与生物破坏等主控因素。文章进一步探讨堤体加固、基础加固与防渗处理等关键技术, 并总结饱和区堵漏、渗水存在区加固、渗漏源封堵及综合修复措施的适应条件与治理机理, 对完善堤防安全运行机制与提升水利工程防灾能力具有重要指导意义。

关键词: 堤防渗漏; 防渗加固; 渗流控制; 水利安全

DOI: 10.64216/3080-1508.26.01.091

引言

堤防作为水利体系中承担防洪减灾任务的关键工程, 其结构稳定性直接关系到沿岸区域的生命财产安全。在堤防的常见病害中, 渗漏问题因隐蔽性强、破坏速度快和处置难度大, 被认为是威胁堤防安全的首要因素。渗漏一旦形成, 不仅会引发管涌、淘刷与土体软化, 还可能导致堤基承载力衰减, 使堤体在高水位期发生整体滑塌。

1 水利工程堤防渗漏的原因分析

1.1 地质条件对堤防渗漏的影响

地质条件是决定堤防渗漏发生与发展趋势的关键因素之一。堤基所在区域的土层结构若呈现明显的不均匀性, 渗流路径往往会沿软弱夹层或砂性土层开展, 使渗漏在局部位置形成集中发展。砂质或粉砂质地层孔隙发育且渗透系数较大, 在高水位作用下容易发生渗流突进, 从而诱发管涌或渗透变形。若地层中存在透水性强的砾石层, 也会让渗流压力迅速传递, 使堤体承受额外的稳定性挑战。地下水位变化同样影响渗流分布, 当枯水期地下水位下降形成不稳定压差时, 堤体内外的水力梯度变化会导致潜在渗漏路径逐渐扩展。在部分河段, 河漫滩地带地下水埋深较浅, 一旦洪水来临, 堤基受渗流压力影响会更为显著, 极易在堤脚形成溢水点^[1]。此外, 岩溶地貌、断层破碎带和可溶性矿物发育区域的天然孔洞和裂隙结构, 会为渗流提供天然通道, 使防渗结构难以形成完整封闭效果。

1.2 施工质量对堤防渗漏的影响

堤防建设质量直接影响后期渗漏发生的概率与程度。在施工过程中, 如果堤身填筑材料未严格控制含水量、颗粒级配与压实标准, 土体将出现孔隙偏大或密度不足的情况, 使渗流更易在堤身内部发展。同时, 施工分层厚度不均或压实机械行走路线不连续, 也会形成局部强度薄弱区, 日后在高水位作用下可能演变为渗漏集中点^[2]。防渗体结构如黏土心墙、防渗墙或截水帷幕若施工接缝处理不当, 将在结构连接部位产生薄弱环, 水流沿缝隙渗透会逐步扩大通道, 从而破坏整体防渗效果。对于浆砌石或混凝土结构, 如果砂浆饱满度不足、混凝土浇筑不密实或存在蜂窝麻面, 也容易形成隐蔽渗透路径。运行中观察到的许多渗漏案例都与施工期的质量控制不到位有关, 例如施工季节选择不当导致土体含水量难以控制, 或因赶工造成压实度不达标。若施工阶段未严格执行质量检验制度, 就会遗留不可逆的结构隐患, 使堤防在长期运行中更易遭受渗流破坏。

2 堤防渗漏的处理措施

2.1 堤防加固与防渗处理技术

2.1.1 堤体加固

堤体加固主要侧重于提高堤身土体的密实度、强度与稳定性, 阻断渗流通道并恢复结构完整性。在加固过程中, 常采用黏土回填、砂砾料填筑与透水性材料组合构成分层加固体, 使不同材料的力学性能相互补充, 从而形成稳定的渗流梯度。当堤身内部存在空洞或松散区

域时,可通过注浆技术提升内部密实度,浆液在压力作用下填充孔隙,使原有潜在渗漏路径被有效封堵。对于堤身整体强度不足的河段,采用堤坡加宽与堤顶加高的方式可以提升抗滑与抗渗能力,使堤身在高水位下更稳定。部分工程还会在堤身内部设置反滤层或排水沟,通过引导渗流有序排出,减少渗流对结构的不利影响^[3]。

2.1.2 基础加固

基础加固是渗漏治理中的关键措施之一,其目标在于提高堤基整体承载力与抗渗能力,防止渗流在深部形成集中通道。对于透水性强的砂层或砾石层,可采用深层搅拌桩、高压旋喷桩或黏土帷幕构筑连续封堵带,使渗流路径在纵向与横向均受到限制。当堤基存在软弱层或松散结构时,通过换填、压实或强夯技术改善土体密度,使渗流在进入堤基前已得到有效衰减。对于存在天然裂隙或溶洞的地基,应采用注浆加固技术提高结构完整性,浆液可沿裂隙扩散并形成封堵体,从而显著减少渗漏风险。若堤脚区域受河床冲刷影响较大,可通过铺设反滤垫层与加固护脚结构提升抗冲能力,避免进一步造成基础暴露。

2.1.3 堤防的防渗处理技术

堤防防渗技术的核心在于建立连续、稳定且适应性强的防渗体系,使渗流在结构内部受到有效控制。常用防渗方式包括黏土心墙、混凝土防渗墙、塑性混凝土墙、高压旋喷桩防渗帷幕以及土工膜复合防渗结构等。黏土心墙适用于大部分黏性土堤防,具有施工简便与材料易得的特点,可有效降低渗透系数。混凝土与塑性混凝土防渗墙具有良好的整体性与抗渗能力,适用于深层地基渗透强或河床冲刷显著的河段。土工膜及其复合防渗系统因施工速度快、适应性强,可在坡面或堤身内部形成连续防渗层,对局部渗漏具有良好控制效果。

2.2 堤防渗漏修复的常见措施

2.2.1 饱和区堵漏技术

饱和区堵漏技术主要用于处理堤体内部因长期渗流导致的饱水区域,该部位通常含水量高、结构松散,若不及时处理会形成渗流集中路径并引发渗透变形。堵漏的核心目标是在饱和区内形成稳定封堵体,使渗流水头得以削减并阻断渗流通道。常用技术包括浆液注入、黏土压填和强度型材料补强等。浆液注入是应用最广的方式,通过控制浆液扩散范围和凝固速度,使浆液在饱和层中形成连续固结体,从而提高局部密实度。对于水

分含量高的饱和土体,需采用适应性强的浆液体系,以避免因浆液被稀释导致堵漏效果不理想。黏土压填则适用于浅层饱和区,通过多次填压提高局部土体密度,使渗流路径得到有效切断。该技术通常与反滤层构建结合使用,以防止因压力变化导致渗流重新发育。此外,在饱和区堵漏过程中还应关注结构应力变化,避免因封堵速度过快形成新的水力差异,从而影响堤体整体稳定性。

2.2.2 渗水存在区加固处理

渗水存在区是指堤体内部已经出现连续湿润带或渗水点的区域,该部位通常具有较高的水力梯度且土体强度下降明显。因此加固处理的重点在于恢复其力学性能并稳定渗流结构。常见加固措施包括压力灌浆、反滤体构筑、局部换填与堤坡加宽等方式。压力灌浆通过浆液渗入土体空隙,使原有渗水路径被有效封堵,同时提高土体密度与整体强度。反滤体构筑则适用于堤脚渗水区域,通过多级粒径材料形成反滤层,可将渗流引导至外排区,使渗透压力得到有效释放。对于已出现明显土体松动或渗水范围较大的区域,可采用局部开挖与换填处理,移除劣质土体后采用黏土或级配料进行重新填筑,使堤体在受力与渗流方面恢复稳定状态。当渗水区位于堤坡表层且渗流可能导致坡面冲刷时,可采取堤坡加宽与坡面整修技术,提高堤坡整体抗渗与抗滑能力。

2.2.3 渗漏源处理

渗漏源通常是堤防渗漏发展最关键的部位,它是形成渗流路径的起点,也是治理过程中最需重点控制的区域。渗漏源往往位于堤基薄弱层、堤身结构裂缝或与渗透性强的地层接触部位。处理渗漏源的关键在于切断渗流驱动力,使渗流量大幅下降并阻止其向堤体深部扩展。常用方法包括深层灌浆、截水帷幕构筑与渗漏点封盖处理。深层灌浆适用于渗漏源范围较大或位于深部的区域,通过浆液压力注入构建固结体,使渗流路径被封闭。截水帷幕技术则适用于渗漏源与透水层相连的情况,通过混凝土或塑性材料形成连续防渗界面,使渗流无法继续向堤体内部渗透。对于浅层渗漏源,可通过黏土封盖、压实填筑和坡面回填等方式恢复堤体表层的防渗结构。在处理渗漏源时,还需结合河势与水位变化分析渗流压 力波动,避免因水力梯度突然改变而引发新的渗漏问题。

2.2.4 综合修复措施

由于多数堤防渗漏具有多因素叠加的特点,单一治理技术往往难以完全解决问题,因此综合修复措施成为处理渗漏最有效的策略。综合修复通常包括堤体加固、

防渗结构构建、渗流疏导与坡面稳定处理等多项措施的协同应用。针对复杂渗漏，可在深部采用截水帷幕或深层灌浆封堵渗流源头，在堤身内部通过注浆或换填提高土体密实度，在堤脚区域增设反滤层与排水沟，使渗流得以安全排出。对于渗漏导致的局部变形，可增加堤坡加宽与坡面防护措施，使堤体整体稳定性恢复。在生态敏感区域，还可结合植被护坡技术，使坡面既具备抗渗能力，又具有生态恢复功能。综合修复的核心是形成由深层到表层、由纵向到横向的完整防渗与导渗体系，使堤体在多种工况下保持安全。制

3 典型工程实例分析

3.1 案例概况

该案例所在区域地形以冲积平原与低丘过渡带为主，河流水位具有明显季节性特征，堤防在多年运行中承受洪水位差、地基非均质性与生物侵蚀等综合作用，逐渐出现渗沟发育、坡面散浸和裂缝渗流多点并存的问题。堤基结构由粉质黏土、中粗砂与砾石层组成，其中砂层渗透系数大，成为渗流发展的主要通道。现场监测表明，部分堤段排水系统老化加剧了浸润线抬升，而堤身历史压实度不足形成弱层，使渗流在不同深度同步扩展。此外，生物活动对堤体结构的破坏不容忽视，局部区域出现蚁巢与鼠洞，使土体空隙显著增大，并与砂层渗透通道形成连通效应。

3.2 检测结果

堤防地基分层结构从上至下依次为粉质黏土、中粗砂与砾石层，其中中粗砂层的渗透系数约为 1.2×10^{-3} cm/s，是导致渗流集中的关键部位。根据监测资料，在背水坡脚 200 m 范围内共发现 5 处管涌点，最大渗流量达到 0.18 L/s，含砂量约 0.3%，显示深层渗漏已形成稳定通道。坡面散浸范围约 320 m²，经现场取样测试其抗剪强度下降约 30%，表明浅层渗漏对结构性能影响显著。同时，探地雷达检测到 3 条纵向裂缝，最大宽度 8 mm，延伸深度 2.1 m，并伴随直径 8~15 cm 的白蚁空腔，使渗流坡降升至 0.32，明显超过安全临界值。浸润线较健康状态抬升 2.4 m，堤坡位移速率达到 2.8 mm/d，均超过安全监控指标。综合判断，该堤段具备深层渗透破坏、浅层散浸扩展与结

构裂缝渗流三类险情叠加的典型特征，亟需采取系统性防渗与加固措施。

3.3 实施措施

为控制深层渗透破坏，在中粗砂层采用高压喷射灌浆构建连续防渗墙，施工参数经扩散模型优化，提高浆液在高渗透介质中的均匀性。施工后围井试验表明，地基渗透系数由原来的 1.2×10^{-3} cm/s 降至 4×10^{-6} cm/s，管涌量从 0.18 L/s 降至 0.002 L/s，降幅超过 98%。

为治理坡面散浸，采用“两布一膜”复合土工膜水平铺盖技术，在膜上配置排水层，使浅层渗流能够快速外排，散浸面积减少 90% 以上。对于裂缝渗流和生物破坏并存区域，实施白蚁信息素诱杀、空腔注浆与深根植物修复组合措施，使裂缝渗流量下降 80%，植被覆盖率提升至 92%。

整体治理后，浸润线上降 1.8 m，堤坡位移速率降至 0.3 mm/d，渗透破坏风险显著下降，该体系能够有效处理多类渗漏叠加的复杂堤防环境，为类似工程提供重要参考。

4 结论

堤防渗漏具有成因复杂、隐蔽性强和危害性大的特点，其控制与治理需要从地质条件、施工质量与运行环境等多个维度进行综合分析。研究表明，科学识别渗漏路径与主控因素是治理的前提，而构建由深层封堵、浅层防渗、渗流疏导与结构加固组成的系统防护体系，是解决多类型渗漏叠加问题的有效途径。未来堤防治理应更加注重监测数据与诊断模型的结合，通过数字化手段实现渗流状态的动态评价，同时提升施工质量管控水平，使堤防能够在极端水文条件下保持稳定运行。通过系统治理与持续维护，可为流域防洪安全和可持续水利工程建设奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 姚立夫, 聂齐麟. 浅谈水利工程堤防渗漏处理办法 [J]. 治淮, 2024, (11): 65~67.
- [2] 沈德生. 堤防除险加固工程地质勘察若干问题的认识 [J]. 小水电, 2012, (02): 9~11.
- [3] 徐铭, 王志堂, 杜洪海. 论堤防渗漏检测技术与处理措施 [J]. 水利技术监督, 2006, (03): 40~42.