

ICS 93.080.01

CCS P 20

CAIEC

团 体 标 准

T/CAIEC 221—2026

高速公路道桥隧不稳定斜坡智能监测预警技术规范

Technical specification for intelligent monitoring and early warning of unstable slopes on expressways, bridges and tunnels

2026-01-29 发布

2026-02-28 实施

中国国际工程咨询协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	1
5 基本规定	2
6 监测要求	2
7 监测方法	4
8 数据采集与管理	5
9 数据分析与预警	7
10 监测成果	7
附录 A（规范性） 不稳定斜坡风险分级评价	9
附录 B（规范性） 监测设备防雷技术	10
附录 C（规范性） 多参数耦合预警算法实施细则	11
附录 D（资料性） 岩溶管道 CT 扫描技术规程	12
参考文献	13

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由桂林理工大学提出。

本文件由中国国际工程咨询协会归口。

本文件起草单位：桂林理工大学、广西交投科技有限公司、湖南致力工程科技有限公司、中国建设基础设施有限公司、长沙理工大学、广西交投集团有限公司、中铁城建集团南昌建设有限公司、中建三局集团有限公司、广西交通职业技术学院、广西水利电力职业技术学院、广西生态工程职业技术学院。

本文件主要起草人：何羽、钱凯、邓小芳、于晓辉、黄翔、李治、何华、卢军源、侯俊敏、蒋召杰、许准、车立刚、张家松、张升彪、刘怡、周哲、罗旭峰、吴永红、屠名、谭木荣、张世越、马亚飞、王磊、王华、张鑫全、曾绍勤、汪浩、刘玮、魏炜、彭来、胡海宁、李君鹏。

高速公路道桥隧不稳定斜坡智能监测预警技术规范

1 范围

本文件规定了高速公路道桥隧不稳定斜坡智能监测预警的基本规定、监测要求、监测方法、数据采集与管理、数据分析与预警、监测成果。

本文件适用于高速公路道桥隧不稳定斜坡智能监测预警工作，涵盖岩质边坡、土质边坡及复合型边坡的施工期、运营期全生命周期监测。对威胁重要基础设施、居民聚居区及生态环境敏感区的不稳定斜坡监测可参照执行。

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 2423.10 环境试验 第 2 部分：试验方法 试验 Fc：振动（正弦）
- GB/T 4208—2017 外壳防护等级（IP代码）
- GB 6722 爆破安全规程
- GB/T 18314 全球导航卫星系统（GNSS）测量规范
- GB/T 21978.2 降水量观测仪器 第 2 部分：翻斗式雨量传感器
- GB/T 32864 滑坡防治工程勘查规范
- GB 50026 工程测量标准
- GB 50167 工程摄影测量规范
- GB 50343 建筑物电子信息系统防雷技术规范
- GB 50497 建筑基坑工程监测技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

不稳定斜坡 *unstable slope*

在自然营力或人类活动影响下，具有潜在滑动、崩塌等变形破坏趋势，可能威胁人民生命财产及生态环境安全的斜坡地质体。

3.2

智能监测预警系统 *intelligent monitoring and early warning system*

集成物联网传感、北斗/GNSS 定位、大数据分析等技术，具备实时数据采集、多源信息融合、自动预警推送及三维可视化功能的监测体系。

3.3

多参数耦合预警 *multi-parameter coupling early warning*

综合位移、倾角、地下水位、降雨量等多维度监测数据，采用机器学习算法建立的动态预警模型。

3.4

红层边坡 *red layer slope*

由白垩系-第三系红色砂泥岩构成的易风化、遇水软化的特殊岩质边坡。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

APP：应用程序（Application）

AR: 增强现实 (Augmented Reality)
ARIMA: 自回归移动平均数 (Autoregressive Integrated Moving Average Model)
BIM: 建筑信息模型 (Building Information Modeling)
CORS: 连续运行卫星定位导航服务系统 (Continuous Operational Reference System)
CT: 计算机断层扫描 (Computed Tomography)
GNSS: 全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System)
GPS: 全球定位系统 (Global Positioning System)
PVC: 聚氯乙烯 (Polyvinyl chloride)
RBAC: 基于角色的访问控制 (Role-Based Access Control)
SPD: 浪涌保护器 (Surge Protection Device)

5 基本规定

5.1 监测分级

5.1.1 应根据附录 A 不稳定斜坡风险等级的规定, 实施差异化监测:

- a) I 级监测 : 极高风险不稳定斜坡或威胁 100 人以上聚居区、重要交通干线的 unstable 斜坡, 实施实时监测; 若涉及特大桥、长隧道, 应增设道桥隧结构专项监测模块;
- b) II 级监测 : 高风险不稳定斜坡或威胁 (50~100) 人区域的中高风险斜坡, 实施“自动化监测+定期巡查”; 涉及高速公路主干线路基、大桥、中短隧道, 应增设道桥隧结构专项监测模块;
- c) III 级监测 : 中风险斜坡实施“简易监测+汛期加密观测”; 若涉及乡村公路衔接段路基、小桥涵, 应每季度增加 1 次道桥隧结构外观检查。

5.1.2 低风险不稳定斜坡实施人工巡检, 不纳入分级监测体系。

5.2 监测原则

5.2.1 针对岩溶区地下水位突变的特征, 智能监测预警系统应具备高灵敏度孔隙水压力监测模块。

5.2.2 红层边坡监测应重点关注干湿循环作用下的强度衰减效应, 设置土壤含水率梯度监测点。

5.2.3 台风季 (6 月~10 月) 监测频率应提升至每 2 小时 1 次, 数据传输间隔应不大于 15 min。

5.3 设备要求

5.3.1 雨量传感器应符合 GB/T 21978.2 的规定, 防护等级应不低于 GB/T 4208—2017 规定的 IP68, -20 °C~+60 °C 温度范围内应能正常工作。

5.3.2 宜采用北斗短报文与 4G/5G 双通道传输, 单点离线时长不大于 30 min。

5.3.3 太阳能供电单元应满足连续阴雨 20 d 续航, 配备超级电容应急电源。

5.3.4 监测设备防雷应符合 GB 50343 的规定, 闪接器设置和 SPD 防护等级参见附录 B。

5.3.5 道桥隧专项监测设备应满足以下特殊要求:

- a) 桥梁墩台监测设备: 防护等级不低于 GB/T 4208—2017 规定的 IP68, 抗振动态性能符合 GB/T 2423.10 规定, -30 °C~+70 °C 温度范围内正常工作;
- b) 隧道内监测设备: 燃烧性能等级不低于 B1 级, 具备抗电磁干扰能力;
- c) 道路路基监测设备: 沉降传感器具备抗碾压性能, 最大承载压力不低于 10 MPa。

6 监测要求

6.1 施工期

6.1.1 开挖阶段

6.1.1.1 爆破作业安全要求应符合 GB 6722 的规定, 前 72 h 应启动振动监测, 单段药量超 500 kg 时应加密至 50 m 网格布点。

6.1.1.2 应对揭露的溶洞充填物进行含水量实时监测, 突变超 10% 应触发橙色预警。

6.1.1.3 道路路基开挖专项要求如下:

- a) 路基开挖至斜坡坡脚时，应同步监测路基边坡坡率，每开挖 2 m 高度布设 1 层边坡位移监测点；
 - b) 若路基穿越岩溶区，应每 10 m 进行 1 次岩溶管道 CT 扫描，发现溶洞直径大于或等于 2 m 时，加密至 5 m 扫描 1 次。
- 6.1.1.4 桥梁基础开挖专项要求如下：
- a) 桥墩基础位于斜坡体上时，基坑开挖前 72 h 应启动基坑周边位移监测，开挖深度超 5 m 时，监测频率加密至每半小时 1 次；
 - b) 爆破作业距桥墩基础小于 30 m 时，单段药量不大于 300 kg，振动速度阈值不大于 2.0 cm/s。
- 6.1.1.5 隧道洞口开挖专项要求如下：
- a) 隧道洞口仰坡开挖前，应采用地质雷达进行超前地质预报，每 5 m 布设 1 个探测断面；
 - b) 仰坡开挖坡度超 1:0.5 时，应布设分布式光纤监测，实时监测开挖引发的坡体变形。
- 6.1.2 支护阶段
- 6.1.2.1 锚索预应力损失监测精度应不大于 0.5 kN，张拉完成 48 h 内数据采集间隔应不大于 5 min。
- 6.1.2.2 格构梁应变监测点按 10 m×10 m 网格布置，温差补偿范围应覆盖 -10 ℃~+50 ℃。
- 6.1.2.3 桥梁支座与箱梁支护专项要求如下：
- a) 箱梁张拉时，若箱梁跨越不稳定斜坡，应同步监测支座竖向压缩量，张拉完成 48 h 内数据采集间隔不大于 5 min；
 - b) 锚索（杆）若用于桥梁墩台抗滑支护，预应力损失监测精度应不大于 0.3 kN，每 24 h 生成 1 次预应力衰减曲线。
- 6.1.2.4 隧道衬砌支护专项要求如下：
- a) 隧道衬砌浇筑时，洞口段应埋入式布设应变计，每 5 m 一环，每环 4 个监测点（拱顶、拱腰、边墙）；
 - b) 衬砌背后回填注浆时，应监测注浆压力，若注浆区域位于斜坡下方，压力超 1.2 MPa 时应暂停注浆，排查斜坡稳定性。
- 6.2 运营期
- 6.2.1 常态化监测
- 6.2.1.1 常态化监测内容应包括：
- a) 表面位移监测：GNSS 平面精度为 $\pm 2 \text{ mm}+1 \text{ ppm}$ ，高程精度为 $\pm 5 \text{ mm}+1 \text{ ppm}$ ；
 - b) 深部变形监测：固定式测斜仪量程为 $\pm 30^\circ$ ，分辨率为 0.001°。
- 6.2.1.2 道路运营期专项监测内容应包括：
- a) 路基沉降：采用北斗/GNSS 静态监测，路基中心沉降精度不大于 1 mm，路肩沉降精度不大于 2 mm，每 100 m 布设 1 个监测断面（含路基中心、两侧路肩共 3 个点）；
 - b) 路面裂缝：采用裂缝计监测，沿路面纵向每 20 m 布设 1 点，横向覆盖行车道、超车道，裂缝宽度超过 3 mm 时触发黄色预警；
 - c) 排水系统：在路基边沟、边坡截水沟关键节点布设流量传感器，实时监测雨水下渗对路基及斜坡的影响。
- 6.2.1.3 桥梁运营期专项监测内容应包括：
- a) 墩台位移：每个墩台布设 2 个 GNSS 监测点（墩顶对角），平面精度 $\pm 2 \text{ mm}+1 \text{ ppm}$ ，高程精度 $\pm 3 \text{ mm}+1 \text{ ppm}$ ，若墩台位于斜坡体上，监测频率常规每小时 1 次，汛期每半小时 1 次；
 - b) 基础应力：在桩基顶部布设应力传感器，实时监测斜坡变形对桩基受力的影响，应力突变超 10% 时触发橙色预警；
 - c) 支座变形：每个支座布设 1 个位移传感器，监测竖向压缩量及水平位移，与斜坡位移数据联动分析。
- 6.2.1.4 隧道运营期专项监测内容应包括：
- a) 洞门位移：在端墙顶部、翼墙端部布设 GNSS 监测点，平面精度 $\pm 2 \text{ mm}+1 \text{ ppm}$ ，高程精度 $\pm 3 \text{ mm}+1 \text{ ppm}$ ，同步监测仰坡位移与洞门变形的关联性；

- b) 围岩收敛：每 10 m 布设 1 个收敛断面，每个断面 3 条测线（拱顶一边墙、边墙一边墙），收敛速率超过 2 mm/d 时提升 1 级预警等级；
- c) 涌水量：在隧道排水沟布设电磁流量传感器，若涌水量单日增幅超 50%，同步排查洞口斜坡渗流情况。

6.2.2 应急响应

- 6.2.2.1 单日降雨量大于 150 mm 时，应自动切换至暴雨模式，监测频率提升至每 5 分钟 1 次。
- 6.2.2.2 地下水位单日变幅大于 3 m 应触发红色预警，同步启动无人机倾斜摄影巡查，无人机倾斜摄影应符合 GB 50167 的规定。
- 6.2.2.3 道桥隧工程应急响应专项要求如下：
 - a) 道路应急：单日降雨量大于 150 mm 时，除提升监测频率外，应同步监测路基含水率，含水率超 35% 时封闭应急车道，超 40% 时全幅封闭道路；
 - b) 桥梁应急：地下水位单日变幅大于 3 m 且桥墩水平位移速率超过 8 mm/d 时，除触发红色预警外，应立即启动桥梁支座加固措施，禁止重车通行；
 - c) 隧道应急：洞口斜坡触发橙色及以上预警时，应同步监测衬砌收敛速率，若收敛速率超 3 mm/d，立即封闭隧道，启动临时支护。

6.3 系统运维

6.3.1 定期校准

- 6.3.1.1 雨量计应每月进行人工对比观测，误差大于 5% 时立即更换。
- 6.3.1.2 北斗基准站应每年参加省级 CORS 网联测，GPS 测量应符合 GB/T 18314 的规定，平面坐标偏差超过 10 mm 应重新标定。
- 6.3.1.3 桥梁应力传感器应每季度进行 1 次现场校准，采用标准力源加载，误差超过 1% 时应立即更换。
- 6.3.1.4 隧道收敛计应每月进行 1 次人工对比观测，采用钢卷尺复核，误差超过 0.02 mm 时应重新标定。
- 6.3.1.5 路基沉降板应每半年进行 1 次高程复测，采用二等水准测量，符合 GB 50026 规定。

6.3.2 数据安全

- 6.3.2.1 应建立区块链存证系统，监测数据实时上链，篡改识别率应大于 99.99%。
- 6.3.2.2 应部署边缘计算节点，本地存储容量应满足 30 d 原始数据备份需求。

7 监测方法

7.1 一般规定

- 7.1.1 监测方法的选择应综合考虑岩溶发育程度、红黏土特性、季风暴雨特征等地域因素，宜采用抗干扰强的原位监测技术。监测应符合 GB/T 32864、GB 50026 和 GB 50497 的规定。
- 7.1.2 道桥隧与斜坡协同监测应遵循“空间关联、数据融合”原则：
 - a) 空间关联：道桥隧监测点与斜坡监测点的平面距离应不大于 10 m，确保监测数据能反映两者耦合关系；
 - b) 数据融合：采用卡尔曼滤波算法融合桥梁墩台位移与斜坡深部变形数据、隧道衬砌应变与洞口斜坡位移数据，融合误差应不大于 3%。
- 7.1.3 道桥隧监测方法选择应结合工程特性：
 - a) 桥梁高墩（墩高大于或等于 50 m）：增设墩身倾角监测；
 - b) 软土路基：采用分层沉降仪监测不同深度路基变形；
 - c) 岩溶区隧道：每月 1 次岩溶管道 CT 扫描，反演地下水渗流路径对隧道的影响。
- 7.1.4 应建立“空-天-地”立体监测体系。每月 1 次卫星遥感宏观监测、汛期每周 1 次无人机倾斜摄影和地面自动化传感器实时监测。
- 7.1.5 针对岩溶区地下水位突变特性，地下水位监测应采用高精度压力式传感器，分辨率不大于 1 mm。

7.2 监测测项

必选测项和可选测项按表 1 的规定进行。

表 1 监测测项

监测类别	必选测项	可选测项
地表变形	GNSS 三维位移、裂缝计、倾角计	维激光扫描、InSAR
地下变形	测斜管、分布式光纤	微震监测
水环境	孔隙水压力、地下水位、渗流量	岩溶管道流量
诱发因素	雨量计（分辨率 0.1 mm）、土壤含水率	地表径流监测
工程响应	锚索应力、挡墙土压力	微型桩应变

7.3 监测精度

监测精度分级应符合表 2 的规定。

表 2 监测精度

单位为毫米

安全等级	水平位移精度	垂直位移精度	地下水位精度
I 级	≤ 1	≤ 0.5	≤ 1
II 级	≤ 3	≤ 3	≤ 3
III 级	≤ 5	≤ 2	≤ 5

7.4 监测布置

7.4.1 监测布置宜采用以下典型布设模式：

- 纵向监测线：沿潜在滑动方向布设，间距 30 m~50 m；
- 横向监测线：垂直滑动方向布设，间距 20 m~30 m；
- 立体监测网：坡顶（GNSS 基准站）+坡体（3 层传感器阵列）+坡脚（渗流监测井）。

7.4.2 岩溶区布设特殊要求如下：

- 在落水洞、地下河出口处加密布设渗压计，间距不大于 15 m；
- 垂直岩溶管道沿走向设置 3 排测斜管，间距 20 m；
- 红黏土边坡坡脚增设土壤含水率监测点，深度为 0.5 m、1.5 m、3 m。

7.4.3 专项监测设备布置要求如下：

- 桥梁：在斜坡与桥墩基础交界区域布设微型桩应变监测点，间距 10 m；
- 隧道：洞口仰坡与衬砌衔接处布设裂缝计，间距 5 m；
- 道路：路基与斜坡坡脚过渡段布设土壤含水率与路基沉降联合监测点。

7.5 设备安装

7.5.1 岩溶裂隙区安装要求如下：

- GNSS 基准站应避开岩溶塌陷区，基础深入稳定基岩大于或等于 1 m；
- 测斜管宜采用双层 PVC 套管，管间宜填充环氧树脂；
- 雨量计安装高度宜为 1.2 m，周边设置直径 2 m 的防溅栅。

7.5.2 热带气候下，设备应采取适应性措施：

- 设备防护等级不小于 GB/T 4208—2017 的 IP67 的规定；
- 太阳能供电系统配置自动除湿模块；
- 金属部件采用 316L 不锈钢并做防腐蚀处理。

8 数据采集与管理

8.1 数据采集

8.1.1 数据采集频率应采取动态调整机制，应符合表 3 的规定。

表 3 数据采集频率

预警等级	常规频率	加密频率
正常	2 小时 1 次	-
蓝色	1 小时 1 次	持续降雨时 30 分钟 1 次
黄色	30 分钟 1 次	15 分钟 1 次
橙色	10 分钟 1 次	5 分钟 1 次
红色	1 分钟 1 次	实时回传

8.1.2 数据预处理要求如下：

- a) 应采用小波降噪剔除降雨引起的信号漂移；
- b) 应配置双温度补偿传感器消除仪器温度漂移；
- c) 岩溶水压数据应进行气压补偿。

8.2 数据传输

8.2.1 应建立多模通信体系：

- a) 4G/5G 作为主通道；
- b) LoRa 作为备用自组网，传输距离不大于 5 km；
- c) 北斗短报文作为极端天气保障。

8.2.2 数据包采用分层结构设计，包含报文头、监测数据、设备状态三部分，具体构成如表 4、表 5 和表 6 所示。

表 4 报文头 (header)

字段名称	数据类型	说明
设备编号	字符串	12 位唯一标识码，编码规则：省级代码 (2 位)+市州代码 (2 位)+设备序列号 (8 位)
时间戳	ISO 8601	数据采集时间，格式示例：2023-08-20T14:30:00+08:00，使用东八区时区
空间坐标	浮点数组	[经度, 纬度, 高程]，坐标系采用 CGCS2000，高程单位为米 (m)

表 5 监测数据 (data)

字段名称	数据类型	单位	精度要求	备注
三维位移	JSON 对象	mm	X/Y 轴±0.5, Z 轴±1.0	包含 x (东西向)、y (南北向)、z (垂向) 分量
孔隙水压力	浮点数	kPa	±0.5%FS	应标注传感器埋深，如 PWP_3.5 m
雨量	浮点数	mm	分辨率 0.1 mm	附带降雨历时，如 RH_24 h
(可选) 锚索应力	整数	kN	±1%FS	仅限支护结构监测点

表 6 设备状态 (status)

字段名称	数据类型	说明
电池电压	整数	百分比显示 (0~100%)，当 ≤20% 时触发低电量预警
信号强度	整数	dBm 值，范围 -120~0，-70 dBm 以上为良好通信状态
工作温度	浮点数	单位为 °C

8.3 数据存储

8.3.1 采集数据应分级存储：

- a) 边缘计算节点：固态硬盘存储 7 d 原始数据；
- b) 市级分中心：分布式存储 1 年过程数据；
- c) 自治区平台：区块链存证，永久存储特征数据。

8.3.2 数据安全要求如下：

- a) 传输加密：AES-256+SSL/TLS1.3；
- b) 访问控制：RBAC 权限模型+双因素认证；
- c) 灾备机制：异地双活数据中心。

9 数据分析与预警

9.1 预警模型

9.1.1 应采用多参数耦合预警算法，多参数耦合预警算法实施应符合附录 C 的规定。

9.1.2 岩溶区专项判据如下：

- a) 当单日地下水位变幅大于 3 m 且位移速率大于 5 mm/d 时，直接触发橙色预警；
- b) 雨季累计降雨大于 300 mm 时，自动提升 1 个预警等级。

9.1.3 “道桥隧—斜坡”耦合预警判据如下：

- a) 桥梁墩台水平位移速率大于 8 mm/d 且对应斜坡位移速率大于 10 mm/d，触发橙色预警；
- b) 隧道衬砌收敛速率大于 3 mm/d 或洞门位移大于 5 mm，触发橙色预警；
- c) 道路路基沉降速率大于 5 mm/d 且路面裂缝宽度超过 3 mm，触发黄色预警。

9.2 预警分级

9.2.1 按表 7 的规定进行预警分级。

表 7 预警分级

预警等级	位移速率阈值 mm/d	降雨强度阈值 mm/h	应急响应措施
红色	>15	>50	立即疏散，封闭道路
橙色	10~15	30~50	人员撤离，交通管制
黄色	5~10	20~30	加强巡查，限制通行
蓝色	2~5	10~20	日常监测，信息发布

9.2.2 道桥隧工程对应的不稳定斜坡触发红色预警时，除疏散人员、封闭道路外，应同步启动桥梁支座加固、隧道临时支护等应急工程措施。

9.3 预警发布

应采用多种语言发布系统，采用多渠道发布方式，包括应急广播、短信、APP 推送和电子路牌。

9.4 数据分析

9.4.1 应设置专项分析模块，包括：

- a) 岩溶管道网络三维反演（CT 扫描技术，参见附录 D）；
- b) 红黏土边坡蠕变预测（Burgers 模型）；
- c) 暴雨—滑坡响应关系（ARIMA 时间序列分析）。

9.4.2 宜实现分析可视化，支持三维地质模型动态渲染、实时位移矢量场显示和历史灾变案例智能匹配。

10 监测成果

10.1 成果体系

监测成果应包括但不限于以下类别：

- a) 动态监测报告：实时生成的监测数据简报（含预警信息）、道桥隧结构变形实时曲线、斜坡—结构耦合影响分析图表；
- b) 专题分析报告：针对特殊工况（如台风、强降雨、爆破施工）的专项评估、桥梁墩台基础稳定性评估、隧道衬砌安全系数计算、道路路基病害与斜坡变形关联分析；
- c) 阶段总结报告：按施工期、运营期划分的阶段性成果总结；
- d) 最终评估报告：项目全周期监测数据综合分析 with 稳定性评价、道桥隧工程全生命周期安全评估结论、斜坡治理对道桥隧结构的影响评估。

10.2 成果内容

- 10.2.1 动态监测报告应包含：
- 监测时段内位移场演变三维矢量图；
 - 岩溶区地下水位等值线动态变化图；
 - 红层边坡风化层厚度变化曲线；
 - 多参数耦合预警指数时空分布云图；
 - 异常数据标识及处理建议。
- 10.2.2 专题分析报告特殊工况下应增加：
- 暴雨入渗一位移响应关联模型（附相关系数矩阵）；
 - 爆破振动波衰减规律拟合曲线（含萨道夫斯基公式参数修正值）；
 - 台风期间 GNSS 监测数据频谱分析图。
- 10.2.3 阶段总结报告应系统包含：
- 智能监测预警系统运行效能评估（含设备完好率、数据捕获率等指标）；
 - 典型断面变形速率统计表（分干季、雨季对比分析）；
 - 预警模型验证报告（附历史预警与实际灾情对比分析）；
 - 岩溶管道网络 CT 反演成果图（含渗透路径三维重构）。
- 10.2.4 最终评估报告应重点突出：
- 全生命周期位移累积量等值线图；
 - 关键监测断面时程曲线簇（位移、水位、降雨量耦合分析）；
 - 红层边坡风化速率预测模型（含未来 10 年强度衰减预测）；
 - 岩溶区稳定性分区图（按风险等级着色）。
- 10.3 成果交付标准
- 10.3.1 数据格式要求如下：
- 结构化数据：采用 GeoJSON 格式存储空间属性数据；
 - 时序数据：采用 HDF5 格式存储，时间分辨率不低于 1 min；
 - 三维模型：BIM 格式，LOD300 以上精度。
- 10.3.2 可视化要求如下：
- 位移场动态展示：粒子系统渲染，每秒应不小于 25 帧；
 - 地下水位可视化：三维等值面实时渲染，应支持透明度调节；
 - 预警信息叠加：AR 模式，应支持移动端查看。
- 10.3.3 道桥隧专项监测成果应单独编制报告，附 BIM 模型（LOD400 精度），包含斜坡与道桥隧结构的三维耦合模型，支持结构变形模拟与风险预判。
- 10.3.4 交付时效应符合表 8 的规定。

表 8 交付时效

成果类型	生成周期	交付时限
动态报告	实时	预警信息 5 min 内推送
专题报告	事件结束后 24 h	48 h 内提交
阶段报告	季度	次季度首月 10 日前
最终报告	项目验收	竣工后 90 日内

- 10.3.5 成果应采用电子存档和实体存档：
- 电子存档：省（自治区）级自治区级地质灾害监测云平台和区块链存证系统；
 - 实体存档：档案室和项目所在地自然资源局。

附录 A
(规范性)
不稳定斜坡风险分级评价

A.1 评价指标

评价指标应包括：

- a) 岩溶发育密度 (个/km²) ;
- b) 地下水位年变幅 (m) ;
- c) 红黏土厚度 (m) ;
- d) 历史崩塌频率 (次/年) ;
- e) 溶洞充填物渗透系数 (cm/s) ;

A.2 分级要求

不稳定斜坡风险分级应符合表 A.1 的规定。

表 A.1 不稳定斜坡风险分级要求

风险等级	岩溶密度 个/km ²	水位变幅 m	红黏土厚度 m
极高风险	≥5	≥8	10
高风险	3~5	5~8	5~10
中风险	1~3	3~5	2~5
低风险	<1	<3	<2

附录 B
(规范性)
监测设备防雷技术

B.1 接闪器可按以下参数进行设置:

- a) 高度 ≥ 2 m;
- b) 保护角 $\leq 45^\circ$;
- c) 接地电阻 $\leq 4 \Omega$ 。

B.2 SPD 防护等级应符合表 B.1 的规定。

表 B.1 SPD 防护等级

设备类型	冲击电流 kA	电压保护水平 kV
北斗终端	20	≤ 1.5
渗压计	10	≤ 0.8
数据采集站	40	≤ 2.0

附录 C
(规范性)
多参数耦合预警算法实施细则

C.1 动态权重分类按公式 (C.1) 计算:

$$W_i = \frac{\alpha S_i + \beta V_i}{\sum (\alpha S_j + \beta V_j)} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

S ——参数敏感度系数;

V ——实时变化率。

C.2 参数阈值矩阵应符合表 C.1 的规定。

表 C.1 参数阈值矩阵

参数	蓝色预警	黄色预警	橙色预警	红色预警
位移速率/(mm/d)	2~5	5~10	10~15	>15
孔隙水压/kPa	10~20	20~30	30~50	>50
土壤含水率/%	25~30	30~35	35~40	>40

附录 D
(资料性)
岩溶管道 CT 扫描技术规程

D.1 扫描参数可按以下要求设置：

- a) 电极距：5 m；
- b) 供电电流：200 mA；
- c) 数据采集密度：100 点/m²。

D.2 反演精度控制应符合表 D.1 的规定。

表 D.1 反演精度控制要求

管道直径 m	定位误差 m	流量估算误差 %
<1	≤0.3	≤15
1~3	≤0.5	≤10

参 考 文 献

- [1] GB/T 32864—2016 滑坡防治工程勘查规范
 - [2] JTG/T 3222—2020 公路工程物探规程
-

全国团体标准信息平台