

T

ICS 93.080.99

CCS P66

团体标准

T/CWDPA XXX—2026

寒区冻土路基长期变形监测技术规范

Technical specification for long-term deformation monitoring of permafrost

roadbeds in cold regions

(草案)

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国西部开发促进会 发布

目 次

| | |
|--------------------------------|-----|
| 前言 | 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 | 3 |
| 4.1 监测工作基本要求 | 3 |
| 4.2 监测内容要求 | 3 |
| 4.3 监测周期要求 | 3 |
| 4.4 监测质量控制要求 | 3 |
| 5 检测方案设计 | 4 |
| 5.1 资料收集 | 4 |
| 5.2 方案内容 | 4 |
| 5.3 监测项目 | 4 |
| 5.4 监测指标 | 4 |
| 5.5 监测频率确定 | 5 |
| 6 检测技术与设备要求 | 5 |
| 6.1 变形监测 | 5 |
| 6.2 地温监测 | 6 |
| 6.3 水分监测 | 6 |
| 7 数据采集与传输 | 6 |
| 7.1 数据采集 | 6 |
| 7.2 数据传输 | 6 |
| 8 数据处理与分析 | 7 |
| 8.1 数据预处理 | 7 |
| 8.2 数据分析 | 7 |
| 9 监测成果评价与预警 | 7 |
| 9.1 监测成果评价 | 7 |
| 9.2 预警 | 7 |
| 10 监测设备维护与管理 | 7 |
| 10.1 设备维护 | 8 |
| 10.2 设备管理 | 8 |
| 11 监测资料归档与应用 | 8 |
| 11.1 资料归档 | 8 |
| 11.2 成果应用 | 8 |
| 附录 A (规范性) 数据传输协议及数据格式要求 | 9 |
| A.1 数据传输协议 | 9 |

| | |
|---------------------------|----|
| A.2 数据格式要求 | 9 |
| 附录 B (资料性) 监测设备选型指南 | 10 |
| B.1 选型基本原则 | 10 |
| B.2 各类设备选型建议 | 10 |

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。

本文件由中国西部开发促进会提出并归口。

本文件起草单位：内蒙古大学。

本文件主要起草人：。

本文件为首次发布。

寒区冻土路基长期变形监测技术规范

1 范围

本文件规定了寒区冻土路基长期变形监测技术规范的总体要求、检测方案设计、检测技术与设备要求、数据采集与传输、数据处理与分析、监测成果评价与预警、监测设备维护与管理、监测资料归档与应用等内容。

本文件适用于寒区多年冻土区、季节冻土区公路、铁路路基工程的长期变形监测工作，包括新建路基工程的施工期至运营期全过程监测、既有路基工程的运营期常态化监测及病害治理后的效果跟踪监测。不适用于寒区冻土路基的短期应急监测及非冻土区路基的变形监测。

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 12897 国家一、二等水准测量规范
- GB/T 12898 国家三、四等水准测量规范
- GB/T 33703 自动气象站观测规范
- GB/T 35221 地面气象观测规范 总则
- GB 50324 冻土工程地质勘察规范
- GB 50026 工程测量标准
- JT/T 1504.1 公路基础设施长期性能科学观测网 第1部分：建设规范
- JT/T 1504.2 公路基础设施长期性能科学观测网 第2部分：观测规范
- JT/T 1504.3 公路基础设施长期性能科学观测网 第3部分：数据汇交规范
- QX 4 气象台（站）防雷技术规范
- DB15/T 2425 高纬度多年冻土区公路路基监测规程
- DB23/T 3988 寒区公路基础设施长期性能观测规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

寒区 cold region

年均气温0℃以下，存在季节性冻土或多年冻土分布，且冻融作用对工程建设产生显著影响的区域，包括高纬度寒区和高海拔寒区两类。

3.2

冻土 frozen soil

含有冰的土（岩），根据冻结持续时间分为多年冻土和季节性冻土两类。

[来源：GB 50324，2.1.1]

3.3

多年冻土 permafrost

冻结状态持续两年及两年以上的土（岩）。

[来源：GB 50324，2.1.2]

3.4

季节性冻土 seasonal frozen soil

地壳表层寒季冻结，暖季又全部融化的土（岩）。

[来源：GB 50324, 2.1.4]

3.5

冻土路基 frozen soil subgrade

处于寒区冻土环境中，由路基填料压实形成的道路基础结构，其稳定性受冻融循环、地温变化、水文条件等因素显著影响。

3.6

长期变形 long-term deformation

冻土路基在长期服役过程中，受冻胀融沉、creep变形、环境变化及荷载作用等综合因素影响，产生的累积性、持续性变形，包括竖向沉降、横向位移及不均匀变形等。

3.7

冻胀 frost heave

寒季冻土路基中水分冻结体积膨胀，导致路基表面向上隆起的变形现象。

3.8

融沉 thaw settlement

暖季冻土路基中冰体融化，土体强度降低、压缩性增大，导致路基表面向下沉降的变形现象。

3.9

多年冻土上限 permafrost table

天然条件或人为条件影响下形成的多年冻土层顶面。

[来源：DB15/T 2425, 3.6]

3.10

活动层 active layer

覆盖于多年冻土之上暖季融化且寒季能完全回冻的岩土层。

[来源：DB15/T 2425, 3.7]

3.11

监测断面 monitoring section

为系统监测冻土路基变形及影响因素，在路基纵向、横向布置的，用于布设监测设备和采集数据的典型断面。

3.12

传感器成活率 sensor survival rate

能够正常工作的传感器数量占传感器总数的百分率。

[来源：DB15/T 2425, 3.11]

3.13

数据有效采集率 effective data collection rate

采集到有效数据的传感器数量占正常工作传感器数量的百分率。

[来源：DB15/T 2425, 3.12]

3.14

预警阈值 early warning threshold

根据冻土路基安全运营要求，结合工程地质条件、变形规律及相关标准，确定的用于判断路基变形是否处于安全状态的临界值。

3.15

区域级数据中心 regional data center

服务于特定地理区域（如省域或公路网络集群），用于存储、汇交、共享冻土路基长期变形监测数据的设备系统。

[来源：DB23/T 3988, 3.6]。

4 总体要求

4.1 监测工作基本要求

监测工作应符合下列基本要求：

- a) 新建、改（扩）建寒区高速、一级和二级公路（铁路）路基应开展长期变形监测；新建、改（扩）建寒区三级及以下公路（铁路）路基可根据工程重要性、冻土发育程度等情况，择要开展长期变形监测；
- b) 已运营寒区冻土路基应根据道路（铁路）等级、多年冻土退化状况、路基病害程度（如冻胀融沉裂缝、不均匀沉降等）及运营年限等综合因素，确定是否开展或加密长期变形监测；
- c) 监测范围应涵盖路基本体、路基下伏冻土地基、路基影响区域（一般为路基两侧 50m 范围内）的天然地面及周边水文、气象环境，确保全面捕捉影响路基变形的各类因素；
- d) 监测工作应结合寒区气候特征（如严寒、酷寒、长冬短夏等）、地质条件（如冻土类型、地层岩性、水文地质等）及工程特点，选择适配性强、稳定性好、耐低温的监测技术和设备；
- e) 监测数据应满足真实性、连续性、完整性和准确性要求，传感器成活率不应低于 90%，数据有效采集率不应低于 85%；
- f) 监测工作应建立专业的监测团队，配备符合要求的技术人员和设备，制定完善的监测管理制度和操作规程，并定期开展技术培训和考核。

4.2 监测内容要求

寒区冻土路基长期变形监测内容应全面覆盖变形、地温、水分、气象及荷载等关键指标，各类监测内容应相互补充、协同联动，具体要求如下：

- a) 变形监测：核心监测指标，包括路基表面竖向沉降、横向位移、不均匀变形，路基填料分层变形，冻土地基沉降变形等，应能反映路基在冻融循环、荷载作用下的变形规律；
- b) 地温监测：基础监测指标，包括路基本体、活动层及多年冻土层的温度，地温年较差、年平均地温、冻土上限深度等，应能反映冻土热动态变化特征及其对路基变形的影响；
- c) 水分监测：关键辅助指标，包括路基本体、活动层及冻土地基的土壤含水率、孔隙水压力，地下水水位及动态变化等，应能反映水分迁移对冻土稳定性和路基变形的影响；
- d) 气象监测：环境辅助指标，包括监测区域的气温、降水量、风速、风向、日照时长、相对湿度等，应能反映区域气候条件对路基冻融变形的影响；
- e) 荷载监测：工况辅助指标，包括交通荷载（轴重、车速、车流量）、路基自重及附加荷载等，应能反映荷载作用对路基变形的影响。

4.3 监测周期要求

监测周期应根据寒区冻土路基的变形特性、冻融循环周期及工程阶段合理确定，确保能够捕捉不同时期的变形规律，具体要求如下：

- a) 新建路基：监测周期应从路基施工完成后开始，持续监测至运营稳定（一般不少于 5 年）；其中，施工后第 1-2 年为变形活跃期，监测频率应加密，第 3-5 年为变形稳定期，可适当降低监测频率；
- b) 已运营路基：监测周期应根据路基变形状况确定，变形稳定路段监测周期不少于 3 年，变形活跃或病害路段应持续监测至变形稳定，必要时延长监测周期；
- c) 冻融循环周期监测：冬季（冻结期）和暖季（融化期）为变形关键期，监测频率应高于平季；其中，冻结初期（10-11 月）、冻结盛期（12-2 月）、融化初期（3-4 月）、融化盛期（5-9 月）应加密监测；
- d) 特殊天气及工况监测：遭遇暴雨、暴雪、强寒潮、强风等极端天气，或发生路基病害、荷载突变等特殊工况时，应临时加密监测频率，必要时开展应急监测。

4.4 监测质量控制要求

监测工作应建立全流程质量控制体系，从监测方案设计、设备选型与校准、现场安装与布设、数据采集与传输、数据处理与分析等各个环节进行质量管控，具体要求如下：

- a) 监测方案设计应经过专家论证，确保方案的科学性、合理性和可行性，满足监测工作的总体目标和要求；
- b) 监测设备（传感器、采集仪、传输设备等）在使用前应进行检定/校准，经检定/校准合格后方可投入使用；使用过程中应定期进行复检，复检周期不应超过1年；
- c) 现场安装与布设应严格按照操作规程执行，安装完成后应进行调试和试运行，确保设备工作正常、数据采集准确；
- d) 数据采集与传输过程中应建立数据校验机制，及时发现和处理异常数据，确保数据的连续性和完整性；
- e) 数据处理与分析应采用规范的方法和模型，处理结果应经过复核，确保分析结论的可靠性和科学性；
- f) 监测工作应定期开展质量检查和评估，及时发现和解决监测过程中存在的问题，不断优化监测方案和工作流程。

5 检测方案设计

5.1 资料收集

编制监测方案前，应调查和收集以下资料：

- a) 工程概况、设计文件及施工方案；
- b) 区域气象、水文、地质资料；
- c) 多年冻土类型、分布范围、天然上限、含冰量、年平均地温等；
- d) 同类工程的典型病害及养护资料；
- e) 工程验收资料。

5.2 方案内容

监测方案编制应包括但不限于下列内容：

- a) 工程概况；
- b) 监测目的和依据；
- c) 监测内容及监测项目；
- d) 监测场地及监测点布设；
- e) 监测方法、仪器设备类型及数量；
- f) 监测工作量与工程监测精度；
- g) 监测人员的配置；
- h) 监测周期及频率；
- i) 监测数据分析及反馈机制；
- j) 质量控制与安全保障措施；
- k) 监测工作计划。

5.3 监测项目

长期变形监测的主要项目应包括：

- a) 变形监测：包括地表水平位移及竖向变形、地基沉降、地基分层沉降（冻胀与融沉）及路堤顶沉降；
- b) 地温监测：包括天然地基与路基温度监测，掌握冻土热状态变化；
- c) 水分监测：包括土体含水率及地下水位监测，分析水分场对冻胀融沉的影响；
- d) 气象监测：包括气温、降水、风速风向、太阳辐射等，为变形分析提供环境驱动数据。

5.4 监测指标

监测指标应涵盖变形、地温、水分、气象及荷载五大类，各类监测指标的具体内容和监测目的应符合表1的规定。

表 1 监测指标要求

| 监测类别 | 具体监测指标 | 监测目的 |
|------|---|------------------------------|
| 变形监测 | 路基表面竖向沉降、横向位移、不均匀变形；路基填料分层变形；冻土地基沉降变形 | 掌握路基在冻融循环、荷载作用下的变形规律，评估路基稳定性 |
| 地温监测 | 路基本体温度、活动层温度、多年冻土层温度；地温年较差、年平均地温；冻土上限深度 | 反映冻土热动态变化特征，分析地温变化对路基变形的影响 |
| 水分监测 | 土壤含水率、孔隙水压力；地下水水位及动态变化 | 反映水分迁移规律，评估水分对冻土稳定性和路基变形的影响 |
| 气象监测 | 气温、降水量、风速、风向、日照时长、相对湿度 | 反映区域气候条件，分析气候因素对路基冻融变形的影响 |
| 荷载监测 | 轴重、车速、车流量；路基自重及附加荷载 | 反映荷载作用特征，分析荷载对路基变形的影响 |

5.5 监测频率确定

监测频率应根据监测阶段、冻融循环周期及特殊工况合理设定，确保能够及时捕捉路基变形及影响因素的变化规律，具体监测频率应符合表2的规定。

表 2 监测频率要求

| 监测阶段 | 监测时期 | 变形监测频率 | 地温监测频率 | 水分监测频率 | 气象监测频率 | 荷载监测频率 |
|------------|-----------|------------|--------|--------|----------|--------|
| 新建路基（1-2年） | 冻结期/融化期 | 1次/7d | 1次/24h | 1次/14d | 1次/1h | 1次/24h |
| 新建路基（3-5年） | 冻结期/融化期 | 1次/15d | 1次/24h | 1次/30d | 1次/1h | 1次/24h |
| 已运营稳定路基 | 冻结期/融化期 | 1次/30d | 1次/24h | 1次/60d | 1次/1h | 1次/24h |
| 变形活跃/病害路基 | 冻结期/融化期 | 1次/3d | 1次/12h | 1次/7d | 1次/1h | 1次/12h |
| 所有阶段 | 极端天气/特殊工况 | 1次/12h-24h | 1次/6h | 1次/24h | 1次/30min | 1次/6h |
| 所有阶段 | 平季 | 1次/30d | 1次/24h | 1次/60d | 1次/1h | 1次/24h |

注1：平季指冻结期和融化期以外的过渡时期；极端天气包括暴雨、暴雪、强寒潮、强风等；特殊工况包括路基病害突发、荷载突变等。

6 检测技术与设备要求

6.1 变形监测

6.1.1 一般规定

变形监测包括地表水平位移及竖向变形、地基沉降、地基分层沉降及路堤顶沉降。每个监测场地应布设不少于1个基准点。基准点应布设于路基沉降影响范围以外的稳定区域，并采取抗冻拔措施。

6.1.2 监测设备

变形监测主要采用以下仪器设备：

- 地表水平位移及竖向变形：设置观测桩，并采用全站仪、水准仪等监测；
- 地基沉降与分层沉降：采用沉降计等监测；
- 路堤顶沉降：设置沉降板，采用全站仪、水准仪等监测。

6.1.3 设备精度

监测仪器设备精度应满足表2的要求。

表 3 表监测仪器设备精度要求

| 序号 | 仪器名称 | 精度要求 | 主要用途 |
|----|------|--------------|---------------|
| 1 | 全站仪 | 2" /2mm+2ppm | 地表水平位移及竖向变形监测 |
| 2 | 水准仪 | ±2mm/km | 沉降监测，等级不低于三等 |
| 3 | 沉降计 | 0.1mm | 地基分层沉降监测 |

6.2 地温监测

6.2.1 监测设备

地温监测应采用稳定性好、耐低温的热敏电阻传感器，其基本参数应符合：

- a) 测量范围应为 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ ，测量精度为 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 耐压值应不低于 1.0MPa；
- c) 具有良好的防水性，浸水 24h 后电阻率变化率应不超过 0.01%；
- d) 地温监测应配备专门的数据采集仪，具备自动采集、存储和传输功能。

6.2.2 监测孔布设

地温监测孔应设置在路基同一横断面。

- a) 高速及一级公路：同一断面不应少于 6 个监测孔（左、右坡脚，左、右路肩，路中，天然地表）；
- b) 二级公路：同一断面不应少于 5 个监测孔；
- c) 天然地基监测孔深度不宜小于 15m，应避开路基热影响区域。

6.3 水分监测

6.3.1 监测设备

水分监测主要包括：

- a) 含水率监测：采用水分传感器，工作温度范围宜为 $-40^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$ ，测量精度在体积含水量小于 65%时为 $\pm 6\%$ ；
- b) 地下水位监测：采用水位计，工作温度范围宜为 $0^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$ ，测量精度为 $\pm 0.1\text{kPa}$ 。

6.3.2 气象监测

气象监测宜采用多要素自动气象站，监测项目至少应包括气压、气温、湿度、风速、风向、降雨量、蒸发量和地面温度等。气象站的安装和观测应符合 GB/T 33703 和 GB/T 35221 的规定。

7 数据采集与传输

7.1 数据采集

7.1.1 监测数据采集应包括自动采集与人工采集两种方式。自动采集系统应能实现数据的连续、实时获取；人工采集应作为自动采集的补充与校核。

7.1.2 数据采集频率应根据监测项目、工程阶段以及环境条件确定，具体应符合表 7.1.2 的规定。当监测数据变化速率异常或遭遇极端天气（如暴雨、寒流、暴风雪）时，应适当提高监测频率。

7.1.3 监测初始值的确定应符合下列规定：

- a) 监测项目在设备安装稳定后，应立即采集初始值；
- b) 初始值应连续采集不少于 3 次，取算术平均值作为该监测项目的初始值。

7.2 数据传输

7.2.1 监测系统宜采用自动传输方式，具备通过有线或无线方式将数据远程传输至数据处理中心的能力。传输系统应具有数据缓存功能，确保在通信中断时数据不丢失，通信恢复后能自动续传。

7.2.2 数据传输应保证其完整性、准确性和及时性。数据传输协议应统一，并设置校验机制，防止数据在传输过程中出错或丢失。

7.2.3 对于环境复杂、条件艰苦的监测点，可采用光纤传输等抗干扰能力强的技术进行数据远程传输，监测数据项目采集频率应符合表 4 要求进行。

表 4 监测项目数据采集频率要求

| 监测项目 | 工程阶段 | 采集频率 | 备注 |
|------|-----------|--------|-----------|
| 地温监测 | 施工期 & 运营期 | 至少1次/日 | 变化异常时提高频率 |

| | | | |
|------|-----------|--------|-----------------|
| 变形监测 | 新建公路（前3年） | 1次/半月 | 监测值变化速率异常时应提高频率 |
| 变形监测 | 新建公路（3年后） | 1次/月 | 监测值变化速率异常时应提高频率 |
| 变形监测 | 已建公路 | 1次/月 | 监测值变化速率异常时应提高频率 |
| 水分监测 | 施工期 & 运营期 | 至少1次/日 | 可根据稳定性调整 |
| 路域气象 | 施工期 & 运营期 | 连续采集 | 按气象观测规范执行 |

8 数据处理与分析

8.1 数据预处理

8.1.1 数据预处理应包括原始数据的检查、校对、剔除和插补。应对采集到的原始数据进行异常值判别，对明显偏离正常范围的跳跃值和孤立值，应结合环境因素和仪器状态进行甄别和处理。

8.1.2 数据应按规定格式进行记录、整理和汇总，并及时绘制变化过程曲线。

8.2 数据分析

8.2.1 数据分析内容应包括：

- 时空变化分析：分析各监测数据随时间的变化规律及在空间上的分布特征；
- 相关性分析：分析变形、地温、水分等不同监测项目之间的关联性；
- 趋势预测：基于长期监测数据，建立预测模型，对路基变形和冻土发展趋势进行预测。

8.2.2 对于变形场监测，可采用如克里金（Kriging）空间插值等方法，将离散点监测数据解译为连续的路基变形场，以全面评估路基健康状况。

9 监测成果评价与预警

9.1 监测成果评价

9.1.1 应定期编制监测报告，报告内容应包括工程概况、监测项目、监测方法、监测数据整理与分析、结论与建议等。

9.1.2 监测成果评价应结合冻土工程特点和设计要求，重点对路基的稳定性进行评价，内容包括：

- 冻土上限的变化情况；
- 路基变形量、变形速率是否处于允许范围内；
- 地温场的变化趋势及其对冻土稳定性的影响。

9.2 预警

9.2.1 应建立分级预警机制（见表5）。当监测数据达到预设的阈值时，应启动相应级别的预警。预警等级可分为黄色预警（关注级）、橙色预警（警示级）和红色预警（行动级）。

9.2.2 预警阈值应根据工程设计值、规范允许值及当地工程经验确定。出现下列情况之一时，应立即发出预警，并上报相关单位：

- 变形监测点的沉降或水平位移速率连续3天超过允许值；
- 冻土人为上限下降速率显著加快；
- 工后沉降超过设计允许值。

表5 路基沉降变形预警等级划分参考表

| 预警等级 | 启动条件 | 响应措施 |
|-----------|---------------------------------|-----------------------------|
| 黄色预警（关注级） | 变形速率连续2天超过允许值的80%，或冻土上限出现明显下降趋势 | 加强数据分析与现场巡查，提高监测频率 |
| 橙色预警（警示级） | 变形速率连续3天超过允许值，或工后沉降达到设计允许值的80% | 立即向项目管理单位报告，进行专项分析，准备处治方案 |
| 红色预警（行动级） | 变形速率急剧加大，出现明显不均匀沉降，或工后沉降超过设计允许值 | 立即启动应急预案，采取工程措施进行干预，并持续加密监测 |

10 监测设备维护与管理

10.1 设备维护

10.1.1 应制定监测设备定期维护、检定和检查计划。监测仪器、设备等应定期检定、检查与校准，其精度、防冻性、寿命等应满足监测要求。

10.1.2 现场应配置备用仪器。测量初期应对主测仪器和备用仪器进行对比测量，以便更换时能保证监测数据的连续性和完整性。

10.1.3 应做好监测断面、监测点和监测仪器设备、元器件的保护工作，防止因施工、机械、冰冻、雷击等因素造成损坏。易遭受雷击的区域，应按相关要求做好数据采集箱防雷击措施。

10.2 设备管理

10.2.1 应建立监测设备档案，对设备的型号、规格、编号、检定日期、使用状态等进行动态管理。

10.2.2 传感器和设备的关键性能指标应满足表 6 的要求。

表 6 监测传感器关键性能指标要求

| 传感器类型 | 关键性能指标 | 要求 |
|-------|-----------------|----------------|
| 温度传感器 | 测量范围 | -50℃ ~ +50℃ |
| | 测量精度 | ±0.05℃ ~ ±0.1℃ |
| | 施工完成后成活率 | >98% |
| 水分传感器 | 工作温度 | -30℃ ~ +60℃ |
| | 测量误差（体积含水率<65%） | <±6% |
| | 施工完成后成活率 | >95% |
| 沉降计 | 工作温度 | -30℃ ~ +60℃ |
| | 分辨率 | ≤0.1mm |

11 监测资料归档与应用

11.1 资料归档

归档内容应包含以下内容：

- 监测的原始记录、计算结果和技术成果应及时组卷、归档。归档资料应包括监测方案、原始数据、计算书、分析报告、图表等；
- 监测成果应加盖公章，使用正式的监测记录表格，记录人、校对人均应签名，确保资料的可追溯性；
- 应做好各种原始数据、报告的保密工作。

11.2 成果应用

监测成果应用于：

- 指导路基工程的施工组织与工艺优化；
- 评价路基工程的长期使用性能和安全状态；
- 为路基的养护、维修和加固决策提供科学依据；
- 为类似冻土工程的设计、施工和监测积累经验和数据。

附录 A
(规范性)
数据传输协议及数据格式要求

A.1 数据传输协议

A.1.1 传输协议应采用TCP/IP协议簇，确保跨平台兼容性，符合JT/T 1504.3《公路基础设施长期性能科学观测网 第3部分：数据汇交规范》要求。

A.1.2 数据传输应支持断点续传功能，通信中断时本地缓存数据保存时间不应低于72h，通信恢复后自动补传。

A.1.3 传输数据应进行加密处理，采用AES-128加密算法，确保数据传输安全。

A.1.4 每帧数据应包含校验位（CRC32），接收端校验无误后反馈确认信息，校验失败则请求重传。

A.2 数据格式要求

A.2.1 通用数据头格式参照表A.1所示。

表 A.1 通用数据头格式

| 字段名称 | 字段长度（字节） | 数据类型 | 说明 |
|--------|----------|------|------------------------|
| 设备编号 | 16 | 字符串 | 唯一标识监测设备 |
| 数据采集时间 | 20 | 字符串 | 格式：YYYY-MM-DD HH:MM:SS |
| 数据类型标识 | 4 | 字符串 | 如“DEFM”（变形）、“TEMP”（地温） |
| 数据长度 | 4 | 整数 | 后续数据字段总字节数 |
| 校验位 | 8 | 字符串 | CRC32校验结果 |

A.2.2 各类监测数据体格式：

- a) 变形监测数据体：竖向沉降值(mm)，横向位移值(mm)，不均匀变形值(mm)，数据状态标识（状态标识：0=正常，1=异常）；
- b) 地温监测数据体：路基本体温度(℃)，活动层温度(℃)，多年冻土层温度(℃)，冻土上限深度(m)，数据状态标识；
- c) 水分监测数据体：土壤含水率(%)，孔隙水压力(kPa)，地下水位(m)，数据状态标识。

附录 B
(资料性)
监测设备选型指南

B.1 选型基本原则

应遵循以下选型基本原则：

- a) 耐低温性：优先选择工作温度下限 $\leq -40^{\circ}\text{C}$ 的设备，适应寒区长冬低温环境；
- b) 稳定性：设备连续工作无故障时间不低于 180 天，传感器成活率 $\geq 90\%$ ；
- c) 适配性：根据冻土类型（多年冻土/季节性冻土）、监测环境（高海拔/高纬度）选择专用设备；
- d) 易维护性：结构简单、模块化设计，便于现场检修和更换。

B.2 各类设备选型建议

设备选型要求参照表B.1所示。

表 B.1 设备选型要求

| 监测类型 | 推荐设备型号特征 | 适用场景 | 注意事项 |
|------|-----------------|-----------|------------------------|
| 变形监测 | 防冻型全站仪、自动安平水准仪 | 所有寒区冻土路基 | 定期清理设备表面积雪、冰霜，避免光学部件结露 |
| 地温监测 | 铠装热敏电阻传感器 | 多年冻土区深层监测 | 传感器探头应与冻土紧密接触，孔壁回填导热介质 |
| 水分监测 | 频域反射式（FDR）水分传感器 | 季节性冻土区 | 避免传感器与冰体直接接触，防止电极损坏 |
| 气象监测 | 防冰冻多要素气象站 | 高海拔寒区 | 风速传感器加装防冰罩，雨量计配备加热除冰功能 |