

## 公路高边坡智能监测技术规范

Technical specification for intelligent monitoring of highway high  
slopes

(报批稿)

— XX — XX 发布

XXXX — XX — XX 实施

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 总体要求 ..... 2

    4.1 监测目的 ..... 2

    4.2 智能监测要求 ..... 2

5 监测方案设计 ..... 2

    5.1 监测内容 ..... 2

    5.2 监测方法 ..... 3

    5.3 监测频率 ..... 4

6 监测网点布设 ..... 4

    6.1 位移监测 ..... 4

    6.2 应力监测 ..... 5

    6.3 地下水监测 ..... 5

    6.4 环境监测 ..... 5

7 数据采集与处理 ..... 5

    7.1 数据采集与传输 ..... 6

    7.2 数据处理与分析 ..... 6

8 监测预警与记录报告 ..... 6

    8.1 监测系统预警 ..... 6

    8.2 监测记录与报告 ..... 7

附 录 A （资料性） 柔性智能感知装置 ..... 8

附 录 B （资料性） 三维土压力盒 ..... 9

附 录 C （资料性） 监测项目预警值设定建议表 ..... 12

附 录 D （资料性） 监测报表样表 ..... 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。

本文件由山东省交通运输厅提出并组织实施。

本文件由山东省交通运输标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：山东高速基础设施建设有限公司、山东大学、山东高速董梁沈新高速公路有限公司、山东省滨州公路工程有限公司、山东交工建设集团有限公司、重庆大学、中铁二局第四工程有限公司、山东省交通规划设计院集团有限公司、山东省交通工程监理咨询有限公司、济宁市鸿翔公路勘察设计院有限公司、济南市交通运输事业发展中心。

本标准主要起草人：崔新壮、薛志超、金青、高立勇、张小宁、刘乐民、王清明、张富山、祝少纯、赵磊、崔社强、郝建文、邓刚、王伟伟、王磊、孙丙辉、常发岗、曹淑龙、侯伟、耿建华、刘凯文、朱世超、王艺霖、张建亮、马雄鹰、姚建成、张炯、李晋、董锐、杜业峰、李月祥、王凯、徐长靖、张旭、高上、苏晓健、张田涛、商淑杰、赵永峰、张定锋、王志文、张常勇、娜仁高娃、牛伟、李晓龙、吴国敬、张琦、范晓华、邱慧、李心秋、杨哲、张晓、赵舒心、肖飞、马玉礼、任亮、李向阳、姜鹏、孙皓、包振昊、颜士荣、韩柏林、曹天才、吕伟、孙仕源、曾浩、李辉、薛涛、杨文杰、张营、周君豪、朱旭。

# 公路高边坡智能监测技术规范

## 1 范围

本文件规定了公路高边坡智能监测技术总体要求，包括监测内容、监测方法、监测网点布设、数据采集与处理、监测预警与记录报告。

本文件适用于山东省各等级公路工程高边坡的智能监测。

## 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 20271 信息安全技术 信息系统通用安全技术要求
- GB 50026 工程测量规范
- GB 50330 建筑边坡工程技术规范
- GB 50497 建筑基坑工程监测技术规范
- GB 50911 城市轨道交通工程监测技术规范
- JTG D30 公路路基设计规范
- JGJ/T 401 锚杆检测与监测技术规程
- SL 21 降水量观测规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

智能监测 intelligent monitoring

通过传感技术、通信技术及计算机系统控制传感设备对监测点进行监测与监测数据分析计算，实现监测数据的自动化采集、传输、处理及预警等工作。

### 3.2

监测等级 grade of monitoring

根据边坡工程的规模、公路等级、周围环境等因素，对边坡工程监测进行等级划分，由高到低依次为一、二级、三级。

### 3.3

路堑高边坡 deep cutting

挖方边坡高度超过 20m 的土质边坡或挖方边坡高度超过 30m 的岩质边坡。

[来源：DB35/T 1844-2019，3.2]

### 3.4

路堤高边坡 high embankment

路堤填土高度超过 20m 的边坡或路堤中心填高超过 10m 的边坡。

[来源：DB35/T 1844-2019，3.3]

3.5

预警值 early warning value

对监测项目预先设定控制值，当采集到的数值超过该设定控制值时，系统会及时发出报警。

4 总体要求

4.1 监测目的

公路高边坡智能监测旨在通过实时、自动化的数据采集与分析，全面掌握边坡在施工、防治效果验证及运营期间的位移、应力、地下水及环境状态变化，科学评估边坡稳定性，及时发现异常与潜在风险，实现灾害早期预警，为工程决策、智能管控与应急响应提供可靠依据。

4.2 智能监测要求

公路边坡智能监测系统应具备下列基本功能：

- a) 现场网络数据通信和远程通讯；
- b) 数据自动采集、上传；
- c) 数据处理、分析和存储；
- d) 数据备份、自检、自诊断、断电保护和故障显示；
- e) 统计、报表和图表分析；
- f) 智能预警；
- g) 数据共享、查询，图形数据展示、报警状态显示等；
- h) 人工监测信息接入接口；
- i) 运行维护记录与管理；
- j) 系统参数配置；
- k) 项目管理、设备管理；
- l) 监测资料（合同、大纲方案及监测报告等）管理。

5 监测方案设计

5.1 监测内容

5.1.1 边坡工程安全等级应按照 GB 50330 中的相关规定进行划分，由高到低依次为一级、二级、三级。

5.1.2 公路边坡安全监测等级，应根据边坡工程规模、公路等级、周围环境及其工程重要性，按表 1 确定。

表 1 高边坡监测等级

路堑边坡高度		路堤边坡高度 m	高速公路、一级公路	二级公路	三、四级公路
土质边坡 m	岩质边坡 m				
20~40	30~60	20~30	一级	三级	三级
40~60	60~80	30~40	一级	二级	三级
≥60	≥80	≥40	一级	一级	二级

下列情景宜提高监测等级：

- a) 已发生边坡滑坡的高边坡，监测等级宜提高一级；
- b) 边坡的影响范围内，存在高压输电塔、桥梁、隧道、油气管道等重要建筑或结构，或其他等级道路等，监测等级应提高一级；
- c) 区域内唯一通道的二、三、四级公路的公路，监测设计等级宜提高一级；
- d) 高边坡建设范围内存在其他等级道路需要监测时，按此等级划分进行监测工作。

5.1.3 公路边坡监测项目应按表 2 确定，并可根据设计要求、边坡稳定状态及施工进度进行动态调整。

表 2 公路高边坡监测项目

监测项目		监测阶段								
		施工监测			防治效果监测			运营期长期监测		
		一级	二级	三级	一级	二级	三级	一级	二级	三级
位移监测	地表位移	应做	应做	应做	应做	应做	应做	应做	应做	应做
	支挡结构位移	应做	应做	宜做	应做	宜做	宜做	应做	应做	选做
	深部位移	应做	宜做	选做	宜做	宜做	选做	宜做	宜做	选做
	地表裂缝	应做	应做	选做	应做	宜做	选做	应做	宜做	选做
应力监测	土压力	宜做	选做	选做	宜做	选做	选做	选做	选做	选做
	支挡结构应力	宜做	选做	选做	宜做	选做	选做	选做	选做	选做
	锚杆（索）应力	应做	宜做	选做	应做	宜做	选做	应做	宜做	选做
地下水监测	地下水位	应做	宜做	选做	应做	宜做	选做	宜做	选做	选做
	孔隙水压力	选做	选做	选做	选做	选做	选做	选做	选做	选做
环境监测	降雨量	应做	应做	选做	应做	宜做	选做	应做	选做	选做
	温度、湿度	选做	选做	选做	选做	选做	选做	选做	选做	选做
注：公路边坡范围内有重要建（构）筑物，且破坏后果严重时，应加强应力监测。										

5.2 监测方法

高边坡监测方法应根据工程等级及监测内容等因素，按表 3 选择。

表 3 公路高边坡监测方法

监测项目	监测方法
地表水平位移	地基合成孔径干涉雷达（InSAR）、智能型全站仪、北斗、倾角仪
地表竖向位移	智能型全站仪、北斗、倾角仪
地表裂缝	伸缩仪、裂缝计、观测桩、位移计
深层位移	测斜仪、钻孔位移计、阵列式位移计、柔性位移计、柔性智能感知装置 <sup>a</sup>
防护与加固结构位移	倾角计、智能型全站仪、北斗
防护与加固结构裂缝	裂缝计、伸缩仪

土压力	振弦式、电阻式土压力计、三维土压力盒 <sup>b</sup>
支挡结构应力	振弦式、电阻式应力计、钢筋计
锚索（杆）应力	振弦式、电阻式锚索（杆）应力计、锚索（杆）测力计
地下水位	水位计
孔隙水压力	孔隙水压力计
降水量	雨量计
温湿度	土壤温湿度传感器
<sup>a</sup> 柔性智能感知装置基于导电聚合物的拉敏效应, 通过材料电阻的变化来实现路基或边坡内部变形的测试, 原理参照附录 A; <sup>b</sup> 三维土压力盒是一种新型传感器, 可用于测量土体内部一点处的全应力分量, 原理参照附录 B。	

5.3 监测频率

5.3.1 公路边坡智能监测可分为施工监测、防治效果监测和运营长期监测等 3 阶段, 并应符合下列规定:

- a) 施工监测周期应与施工期一致, 起于工程开工建设, 止于防治工程验收;
- b) 防治效果监测周期应与施工监测周期相衔接, 起于路堑边坡防治工程交工验收时, 当监测项目数值稳定后且经历至少 1 个水文年可停止监测;
- c) 运营监测周期应与防治效果监测周期相衔接, 起于工程运营, 当监测项目数值稳定后且经历至少 1 个水文年才可停止监测。

5.3.2 边坡自动化监测设备的数据采样频率不应低于 1 次/10min, 数据上传频率应根据边坡监测等级设置, 并符合下列规定:

- a) 一级监测数据上传频率不应低于 1 次/h;
- b) 二级监测数据上传频率不应低于 1 次/2h;
- c) 三级监测数据上传频率不应低于 1 次/4h;

5.3.3 当出现下列情况之一时, 应提高监测频率, 并立即进行连续监测:

- a) 监测数据变化速率或累计变化量达到报警值;
- b) 监测数据变化较快或者速率加快;
- c) 支护结构出现裂缝;
- d) 出现连续降雨或者施工异常;
- e) 存在勘察未发现的不良地质条件。

6 监测网点布设

6.1 位移监测

6.1.1 在下列地段宜布设位移监测点:

- a) 受地下水和地表水影响的地段;
- b) 有滑动迹象或正在进行治理的地段;
- c) 公路边坡应力最大地段, 并选择断面布设;
- d) 有建筑物、构筑物和运输枢纽区的地段;
- e) 不良地质作用地段。

6.1.2 边坡地表变形监测网点布设应符合下列要求：

- a) 监测断面应根据监测等级、边坡长度及现场条件布设，断面间距宜为 40m~60m；
- b) 监测断面上监测点间距应根据监测等级确定，监测等级为一级时，监测点间距宜为 20m~30m；监测等级为二级、三级时，监测点间距宜为 30m~50m。

6.1.3 支挡结构顶部位移监测点应沿支挡结构走向布设，监测点间距不宜大于 20m。

6.1.4 深部水平位移监测孔深度应超过边坡最下层潜在滑动面 5m。深部垂直位移监测点在竖向上宜布设在各土层分界面上，若土层厚度较大，则应在该土层中部适当加密。

6.1.5 柔性智能感知装置安装埋设应满足下列要求：

- a) 对于边坡监测，沿边坡顶面布设多个竖向钻孔，或沿其坡面布设多个横向钻孔，每个钻孔中埋设一条柔性智能感知装置，布置的柔性智能感知装置应穿过边坡潜在滑裂面且末端到潜在滑裂面距离不小于 3m。
- b) 柔性智能感知装置与钻孔内壁之间的缝隙，对岩质边坡使用水泥浆填充密实，对土质边坡使用膨润土填充密实，使其受力环境与边坡的内部环境接近。

## 6.2 应力监测

6.2.1 土压力计埋设于土压力变化的部位，土压力计的埋设间距不宜小于 0.6m。

6.2.2 支挡结构应力监测点宜布设在支挡结构设计计算弯矩最大处，还应根据实际情况，考虑其他可能存在应力集中的位置。

6.2.3 非预应力锚杆的应力监测根数不宜少于锚杆总数 3%，且不应少于 5 根；预应力锚索应力监测根数不宜少于锚索总数的 5%，且不应少于 5 根。

## 6.3 地下水监测

6.3.1 地下水位应采用水位孔和水位计进行监测，一个边坡工程不宜少于 3 个，布置间距宜为 20~50m。

6.3.2 孔隙水压力应采用孔隙水压力测试孔和孔隙水压力计进行监测，一般竖向间距宜为 2m~5m，且每个测试孔每土层不应少于 1 个测点，监测点总数量不应少于 3 个。

## 6.4 环境监测

6.4.1 降水量监测设备布设应符合下列要求：

- a) 应避开强风区且周围应空旷，不受突变地形、树木及其他建筑物的影响。在多风的高山、出山口、近海岸地区的雨量器，不宜设置杆式雨量器，可根据现场情况布设监测场；
- b) 安装位置至障碍物边缘的距离应大于障碍物高度 1.5 倍，并应避开电力线路。

6.4.2 温湿度监测设备布设原则如下：

- a) 选择长期固定的地段进行监测，该地段对所监测边坡的自然土壤水分状况应具有代表性，监测点与边坡排水设施距离大于 1.5m；
- b) 监测点应避开周围障碍物对监测点附近的降雨与光照等产生影响的区域。

6.4.3 雨量器安装高度选定后不得随意变动，以保证历年降雨观测高度的一致性和降水记录的可比性。雨量器底座与基座连接应牢固，有水准气泡的仪器应调节水准气泡居中。并在安装完毕后就地调试并进行注水试验。

6.4.4 做好安装区域的保护，应在传感器安装区域、数据采集器安装区域以及通信电缆敷设区域做明显的标识和围栏，避免监测设备遭受破坏。

## 7 数据采集与处理



7.1 数据采集与传输

7.1.1 应根据公路边坡特点及监测需求选择数据采集设备，并制定数据采集、传感器与数据采集设备接口等架构方案。

7.1.2 数据采集与传输应提供可靠的数据传输机制，具有丢包重传、数据完整性校验等功能。

7.1.3 自动化数据采集设备具备灵活的传感器设备接入机制，包括且不限于采用自识别自组网设备接入、现场扫码接入、远程配置接入。

7.1.4 当公路边坡遭受地震、滑坡、泥石流、周边工程扰动事件后，应具备智能加密采集频率功能。

7.1.5 特殊项目区域数据传输也可考虑采用北斗通讯方式。北斗卫星短报文数据传输应符合下列要求：

- a) 北斗卫星短报文数据传输应采用 RNSS 定位或 RDSS 短报文形式；
- b) 北斗卫星短报文数据传输平均时延应不大于 5s；
- c) 北斗卫星短报文数据传输成功率应不低于 95%；
- d) 北斗卫星短报文发送周期不低于 1 分钟。

7.2 数据处理与分析

公路边坡稳定性监测过程中，应结合边坡情况，根据监测数据，对滑坡位移及其发展趋势预测。公路边坡智能监测数据分析与处理主要包括以下内容：

- a) 监测资料及时编录、整理、统计分析；
- b) 及时确定边坡变形量、变形速率、应力、应变变化以及潜在滑动面位置，对于滑坡，能判定主滑断面及方向，分析诱发滑动的主要因素，判断滑坡所处的变形阶段；
- c) 地表位移监测数据分析应包含水平位移或垂直位移历时曲线图等；
- d) 深部位移监测数据分析应包含深部位移累计变形量与深度关系曲线图、深部位移变化率与深度关系曲线图等；
- e) 应力应变监测数据分析应包含应力应变历时曲线图等；
- f) 地下水监测数据分析应包含地下水位历时曲线图、土体含水率历时曲线图、孔隙水压力历时曲线图等；
- g) 环境监测数据分析应包含降雨量历时曲线图、温湿度历时曲线图等；
- h) 确定位移、应力（压力）的预警阈值，参照附录 C。根据监测数据和变形迹象进行综合分析，当监测数据达到或超出预警阈值时，应进行预警。

8 监测预警与记录报告

8.1 监测系统预警

8.1.1 监测系统预警应具备下列功能：

- a) 系统宜具有报警信息推送功能，报警信息宜包括工程名称、报警工点、测点编号、监测类型、报警值、报警等级、报警时间；
- b) 监测系统具有对不同监测类型监测数据的预警规则配置功能；
- c) 系统宜具有人工预警、自动预警（阈值预警）等功能；
- d) 预警系统宜具有触发报警，自动调整监测频率的功能。

8.1.2 根据监测技术要求、边坡失稳灾害紧急程度及危害程度，公路边坡预警分为蓝色、黄色、橙色和红色四级，红色为最高级别。

表 4 预警状态分级

序号	预警级别	现象
1	蓝色	公路边坡灾害发生的可能性小，系统监测数据表现有一定变化，一般为报警值的 70%
2	黄色	公路边坡灾害发生的可能性较大，有明显的变形特征，在数周内或数月内大规模发生的概率较大，一般为报警值的 80%
3	橙色	公路边坡灾害发生的可能性大，有一定的宏观前兆特征，在几天内或数周内大规模发生的概率较大，一般为报警值的 90%
4	红色	公路边坡灾害发生的可能性很大，各种前兆特征显著，在数小时内或数天内大规模发生的概率很大，一般为报警值的 100%

8.1.3 监测数据发布渠道包括网站、APP、微信公众号等，宜具备预警监测点醒目提示、历史数据、图像查询及图像展示等功能。预警信息宜通过短信、APP 通知、自动语音电话等快捷方式将预警信息报送给主管部门。

8.2 监测记录与报告

8.2.1 监测过程中形成的所有记录和报告是证实监测数据有效性、数据分析准确性和预警发布及时性的客观证据，所有记录应真实、准确、完整、清晰，并具有可追溯性。

8.2.2 监测记录宜包括：

- a) 当日天气情况、报表编号、测试时间等；
- b) 仪器监测项目的本次测试值、本次变化量、累计变化量、变化速率等，必要时绘制有关曲线图；
- c) 对监测项目应有正常或异常、危险的判断性结论；
- d) 对仪器监测或现场巡检发现超过预警值的监测点应有详细描述，并有分析和建议。

8.2.3 监测记录报表格式参见附录 D。

8.2.4 监测报告应系统性地呈现监测结果，公路边坡监测报告宜包括阶段性报告（月度报告、季度报告、年度报告）及总结报告等。

8.2.5 阶段性监测报告应包括以下内容：

- a) 工程概况；
- b) 监测方案编制与实施；
- c) 监测数据分析；
- d) 监测结果及建议；
- e) 附件，包含监测系统的平面和剖面布置图、边坡的工程地质图及数据监测记录表等；
- f) 下阶段工作建议。

8.2.6 监测总结报告应包括以下内容：

- a) 前言；
- b) 工程概况；
- c) 工程地质条件；
- d) 水文地质条件；
- e) 监测方案，包括监测内容、监测方法、监测网点和监测系统组成与布置情况；
- f) 监测仪器设备安装埋设以及基准点布设；
- g) 监测数据采集及分析，说明数据采集流程及异常数据消除方法，编制相关表格及曲线图表；
- h) 监测结果、主要结论与相关建议；
- i) 附件，包含监测系统的平面和剖面布置图、边坡的工程地质图及数据监测记录表等。

附录 A  
(资料性)  
柔性智能感知装置

A.1 柔性智能感知装置

柔性智能感知装置是基于导电聚合物的土体内部监测元件，具体参数如表 A.1 所示。

表 A.1 柔性智能感知装置相关参数

相关参数	技术要求
监测精度	±0.01mm
应变量程	≥25%
响应时间	≤3s
温度工作范围	-40℃ ~ 60℃
灵敏度	可调，典型值5-50（取决于填料浓度）
工程适用性	耐潮湿、耐化学腐蚀，耐久性≥15年
制备与成本	原材料成本低，易于规模化制备
误差	可实现温度自补偿

将柔性智能感知装置埋入边坡内部，其末端从边坡的坡面处露出，连接有缆绳与数据采集站相连接，数据采集站通过网络上传到云端服务器，借助云端服务器实现监测数据的自动化采集监测。

A.2 柔性智能感知装置测量方法及原理

根据导电聚合物的应变-电阻特性，即指在弹性范围内，导电聚合物的电阻在拉应变下随应变的增加而成正比例增加的行为。利用导电聚合物的应变-电阻特性可实现对柔性智能感知装置工作状态的实时监测，即通过测量材料的阻值变化实现对土体的在线动态监测：

阻值变化与变形的关系：

$$\Delta R = k \times \Delta l \cdots \cdots \cdots (A.1)$$

将式（A.1）变成无量纲关系式：

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \frac{\Delta l}{l} \cdots \cdots \cdots (A.2)$$

应变：

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdots \cdots \cdots (A.3)$$

将式（A.3）带入式（A.2），并进行公式变换得：

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \times \frac{\Delta R}{R_0} \cdots \cdots \cdots (A.4)$$

式中：ΔR为电阻变化量，R<sub>0</sub>为初始阻值，k为一无量纲常数，Δl为伸长量，l为初始长度，ε为柔性智能感知装置的线应变，从而获得柔性智能感知装置工作状态的实时监测。

附录 B  
(资料性)  
三维土压力盒

B.1 三维土压力盒

每个三维土压力盒包括一个橡胶基座以及七个直径为 20mm 的应力传感器。对镶嵌在橡胶基座上的七个传感器进行编号，分别为 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 、 $\alpha_5$ 、 $\alpha_6$ 、 $\alpha_7$ 。镶嵌在橡胶基座上的土压力传感器的具体参数如表 B.1 所示。

表 B.1 土压力传感器相关参数

相关参数	技术要求
输入电压	24 V
输出电压	5 V
频响	$\geq 3\text{ k Hz}$
测量精度	$\pm 0.5\%$
灵敏度	$\leq 1.0\times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{FS}$

三维土压力盒安装了七个传统应力传感器，其中一个传感器作为备用传感器，能够同时测量土体内一点处七个不同方向上的正应力。

B.2 三维土压力盒测量方法和原理

如图B.1所示，考虑到土单元切应力互等，一个点处的三维应力状态可由三个切应力和三个正应力表示，即 $\sigma = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}$ 。

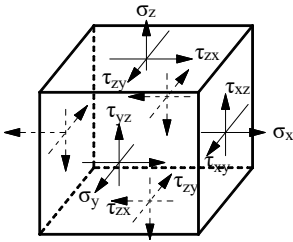


图 B.1 土壤单元的三维应力状态

如果一点处的三维应力状态已知，那么该点处任意方向上的正应力均可以根据公式B.1获得，

$$\sigma_{\beta} = l^2\sigma_x + m^2\sigma_y + n^2\sigma_z + 2lm\tau_{xy} + 2mn\tau_{yz} + 2nl\tau_{zx} \cdots \cdots \cdots (B.1)$$

式中：  
 $l$ 、 $m$ 、 $n$ 为某一平面法向量的方向余弦。  
对于三维土压力盒而言，橡胶基座上镶嵌应力传感器 $\alpha_1\sim\alpha_7$ 的7个平面法向量的方向余弦可由公式 B.2表示。

$$\vec{\gamma}_i = \begin{pmatrix} l_i & m_i & n_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (\text{B.2})$$

假设传感器的 7 个平面的法向量为  $\sigma_i = (\sigma_a, \sigma_b, \sigma_c, \sigma_d, \sigma_e, \sigma_f, \sigma_g)$ , 将公式 B.2 带入到公式 B.1 中, 可获得公式 B.3。

$$\begin{pmatrix} \sigma_a \\ \sigma_b \\ \sigma_c \\ \sigma_d \\ \sigma_e \\ \sigma_f \\ \sigma_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & -1 & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (\text{B.3})$$

在六个应力分量  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  已知的情况下, 主应力的的大小可以通过求解下面的三次方程 (应力张量的特征方程) 得到:

$$\sigma^3 - I_1 \sigma^2 + I_2 \sigma - I_3 = 0 \dots\dots\dots (\text{B.4})$$

式中:

$$I_1 = \sigma_{ii} = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z;$$

$$I_2 = (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) - (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2);$$

$$I_3 = \det[\sigma_{ij}] = \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2。$$

由三维土压力盒监测并通过处理得到土体内部某点处的第一、二、三主应力, 令  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , 由广义 von Mises 准则可得屈服函数为

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \cdots \cdots \cdots (B.5)$$

式中：

$$\alpha = \frac{\sin \varphi'}{\sqrt{3} \sqrt{3 + \sin^2 \varphi'}};$$

$$k = \frac{\sqrt{3} c' \cos \varphi'}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi'}};$$

$$I_1 = \sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3;$$

$$J_2 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{6};$$

$$c' = \frac{c}{F};$$

$$\varphi' = \arctan \left( \frac{\tan \varphi}{F} \right);$$

$c$ 、 $\varphi$  分别为土的凝聚力和内摩擦角；

$F$  为边坡设计安全系数，应按照 GB 50330 中的相关规定进行确定。

三维土压力盒应布设在边坡的潜在滑动面附近，当监测点处应力满足广义 von Mises 准则函数  $f \leq 0$  时，判定边坡局部土体达到应力屈服，此时应进行预警，并加强现场人员对监测区域边坡的巡检。

附录 C  
(资料性)  
监测项目预警值设定建议表

序号	监测项目	监测级别					
		一级		二级		三级	
		变形量（mm）	变形速率（mm/d）	变形量（mm）	变形速率（mm/d）	变形量（mm）	变形速率（mm/d）
1	地表水平位移	20~40	2~4	40~60	4~6	>60	>6
2	地表竖向位移	20~40	2~4	40~60	4~6	>60	>6
3	深部水平位移	40~50	3~5	50~60	5~8	60~70	8~10
4	桩（墙）顶水平位移	40~50	3~5	50~60	5~8	60~70	8~10
5	锚杆（索）应力	$(10\sim 20)\%f_1$	$(5\sim 10)\%f_1$	$(20\sim 30)\%f_1$	$(5\sim 10)\%f_1$	$(30\sim 40)\%f_1$	$(5\sim 10)\%f_1$
6	土压力	$(60\sim 70)\%f_2$		$(70\sim 80)\%f_2$		$(70\sim 80)\%f_2$	
7	孔隙水压力	$(60\sim 70)\%f_2$		$(70\sim 80)\%f_2$		$(70\sim 80)\%f_2$	
<p>注1：本表预警值是参照《建筑基坑工程监测技术规范》、《城市轨道交通工程监测技术规范》等相关监测规范给出的预警值，并结合多年监测数据总结分析，给出的预警建议值。监测预警值设定跟边坡所在的地形地貌、岩土体性质、变形破坏机制等因素相关，监测单位在选择使用时，可根据实际情况进行调整。</p> <p>注2：<math>f_1</math>表示锚杆（索）设计值，单位kN；锚杆（索）应力变形量是指锚杆（索）应力损失量；<math>f_2</math>表示荷载设计值，单位kN。</p> <p>注3：表中未给出的其他监测项目预警值，可参照当地工程经验选择设定。</p> <p>注4：当监测项目的变化速率连续3天超过预警值的50%，应进行预警。</p>							

附录 D  
(资料性)

监测报表样表

表 D.1 地表位移监测报表

工程名称：                      天气情况：                      报表编号：                      测试时间：

测点编号	水平位移				垂直位移				备注
	本次 测量值 (mm)	本次 变化量 (mm)	累计 变化量 (mm)	变化速率 (mm/d)	本次 测量值 (mm)	本次 变化量 (mm)	累计变化 量 (mm)	变化速率 (mm/d)	
正常、异常或危险的判断性结论：									
工况描述及建议分析：									



表 D.2 深层水平位移监测报表

工程名称：                      天气情况：                      报表编号：                      测试时间：

测点编号	深度 (m)	本次 测量值 (mm)	本次 变化量 (mm)	累计 变化量 (mm)	变化速率 (mm/d)	备注
正常、异常或危险的判断性结论：						
工况描述及建议分析：						

表 D.3 深层垂直位移监测报表

工程名称：天气情况：报表编号：测试时间：

测点编号	深度 (m)	初始高程 (m)	本次高程 (m)	本次 变化量 (mm)	累计 变化量 (mm)	变化速率 (mm/d)	备注

正常、异常或危险的判断性结论：

工况描述及建议分析：

表 D.4 裂缝监测报表

工程名称：                      天气情况：                      报表编号：                      测试时间：

测点编号	上次测量值 (mm)	本次 测量值 (mm)	本次 变化量 (mm)	累计 变化量 (mm)	变化速率 (mm/d)	备注
正常、异常或危险的判断性结论：						
工况描述及建议分析：						

表 D.5 土压力、孔隙水压力、支（挡）护结构应力监测报表

工程名称：                      天气情况：                      报表编号：                      测试时间：

测点编号	深度 (m)	上次测量值 (kPa)	本次 测量值 (kPa)	累计变化(kPa)	变化速率 (kPa/d)	备注
正常、异常或危险的判断性结论：						
工况描述及建议分析：						

表 D. 6 地下水位监测报表

工程名称：                      天气情况：                      报表编号：                      测试时间：

测点编号	初始高程 (m)	本次高程 (m)	本次 变化量 (mm)	累计 变化量 (mm)	变化速率 (mm/d)	备注
正常、异常或危险的判断性结论：						
工况描述及建议分析：						

表 D.7 温湿度监测报表

工程名称：天气情况：报表编号：测试时间：

测点编号	温度（℃）	湿度（%RH）	备注
正常、异常或危险的判断性结论：			
工况描述及建议分析：			