

# 土工膜斜墙坝安全监测设计

陈 瑞

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘 要:** 土工膜斜墙坝安全监测设计需遵循全面性、针对性、可靠性与经济性原则。监测范围应覆盖坝体、坝基、坝肩及近坝区, 涵盖变形、渗流、应力应变及温度等项目。针对土工膜特性, 增设破损监测与老化跟踪; 对渗漏、滑坡等风险点加密布设监测设备。选用稳定可靠的监测设备, 建立高效数据传输体系, 合理控制成本, 实现坝体安全状态实时评估与预警。

**关键词:** 土工膜斜墙坝; 安全监测; 设计

引言: 土工膜斜墙坝作为现代水利工程中广泛应用的一种坝型, 以其独特的防渗性能和经济性受到青睐。然而, 受自然环境、材料老化及运行管理等多重因素影响, 其安全稳定性面临挑战。为确保坝体长期安全运行, 科学合理的安全监测设计至关重要。通过系统监测坝体变形、渗流、应力应变等关键指标, 可及时发现潜在隐患, 为工程维护与管理提供可靠依据, 从而保障水利工程的安全与效益。

## 1 土工膜斜墙坝结构特点与安全风险分析

### 1.1 土工膜斜墙坝结构特点

(1) 坝体结构概述: 土工膜斜墙坝主要由坝体、土工膜斜墙、垫层、过渡层及护坡组成。坝体采用当地土石料填筑, 承担挡水稳定作用; 土工膜斜墙铺设于上游坡面, 作为防渗核心, 与坝基、岸坡防渗设施衔接; 垫层保护土工膜免受刺破, 过渡层缓解颗粒级配差异, 护坡抵御风浪雨水冲刷, 保障斜墙完整。(2) 土工膜材料特性: 土工膜防渗性能优良, 渗透系数极低; 物理上柔韧轻便、便于铺设, 能适应坝体轻微变形; 化学性能稳定, 耐酸碱、抗腐蚀, 适配不同环境; 力学上具备一定抗拉强度和伸长率, 可承受常规应力, 但抗穿刺、抗老化能力有限, 易受外力和环境影响损坏。

### 1.2 安全风险分析

(1) 常见安全隐患: 主要包括渗漏、滑坡、土工膜老化等。土工膜破损或衔接不严会引发渗漏, 严重时导致坝体渗透破坏; 坝体填料压实不足、坡比过陡或雨水浸泡, 易引发上游坡面滑坡并损坏斜墙; 长期日晒雨淋和温度变化, 会使土工膜脆化开裂、丧失防渗功能。(2) 风险成因分析: 设计缺陷为隐患埋下伏笔, 如坡比不合理、土工膜选型不当、防渗衔接设计疏漏; 施工不当直接降低安全性, 如填料压实度不达标、土工膜铺设时被刺破、衔接施工不规范; 运行管理不善导致隐患扩大, 如未定期

检查维护土工膜和护坡, 忽视外界不利影响<sup>[1]</sup>。

## 2 土工膜斜墙坝安全监测设计原则

### 2.1 全面性原则

(1) 监测范围覆盖: 安全监测需实现关键部位无盲区, 全面覆盖坝体、坝基、坝肩及近坝区岸坡。坝体重点覆盖上游土工膜斜墙及填料区域, 跟踪防渗层与坝体整体状态; 坝基聚焦防渗体系衔接部位, 防范渗透破坏; 坝肩关注两岸山体与坝体结合处, 规避边坡失稳; 近坝区岸坡延伸监测范围, 及时捕捉岸坡变形对坝体的影响, 全方位保障坝体安全。(2) 监测项目全面: 结合坝体运行特性, 涵盖变形、渗流、应力应变、温度等核心内容。变形监测跟踪坝体沉降、水平位移及土工膜拉伸变形, 掌握变形规律; 渗流监测包括渗流量、渗压及渗滤液水质, 防范渗漏扩大; 应力应变监测聚焦土工膜及坝体填料受力状态, 避免局部应力集中破损; 温度监测跟踪坝体内部及土工膜表面温度, 规避温度应力引发的老化或破损。

### 2.2 针对性原则

(1) 针对坝型特点: 结合土工膜斜墙坝以土工膜为核心防渗层、坝体多为土石料填筑的结构特点, 设计针对性监测方案。针对土工膜柔韧性强但抗穿刺、抗老化能力有限的特性, 增设土工膜破损监测及老化状态跟踪; 针对土石料坝体易出现沉降、滑坡的特点, 优化变形监测点位布置, 重点监测上游坡面及坝体中部的变形情况, 确保监测方案与坝型特性高度适配。(2) 针对风险点: 围绕土工膜斜墙坝潜在的渗漏、滑坡、土工膜老化等安全隐患, 设置重点监测区域与项目。针对渗漏风险, 在土工膜衔接处、坝基防渗界面等易渗漏部位加密渗压监测点; 针对滑坡风险, 在坝肩、近坝岸坡及坝体陡坡段强化变形监测, 提高监测频率; 针对土工膜老化风险, 在坝体表层土工膜区域增设温度、老化指标监测, 实现

风险精准管控。

### 2.3 可靠性原则

(1) 监测设备选型：优先选择性能稳定、抗干扰能力强、适应水利工程复杂环境的监测设备，确保设备长期可靠运行。土工膜相关监测设备需具备耐腐蚀、抗老化、灵敏度高的特点，适配坝体坡面及水下环境；变形、渗流等核心监测设备需经过严格校验，保障监测数据的准确性，避免因设备故障导致监测失效<sup>[2]</sup>。(2) 数据传输与处理：建立高效、稳定的数据传输体系，采用有线与无线结合的传输方式，确保监测数据实时、准确传输至监控中心，规避数据丢失或延迟；完善数据处理机制，对采集的原始数据进行筛选、校验、分析，剔除异常数据，生成可靠的监测报告，为坝体安全评估提供科学依据，提升监测系统的实用价值。

### 2.4 经济性原则

(1) 成本控制：在满足坝体安全监测核心需求、保障监测质量的前提下，合理控制监测系统的建设与运行成本。优化监测点位布置，避免重复布设，优先选择性价比高的监测设备；简化不必要的监测流程，降低设备安装、调试及后期维护成本，实现监测成本与监测效果的平衡，避免过度投资。(2) 效益评估：全面评估监测系统的经济效益与社会效益，确保投资回报合理。经济效益方面，通过精准监测及时发现安全隐患，避免坝体破损、渗漏等事故造成的巨额维修费用及水资源浪费；社会效益方面，保障坝体周边人民群众生命财产安全，维护区域水利工程正常运行秩序，实现监测系统的综合效益最大化。

## 3 土工膜斜墙坝安全监测技术与方法

### 3.1 变形监测

(1) 表面变形监测：主要采用水准仪、全站仪等专业设备，实现坝体表面位移的精准监测。监测前需在坝体表面合理布设监测点位，形成完整的监测网络，重点覆盖土工膜斜墙坡面、坝顶、坝肩及近坝岸坡等关键区域。水准仪主要用于监测坝体表面沉降量，通过定期观测监测点高程变化，分析沉降规律及均匀性；全站仪用于监测水平位移，采用极坐标法或交会法，实时捕捉监测点的平面位置变化，及时发现坝体倾斜、滑坡等异常迹象，监测频率根据坝体运行阶段合理调整。(2) 内部变形监测：依托测斜仪、分层沉降仪等设备，深入监测坝体内部变形情况，防范内部隐患隐蔽发展。测斜仪主要埋设于坝体内部及坝肩边坡，沿钻孔自上而下安装，通过监测钻孔不同深度的水平位移，掌握坝体内部滑动面的形成及发展趋势；分层沉降仪用于监测坝体不同深度

填料的沉降量，精准捕捉坝体分层变形规律，判断坝体压实度是否满足要求，避免因内部不均匀沉降导致土工膜斜墙拉裂破损<sup>[3]</sup>。

### 3.2 渗流监测

(1) 渗流量监测：通过设置量水堰、测流孔等专用设施，实现坝体渗流量的实时监测与统计。根据渗流量大小，合理选择量水堰类型，小型渗流量采用三角堰，中大型渗流量采用矩形堰或梯形堰，确保监测精度；测流孔主要布置于坝体下游坡面、坝基排水体等部位，通过流速仪测量渗流速度，结合断面面积计算渗流量，定期记录数据，分析渗流量的变化趋势，当渗流量突然增大时，及时排查土工膜破损、坝基渗漏等隐患。(2) 渗流压力监测：在坝体内部、坝基、土工膜衔接处等易产生渗流的部位，安装渗压计监测渗流压力。渗压计采用钻孔埋设方式，确保传感器与周边土体紧密结合，准确感知渗流压力变化；监测数据实时传输至监控中心，通过分析渗压分布规律及变化幅度，判断防渗系统的运行效果，防范渗流压力过大导致坝体渗透破坏、土工膜剥离等风险。

### 3.3 应力应变监测

(1) 混凝土应力应变监测：针对坝体中的混凝土结构（如坝顶挡墙、防渗趾板等），在混凝土浇筑过程中同步埋设应变计，实现应力应变的全程监测。应变计采用嵌入式埋设，避免施工过程中损坏，通过监测混凝土在温度变化、荷载作用下的应变值，换算得出应力大小，分析混凝土结构的受力状态，防范因应力集中导致混凝土开裂，进而影响坝体整体安全性。(2) 土工膜应力监测：采用特殊设计的土工膜专用传感器，贴合于土工膜表面或埋设于土工膜与垫层之间，监测土工膜在施工及运行过程中的应力变化。该类传感器需具备柔韧性、抗老化特性，适配土工膜的变形特点，实时捕捉土工膜的拉伸、挤压应力，当应力超过材料承受极限时，及时发出预警，避免土工膜破损失效<sup>[4]</sup>。

### 3.4 温度监测

(1) 坝体温度监测：在坝体内部不同深度、不同部位安装温度计，形成温度监测网络，监测坝体温度分布及变化规律。重点监测土工膜铺设区域及坝体核心部位，捕捉温度变化对坝体填料、土工膜性能的影响，避免因温度骤升骤降产生温度应力，导致坝体开裂、土工膜脆化破损，为坝体安全运行提供温度数据支撑。(2) 环境温度监测：同步监测气温、水温等环境因素，分析其对坝体温度的影响。在坝体周边布设气温监测点，在水库上下游布设水温监测设备，实时记录环境温度数据，结合坝体

内部温度监测结果, 预判温度变化引发的坝体变形、土工膜老化等问题, 为监测方案优化、风险防控提供依据。

### 3.5 专项监测技术

(1) 土工膜完整性监测: 采用地质雷达、高密度电阻率法等无损检测技术, 全面监测土工膜的完整性, 及时发现破损隐患。地质雷达通过发射电磁波, 接收土工膜反射信号, 根据信号特征判断土工膜是否存在破损、搭接不严等问题, 检测效率高、无损伤; 高密度电阻率法通过测量土体电阻率变化, 间接判断土工膜破损位置及破损程度, 适用于大面积土工膜完整性排查。(2) 雾化监测: 针对水库泄洪时产生的雾化问题, 在泄洪区域周边合理设置雾化监测设备, 监测雾化强度、范围及持续时间。采用湿度传感器、风速传感器等, 实时捕捉雾化区域的环境参数, 分析雾化对坝体坡面、土工膜及周边设施的侵蚀影响, 为泄洪方案优化、雾化防护措施制定提供科学依据<sup>[5]</sup>。

## 4 土工膜斜墙坝安全监测数据分析与评估

### 4.1 数据预处理

(1) 数据清洗: 监测数据采集过程中易受设备故障、环境干扰等影响, 需先进行清洗处理, 去除异常值、重复值及无效数据。采用 $3\sigma$ 准则识别异常数据, 剔除偏离正常范围的监测值, 避免其影响分析结果; 对重复记录的数据进行合并, 删除无效空白数据, 同时核对数据采集时间、监测点位等信息, 确保数据的准确性和唯一性, 为后续分析工作奠定可靠基础。(2) 数据插值: 针对监测过程中因设备故障、维护检修等导致的缺失数据, 采用合理的插值方法进行补充, 确保数据连续性。结合土工膜斜墙坝监测数据的时序特性, 优先采用线性插值、多项式插值等方法, 根据缺失数据前后的有效数据, 精准推算缺失值, 避免因数据断裂导致分析结果失真, 保障数据分析的完整性。

### 4.2 数据分析方法

(1) 统计分析: 运用均值、方差、极值等统计方法, 分析监测数据的分布特征与变化趋势。重点统计变形、渗流、应力应变等核心监测指标的数值范围、波动幅度, 判断数据是否处于正常区间, 通过对比不同时段、不同点位的监测数据, 识别坝体性态的细微变化, 排查潜在异常。(2) 时序分析: 采用时间序列分析方法, 结合监测数据的时间关联性, 构建时序模型, 预测监测数据的未

来变化趋势。通过分析数据的周期性、趋势性, 预判坝体变形、渗流量等指标的发展规律, 提前识别可能出现的安全隐患, 为坝体安全管控提供前瞻性依据。(3) 模型分析: 建立贴合土工膜斜墙坝结构特性的数学模型, 分析监测数据与坝体性态之间的内在关联。结合坝体尺寸、土工膜性能等参数, 构建变形、渗流等相关数学模型, 量化监测数据与坝体安全状态的对应关系, 提升数据分析的科学性和精准度。

### 4.3 安全评估与预警

(1) 安全评估标准: 结合土工膜斜墙坝的设计要求、运行工况及相关规范, 制定完善的安全评估标准与指标体系。明确变形、渗流、应力应变等各项监测指标的安全阈值, 划分安全、警戒、危险三个等级, 为坝体安全状态评估提供明确依据。(2) 预警机制建立: 根据监测数据分析结果, 结合安全评估标准, 建立科学的安全预警机制。设置分级预警信号, 明确预警触发条件, 当监测数据达到警戒阈值时, 及时发出预警信息; 同时制定预警响应流程, 明确处置措施, 确保隐患早发现、早处置, 保障坝体安全稳定运行。

### 结束语

土工膜斜墙坝安全监测设计是保障其长期稳定运行的关键环节。通过全面、精准的监测体系, 可实时掌握坝体变形、渗流、应力应变等关键参数的变化, 为工程安全评估提供科学依据。设计过程中需注重监测设备的可靠性、数据传输的稳定性及预警机制的灵敏性, 同时兼顾经济性与实用性。未来, 随着监测技术的不断进步, 应持续优化监测方案, 提升坝体安全保障能力, 确保水利工程安全高效运行。

### 参考文献

- [1] 宿振兴. 水利水库坝体加固工程中的土工膜防渗施工技术探讨[J]. 四川水泥, 2021(8): 294-295.
- [2] 韦学军, 卢志卿, 俞扬. 防渗复合土工膜施工及质量控制探析[J]. 工程建设与设计, 2020(23): 144-146.
- [3] 李标. 薄壁塑性混凝土防渗墙在高水头围堰中的应用[J]. 珠江水运, 2024, (22): 49-51.
- [4] 郝玉鹏. 防渗围堰复合土工膜心墙和斜铺的差异分析[J]. 水利水电工程设计, 2023, 42(1): 58-59.
- [5] 肖雪华. 钢板桩+土工膜防渗技术在围堰防渗工程中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(3): 49-52.