

# 基于地质勘察的堤防工程稳定性评价与加固设计研究

周 婧

(江西省上饶市信州区农业农村局, 江西 上饶 334000)

**摘 要** 在流域防洪体系中, 堤防工程稳定性关乎人们的生命财产安全, 而地质条件则是决定其安全性能的核心要素。经地质勘察发现, 上饶市信州区信江沙溪、秦峰段堤防稳定性存在突出问题, 主要表现为堤身填筑松散、堤基渗透隐患、岸坡冲刷等, 亟需进行系统的加固处理。基于此, 本研究结合堤防工程地质勘察数据, 综合采用室内试验与原位测试结合方法, 对堤身、堤基及岸坡稳定性进行评价。通过稳定性评价明确了堤防工程中存在的砂卵石夹砂壤土堤身抗剪强度不足、多层结构堤基渗透风险等关键问题。在此基础上提出了堤身培厚防渗、堤基截渗固脚、岸坡护脚防护等工程加固设计差异化方案, 以期为类似工程提供参考。

**关键词** 堤防工程; 地质勘察; 稳定性评价; 加固设计; 渗透控制

中图分类号: TV8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.26.041

## 0 引言

依据《堤防工程设计规范(附条文说明)》(GB50286-2013), 当已建堤防防洪标准不达标或存在安全隐患时, 需进行加固等处理。堤防是防洪体系的关键构成, 其稳定性关乎周边区域的安全发展。对于上饶市信州区信江沙溪、秦峰段堤防, 其长期受自然因素及过往建设条件限制, 堤防工程稳定性存在诸多隐患。为此, 需针对该堤防工程进行精准的地质勘察工作, 以全面了解堤防地质状况、评估稳定性并制定有效加固方案。本文充分结合该区域实际情况, 通过系统地质勘察, 深入剖析堤身、堤基与岸坡稳定性, 旨在显著提升堤防防洪能力, 为同类工程提供借鉴。

## 1 工程地质勘察与分析

### 1.1 工程概况

上饶市信州区信江沙溪、秦峰防洪综合治理工程地处江西省东北部, 涉及玉山水两岸及支流丁宅河, 保护沙溪、秦峰镇 5 万人口、2.5 万亩耕地及区域交通干线。秦峰堤长 4.54 km, 防洪标准仅 5 年一遇, 堤身单薄且未封闭; 沙溪堤长 9 km, 防洪标准 10 年一遇, 堤基渗透隐患突出。2022 年 6 月强降雨导致两堤发生漫堤事故, 秦峰镇受淹 1.5~2.0 m, 直接经济损失 4.1 亿元。

工程建设内容包括加固堤防 12.97 km、新建堤防

5.81 km, 配套涵闸、拦河坝等建筑物, 需通过地质勘察明确工程地质条件以支撑设计。

### 1.2 区域地质条件

工程区属构造剥蚀丘陵与冲积平原过渡地貌, 玉山水流域地势北高南低, 河床宽 300~500 m, 漫滩高程 66~78 m。地层以白垩系紫红色砂岩、砂砾岩为主, 第四系覆盖层为含砾壤土、砂壤土及含细粒土砾石层。区域地震基本烈度 VI 度, 地震动峰值加速度 0.05 g。水文地质条件显示孔隙潜水赋存于冲积层中, 与河水水力联系密切, 地下水对混凝土具弱腐蚀性。玉山水主流及丁宅河两岸存在凹岸顶冲、凸岸堆积的岸坡特征, 抗冲刷能力差。

### 1.3 工程地质勘察方法与成果

为全面掌握工程地质状况, 本次勘察综合运用多种技术手段。勘察采用 1:1 000 工程地质测绘、钻探(总进尺 823.4 m)、标准贯入试验(70 次)及动力触探(46 次), 结合室内土工试验(原状样 39 组、扰动样 28 组)。结果表明: 秦峰堤 0+000-2+880 段堤身填筑为砂卵石夹砂壤土, 结构疏松, 渗透系数达  $1 \times 10^{-4}$  cm/s; 堤基为多层结构, 0+040-0+240 段存在砂壤土淘刷形成的渗漏通道。沙溪堤堤基中砂壤土与含细粒土砾石层交互分布, 4+150-5+323 段渗透坡降超允许值。岸坡稳定性评价显示, 凹岸段土体抗冲刷能力差, 需采取针对性的防护措施。

## 2 基于地质勘察的堤防工程稳定性评价

### 2.1 堤身稳定性评价

基于堤防工程稳定性评价,需以材料力学与渗流理论为基础,充分结合《堤防工程设计规范》(GB50286-2013)构建“材料—结构—荷载”三维评价体系<sup>[1]</sup>。通过室内土工试验获取压实度、抗剪强度等核心参数,采用简化毕肖普法与有限元法进行多工况验算,重点分析自重+静水压力+渗透力组合荷载下的应力应变特征<sup>[2]</sup>。对于砂卵石夹砂壤土等散粒体,则引入邓肯—张E-B模型描述非线性应力—应变关系,渗透分析采用饱和—非饱和渗流耦合模型。

对于秦峰堤0+000-2+880段,其堤身填筑物天然含水率8.2%,干密度 $1.55\text{ g/cm}^3$ ,孔隙比0.718,颗粒分析显示砾石含量32.7%、砂粒51.3%,级配不良( $C_u=2.3$ )。直剪试验测得饱和快剪指标 $c=6.9\text{ kPa}$ 、 $\phi=23.7^\circ$ ,渗透系数达 $1\times 10^{-4}\text{ cm/s}$ ,属中等透土层。结合有限元计算显示,设计洪水位工况下该段堤身最大剪应变达3.2%,超过土体极限剪应变2.5%,背水坡稳定安全系数1.21(规范要求 $\geq 1.15$ ),且历史管涌位置与渗流场中水力梯度 $> 0.3$ 的区域高度吻合,这就在一定程度上印证了渗透破坏风险。

2+880-4+370段虽采用含砾壤土填筑( $c=10.0\text{ kPa}$ 、 $\phi=24.0^\circ$ ),但压实度仅89%,堤身压缩模量 $E_s=7.7\text{ MPa}$ ,低于规范要求的 $10\text{ MPa}$ 。沉降计算显示,堤高4 m段工后沉降量达 $12.7\text{ cm}$ ,超过允许值 $5\text{ cm}$ ,且堤顶高程 $76.5\sim 78.5\text{ m}$ 较20年一遇洪水位( $78.66\sim 80.99\text{ m}$ )低 $1.5\sim 2.0\text{ m}$ ,漫堤风险尤为显著。

沙溪堤6+700.2-7+899.4段人工填土存在明显压实不均,标准贯入试验 $N=6\sim 12$ 击,实测渗透系数 $2\times 10^{-4}\text{ cm/s}$ 。采用Geo-Studio软件模拟显示,该段浸润线在背水坡出逸点高程 $75.2\text{ m}$ ,较堤脚高 $2.1\text{ m}$ ,逸出坡降0.18,超过砂壤土允许坡降0.12,易引发流土破坏;同时,堤身最大主应力 $158\text{ kPa}$ 超出土体抗压强度 $142\text{ kPa}$ ,存在局部剪切破坏隐患。

### 2.2 堤基稳定性评价

在堤防工程堤基稳定性评价中,可采用地质结构、渗流场、承载力的协同评价模型,依据《堤防工程地质勘察规程》(SL188-2005)实现地质结构分类<sup>[3]</sup>,通过流网法计算渗透坡降,结合太沙基公式验算地基承载力。对于多层结构地基,引入渗透变形临界坡降计算公式( $J_{cr}=(G_s-1)/(1+n)$ ,其中 $G_s$ 为土粒比重, $n$ 为孔隙率),并采用有限元法分析基底应力分布。评价时需对比实际水力坡降与临界坡降,同时验算基底

应力是否超过地基承载力特征值( $f_k$ ),对存在渗透风险或承载力不足的堤段提出针对性处理方案<sup>[4]</sup>。

秦峰堤0+040-0+240段中,堤基主要为砂壤土(厚 $1.2\sim 2.0\text{ m}$ )与含细粒土砾石层(厚 $3.7\sim 5.0\text{ m}$ )组合,属III 1类地质结构。颗粒分析显示砂壤土黏粒含量12.5%,砾石层 $d_{50}=5.3\text{ mm}$ ,渗透系数 $k=5\times 10^{-3}\text{ cm/s}$ 。渗流计算得实际坡降 $J=0.13$ ,超过 $J_{cr}=0.12$ ( $G_s=2.65$ , $n=0.43$ ),且勘察揭露该7段存在直径 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ 的渗漏通道,印证管涌破坏机制。采用水泥土搅拌桩(桩径 $0.5\text{ m}$ ,间距 $1.2\text{ m}$ )处理后,复合地基承载力特征值提升至 $220\text{ kPa}$ ,满足设计要求( $f_k\geq 180\text{ kPa}$ ),渗透系数降低至 $1\times 10^{-5}\text{ cm/s}$ ,有效控制渗透风险。

秦峰堤1+846-4+370段的堤基覆盖层厚 $2.6\sim 6.3\text{ m}$ ,其大于临界厚度 $2.5\text{ m}$ ,属III 2类结构,下伏砾石层渗透系数达 $5\times 10^{-2}\text{ cm/s}$ 。渗流分析表明,该段水力梯度 $J=0.09$ ,虽未超过砂壤土允许坡降0.12,但砾石层与壤土接触面存在渗透突变,易形成集中渗流。基底应力计算显示,最大压应力 $\sigma_{\max}=148\text{ kPa}$ ,小于地基承载力特征值 $f_k=200\text{ kPa}$ ,但需设置深 $5\text{ m}$ 的黏土截水槽(顶宽 $2\text{ m}$ ,底宽 $1\text{ m}$ )阻断渗流路径,截水槽采用粉质黏土(渗透系数 $\leq 1\times 10^{-6}\text{ cm/s}$ )填筑,压实度 $\geq 93\%$ ,确保防渗效果。

### 2.3 岸坡稳定性评价

在堤防工程岸坡稳定性评价中,需充分融合河流动力学、土力学及边坡工程理论,采用“地质结构—水流作用—动力响应”耦合分析模型<sup>[5]</sup>。基于Shields临界切应力理论( $\tau_c=0.046(\rho_s-\rho)gd_{50}$ )量化土体抗冲刷能力,结合Bishop法与有限元强度折减法计算边坡安全系数,同时引入Meyer-Peter公式估算水流冲刷深度( $\Delta h_B$ )。

秦峰堤2+000-3+850段是典型凹岸顶冲段,岸坡由含砾壤土(厚 $1.5\sim 5.6\text{ m}$ )与含细粒土砾石层(厚 $1.7\sim 3.6\text{ m}$ )组成。颗粒分析显示砾石层 $d_{50}=8.7\text{ mm}$ , $\rho_s=2.68\text{ g/cm}^3$ ,计算得临界切应力 $\tau_c=0.52\text{ Pa}$ ,而设计洪水期水流切应力 $\tau=0.87\text{ Pa}$ (流速 $2.0\text{ m/s}$ 时),超出抗冲刷能力67%。实测岸坡淘刷深度达 $1.2\text{ m}$ ,坡脚出现直径 $0.3\sim 0.5\text{ m}$ 的冲坑,且钻探揭露含砾壤土层中发育顺坡向裂隙(倾角 $15^\circ\sim 20^\circ$ ),与水流冲刷共同作用易引发顺层滑动。有限元计算显示,该段岸坡稳定安全系数1.12,接近规范限值1.15,需采取抛石固脚+混凝土挡墙组合防护。

丁宅河裁弯取直段新岸坡为第四系覆盖层开挖形成,上部细粒土(厚 $1.6\sim 1.9\text{ m}$ ,渗透系数 $5.5\times 10^{-5}\text{ cm/s}$ )

与下部粗砾土(厚 1.5~2.3 m, 渗透系数  $5 \times 10^{-2}$  cm/s) 构成双层结构。地下水渗流场分析表明, 退水期粗砾土中孔隙水压力消散滞后于细粒土, 产生向上渗透力, 导致有效应力降低 30%~40%。采用极限平衡法计算得退水工况下岸坡安全系数 1.08, 存在圆弧滑动风险, 设计坡比 1:5 仍需结合反滤层(土工布+级配砂石) 施工, 控制渗透坡降  $\leq 0.15$ 。

### 3 基于地质勘察的堤防工程加固设计方案

#### 3.1 堤身填筑体加固与防渗结构设计

针对堤身抗剪强度不足、渗透隐患及沉降超标等问题, 可尝试采用培厚压实+复合防渗综合加固策略<sup>[6]</sup>。对于秦峰堤 0+000-2+880 段砂卵石夹砂壤土堤身, 采用分层培厚法, 在背水坡按 1:3 坡比加筑含砾壤土, 每层填筑厚度控制在 30 cm 以内, 经重型击实试验确定最优含水率为 12.5%, 压实度提升至 93% 以上, 有效增强堤身抗剪性能。与此同时, 在迎水坡铺设复合土工膜, 即两布一膜, 规格 400 g/0.5 mm/400 g, 其横向抗拉强度  $\geq 25$  kN/m, 渗透系数  $\leq 1 \times 10^{-11}$  cm/s, 与黏土截水槽槽接形成封闭防渗体系, 截断堤身内部渗流路径。针对沙溪堤压实不均区域, 可尝试采用振动碾压结合强夯技术, 将标准贯入击数提升至 15 击以上, 消除填筑体孔隙差异<sup>[7]</sup>。对于浸润线出逸点设置贴坡排水体, 采用土工格栅包裹碎石结构, 既降低渗流压力, 又保证堤身稳定性。

#### 3.2 堤基地质缺陷处理与防渗体系设计

针对堤基渗透与承载力不足的问题, 可引入截渗固脚+复合地基协同处理方案。在秦峰堤 0+040-0+240 段渗漏通道区域, 采用高压旋喷桩技术, 设置桩径 0.8 m、间距 1.0 m, 形成水泥-土截渗墙, 其 28 天抗压强度  $\geq 2.0$  MPa, 渗透系数降至  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, 有效阻断砂壤土与砾石层间的渗漏通道。对于秦峰堤 1+846-4+370 段多层结构地基, 除设置黏土截水槽外, 在槽底采用粉喷桩(桩径 0.5 m, 间距 1.5 m) 进行深层加固, 桩体水泥掺量 18%, 形成复合地基承载力提升至 250 kPa, 满足设计要求。与此同时, 在截水槽上下游可设置反滤层, 采用土工滤网+级配砂砾石结构, 有效防止渗透变形<sup>[8]</sup>。针对沙溪堤渗透坡降超标的 4+150-5+323 段, 采用悬挂式防渗墙技术, 防渗墙深入相对不透水层 1.5 m, 配合堤前黏土铺盖(厚度 1.5 m, 长度 20 m), 降低堤基渗透压力, 将渗透坡降严格控制在允许范围内。

#### 3.3 岸坡地质灾害防治与防护结构设计

对于岸坡冲刷与滑动风险, 可引入防护-排水-固坡的三位一体防护体系<sup>[9]</sup>。在秦峰堤 2+000-3+850

段凹岸顶冲区, 先抛投块石固脚, 块石粒径  $\geq 30$  cm, 重量  $\geq 80$  kg, 由此形成 2.0 m 厚防冲垫层。在此基础上修筑 C25 混凝土挡墙, 墙高 3.5 m, 底宽 2.0 m, 顶宽 0.8 m, 挡墙基础嵌入基岩 0.5 m, 墙后设置排水孔(直径 5 cm, 间距 2.0 m), 降低墙后土压力。对于丁宅河裁弯取直段新岸坡, 在坡脚设置反滤层, 采用土工布包裹级配砂石(粒径 2~40 mm), 厚度 0.8 m, 防止渗流带出细粒土; 坡面采用生态混凝土框格防护, 框格内种植狗牙根草皮, 既增强边坡稳定性, 又实现生态防护。同时, 在岸坡顶部设置截水沟, 将地表水引入河道, 避免雨水冲刷坡面; 对岸坡内部发育的裂隙, 则可采用水泥-水玻璃双液注浆技术封闭, 注浆压力 0.3~0.5 MPa, 防止水流渗入引发滑动。

### 4 结束语

通过勘察上饶市信州区信江沙溪、秦峰段堤防工程地质情况, 系统地评价了堤身、堤基及岸坡稳定性, 精准识别抗剪强度不足、渗透风险等关键问题。由此提出了差异化加固设计方案, 将材料特性、结构需求与地质条件紧密结合, 有效解决工程隐患。研究成果可助力提升该堤防防洪能力, 也为类似工程稳定性评价与加固设计提供实践范例。

### 参考文献:

- [1] 陈平. 南沙区某堤防工程设计方案分析[J]. 水利技术监督, 2024(09):292-295.
- [2] 雍刚. 基于稳定性分析的广东梅江河堤防除险加固设计研究[J]. 云南水力发电, 2022,38(08):141-145.
- [3] 彭力. 南庙河铁路桥-河口段防洪工程堤防加固设计综述[J]. 黑龙江水利科技, 2022,50(02):85-87.
- [4] 武娟, 张鸣, 李岩松. 平原圩区堤防加固方案分析与复核计算[J]. 人民珠江, 2022,43(03):123-130.
- [5] 熊涛. 丰城市城西防洪工程防洪堤除险加固设计综述[J]. 黑龙江水利科技, 2021,49(08):159-160,221.
- [6] 罗真行. 浆砌条石堤防病害分析及加固设计:以成都武侯区清水河浆砌条石堤防为例[J]. 工程技术研究, 2021, 06(10):40-42.
- [7] 张鹏. 河道整治工程堤防加固设计探析:以荥阳新河为例[J]. 海河水利, 2021(02):36-38,42.
- [8] 乔冠锋. 萨克打克库木堤防工程设计探讨[J]. 陕西水利, 2020(08):93,99.
- [9] 张慧敏, 李燕清, 燕永锋, 等. 不同坡度条件下的全风化花岗岩回填土边坡生态防护措施[J]. 水土保持学报, 2022, 36(06):156-162.