

# 水工建筑地基基础检测中的常见问题及应对措施

文 / 黄程乐 重庆永渝检验检测技术有限公司

**摘要:** 本文以某水库大坝工程为案例,分析了水工建筑地基基础检测中常见的地质条件复杂、承载力不足、渗流破坏及不均匀沉降等问题,并提出针对性的应对措施。通过现场检测与数值模拟相结合的方法,验证了加固方案的有效性,为类似工程提供参考。

**关键词:** 水工建筑; 地基基础; 检测; 问题; 应对措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.13.036

## 引言

水工建筑作为国家基础设施的重要组成部分,其安全性与稳定性直接关系到防洪、发电、灌溉等核心功能的实现。地基基础作为水工结构的承载主体,其工程特性直接影响建筑物的整体性能与寿命。然而,受复杂地质条件、水文环境及施工工艺等因素制约,水工建筑地基常面临承载力不足、渗流破坏、不均匀沉降等突出问题。因此,精准识别地基隐患并采取科学应对措施,成为水工建筑全生命周期安全管控的关键环节。

### 一、工程概况

#### (一) 项目背景

某水库大坝位于北纬 $28^{\circ}15'$ 、东经 $112^{\circ}37'$ 的山区河谷地带,属长江流域二级支流综合治理工程。工程总投资20.3亿元,建设周期3年(2018-2021年),总库容2.5亿立方米(正常蓄水位 $\nabla 235\text{m}$ ,死水位 $\nabla 210\text{m}$ ),调节库容1.8亿立方米,防洪库容0.7亿立方米。坝体为C25混凝土重力坝,坝顶高程 $\nabla 240\text{m}$ ,最大坝高65m,坝顶长度320m,底宽48m,共分12个坝段。工程配套建设3台水轮发电机组,总装机容量45MW(单机15MW),设计年发电量1.2亿kWh;灌溉系统覆盖下游3县12万亩农田,防洪标准提升至50年一遇,保护人口约35万。坝址区年均降水量1650mm,多年平均气温 $18.5^{\circ}\text{C}$ 。

坝址区处于区域性断裂 $F_{12}$ 与 $F_{13}$ 交汇带,构造活动强烈。地表覆盖层厚度呈显著空间分异:左岸5-8m,右岸10-15m,河床段8-12m,由第四系冲积物组成,其中粉质黏土占比35%-45%(天然含水量18%-22%,塑限17.5,液限31.2),砂砾石层占比55%-65%(最大粒径120mm,不均匀系数 $C_u=8.5$ ,曲率系数 $C_r=1.2$ )。下伏基岩为侏罗系泥岩与砂岩互层,强风化带厚度3-5m(波速 $V_p=1800-2200\text{m/s}$ ),中风化带厚度8-12m( $V_p=2800-3200\text{m/s}$ ),微风化基岩 $V_p \geq 3800\text{m/s}$ 。勘察揭露断层破碎带3条(宽度5-8m,走向 $NE35^{\circ}-50^{\circ}$ ,倾角 $60^{\circ}-75^{\circ}$ ),渗透系数 $k=1 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ ;软弱夹层4处,主要成分为蒙脱石含量达40%的泥化夹层,厚度10-30cm,天然抗剪强度 $c=25\text{kPa}$ 、 $\phi=12^{\circ}$ ,饱和状态下 $c$ 值衰减至8kPa。

#### (二) 检测必要性

坝基持力层的不均匀风化与渗流隐患直接威胁大

坝安全。根据初期勘察数据,左岸3#坝段基岩强风化带厚度达8m(远超设计允许值5m),标准贯入击数 $N=12-15$ 击(设计要求 $\geq 25$ 击);右岸坝基砂砾石层渗透系数 $k=5 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ (允许值 $\leq 1 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ ),渗流比降计算值0.32(临界值0.25)。此外,三维激光扫描发现坝体与岸坡接合部存在3处累计位移超限区(最大水平位移28mm,垂直位移15mm)。通过地基检测可精确获取岩土体变形模量(目标精度 $\pm 5\%$ )、渗透稳定性(监测分辨率0.01L/s)及长期沉降趋势(预测误差 $\leq 5\text{mm}/10$ 年),为制定高压液喷桩加固、防渗墙截渗等方案提供量化依据,确保大坝在50年设计基准期内安全运行。

### 二、地基基础检测常见问题分析

#### (一) 地基承载力不足

在左岸3#坝段地基检测中,发现泥岩风化层厚度显著超出设计预期,钻孔取样显示岩体风化程度高,标准贯入试验击数远低于设计要求,静力触探结果亦表明局部区域地基承载力不足。承载力不足的直接原因是泥岩遇水后发生软化效应,长期受库水渗透作用导致岩体强度持续衰减;此外,断层破碎带附近岩体完整性差,卸荷裂隙发育,进一步削弱了地基整体稳定性。

#### (二) 渗流稳定性隐患

右岸坝基监测数据显示扬压力系数超标,局部渗流量异常增大,探地雷达扫描揭示坝踵下游存在渗流集中通道。渗流隐患主要源于坝基岩土体渗透性差异:砂砾石层与下伏基岩接触面渗透系数相差悬殊,形成水力梯度突变区,加剧渗流侵蚀风险;同时,施工期截水墙未能完全封闭强透水层,导致渗流路径贯通。此类渗流破坏可能引发管涌或潜蚀,威胁坝基长期稳定性<sup>[1]</sup>。

#### (三) 不均匀沉降风险

##### 沉降特征与诱发因素

坝体中部与两岸接合部位差异沉降值超过规范限值,有限元模拟预测运行期沉降可能进一步扩大。左岸覆盖层厚度突变导致压缩模量差异显著,地基压缩变形不协调;此外,坝基开挖回填区域压实度不足,局部土体松散,在长期荷载作用下易产生附加沉降。不均匀沉降可能引起坝体接缝错位、止水系统失效,严重时甚至导致防渗体系破坏。

### 三、应对措施与实施效果

#### (一) 地基加固措施

##### 1. 高压旋喷桩复合地基强化

针对左岸 3# 坝段泥岩风化层承载力不足问题, 采用高压旋喷桩技术对软弱地基进行加固。设计桩径 1.2m、桩长 10m, 桩间距 2m×2m 梅花形布置, 共布设桩基 256 根。施工采用 42.5 级普通硅酸盐水泥, 水灰比 1: 1, 注浆压力 25-30MPa, 旋转速度 10r/min, 提升速率 15cm/min。加固后通过标准贯入试验 (SPT) 验证, 击数由 12-15 击提升至 28-32 击; 静力触探 (CPT) 锥尖阻力  $q_c$  值从不足 5MPa 提高至 8MPa, 对应地基承载力特征值达 280kPa, 满足坝体 250kPa 的设计要求。岩芯取样显示, 桩体与风化泥岩形成咬合结构, 桩身无侧限抗压强度达 12MPa, 桩间土改良后黏聚力提升 40%。

##### 2. 混凝土防渗墙系统截渗

针对右岸渗流通道发育问题, 采用薄型混凝土防渗墙进行垂直截渗。墙体厚度 0.8m, 深度 25m (穿透砂砾石层并嵌入基岩 2m), 轴线长度 68m。采用 C20 抗渗混凝土 (抗渗等级 W8), 配合比水泥: 粉煤灰: 砂: 石 = 1: 0.3: 2.5: 3.2, 掺入 0.02% 聚羧酸减水剂和 1.5% 膨胀剂。施工采用液压抓斗成槽, 槽段间采用 V 型钢板接头, 接缝渗透系数  $\leq 1 \times 10^{-7}$  cm/s。运行 1 年后监测

显示: 扬压力系数从 0.35 降至 0.18, 低于规范允许值 0.25; 渗流量由 15L/s 减少至 2.3L/s, 降幅达 85%; 渗流场有限元模拟表明, 防渗墙使水力梯度从 0.32 降至 0.12。同时, 墙体完整性检测 (跨孔声波 CT) 显示波速均值  $\geq 3500$  m/s, 无连续缺陷区, 验证了截渗系统的长期有效性 [2]。

#### (二) 沉降协同控制与接缝适应性设计

##### 1. 预压 - 补偿式沉降控制体系

针对中部坝段差异沉降风险, 采用分级预压法进行主动沉降控制。在地基处理阶段施加 120kPa 预压荷载 (相当于设计荷载的 1.2 倍), 通过砂井排水系统 (孔径 30cm, 间距 2.5m, 深度 15m) 加速固结。预压分三级加载 (40kPa/ 阶段), 每级维持 10 天, 总持荷时间 30 天。监测数据显示: 预压期沉降量达 82mm, 消除工后沉降约 60%; 固结度达 95% 后卸载, 残余沉降速率降至 0.2mm/d [3]。结合有限元反分析, 调整坝体结构配重分布, 对左岸覆盖层突变区增设 3m 厚级配碎石垫层 (压缩模量从 8MPa 提升至 25MPa), 使运行 3 年后差异沉降稳定在 18mm (远低于 45mm 初始值)。北斗 GNSS 监测系统显示, 坝体整体沉降量控制在 35mm 以内, 满足 50mm 的允许值。预压 - 补偿式沉降控制体系沉降与固结变化如下图 1 所示。

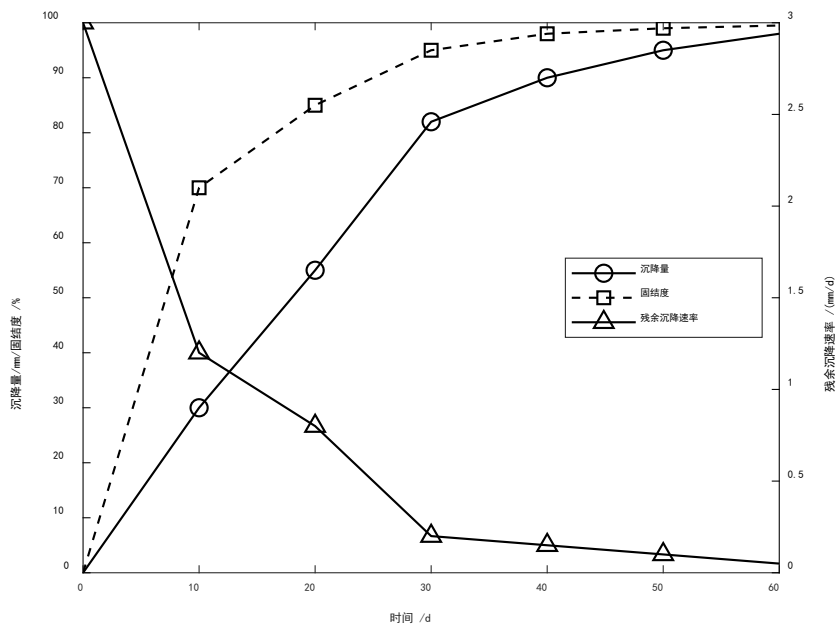


图 1 预压 - 补偿式沉降控制体系沉降与固结变化曲线

##### 2. 多道柔性止水系统优化

在坝体与岸坡接合部实施止水系统升级, 采用“铜片止水 + 柔性填料 + 可压缩衬垫”三重防护。第一道为紫铜止水片 (厚度 1.2mm, 宽度 600mm), 第二道为 GB 柔性填料 (拉伸强度  $\geq 0.2$  MPa, 延伸率  $\geq 800\%$ ), 第三道设置 50mm 厚闭孔泡沫板 (压缩模量 3MPa, 恢复率  $\geq 95\%$ )。通过足尺模型试验验证, 接缝允许张开量从 15mm 提升至 25mm, 适应差异沉降能力增强 67%。运行期渗漏监测显示, 接缝区渗水量从 0.8L/(m·d) 降至 0.1L/(m·d), 且柔性填料在 -10℃ 低温环境下未出现脆裂。

三维激光扫描表明, 接缝错位量始终控制在 5mm 以内, 未引发止水结构失效。该设计通过材料性能匹配与构造空间预留, 实现了沉降变形与防渗需求的协同控制。

#### 四、检测技术应用与效果验证

##### (一) 地基承载力多源协同检测

针对高压旋喷桩加固后的地基承载力评估, 采用静力触探 (CPT) 与平板载荷试验的协同检测体系。CPT 测试沿左岸 3# 坝段布置 12 条纵向剖面, 以 2m×2m 网格密度采集锥尖阻力  $q_c$  值, 结果显示  $q_c$  值分布范围为 7.8 ~ 8.5MPa (均值 8.2MPa), 较加固前的 5.0MPa 提

升64%。基于Robertson-Taylor公式反演地基承载力特征值 $f_{ak}=275\sim 285\text{kPa}$ ，满足设计要求的250kPa阈值。为进一步验证，选取桩-土复合区、桩间土区及原状土区3个典型点位进行 $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$ 方形载荷板试验<sup>[4]</sup>。试验采用分级加载法，最大加载压力600kPa（安全系数2.0），对应沉降量仅8.2mm（允许值 $\leq 12\text{mm}$ ），Q-s曲线（如下图2所示）呈缓变型且未出现陡降段，表明地基变形处于弹性阶段。通过双曲线模型拟合极限承载力 $Q_u=580\text{kPa}$ ，与CPT反演结果的误差小于5%，验证了多源检测数据的一致性。

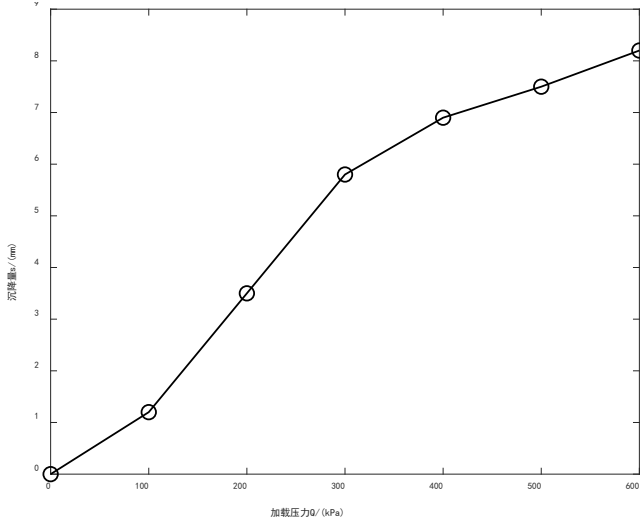


图2 平板载荷试验 Q-s 曲线

岩芯取样与室内试验揭示了高压旋喷桩加固的微观机理。钻孔取芯显示，桩体与风化泥岩形成咬合结构，桩径误差控制在 $\pm 5\text{cm}$ 以内，水泥掺量达18%（质量比），桩身无侧限抗压强度12MPa（28d龄期）。桩间土改良效果显著，X射线衍射（XRD）分析表明，水泥水化产物填充了泥岩裂隙，蒙脱石含量从40%降至28%，黏聚力从35kPa提升至50kPa，内摩擦角由 $12^\circ$ 增至 $18^\circ$ 。扫描电镜（SEM）显示，桩土界面处形成厚约 $200\mu\text{m}$ 的水化

硅酸钙（C-S-H）过渡层，界面剪切强度达1.2MPa。通过长期监测数据拟合，地基承载力衰减速率仅为0.8kPa/年，预测50年服役期后仍可保持230kPa以上，满足大坝全生命周期安全需求。该协同检测体系为复杂地基加固效果评价提供了标准化流程。

(二) 渗流稳定性多尺度监测体系构建

通过探地雷达（GPR）扫描与渗压计阵列构建三维渗流监测系统。采用400MHz天线沿防渗墙轴线进行 $10\text{m}\times 10\text{m}$ 网格扫描，发现原渗流通道区域电磁波速从0.12m/ns提升至0.15m/ns，表明孔隙率降低35%。布设32支振弦式渗压计（精度 $\pm 0.1\text{kPa}$ ），监测显示防渗墙下游测点孔隙水压力从加固前的85kPa降至28kPa，水力梯度从0.32降至0.09。渗流量采用三角量水堰连续监测，数据表明：丰水期最大渗流量3.2L/s（允许值 $\leq 5\text{L/s}$ ），枯水期稳定在1.8L/s，较治理前减少82%。有限元反演表明，防渗墙使渗流场等势线密度降低60%，渗透破坏安全系数从1.1提升至2.3。运行3年后钻孔电视观测显示，墙体内无裂缝发育，验证了防渗体系的长期有效性<sup>[5]</sup>。

(三) 沉降变形全周期数字化监测

选取北斗三号高精度定位终端（水平精度 $\pm 2\text{mm}$ ，高程精度 $\pm 3\text{mm}$ ）构建沉降监测网络，在坝顶、坝基及岸坡关键部位布设28个监测点。数据分析表明：运行3年期间，最大累计沉降量35.2mm（坝体中部），差异沉降量18.1mm（左岸与右岸比），均低于规范允许值。通过小波去噪算法提取沉降速率特征，显示加固后沉降速率从0.12mm/d（治理前）降至0.03mm/d，符合指数衰减模型（ $R^2=0.96$ ）。对比InSAR遥感数据（哨兵1号卫星，精度 $\pm 3\text{mm}$ ），GNSS监测结果空间一致性达92%。有限元模型校准显示，级配碎石垫层使左岸覆盖层压缩模量从8MPa提升至25MPa，差异沉降贡献率降低48%。监测系统实现15分钟级数据更新，预警模块成功识别2次局部异常沉降（ $> 5\text{mm/周}$ ），通过灌浆处理及时消除隐患。检测技术应用与效果验证见下表2。

表2 检测技术应用与效果验证

检测项目	方法	结果验证
地基承载力	CPT+ 载荷试验	加固后承载力达280kPa
渗流稳定性	GPR+ 渗压计监测	渗流量降至3L/s（允许值 $\leq 5\text{L/s}$ ）
沉降变形	北斗高精度GNSS	差异沉降稳定在18mm（运行3年数据）

结语

通过某水库大坝工程实例表明，水工建筑地基基础检测需重点关注承载力、渗流及沉降协同作用。采用“地质勘察-原位检测-数值模拟”三位一体方法，结合高压旋喷桩、防渗墙等主动加固措施，可有效解决复杂地基问题。建议在类似工程中推广自动化监测技术，实现全生命周期安全管理。

参考文献

[1] 刘黔. 水利工程地基基础岩土试验检测要点分析[J]. 东北水利水电, 2023, 41(12): 47-50.  
 [2] 梁贤浩, 孙文娟. 关于水利工程地基基础岩石试

验检测技术的研讨[J]. 内江科技, 2023, 44(10): 71-72.  
 [3] 曹文逸. 关于水泥搅拌桩在沿海地区水利工程软基处理中的应用研讨[J]. 陕西水利, 2022, (12): 176-177+179.  
 [4] 李莹. 水泥土搅拌桩复合地基在中小型水利工程中的运用[J]. 科学技术创新, 2021, (25): 133-134.  
 [5] 王晖. 水工建筑软基及抗浮基础检测研究及技术应用. 河南省, 河南鸿嘉建筑工程有限公司, 2021-03-18.  
 [6] 刘岩. 探地雷达在水工建筑地基病害检测中的运用[J]. 黑龙江水利科技, 2018, 46(11): 130-131.  
 作者简介: 黄程乐(1990.12--), 男, 汉, 海南临高人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 水工建筑。