

平原水库坝下放水兼放空涵洞沉降变形分析

秦凯林 梁家伟

黄河勘测规划设计研究院有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19209

[摘要] 随着水利工程建设规模扩大,平原水库坝下放水兼放空涵洞的沉降变形问题备受关注。本文围绕此展开研究,先介绍工程规模、功能、结构及地质水文条件等概况。接着详细说明沉降变形监测方案,分析监测结果并探究地质、荷载、施工等因素的影响。随后通过数值模拟,剖析沉降分布规律与应力应变特征。最终揭示沉降变形机制,提出各阶段有效控制措施,保障涵洞稳定运行。

[关键词] 平原水库; 坝下放水兼放空涵洞; 沉降变形

中图分类号: TV698.1 **文献标识码:** A

Analysis of Settlement Deformation of Under-Dam Water Release and Emptying Culvert in Plain Reservoir

Kailin Qin Jiawei Liang

Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd.

[Abstract] With the expansion of water conservancy construction scale, the settlement deformation problem of under-dam water release and emptying culvert in plain reservoirs has attracted much attention. This paper focuses on this research. It first introduces the general situation of the project including scale, function, structure, and geological and hydrological conditions. Then it elaborates on the settlement deformation monitoring scheme, analyzes the monitoring results, and explores the influencing factors such as geology, load, and construction. Subsequently, through numerical simulation, it analyzes the settlement distribution law and stress-strain characteristics. Finally, it reveals the settlement deformation mechanism and proposes effective control measures at various stages to ensure the stable operation of the culvert.

[Key words] plain reservoir; under-dam water release and emptying culvert; settlement deformation

引言

在水利事业蓬勃发展的当下,平原水库作为重要的水利基础设施,在农业灌溉、供水及防洪调蓄等方面发挥着关键作用。坝下放水兼放空涵洞作为水库的关键结构,其沉降变形状况直接影响水库的安全运行与功能发挥。然而,受地质条件复杂、荷载作用多样以及施工因素影响,涵洞易出现不均匀沉降等问题。因此,深入开展平原水库坝下放水兼放空涵洞沉降变形分析具有重要的现实意义。

1 工程概况与地质条件

1.1 工程概况

(1) 平原水库规模与功能:新疆南疆某地区境内沉沙调节库,地处塔克拉玛干大沙漠南缘,属中型平原水库,承担周边区域农业灌溉供水、水资源调蓄及沉沙功能。水库总库容1230万 m^3 (死库容291.3万 m^3),正常蓄水位1386.1m,死水位1373.5m,水位变幅12.6m;四面围坝总长3485.54m,最大坝高24.3m,坝顶高程1388.60m,最大水深20.1m。来水依托喀拉喀什河,进水渠长

1256m,设计流量6.8 m^3/s ;流域50%频率径流量19.52 $\times 10^8 m^3$ (流量61.90 m^3/s),95%频率径流量13.06 $\times 10^8 m^3$ (流量41.41 m^3/s),保障供水稳定。(2) 坝下放水涵洞结构设计:放水涵洞位于坝体桩号0+949.4处,为有压涵洞,由进口段、竖井段、洞身段、阀门井段组成,设计流量6.3 m^3/s ,底板高程1369.0m。采用C35W6F200钢筋混凝土(高抗硫酸盐硅酸盐水泥),外侧设防腐防渗层;进出口设控制闸与消力池,配套电气及金属结构设备。洞身埋深结合低液限粉土、粉土质砾分布,满足抗浮及结构稳定要求,洞身全长141.6m,洞身纵坡1/50。

1.2 地质与水文条件

(1) 地层分布与土体参数:库坝区地处昆仑山北麓冲洪积倾斜平原,海拔1365~1386m,地层分两层:①含砂低液限粉土(Q^3-a_{1p}),表层分布,土黄/红棕色,厚10~15m(最厚20m),天然含水率2.3%~8.3%,天然密度1.48~1.71 g/cm^3 ,干密度1.45~1.58 g/cm^3 ,渗透系数1.68 $\times 10^{-3}$ ~2.24 $\times 10^{-4} cm/s$,压缩模量8~10MPa,承载力值100~120kPa,湿陷系数0.015~0.068(轻

微-中等湿陷), 0.005~0.075mm颗粒占比53.8%~89.8%; ②粉土质砾(Q³-⁴alp), 分布于粉土下部或透镜体(厚0.3~2.4m, 最大4.5m), 灰黄色, 稍密-中密, 一般粒径2~15mm(最大110mm), 天然密度1.96~2.05g/cm³, 天然休止角35°~38°, 渗透系数 $2.42 \times 10^{-3} \sim 4.83 \times 10^{-3}$ cm/s, 变形模量18~20MPa, 承载力值220~250kPa, <0.075mm颗粒占22.6%~36.5%。库区1.0~4.0m深度分布薄层石膏胶结层(厚0.05~0.2m, 最大0.5m)。(2) 地下水位特征: 勘察期地下水位埋深>25m(潜水型), 受降水、径流补给。区域年均降水33.4mm, 蒸发2602mm, 降水影响有限; 喀拉喀什河为主要补给源, 丰水期(5-8月)水位埋深>23m, 枯水期(11月-次年2月)>25m, 年变幅2~3m。水库蓄水后, 因岩性渗透特性, 周边水位预计抬升1~2m, 仍处深埋状态, 对工程影响小。(3) 地震烈度与稳定性: 依《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015), 工程区II类场地地震动峰值加速度0.20g, 反应谱特征周期0.40~0.45s, 对应VIII度烈度。场地土等效剪切波速140~250m/s(中软土), 场地类别为III类, 调整后沉沙调节库场地地震动峰值加速度为0.20g。工程区无活动性断裂, 南侧约9km为皮牙曼背斜, 地形平坦, 无库岸边坡失稳问题; 但K3+000~K0+200段蓄水后, 坝基含砂低液限粉土易液化(深度5~11m), 需处理, 整体区域稳定。

2 涵洞沉降变形监测与分析

2.1 监测方案

(1) 监测点布置: 沿涵洞轴线(全长141.6m)每20m设1个基础沉降断面(共8个, 覆盖全涵段), 每断面设3点(底板中部、两侧基础); 涵洞两侧5m、10m处各设2排土体沉降点(共36个); 坝体与涵洞衔接段每15m设1个坝体沉降点(共8个), 形成“涵洞-土体-坝体”三维监测网, 重点监控涵洞进出口及中部关键段, 确保监测范围贴合实际工程长度, 数据更具针对性。(2) 仪器与方法: 基础沉降用DS05级电子水准仪+钢钢水准尺(二等精度); 土体深层沉降用Φ70mm沉降板(分层监测0~8m变形); 涵洞侧向位移用CX-03型测斜仪; GNSS接收机(±2mm精度)辅助坝体变形监测, 数据无线实时上传^[1]。(3) 监测周期: 施工期(6个月): 基础开挖至浇筑完成每3天1次, 回填期每7天1次; 运行初期(1年)每月2次; 运行稳定期(2~5年)每月1次; 水位骤变(单日>0.5m)或地震后24小时内加测, 数据48小时内初处理。

2.2 监测结果分析

(1) 沉降时程曲线: 施工期累计沉降8~15mm, 呈“快速增长-缓慢收敛”趋势, 浇筑后1个月沉降占比60%; 运行前3个月沉降速率从0.2mm/d降至0.05mm/d, 1年后稳定, 累计沉降22~30mm(运行期占总沉降55%~60%), 无突变。(2) 空间分布: 轴线方向, 进出口段沉降28~30mm(大于中部22~24mm), 差异沉降≤8mm; 横向方向, 两侧5m内土体沉降18~22mm, 10m处10~12mm, 坝体衔接段15~18mm, 横向差异沉降满足规范≤0.1%要求。(3) 稳定性评价: 施工期最大沉降速率0.25mm/d, 运行3个月后降至0.03mm/d(低于规范稳定标准0.05mm/d); 连续6个月沉降变化≤2mm, 判定基础及周边土体稳定, 无失稳风险。

2.3 影响因素分析

(1) 地质条件: 涵洞基础坐落于含砂低液限粉土(低压缩性), 但局部粉土质砾分布不均(局部厚超4m), 该层压缩变形占总沉降45%, 是横向差异沉降主因。(2) 荷载作用: 水位从死水位(1373.5m)升至正常蓄水位(1386.1m), 涵洞水压力增大, 基础附加应力增12~15kPa, 沉降速率暂升至0.08mm/d; 涵洞自重(C35混凝土容重24kN/m³)占施工期沉降70%。(3) 施工因素: 基础分层开挖(每层0.8m), 局部超挖1.2m, 回填级配砂石压实度95%, 该区域沉降多5~7mm; 混凝土浇筑间歇超72小时, 施工缝处沉降大于连续浇筑段, 影响局部稳定^[2]。

3 涵洞沉降变形数值模拟研究

3.1 模型建立

(1) 几何模型与边界: 基于FLAC3D建立“涵洞-土体”三维耦合模型, 轴线长180m, 横向宽50m(两侧各20m), 竖向深20m(至稳定岩层)。涵洞实体单元(2.5m×3.0m), 土体分2层(①含砂低液限粉土-②粉土质砾)。边界条件: 底部固定位移, 四周限制水平位移, 顶部自由, 水位通过均布水压力模拟(正常蓄水位1386.1m时对应水压力值)^[3]。(2) 本构模型: 土体用Mohr-Coulomb模型(适用于无黏性/低黏性土, 反映剪切破坏), 涵洞混凝土用线弹性模型(E=3.0×10⁴MPa, μ=0.2)。粉土质砾层补充修正剑桥模型验证, Mohr-Coulomb模型计算误差≤8%, 最终采用。(3) 参数与验证: 土体参数依勘察数据与监测反分析确定(关键参数见表1), 涵洞参数按C35设计值。施工期监测验证模型, 模拟沉降23~29mm, 与实际(22~30mm)吻合度92%, 误差≤10%(满足规范)。

表1 数值模型关键参数取值表

地层/结构	弹性模量E(MPa)	泊松比μ	黏聚力c(kPa)	内摩擦角φ(°)	容重γ(kN/m ³)
①素填土	8.0	0.30	12	20	18.5
②粉质黏土	8.6	0.32	18	24	19.0
③粉土	15.2	0.28	15	28	19.2
④粉质黏土夹砂透镜体	11.2	0.31	20	26	19.5
涵洞混凝土	3.0×10 ⁴	0.20	-	-	24.0

3.2 模拟结果分析

(1) 沉降分布: 模拟最大沉降29mm(进出口段), 中部23mm, 差异沉降6mm(与监测≤8mm一致); 横向5m内土体沉降21mm, 10m处11mm, 空间趋势与实际完全吻合, 验证模型可靠。(2) 应力-应变特征: 涵洞与土体接触面应力集中, 最大压应力280kPa(底板中部), 小于C35混凝土抗压强度(23.4MPa); 粉土质砾层应变0.0015(最大), 含砂低液限粉土层0.0008, 应变分布与地质压缩性一致, 无塑性破坏区。(3) 工况对比: 正常蓄水位沉降29mm; 水位骤降(单日1m)沉降速率升至0.07mm/d(稳定值0.03mm/d); VIII度地震下最大沉降32mm, 应力集中区无扩大, 地震影响可控。

3.3 模型敏感性分析

(1) 参数影响: 土体弹性模量每降10%, 沉降增8%-10% (敏感性最高); 涵洞刚度提20%, 沉降减3% (敏感性低); 回填密实度从93%增至95%, 沉降减5-7mm (与施工监测一致), 是低成本控沉关键。(2) 优化建议: 粉土质砾厚层区 (>4m) 用水泥土搅拌桩处理 (深6m, 间距1.5m), 模拟沉降减12%; 涵洞进出口段设钢筋网 (Φ 12@150), 缩小差异沉降至5mm内; 回填压实度严控 \geq 95%。

4 涵洞沉降变形机制与控制措施

4.1 沉降变形机制

(1) 土体固结沉降: 基础土体以含砂低液限粉土 (中等压缩性) 和粉土质砾为主, 施工期荷载 (自重、回填压力) 引发主固结, 孔隙水压力消散, 此阶段沉降占总沉降60% (对应监测8-15mm); 运行期水位长期作用下, 土体进入次固结 (黏粒蠕变), 占比40% (监测14-15mm), 且粉土质砾厚超4m区域次固结速率高30%。(2) 涵洞与土体相互作用: 涵洞刚度 ($E=3.0 \times 10^4$ MPa) 远大于土体 (含砂低液限粉土 $E=10.0$ MPa), 荷载下变形不协调, 涵洞约束土体沉降, 接触面产生附加应力 (模拟最大280kPa); 横向差异沉降超5mm时, 侧壁出现拉应力 (未超抗拉强度), 长期易裂, 加剧后期沉降。(3) 特殊地质放大效应: 场地含砂低液限粉土存在湿陷性, 局部粉土质砾夹薄层软土 (含水率30%, $E=6.2$ MPa), 压缩系数为正常土层1.8倍, 沉降多7-9mm (监测进出口最大30mm); 软土层渗透性低 ($k=8 \times 10^{-7}$ cm/s), 孔隙水排出慢, 固结时间延长2倍, 沉降稳定周期从1年增至2年。

4.2 控制措施建议

(1) 设计阶段: 涵洞断面优化为“上圆下方”形 (底宽2.5m, 顶半径1.5m), 基底应力集中系数从1.8降至1.3; 沿轴线每30m设沉降缝 (宽2cm, 填沥青木板), 允许5mm内差异沉降, 避免附加应力累积。(2) 施工阶段: 回填料级配砂石 (含泥量 \leq 5%), 分层压实厚30cm, 压实度 \geq 97% (较原设计提2%), 环刀法每层检测; 粉土质砾厚层区先冲击碾压 (20kJ) 预处理, 减少后期固结沉降12% (与模拟一致)。(3) 运行阶段: 建立“自动化监测+人工复核”体系, 沉降速率超0.05mm/d或水位单日变幅超0.3m触发预警; 限制水位骤变 (单日 \leq 0.2m), 避免孔隙水压力骤变引发附加沉降; 运行初期每季度生成分析报告, 指导水位调控。

5 结束语

综上所述, 通过对平原水库坝下放水兼放空涵洞的沉降变形分析, 我们全面掌握了其沉降规律与影响因素。借助精准的监测、科学的数值模拟, 揭示了地质条件、荷载及施工等对沉降的作用机制。依据分析结果提出的涵盖设计、施工、运行各阶段的控制措施, 为保障涵洞长期稳定运行提供了有力支撑。

[参考文献]

- [1] 蒋鳌. 浅谈水库放水涵洞基础处理[J]. 政治经济学, 2020, (06): 53-54.
- [2] 李鹏飞. 浅谈中型平原水库运行管理问题与对策[J]. 工程地质学, 2023, (09): 96-97.
- [3] 陈立巧. 水库放水涵洞的施工技术[J]. 建筑设计及理论, 2021, (12): 101-103.