

水利工程堤防加固施工工艺及渗流稳定性分析

颜文彪

洱源县炼铁乡人民政府 云南 大理 白族自治州 671208

【摘要】：堤防是防洪减灾核心水利工程，安全稳定关联人民生命财产与区域发展。结合工程实例，阐述高压喷射注浆、垂直铺膜防渗、水平防渗铺盖三种堤防加固施工工艺的流程、适用条件及应用效果，分析土体物理力学性质、堤防结构填筑质量、水位变化与渗流路径对堤防渗流稳定性的影响机制，探讨渗流稳定性计算分析、破坏形式判别及综合控制加固技术。合理选用加固工艺、识别影响因素并采取针对性控制措施，可提升堤基承载与防渗能力，防范渗流破坏险情，为堤防工程设计、施工及运维提供理论与实践参考。

【关键词】：堤防加固；渗流稳定性；高压喷射注浆；防渗工艺；渗流控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.14.060

引言

堤防是抵御洪水侵袭、保护沿岸生态与居民安全的重要屏障，在水利工程体系中占据关键地位。我国江河湖库众多，堤防工程分布广泛，部分堤防因建设年代久远、地质条件复杂、长期受洪水冲刷，易出现渗流、管涌、滑坡等险情，威胁工程安全运行。渗流破坏是堤防失稳的主要诱因，科学的加固工艺与精准的渗流控制是保障堤防安全的核心手段。结合实际工程案例，梳理常用堤防加固施工工艺，分析渗流稳定性影响因素，提出针对性控制措施，为堤防工程加固与渗流防控提供技术支撑，助力提升堤防防洪减灾能力。

1 堤防加固常用施工工艺

1.1 高压喷射注浆加固工艺

高压喷射注浆加固工艺适配黏土、砂土、淤泥及砂砾层等多种地层，施工以钻孔、制浆、高压喷射、拔管封孔为核心流程，按设计孔位成孔并采用套管护壁保障孔壁稳定，将注浆管置入孔内保证密封性能，选用 42.5 级普通硅酸盐水泥制备符合配比的浆液，调控压力、流量与提升速度实现浆液在地层中均匀扩散，形成连续密实的固结防渗体，可使土体渗透系数降至 $2.5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 量级，抗压强度提升至 6.0MPa 左右，增强堤基承载与防渗能力^[1]。淮河干流某穿堤工程采用高压旋喷与摆喷结合工艺，防渗墙厚 0.4 - 0.6m、桩径 1.0m，有效阻断堤身与管道周边渗流通道，运行后未出现集中渗漏与管涌险情，验证了该工艺在复杂堤段加固的可靠性。

1.2 垂直铺膜防渗加固工艺

垂直铺膜防渗加固工艺以聚乙烯或复合土工膜为核心防渗材料，通过开槽、垂直铺膜、接缝焊接、密封检测与回填保护形成连续垂直防渗屏障，施工前对地基整平压实并清除尖锐杂物，采用 GPS 与全站仪定位开槽边线，槽宽控制在 15 - 30cm，膜体搭接处采用热熔焊接并做电火花或水压检测，确保接缝密封无渗漏。

1.3 水平防渗铺盖加固工艺

水平防渗铺盖加固工艺依托迎水侧天然或人工铺设的防渗层延长渗径、降低出逸坡降，适用于外滩宽阔、黏土资源丰富的堤防段，常用 HDPE 土工膜、黏土及复合防渗结构，与堤身斜墙或坝体防渗段衔接形成全域防渗体系。湖北王甫洲水利枢纽围堤采用复合土工膜水平铺盖与斜墙组合方案，防渗规模达 110 万平方米，与传统黏土铺盖相比节省投资 46%，减少林地与耕地占用，运行后渗流量稳定达标，被列为土工合成材料应用示范工程，体现其在经济性与环保性上的综合优势。

2 堤防渗流稳定性影响因素

2.1 土体物理力学性质

土体颗粒级配、渗透性、压实度及抗剪强度直接决定渗流发展规律，砂性土骨架孔隙大易引发管涌，黏性土渗透系数小但遇水软化易出现滑动破坏，不均匀系数与临界坡降呈显著相关性，松散土层与软弱夹层会形成优先渗流通道，导致局部渗透坡降骤增触发渗透变形^[2]。堤基二元结构地层中，上层黏土层与下层透水砂层组合适易在界面处产生集中渗流，是堤脚管涌与散浸险情的主要诱因，含水率与压实度不达标会直接降低有效应力与抗渗能力，加剧渗流破坏风险（见图 1）。

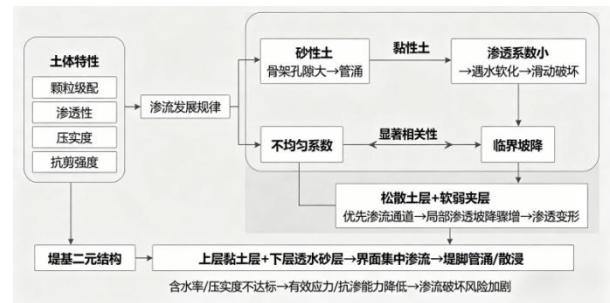


图 1 土体物理力学性质

2.2 堤防结构与填筑质量

堤防断面尺寸、边坡坡度、填筑分层及碾压质量决定结构抗渗承载能力,分期加高形成的新旧土体界面、分缝交界段易产生纵向与横向裂缝,成为贯穿性渗漏通道。填筑土料含杂质、含水率偏离最优范围、碾压遍数不足会造成压实度不均与局部松散区,在高水头作用下快速发展为渗漏薄弱带,穿堤建筑物与堤身结合部位因材料差异易形成接触渗漏,施工冷缝、分层厚度超标及回填不密实均会降低整体防渗性能,威胁渗流稳定安全。

2.3 水位变化与渗流路径

水位升降直接改变渗透水头、浸润线位置与出逸坡降,高水位持续运行抬高堤内浸润线,使饱和区扩大、土体抗剪强度衰减,退水阶段临水侧压力骤降,堤内渗水向外排泄产生附加动水压力,极易引发滑坡与塌岸险情。渗流路径长短与形态决定水头损耗速率,路径过短、绕渗及多层透水层贯通会导致渗透坡降超限,堤基浅部透水层与堤身裂缝会形成快速渗流通道,使背水侧出逸点抬高、渗流量增大,进一步恶化渗流稳定条件。

3 堤防渗流稳定性分析与控制措施

3.1 渗流稳定性计算分析

渗流稳定性计算分析是防控堤防渗流风险、优化加固方案的核心环节,以达西定律与稳定渗流场理论为基础,结合堤防实际地质条件与运行工况,采用有限元法求解堤身与堤基的浸润线位置、渗透坡降、渗流量及孔隙水压力分布,结合土体临界坡降,判定堤防渗流稳定安全裕度。计算核心包括断面渗流场模拟、出逸坡降校核、接触渗流与分层渗流验算,需充分考虑水位骤降、汛期高水位、暴雨等不利工况组合,确保结果全面准确。计算需输入地层渗透系数、填筑密度、土料抗剪强度及水位过程等实测参数,准确性直接决定结果可靠性。江湖长江干堤燕窝堤段通过渗流数值模拟,定位管涌高发区域与薄弱环节,为垂直截渗工程与减压井布置提供定量依据,实现渗流

险情源头防控与加固方案优化,保障堤防安全运行。

3.2 渗流破坏形式判别

堤防渗流破坏以管涌、流土、接触冲刷与散浸为主要形式,无黏性土中细颗粒被水流带出形成集中涌水带砂为管涌,黏性土整体隆起、浮动为流土,界面处土体颗粒被冲刷迁移为接触冲刷,背水坡大面积湿润渗水为散浸^[1]。破坏判别依据现场出逸形态、渗水量与水质变化,结合渗透坡降与临界值对比、颗粒级配分析及监测数据异常特征,长江中下游堤防运行经验表明,管涌多发生在砂层埋深浅、水头差大的堤段,流土常见于黏性土覆盖层薄弱区,接触冲刷集中于建筑物周边,准确判别是制定控制措施的前提。

3.3 渗流控制加固技术

渗流控制遵循“上游截渗、下游导渗、降低坡降”原则,综合采用截、堵、导、压组合技术。垂直截渗采用高压喷射注浆、深层搅拌桩或防渗墙截断强透水层,淮河堤防穿越工程通过高压旋喷墙深入相对隔水层1.5-2m,实现全断面截渗;水平防渗采用土工膜或黏土铺盖延长渗径,王甫洲枢纽水平铺盖有效降低出逸坡降至安全范围;下游导渗设置反滤层、减压沟与减压井,保障渗水通畅排出且保留土颗粒;压渗盖重与堤脚抛石固脚抑制土体隆起与滑动,多种技术协同作用可全面提升堤防渗流稳定性,保障堤防长期安全运行。

4 结语

堤防加固与渗流稳定性控制是保障水利工程安全、防范洪水灾害的关键环节。通过对常用加固工艺、渗流影响因素及控制措施的系统分析,明确高压喷射注浆等工艺的适用场景与优势,厘清土体性质、结构质量等因素对渗流稳定的作用规律,提出“截、堵、导、压”相结合的综合控制方案。合理运用加固技术、精准管控影响因素,可有效提升堤防渗流稳定性与耐久性。未来需结合工程实际地质与水文条件,优化工艺参数,创新防渗技术,实现堤防工程安全、经济与环保的协同发展,为防洪减灾工作提供更坚实的保障。

参考文献:

- [1] 柯锦才.板桩加固堤防边坡稳定性及渗流分析[J].水利科学与寒区工程,2025,8(09):28-31.
- [2] 张思超,翟兵科.高压喷射灌浆加预注浆施工技术研究[C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会.2023 水利水电地基与基础工程技术创新与发展.中国葛洲坝集团市政工程有限公司,2023:114-119.
- [3] 武娟,岑威钧,张鸣,等.堤防锥探灌浆加固后的渗流及稳定性比较分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2022,39(04):79-85.