

ICS XXX
CCS XXX



团

体

标

准

T

T/CI XXX-2025

水利水电工程滑坡预警技术规程

（征求意见稿）

Technical guidelines for landslide early warning in water
conservancy and hydropower projects

2025-X-XX 发布

2025-X-XX 实施

中国国际科技促进会

发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体要求	1
5 滑坡风险识别与评估	4
6 监测技术体系	5
7 预警系统设计	6
8 应急响应与工程处置	7
9 验收与运行维护	7
附录 A（资料性）数值模拟参数库	9

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第一部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由**东辰华夏(北京)工程技术有限公司**提出。

本文件由中国国际科技促进会归口。

本文件起草单位：**东辰华夏(北京)工程技术有限公司**

本文件主要起草人：许立祥

引 言

水利水电工程是国民经济的重要基础设施，其安全运行直接关系到人民生命财产安全和区域可持续发展。滑坡作为水利水电工程中常见的地质灾害，具有突发性强、破坏性大等特点，尤其在水库蓄水、强降雨等工况下，易诱发滑坡失稳，威胁工程安全及下游居民区。近年来，随着全球气候变化与人类工程活动加剧，滑坡灾害呈现频发态势，传统经验式管理已难以满足现代化防灾需求。

为规范水利水电工程滑坡预警工作，提升灾害防控的科技化、精细化水平，本文件依据国内外相关技术标准（如GB/T 38509、ISO 22327等），结合我国水利水电工程滑坡防治实践经验，系统规定了滑坡预警的技术体系、监测方法、预警模型构建及应急响应流程。标准重点聚焦以下方面：

——多源监测技术融合：综合运用GNSS、边坡雷达、光纤传感等先进技术，构建“空-地-地下”立体监测网络，实现滑坡变形与水文参数的动态感知；

——智能化预警模型：引入LSTM时序预测、随机森林分类等算法，建立静态稳定性分析与动态阈值修正相结合的双重预警机制；

——全链条应急管理：从风险识别、预警发布到工程处置，明确分级响应措施与时效要求，保障应急行动的科学性与可操作性；

——标准化运维保障：通过设备选型参数化、验收指标定量化，确保监测系统长期可靠运行。

本文件的制定，可为水利水电工程滑坡监测预警提供技术依据，助力实现灾害“早发现、早预警、早处置”，最大限度降低灾害损失。附录中提供的仪器检验方法与典型案例库，进一步增强了标准的实用性和参考价值。

水利水电工程滑坡预警技术规程

1 范围

本文件规定了水利水电工程滑坡预警的技术要求、监测方法、预警系统设计、应急响应及运行维护等内容。

本文件适用于水库、水电站、堤防等水利水电工程的滑坡地质灾害监测预警工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 38509-2020 滑坡防治设计规范

GB 50201-2014 防洪标准

DL/T 2257 大中型水电站地质灾害预警及应急管理技术规范

DZ/T 0221 崩塌、滑坡、泥石流监测规范

SL/T 803-2020 水利工程地质灾害监测技术规程

ISO 22327:2018 滑坡灾害风险管理指南

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

滑坡预警 landslide early warning

基于监测数据与风险分析，对潜在滑坡灾害的时空范围、危害程度进行预测并发布警报的行为。

3.2

监测系统 monitoring system

由传感器、数据传输设备、数据处理平台组成的实时或周期性监测网络，包括变形监测、水文监测等子系统。

3.3

预警阈值 warning threshold

触发不同等级预警的临界参数（如位移速率、降雨强度等）。

3.4

滑坡稳定性系数 landslide stability coefficient

表征滑坡体稳定性的无量纲参数，通常通过力学模型计算得出。

4 总体要求

4.1 基本原则

滑坡预警是水利水电工程安全管理的核心环节，其基本原则需贯穿预警系统设计、实施与运维全过程，具体细化如下：

a) 预防为主，风险分级布控

1) 风险动态评估

基于历史滑坡数据、地质构造（如断层走向、岩体风化程度）、水文条件（地下水位波动、降雨入渗率）建立三级风险分区模型：

— 极高风险区（Ⅰ类）：存在历史滑坡体、坡体倾角 $>35^\circ$ 、岩土体渗透系数 $>1\times 10^{-4}$ cm/s 的区域，需布设实时监测设备，监测频率 ≥ 1 次/小时；

— 中高风险区（Ⅱ类）：坡体存在明显裂缝（宽度 >5 cm）、人工开挖边坡高度 >20 m 的区域，监测频率 ≥ 1 次/天；

— 潜在风险区（Ⅲ类）：植被覆盖率 $<30\%$ 、坡面径流冲刷严重的区域，实施周期性巡检，监测频率 ≥ 1 次/周。

2) 预防性工程措施

— 对Ⅰ类区域优先实施锚索加固（预应力 ≥ 1000 kN）、截排水沟（断面尺寸 $\geq 0.5\text{m}\times 0.5\text{m}$ ）及生态护坡（植被覆盖度 $>60\%$ ）；

— 结合 InSAR（合成孔径雷达干涉测量）技术开展区域性形变扫描，识别毫米级位移异常区。

b) 技术适用，分级匹配监测体系

1) 技术选型依据

— 大型枢纽工程（库容 >1 亿 m^3 ）：采用 GNSS（全球导航卫星系统）+ 光纤光栅传感 + 微震监测的多元融合方案，定位精度 $\leq \pm 2\text{mm}$ ，采样频率 $\geq 50\text{Hz}$ ；

— 中型边坡（高度 50-100m）：布设倾斜仪、渗压计与雨量计联动系统，数据回传间隔 ≤ 15 分钟；

— 小型边坡（高度 $<50\text{m}$ ）：采用低成本 MEMS（微机电系统）加速度计与无人机航拍定期巡检。

2) 地质适应性调整

— 岩质边坡：侧重地表位移监测（如全站仪、激光扫描），重点关注结构面张开度变化；

— 土质边坡：强化孔隙水压力与含水量监测（TDR 时域反射仪），预警阈值需结合土体抗剪强度参数（ c 、 ϕ 值）动态修正。

c) 系统联动，构建智能决策平台

1) 多源数据融合架构

— 建立“空-天-地-地下”四维监测网：

— 空基：无人机热成像识别地表渗流异常；

— 天基：遥感卫星监测区域性地表形变（精度 $\leq 5\text{mm}/\text{年}$ ）；

— 地表：北斗/GPS 位移站、裂缝计、雨量站；

— 地下：钻孔测斜仪、渗压计阵列（埋深 $\geq$ 坡体高度的 $1/2$ ）。

— 开发数据中台，实现多传感器时间同步（误差 $\leq 1\text{ms}$ ）、空间坐标统一（WGS-84 坐标系），支持机器学习算法（如 LSTM 神经网络）预测滑坡演化趋势。

2) 应急响应机制

— 预警触发后，系统自动推送信息至工程指挥部、地方政府及受影响社区，同步启动应急预案代码；

— 代码红色：立即疏散半径 3km 内人员，关闭下游交通；

- 代码橙色：工程车辆待命，加强监测至 1 次/10 分钟；
- 代码黄色：启动 24 小时人工巡查，检查排水设施通畅性。

d) 经济合理，全周期成本优化

1) 设备全寿命周期管理

— 设计阶段：通过数值模拟（如 FLAC3D 软件）优化测点布设，减少冗余设备（节约成本 15-30%）；

— 运维阶段：采用太阳能供电+LoRa 无线传输方案，降低线缆铺设与电费支出；

— 淘汰设备：建立备件共享库，对退役传感器进行翻新重组，利用率提升 40%。

2) 效益风险评估模型

— 计算预警系统投入产出比（ROI）：

— 要求 $ROI \geq 150\%$ 方可立项，并通过蒙特卡洛模拟评估极端天气下的经济可行性。

4.2 分级管理

滑坡预警等级划分需综合考虑变形动力学特征、环境诱发因素及工程暴露风险，具体实施细则如下：

a) 一级预警（红色，极高风险）

1) 触发条件

— 变形指标：地表位移速率 ≥ 10 mm/天，或单日位移量突变超过月均值的 300%；

— 水文指标：连续 3 小时降雨强度 > 50 mm/h，或 72 小时累积雨量超过当地百年一遇标准；

— 辅助判据：地下水位单日上升 > 2 m，或微震事件频率 > 50 次/小时（能量 $> 1 \times 10^3$ J）。

2) 响应措施

— 工程层面：启动应急支护（如喷射混凝土+钢拱架），开启全部排水泵站（流量 ≥ 1000 m³/h）；

— 管理层面：工程全线停工，人员撤离至安全区（距离坡脚 ≥ 2 倍坡高）；

— 数据跟踪：启用备份监测系统，数据回传频率提升至 1 次/分钟。

b) 二级预警（橙色，高风险）

1) 触发条件

— 变形指标：位移速率 5-10 mm/天，且加速度 > 0.1 mm/h²；

— 水文指标：连续 24 小时降雨 > 150 mm，或土壤体积含水量 $> 35\%$ （黏土质边坡）；

— 裂缝扩展：主裂缝长度日增 > 1 m，或出现羽状次级裂缝（间距 < 0.5 m）。

2) 响应措施

— 工程层面：局部限制施工（禁止坡顶加载），加固临时支护结构（安全系数提升至 1.5 倍）；

— 监测强化：增设临时测斜孔（深度 $\geq$ 潜在滑面以下 5m），启动无人机每日 2 次航拍；

— 物资准备：在坡脚预置沙袋（ ≥ 500 个）、排水泵（ ≥ 500 m³/h 容量）。

c) 三级预警（黄色，潜在风险）

1) 触发条件

— 变形指标：位移速率 1-5 mm/天，且累计位移量 > 30 mm；

— 环境诱因：连续 5 日降雨量 > 50 mm/日，或气温骤降 $> 10^\circ\text{C}/24\text{h}$ （冻融边坡）；

— 设备预警：3 个以上相邻测点出现协同位移（相关性系数 > 0.8 ）。

2) 响应措施

— 日常管控：限制坡顶机械振动（振动速度 ≤ 5 mm/s），清理排水沟淤积物；

- 监测调整：将 GNSS 采样间隔从 1 小时缩短至 15 分钟，人工巡检频次提升至 2 次/天；
- 人员培训：组织现场技术人员开展滑坡应急预案演练（每年 ≥ 2 次）。
- d) 分级动态调整机制
 - 1) 降级条件
 - 连续 7 天位移速率稳定下降至下一等级阈值以下，且诱发因素（如降雨）消退；
 - 应急工程措施验收合格（如抗滑桩位移 $<$ 设计允许值 5%）。
 - 2) 升级条件
 - 预警期内发生余震（震级 > 4 级）或新增集中渗流点（流量 $> 1\text{L/s}$ ）；
 - 监测设备故障率 $> 30\%$ ，导致关键数据缺失超过 12 小时。

5 滑坡风险识别与评估

5.1 地质勘察要求

地质勘察应符合 GB/T 38509-2020 中第 5 章的规定，具体要求如下：

5.2 勘察内容

- 地质勘察应包括以下内容：
- a) 地形地貌：坡度、坡向、沟谷发育程度；
 - b) 地层岩性：软弱夹层、风化程度；
 - c) 水文地质：地下水位动态、渗透系数。

5.3 勘察方法

- 地质勘察应采用以下方法：
- a) 钻探：每 100 m² 布置 1 个钻孔，深度 $\geq$ 潜在滑面以下 5 m；
 - b) 物探：采用地质雷达（GPR）探测地下结构异常。

5.4 多源数据融合分析

5.4.1 遥感解译技术

- a) 光学遥感：使用 WorldView-3 卫星数据（分辨率 0.3m）识别新生裂缝，要求裂缝解译宽度阈值 $\leq 0.5\text{m}$ ；
- b) 热红外遥感：通过 Landsat-8 TIRS 数据反演地表温度场，温异常区（ $\Delta T \geq 3^{\circ}\text{C}$ ）应列为重点核查区；
- c) InSAR 数据处理：采用 PS-InSAR 技术处理 Sentinel-1 数据，形变速率解算精度应达 $\pm 2\text{mm/年}$ 。

5.4.2 三维地质建模

- a) 建模要求：采用 GOCAD 软件建立结构模型，网格尺寸 $\leq 5\text{m} \times 5\text{m} \times 2\text{m}$ ；
- b) 参数赋值：岩土体力学参数按表 5 进行概率分布设置：

表 5 岩土体参数概率分布类型

参数	分布类型	取值范围
内摩擦角 ϕ	正态分布	$\mu = 25^{\circ}$, $\sigma = 3^{\circ}$

粘聚力 c	对数正态分布	$\mu=50\text{kPa}, \sigma=15\text{kPa}$
渗透系数 k	均匀分布	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$

5.5 风险量化评估

5.5.1 风险矩阵构建

采用公式（1）计算风险指数 R:

$$R = P \times C \times S \dots\dots\dots (1)$$

式中：P——发生概率（0-1）

C——暴露资产价值（亿元）

S——社会影响系数（1-5 级）

5.5.2 动态风险评估流程

- a) 数据同化：每 6 小时融合一次监测数据与数值模拟结果；
- b) 蒙特卡洛模拟：执行 ≥ 10000 次迭代计算，输出破坏概率曲线；
- c) 敏感性分析：确定关键影响因子排序（如地下水位变化权重占 35%）。

6 监测技术体系

6.1 监测内容与技术要求

监测内容与技术要求应符合表 1 的规定。

表 1 监测内容与技术要求

监测类型	技术手段	精度要求	适用场景
地表变形监测	GNSS、边坡雷达、 InSAR	$\pm 1 \text{ mm}$ （水平位移）	大范围区域监测 ($\geq 1 \text{ km}^2$)
地下变形监测	测斜管、光纤传感	$\pm 0.1 \text{ mm/m}$ （深部位移）	滑动面定位、深部变形分析

6.2 设备选型与安装

监测设备技术参数与安装要求应符合表 2 的规定。

表 2 监测设备技术参数与安装要求

设备类型	型号示例	量程	精度	安装要点
GNSS 接收机	Trimble R12	水平 $\pm 50 \text{ mm/km}$	$\pm 2 \text{ mm} + 0.1 \text{ ppm}$	混凝土墩需预埋钢筋锚杆，深度 $\geq 1 \text{ m}$
渗压计	Geokon 4500	0~2000 kPa	$\pm 0.1\% \text{ FS}$	安装前需饱和处理，避免气泡影响读数

6.3 新型传感技术应用

6.3.1 分布式光纤监测

- a) 布设方式: 沿坡体走向铺设铠装光缆, 弯曲半径 $\geq 30\text{cm}$;
- b) 性能指标: 空间分辨率 1m , 应变测量精度 $\pm 5\mu\varepsilon$;
- c) 预警应用: 当监测段出现 ≥ 3 个连续测点应变突变 $> 100\mu\varepsilon/\text{小时}$, 触发二级预警。

6.3.2 微震监测网络

- a) 台阵布置: 按正三角形网格布设传感器, 间距 $\leq 50\text{m}$;
- b) 事件定位: 采用 Geiger 算法, 定位误差 $\leq 10\text{m}$;
- c) 特征分析: 提取 b 值、能量指数等参数, 当 b 值 < 0.7 且能量指数 $> 10^3$ 时判定为失稳前兆。

6.4 监测数据质控

6.4.1 异常数据识别

建立三级过滤机制:

- a) 一级过滤: 剔除超出物理量程数据 (如位移 $> 10\text{m}$);
- b) 二级过滤: 3σ 准则排除统计异常值;
- c) 三级过滤: 人工复核持续异常 ≥ 6 小时的数据段。

7 预警系统设计

7.1 系统架构与功能模块

预警系统设计应符合 DL/T 2257 中第 6 章的规定, 具体要求如下:

7.1.1 数据采集层

数据采集层应包括以下设备:

- a) GNSS 接收机: 精度应符合 GB/T 38509-2020 中 7.2.3 的要求;
- b) 边坡雷达: 监测范围 $\geq 2\text{km}$, 精度 $\pm 1\text{mm}$ 。

7.1.2 分析层

分析层应采用以下模型:

- a) LSTM 模型: 预测未来 24 小时位移趋势;
- b) 随机森林模型: 分类滑坡风险等级。

7.2 预警模型构建

预警模型构建应符合以下要求:

- a) 静态模型: 基于极限平衡法计算稳定性系数;
- b) 动态模型: 结合实时降雨量修正阈值。

7.3 多模型耦合预警

7.3.1 模型架构

构建“物理机制+数据驱动”双核模型:

- a) 物理核: 采用 FLAC3D 进行应力-渗流耦合计算, 时间步长 $\leq 1\text{s}$;
- b) 数据核: 应用 XGBoost 算法融合 15 维特征参数, 训练样本量 $\geq 10^5$ 组。

7.3.2 模型验证

通过历史案例反演验证:

- a) 拟合度要求: 位移预测曲线决定系数 $R^2 \geq 0.85$;
- b) 预警时效: 较传统方法提前 ≥ 2 小时发出预警;

- c) 虚警率控制: $<5\%$ (置信度 95%)。

7.4 可视化平台开发

- a) 三维可视化: 采用 WebGL 技术实现 10 万级点云流畅渲染;
- b) 预警热力图: 按 $500\text{m} \times 500\text{m}$ 网格动态显示风险等级;
- c) 移动终端: 开发 Android/iOS APP, 支持推送延迟 $\leq 3\text{s}$ 。

8 应急响应与工程处置

8.1 应急预案制定

应急预案制定应符合 SL/T 803-2020 中第 8 章的规定, 具体要求如下:

8.1.1 预案要素

应急预案应包括以下要素:

- a) 撤离路线: 沿垂直滑坡方向向两侧高地疏散;
- b) 通信保障: 配备卫星电话、对讲机;
- c) 医疗救援: 预设医疗点, 储备急救物资。

8.1.2 应急演练

应急演练应每半年进行一次, 具体要求包括:

- a) 模拟一级预警, 测试响应时效;
- b) 记录人员撤离时间, 目标 ≤ 30 分钟。

8.2 工程处置措施

工程处置措施应符合 GB 50201-2014 中第 9 章的规定, 具体要求如下:

8.2.1 临时支护

临时支护应包括以下措施:

- a) 抗滑桩: 直径 1.2 m , 间距 3 m ;
- b) 挡土墙: 混凝土强度 C25, 基础深度 $\geq 2\text{ m}$ 。

8.2.2 排水工程

排水工程应包括以下措施:

- a) 地表排水: 截水沟断面尺寸 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$;
- b) 地下排水: 仰斜排水孔直径 110 mm , 间距 5 m 。

8.3 智能决策支持

8.3.1 疏散路径优化

- a) 算法选择: 采用改进 A*算法, 考虑实时路况与滑坡影响范围;
- b) 动态更新: 每 5 分钟重新计算最佳路径, 保证通行时间 $< 30\text{min}$;
- c) 指示系统: 部署太阳能 LED 导向屏, 亮度 $\geq 3000\text{cd/m}^2$ 。

8.3.2 工程抢险机器人

- a) 型号要求: 适应坡度 $\leq 45^\circ$, 越障高度 $\geq 0.5\text{m}$;
- b) 功能配置: 集成机械臂 (负载 $\geq 50\text{kg}$)、三维扫描仪 (精度 $\pm 2\text{cm}$);
- c) 作业模式: 远程遥控与自主导航双模式切换, 续航 $\geq 4\text{h}$ 。

9 验收与运行维护

9.1 验收标准

验收标准应符合以下要求：

9.1.1 监测系统验收

监测系统验收指标应符合表 3 的规定。

表 3 监测系统验收表

项目	标准要求	检测方法
数据采集完整性	≥98%	抽查 30 天数据，计算缺失率
预警响应时间	≤10 分钟	模拟滑坡事件，全程计时

9.1.2 工程措施验收

工程措施验收指标应符合表 4 的规定。

表 4 工程措施验收表

项目	标准要求	检测方法
排水通水能力	≥设计值 120%	注水试验记录流量
支护位移量	<10 mm/年	GNSS 连续监测 1 年数据

9.2 运行维护

9.2.1 日常巡检

日常巡检应包括以下内容：

- a) 每周检查传感器供电与通信状态；
- b) 每月清理监测点周边杂草、落石。

9.2.2 人员培训

人员培训课程大纲应符合以下要求：

- a) 基础课程（24 学时）：地质灾害识别、设备操作；
- b) 高级课程（16 学时）：预警模型调参、应急演练设计。

9.3 全生命周期管理

9.3.1 设备健康度评估

建立设备状态指标体系：

- a) 性能指数= (实际采样率/标称采样率) ×100%，要求 ≥95%；
- b) 可靠性指数= MTBF/(MTBF+MTTR)，要求 ≥0.98；
- c) 环境适应性：在-20℃~+60℃ 范围内保证功能正常。

9.3.2 预防性维护策略

- a) 定期更换：锂电池每 3 年更换，太阳能板每 5 年更新；
- b) 软件升级：每季度更新预警算法，追溯测试通过率需 100%；
- c) 防雷措施：接地电阻 ≤4 Ω，安装三级浪涌保护器。

附录 A

(资料性) 数值模拟参数库

A.1 典型岩土体本构模型参数

表 A.1 Mohr-Coulomb 模型参数参考值

岩性	弹性模量 E(GPa)	泊松比 ν	粘聚力 c(kPa)	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$
花岗岩	20-50	0.25-0.3	1000-2000	45-55
黏土	0.01-0.1	0.35-0.45	10-50	15-2