



T/CECS G: ×××-××-202×

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路隧道结构监测系统实施标准

Standard for Implementation of Highway Tunnel Structural
Monitoring Systems

(征求意见稿)

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

中国工程建设标准化协会标准

公路隧道结构监测系统实施标准

Standard for Implementation of Highway Tunnel Structural Monitoring
Systems

(征求意见稿)

T/CECS G: ×××-××-202×

主编单位：同济大学

发布机构：中国工程建设标准化协会

实施日期：202×年××月××日

人民交通出版社股份有限公司

北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2024 年第二批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字[2024]28 号）的要求，由同济大学承担《公路隧道结构监测系统实施标准》（以下简称“本标准”）的制定工作。

编制组在总结公路隧道结构监测相关工程经验和科研成果的基础上，对公路隧道结构监测技术进行归纳和整理，完成了本标准的编制工作。

本标准分为 8 章和 1 个附录，主要内容包括：1 总则、2 术语、3 基本规定、4 传感器安装、5 采集及供电传输设备安装、6 监测数据管理平台、7 测试与试运行、8 质量验收，附录 A 监测系统验收记录表。

本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准基于通用的工程建设理论及原则编制，适用于本标准提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本标准相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本标准由中国工程建设标准化协会公路分会归口管理，由同济大学负责具体技术内容的解释。在执行过程中如有意见或建议，请函告本标准日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或刘学增（地址：上海市四平路 1239 号同济大学土木工程学院，邮政编号：200092，电话：13918874336；电子邮箱：liuxuezeng@tongji.edu.cn），以便修订时研用。

主 编 单 位：同济大学

参 编 单 位：

主 编：刘学增

主要参编人员：

主 审：陈楚江

参与审查人员：

目 次

1 总则	1
2 术语	2
3 基本规定	4
4 传感器安装	5
4.1 一般规定.....	5
4.2 通用安装标准.....	8
4.3 变形、位移监测传感器安装.....	11
4.4 受力监测传感器安装.....	15
4.5 病害特征监测传感器安装.....	19
4.6 环境监测传感器安装.....	21
4.7 其他监测传感器安装.....	24
5 采集及供电传输设备安装	26
5.1 一般规定.....	26
5.2 采集设备安装.....	27
5.3 设备接入.....	27
5.4 通信传输设备安装.....	28
5.5 供电设备安装.....	29
5.6 综合布线.....	30
6 监测数据管理平台	33
6.1 一般规定.....	33
6.2 数据采集.....	33
6.3 数据处理.....	34
6.4 数据分析.....	36
6.5 信息反馈.....	37
7 测试与试运行	39
7.1 一般规定.....	39
7.2 硬件测试.....	39
7.3 软件测试.....	40

7.4 联调联试.....	40
7.5 系统试运行.....	42
8 质量验收	43
8.1 一般规定.....	43
8.2 硬件验收.....	44
8.3 软件验收.....	45
附录 A 监测系统验收记录表.....	47
本标准用词用语说明	49

征求意见稿

1 总则

1.0.1 为指导和规范公路隧道结构监测系统实施与验收工作，提高监测技术水平，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于采用各工法修建的公路隧道结构监测系统的实施与质量验收。

1.0.3 公路隧道结构监测应积极稳妥地采用信息化、自动化、人工智能等新技术、新设备，推进公路隧道结构监测智能化发展。

1.0.4 公路隧道结构监测实施除应符合本标准外，尚应符合国家、行业和中国工程建设标准化协会现行有关标准的规定。

征求意见稿

2 术语

2.0.1 公路隧道结构监测系统 highway tunnel structural monitoring system

由安装部署在公路隧道结构上的传感器、数据采集与传输设备、监测数据管理平台等监测硬件、软件构成，能自动获取结构变形、受力、病害特征及关联环境状态等数据，用于掌握隧道结构状态、分级预警、辅助养护决策的集成化技术系统。

2.0.2 监测硬件 monitoring hardware

公路隧道结构监测系统中所有实体装置的总称，包括监测传感器、数据采集与传输设备、供电及通信传输设备、监控中心硬件设备等，承担信号感知、数据采集、信号转换、数据传输、供电保障、数据存储与展示等物理层功能，是监测系统运行的物理载体。

2.0.3 监测软件 monitoring software

公路隧道结构监测系统中与监测硬件配套使用的程序、算法及配套技术文档的总称，用于支撑隧道结构安全管控及运营养护决策，包括采集传输类软件、监测数据管理平台及配套工具软件等。

2.0.4 监测传感器 monitoring sensor

安装于公路隧道结构中，可将结构变形、受力状态、病害特征、环境状态等被测物理量或化学量按一定规律转换为可采集、传输的信号，为隧道结构监测系统提供基础监测数据的前端感知装置。

2.0.5 监测设备 monitoring equipment

公路隧道结构监测系统中用于对监测传感器输出的信号进行采集、转换、传输、存储与预处理，并为系统运行提供供电、通信及管控支撑的各类物理装置，主要包括数据采集设备、供电及通信传输设备、监控中心硬件设备等。

2.0.6 监测数据管理平台 monitoring data management platform

监测软件的核心载体，用于进行数据集中管控与应用服务，支持多源监测数据的统一接入、存储、处理、查询与可视化展示，具备设备运行管控、结构安全状态研判、分级预警管理、养护决策及应急处置、报表自动生成等功能。

2.0.7 自动化监测 automatic monitoring

以传感技术、通信技术与信息技术为基础，通过监测传感器、数据采集传输设备及数据管理平台协同运行，在无人或少量人工干预下，自动完成公路隧道结构监测数据的采集、传输、存储、分析与预警，实现连续、实时、全天候运行的监测技术。

征求意见稿

3 基本规定

3.0.1 公路隧道结构监测系统实施单位应建立健全项目组织机构、安全管理制度、施工质量控制和检验制度，并明确各岗位职责。

3.0.2 公路隧道结构监测系统实施前，应开展现场调查，审查设计文件，编制施工方案并进行技术交底。实施人员应经过专项技术培训，考核合格后方可上岗。

3.0.3 公路隧道结构监测系统实施过程中的安全生产、劳动保护、防火及环境保护等措施应符合国家现行相关法律法规和标准的规定。

3.0.4 公路隧道结构监测系统的安装、测试和试运行应符合设计文件和现行有关标准的规定。

3.0.5 监测硬件安装涉及隐蔽工程时，应在隐蔽工程验收合格后进行。

3.0.6 监测硬件安装完成后，应设置包含设备编号的固定标识，并建立包含设备编号、类型、型号、数量、安装位置、影像资料和异常情况等信息的安装信息档案。

3.0.7 公路隧道结构监测系统实施过程中，应记录实施进度、周边环境、监测断面周边施工等信息，并收集相关勘察、设计、测量及相关技术资料。

3.0.8 监测数据管理平台宜具备数据分析、状态识别和信息服务等智能化功能，并应符合现行有关信息技术安全标准的规定。

3.0.9 公路隧道结构监测系统建设完成并通过测试后，应及时开展联调联试及试运行，确保监测硬件及软件系统正常运行。

3.0.10 公路隧道结构监测系统质量验收应符合验收程序，验收资料宜采用信息化手段管理，并纳入隧道养护技术档案。

3.0.11 公路隧道结构监测项目、频率、方法和技术要求应符合现行国家、行业及中国工程建设标准化协会相关标准的规定。

4 传感器安装

4.1 一般规定

4.1.1 传感器选型宜结合监测对象、环境条件及监测需求,采用具备自诊断、自校准或智能感知功能的传感器,提高监测系统运行可靠性和数据质量。

4.1.2 传感器安装前应检查安装环境是否符合设计文件和产品技术文件的要求。

4.1.3 传感器安装前应进行外观检查和性能检测,并按照产品技术文件要求进行性能检查和初始标定,确认传感器状态满足安装要求。

4.1.4 布设传感器的监测断面应统一编号并设置标识牌,标识牌应包括监测断面编号、里程、监测内容、监测单位及联系人、警示标语等信息。

4.1.5 传感器安装不应影响隧道结构安全、使用功能和检修维护,并应采取必要的保护装置。传感器保护装置应符合下列规定。

- 1 保护装置不得影响传感器的正常工作。
- 2 保护装置应可靠、有效、耐久和拆卸方便。
- 3 保护装置应具有防止人为破坏、防雷、防腐蚀、防生物侵害和防潮功能。
- 4 保护装置不得影响隧道结构安全、界限要求及其他工序施工。

4.1.6 传感器安装完成后应恢复隧道结构表面被去除的粉刷层或涂装层,并应在 24h 内完成初始数据的采集和记录。

4.1.7 不同工法隧道各监测项目的传感器选择应符合现行相关标准、规范要求,并应符合下列规定。

- 1 钻爆法隧道结构监测传感器选择应符合本标准表 4.1.7-1 规定。

表 4.1.7-1 钻爆法隧道结构监测传感器

监测项目		监测仪器
变形监测	净空收敛	收敛计、全站仪、激光测距仪或激光扫描仪
	断面轮廓变形	全站仪、激光扫描仪
	拱顶下沉、墙脚下沉、路面隆沉	全站仪、水准仪、激光扫描仪、静力水准仪、分布式光纤
	隧道竖向位移、水平位移	全站仪、水准仪、FBG 位移传感器、分布式光纤、高精度激光位移传感
	地层水平位移	测斜仪
	仰拱隆沉、地层竖向位移	分层沉降仪、沉降计、高精度激光位移传感

	洞门位移	全站仪、水准仪、倾斜仪、水准仪、静力水准仪、GNSS
	洞口边仰坡变形	全站仪、GNSS、合成孔径雷达差分干涉测量法
受力监测	围岩与支护间接触压力、两层支护间接触压力	压力盒、柔性压力计
	衬砌外水压力	渗压计、水压力表
	衬砌应力、衬砌（结构）表面应力	应变计、应变传感器
	钢筋应力	钢筋计
	螺栓轴力	螺栓轴力计
环境监测	地表水位、河（海）床变化	水位计
	围岩温度、隧道内环境温度	温度传感器
	水/混凝土中氯离子、硫酸根离子等腐蚀性离子含量	取样测定，可按现行《水运工程混凝土试验检测技术规范》（JTS/T 236）和《土工试验方法标准》（GB/T 50123）的有关规定执行。
	振动速度及频率	测振仪、速度传感器或加速度传感器、频率计
病害特征监测	裂缝位置、方向、长度、宽度和深度	测缝计、位移计、或激光扫描仪
	渗漏水位置、面积、水量、水质	红外热像仪、激光扫描仪、流量计
	衬砌起层、剥落的位置、面积和深度	激光扫描仪
	施工缝、变形缝错台	全站仪、激光扫描仪、测缝计、位移计
	路面开裂位置、宽度、长度	激光扫描仪
其他监测	钢筋锈蚀位置、范围及截面损失率	钢筋锈蚀仪、锈蚀传感器、钢筋探测仪和游标卡尺相结合
	混凝土保护层厚度	钢筋扫描仪、探地雷达
	混凝土碳化深度	钢筋探测仪与酚酞酒精溶液相结合
	混凝土强度	超声波探测仪、钻芯机

2 盾构法隧道结构监测传感器选择应符合本标准表 4.1.7-2 规定。

表 4.1.7-2 盾构法隧道结构监测传感器

监测项目		监测仪器
变形监测	净空收敛	收敛计、全站仪、激光测距仪或激光扫描仪
	隧道竖向位移、水平位移	全站仪、水准仪、FBG 位移传感器、分布式光纤、高精度激光位移传感
	纵向差异沉降	静力水准仪、水准仪、全站仪、激光扫描仪
	拱顶下沉	全站仪、水准仪、激光扫描仪、静力水准仪、分布式光纤
	断面轮廓变形	全站仪、激光扫描仪

受力监测	管片外土压力	柔性压力计、压力盒
	管片外水压力	渗压计、水压力表
	管片结构混凝土应力	应变计、应变传感器
	钢筋应力	钢筋计
	螺栓轴力	螺栓轴力计
	结构表面应力	应变计
环境监测	地表水位、河（海）床变化	水位计
	水/混凝土中氯离子、硫酸根离子等腐蚀性离子含量	取样测定，可按现行《水运工程混凝土试验检测技术规范》（JTS/T 236）和《土工试验方法标准》（GB/T 50123）的有关规定执行。
	隧道内环境温度	温度传感器
	振动速度及频率	测振仪、速度传感器或加速度传感器、频率计
病害特征监测	管片裂缝位置、方向、长度、宽度	测缝计、位移计、激光扫描仪
	渗漏水位置、面积、水量和水质	红外热像仪、激光扫描仪、流量计、计量堰
	接缝张开或错台	全站仪、激光扫描仪、测缝计、位移计
其他监测	钢构件锈蚀位置、范围及截面损失率	钢筋锈蚀仪、锈蚀传感器、钢筋探测仪和游标卡尺相结合
	混凝土保护层厚度	钢筋扫描仪、探地雷达

3 沉管法隧道结构监测传感器选择应符合本标准表 4.1.7-3 规定。

表 4.1.7-3 沉管法隧道结构监测传感器

监测项目		监测仪器
变形监测	隧道竖向位移、水平位移	全站仪、水准仪、FBG 位移传感器、分布式光纤、高精度激光位移传感
	纵向差异沉降、横向差异沉降	静力水准仪、水准仪、全站仪、激光扫描仪、分布式光纤
	接头张开与变位	全站仪、位移计、测缝计、激光扫描仪
受力监测	剪力键应力	应变计、应变传感器
	管节结构混凝土应力	应变计、应变传感器
	钢筋应力	钢筋计
	结构表面应力	应变计、应变传感器
环境监测	地表水位、河（海）床变化	水位计
	隧道内环境温度	温度传感器
	水/混凝土中氯离子、硫酸根离子等腐蚀性离子含量	取样测定，可按现行《水运工程混凝土试验检测技术规范》（JTS/T 236）和《土工试验方法标准》（GB/T 50123）的有关规定执行。
	振动速度及频率	测振仪、速度传感器或加速度传感器、频率计
病害特征监测	裂缝位置、方向、长度、宽度	测缝计、位移计、激光扫描仪

其他监测	渗漏水位置、面积、水质	红外热像仪、激光扫描仪、流量计
	接头破损	全站仪、激光扫描仪、测缝计、位移计
	钢壳、钢筋锈蚀范围、截面损失率	钢筋锈蚀仪、锈蚀传感器、钢筋探测仪和游标卡尺相结合
	混凝土保护层厚度	钢筋扫描仪、探地雷达

4 明挖法隧道结构监测传感器选择应符合本标准表 4.1.7-4 规定。

表 4.1.7-4 明挖法隧道结构监测传感器

监测项目		监测仪器
变形监测	隧道竖向位移、水平位移	全站仪、水准仪、FBG 位移传感器、分布式光纤、高精度激光位移传感
	纵向差异沉降、横向差异沉降	静力水准仪、水准仪、全站仪、激光扫描仪、分布式光纤
	变形缝张开与错台	全站仪、位移计、测缝计、激光扫描仪
	净空收敛	收敛计、全站仪、激光测距仪、激光扫描仪
	顶板挠度	全站仪、水准仪、位移计、FBG 位移传感器
受力监测	结构混凝土应力	应变计、应变传感器
	钢筋应力	钢筋计
	结构外水压力	柔性压力计、压力盒
	结构表面应力	应变计、应变传感器
环境监测	地表水位、河（海）床变化	水位计
	围岩温度、隧道内环境温度	温度传感器
	水/混凝土中氯离子、硫酸根离子等腐蚀性离子含量	取样测定，可按现行《水运工程混凝土试验检测技术规范》（JTS/T 236）和《土工试验方法标准》（GB/T 50123）的有关规定执行。
	振动速度及频率	测振仪、速度传感器或加速度传感器、频率计
病害特征监测	裂缝位置、方向、长度、宽度和深度	测缝计、位移计、激光扫描仪
	渗漏水位置、面积、水量、水质	红外热像仪、激光扫描仪、流量计
其他监测	锈蚀位置、范围及界面损失率	钢筋锈蚀仪、锈蚀传感器、钢筋探测仪和游标卡尺相结合
	混凝土保护层厚度	钢筋扫描仪、探地雷达

4.2 通用安装标准

4.2.1 传感器安装位置应清洁平整，无角度偏转或应力集中，安装面处理应符合下列规定。

1 当传感器直接固定在结构上时，结构表面应符合下列规定。

1) 对于混凝土结构，应去除距离传感器安装面边缘 30mm~60mm 区域内的粉刷层；

2) 对于钢结构，应去除距离传感器安装面边缘 20mm~50mm 区域内的涂装层和锈迹；

3) 对于木结构和纤维增强复合材料结构，应去除距离传感器安装面边缘 20mm~50mm 区域内的涂装层；

4) 处理完的表面应清洁平整。

2 当传感器通过基座固定在结构上时，基座处理应符合下列规定。

1) 基座边缘尺寸应超出传感器安装面边缘 20mm 且不应大于 50mm；

2) 有整平要求的传感器，基座台面坡度不应大于 1° ；

3) 需要竖直安装的传感器，基座台面倾斜度不应大于 1° 。

4.2.2 传感器的定位应符合下列规定。

1 当采用内部预埋安装方式时，传感器定位应符合下列规定。

1) 传感器的位置偏差不应大于 30mm，当与固有结构冲突时，应经设计或技术负责人确认后调整；

2) 对于可测量方向的传感器，传感器安装方位角偏差不应大于 1° ；

3) 对于有整平要求的传感器，传感器安装倾斜度不应大于 1° ；

2 当采用钻孔埋置安装方式时，传感器安装应符合下列规定。

1) 传感器的位置应严格参照设计图纸，偏差不应大于 10mm；

2) 对于可测量方向的传感器，传感器安装方位角偏差不应大于 1° ；

3) 对于有整平要求的传感器，传感器安装倾斜度不应大于 1° 。

3 当采用外部固定安装方式时，传感器安装应符合下列规定。

1) 传感器的位置偏差不应大于 10mm；

2) 对于可测量方向的传感器，传感器安装方位角偏差不应大于 0.5° ；

3) 对于有整平要求的传感器，传感器安装倾斜度不应大于 0.5° 。

4.2.3 传感器固定应注意对既有结构和传感器自身的保护和安装规范，固定方式应符合下列规定。

1 当采用内部预埋安装方式时，应符合下列规定。

1) 应采取防止施工造成损坏或移位的措施；

2) 当传感器采用试块封装保护时，试块材料应与安装位置处结构材料的强度等级相同。

2 当采用钻孔埋置安装方式时，应符合下列规定。

1) 拟钻孔区域内应确保无钢筋或其他预埋件；

2) 孔洞直径应大于传感器垂直于钻孔方向最大尺寸的 1.5 倍且不应大于 5 倍；

3) 孔洞内的杂物和灰尘应清除干净，埋入后应采用细石混凝土或砂浆填实空隙，养护时间不应少于 7d。

3 当采用胶结固定安装方式时，应符合下列规定。

1) 胶结材料固化前，应采取固定传感器的辅助装置，且固定时间宜多于 1d，当胶结材料固化后，应及时拆除辅助装置；

2) 当采用加热方式加速胶结材料固化时，应确保加热温度处于传感器可承受范围内。

4 当采用焊接固定安装方式时，应符合下列规定。

1) 传感器应避免焊接电流通过；

2) 传感器温度应低于其温度最高限制，焊接过程中应采取降温措施，防止焊接过热导致损坏或性能下降；

3) 焊接过程中，传感器线缆应远离或采用保护措施防止焊渣损坏线缆。

5 当采用螺栓固定安装时，应符合下列规定。

1) 应按传感器的技术要求选择螺栓规格，不应使用塑料膨胀塞或木楔；

2) 螺栓应采用双螺母、开口销、垫片等防松动的措施；

3) 螺栓孔深应根据设计要求及结构允许进行钻孔，如无具体要求，锚固深度不应大于保护层厚度且不应小于 30mm。

- 6 当采用夹具和抱箍固定安装方式时，夹具和抱箍应与传感器连接可靠。
- 7 当采用磁力吸附固定安装方式时，应符合下列规定。

- 1) 传感器应与隧道紧密贴合且无缝隙；
- 2) 传感器应采取防止移位的措施。

- 8 安装过程中不应猛烈敲打、强拉或抛扔传感器。

4.2.4 传感器引出线缆应符合下列规定。

- 1 接线排列应整齐有序，导线应绝缘良好、无损伤。
- 2 当端部有可插接接头时，线缆露出隧道结构表面或保护装置的长度不宜小于 0.5m，接头处应做防水保护措施。
- 3 线缆不宜缠绕和扭绞，硬质线缆最小弯曲半径不宜小于线缆外径的 20 倍且不应小于 100mm，软质线缆最小弯曲半径不宜小于线缆外径的 10 倍且不应小于 50mm。
- 4 线缆端部应具有防尘、防潮和绝缘措施。
- 5 线缆端部在设备接入前应采取临时保护措施，线缆禁止悬吊。
- 6 固定接线的螺栓和螺钉应拧紧，拧紧力矩值应符合技术文件的要求。
- 7 屏蔽线缆接线宜采用锡焊连接、热缩管保护。

4.3 变形、位移监测传感器安装

4.3.1 收敛计的安装应符合下列规定。

- 1 安装收敛计前应先安装锚固点，锚固点钻孔完毕后，应及时用速凝水泥或环氧树脂固定栓锚，待水泥或环氧树脂完全固化后，再进行收敛装置就位调试。
- 2 应根据测量需要确定收敛计的安装深度，并用千分尺等测量工具确保收敛计的安装位置准确。

4.3.2 全站仪的安装应符合下列规定。

- 1 使用前应对全站仪整体性能、安装配件等进行核查，并对安装位置进行筛选、清洁，确保满足长期使用要求。
- 2 强制对中支座安装应选择稳定、无扰动因素的位置，与结构刚性连接。对中支座固定后应检测支座平整度、稳固度，无松动、翘边、晃动，支座中心点位偏差应控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内。
- 3 安装测量机器前，应清理顶面杂物、灰尘、油污，采用水平尺检测支座水平度。

4 测量机器安装应严格对中，与支座完全贴合、无间隙、无偏移。
5 洞内棱镜应采用刚性支座固定，安装位置应保持与测量机器通视良好。
6 测量机器和棱镜安装完成后，应从测量机器处依次对所有棱镜进行通视确认。

7 通视确认后，应通过测量机器对测点逐一进行定位，确保无遗漏。

8 对于灰尘较大的环境，应增加防尘措施，并定期对灰尘进行清理。

4.3.3 激光测距仪安装应符合下列规定。

1 安装前应核查传感器精度及稳定性。

2 传感器及配套安装支座尺寸不应超出限界要求，同时，不应影响其他工序施工。

3 安装支座应与隧道结构刚性连接，安装表面应搭配水平尺，保持水平安装。

4 激光测距仪固定前，应保证水平面不出现偏斜。

5 激光照射路径应无遮挡，照射位置应为光面，不影响激光反射。

6 激光测距仪在支座上的固定位置不应少于 2 处。

7 固定过程中，应注意调整偏斜情况。

8 在风压较大的隧道中，应增加保护罩。

4.3.4 三维激光扫描仪的安装应符合下列规定。

1 扫描仪安装位置应稳定，视场范围内不应存在遮挡物。

2 安装基座应与结构可靠连接，并满足设备水平度要求。

3 扫描仪安装完成后，应进行坐标系校准和扫描范围检查。

4.3.5 静力水准仪的安装应符合下列要求。

1 静力水准仪固定方式宜选择螺栓、抱箍或支座安装，并确保安装固定的稳定性。

2 传感器安装应保持水平或竖直，安装基准点应选在相对稳定的位置。

3 相互串联的传感器的安装高程应处于传感器量程之内，条件允许时，应保持在同一标高。

4 储液罐的液面高度应高于与之串联的所有传感器的高程，最大高差不应超出传感器量程。

5 基准点应选在结构稳定、受环境影响较小的位置，宜优先选择在储液罐旁或其内部。

6 安装过程若需转点，转点位置应选在同一横截面，且具有相同位移规律的结构上。

7 连通管内应保证无气泡。

4.3.6 测斜仪的安装应符合下列要求。

1 测斜管埋设前应检查管材质量，内壁导向槽应无变形、无毛刺；管段连接时上下导槽应对准顺畅，接头及管底应密封处理。

2 测斜孔钻孔孔径、孔深应符合设计要求，钻孔应保持竖直；钻孔完成后应清孔，排除孔底沉渣。

3 测斜管下管时管底应采用盲板封死，底部宜设置配重增加稳定性；应保持测斜管竖直下放，防止上浮、断裂或扭转。

4 测斜管下放至孔底后，应采用水泥砂浆或膨润土浆进行回填固定，回填应密实，灌注速度不宜大于 1m/min，确保测斜管与孔壁土体紧密结合。

5 测斜管管口应高出地面或结构面 100mm~200mm，并加盖保护帽，防止杂物、水进入管内。

6 固定式测斜仪应在测斜管埋设后 24h 内安装，安装时导向轮应嵌入导向槽内，下放应顺畅，各测点位置应与设计深度一致。

4.3.7 分层沉降仪的安装应符合下列要求。

2 沉降管应按管底、管段、管顶盖的顺序逐节连接下放，管段连接应密封，下放过程中应保持竖直，不应扭转。

3 沉降磁环应按设计测点深度依次安装至对应位置，相邻磁环之间应采用洁净粗砂填充捣实，确保磁环与周围土体同步变形。

4 磁环安装时应记录各磁环的实际深度位置，作为沉降计算的基准。

5 沉降管安装完成后，孔口应设置保护装置，防止外物进入管内。

4.3.8 沉降计的安装应符合下列要求。

1 采用钻孔法埋设时，钻孔孔径不应小于 90mm，孔深应达到设计深度。

2 沉降计底端锚头应与首节测杆连接，连接应牢固；下放时应采用防坠绳保护，缓慢放入钻孔内，防止元件自行掉落。

3 测杆应逐节连接延长，接头应涂螺纹胶拧紧；外部保护管应同步接长，护管接头应做密封处理，测杆与护管之间应设置减摩环。

4 沉降计就位后，应采用原土料或细砂分层回填密实，回填过程中应防止沉降计倾斜或移位。

4.3.9 GNSS 安装应符合设计文件要求，当设计无要求时，应符合下列规定。

1 天线 2m 空间范围内应无尺寸大于 20cm 的金属物，周围俯仰角 30°范围

内应无建筑、铁塔等较大的遮挡物。

2 观测墩偏离监测点设计位置的距离应不大于 10cm，观测墩顶面的强制对中器底盘应调整水平，倾斜度应不大于 1° 。

3 固定 GNSS 天线的支架应竖直，角度偏差应不大于 2° 。

4 GNSS 天线应位于避雷针保护范围内，且不应与其他硬件的接地导体连接。

5 GNSS 天线的引下馈线从观测墩外部或支架走线时，其与观测墩或支架的绑扎间距应不大于 0.8m，拐弯两侧应同时绑扎固定。

6 引下馈线不得缠绕、扭绞，且拐弯应圆滑均匀。硬质馈线最小弯曲半径应不小于馈线外径的 20 倍；软馈线最小弯曲半径应不小于馈线外径的 10 倍。

4.3.10 倾角计安装应符合下列规定。

1 倾角计的安装应保证传感器与被测表面保持平行。

2 安装表面应选在坚固稳定、表面平整的位置，传感器或传感器辅助安装支架应与被测表面刚性接触。

3 安装过程应平衡受力，避免机械、工具施工造成安装表面变形。

4 传感器的测量轴在安装时应与被测方向平行。

5 传感器安装后，应设置相对零点或利用传感器本身自动调零系统。

条文说明

倾角计的安装分为水平安装和垂直安装两种方式。

4.3.11 FBG 位移传感器安装应符合下列规定。

1 传感器埋设前应进行标定测试，确认量程、精度及温度补偿性能满足设计要求，并记录初始读数。

2 安装时应保证位移计与测点位移方向同轴，安装支架应牢固可靠，避免振动或施工扰动影响。

3 预埋式位移传感器应采用焊接或专用夹具固定于钢筋笼或预埋件上，安装位置应避开主筋密集区及混凝土振捣盲区，测头应与结构表面齐平或按设计要求预留伸出量。

4 后装式位移传感器应采用钻孔安装，钻孔直径与深度应满足位移计安装要求，孔壁应圆直、平整，孔内应清理干净并按设计要求填充灌浆材料，确保位移传感器与围岩或结构紧密耦合；

5 传感器测杆及线缆应设置保护装置，避免施工碰撞、浆液污染或锈蚀。

6 线缆接头应集中引至集线箱或采集设备处，并采用防水密封处理。

7 位移传感器周边及线缆路径应增设防水、防破坏措施，混凝土浇筑或喷射

作业时应采取遮挡防护，避免浆液污染或振捣损坏。

4.3.12 分布式光纤安装应符合下列规定。

- 1 光纤布设前应进行通光测试，确认光纤损耗、断点等指标满足设计要求，并做好初始衰减记录。
- 2 光纤安装应采用光纤卡、扎带、粘结剂等专用固定件固定于结构表面或钢筋笼上，固定间距宜为 300mm~500mm，光纤应保持自然松弛，避免过度张拉或扭曲。
- 3 内埋式光纤宜随结构浇筑同步布设，可采用绑扎或专用夹具固定于钢筋笼主筋上，浇筑过程中应防止振捣棒直接接触光纤，接头及脆弱部位应增设保护套管。
- 4 表贴式光纤应清理结构表面，采用专用粘结剂均匀粘贴，粘贴段应无气泡、无褶皱，端部应做好防拉拽保护，转角处应设置平滑过渡，弯曲半径不应小于光纤允许值。
- 5 光纤接头应采用熔接方式连接，熔接点应进行热缩管保护及防水密封处理，集中布设时应设置标识牌区分回路。
- 6 光纤走线路径上应每隔 500mm 设置防破坏措施，穿越施工缝、变形缝时应增设柔性保护套管或预留缓冲段，确保光纤不受结构变形影响。

4.3.13 高精度激光位移传感器应符合下列规定。

- 1 应采用刚性安装支架固定，安装距离应在传感器线性量程内，且应避开强热源，避免高温影响传感器性能。
- 2 激光束应尽量垂直照射被测表面，倾斜角度应小于 10°；光斑应落在被测构件的平整中心，避开边缘、台阶、凹槽，防止边缘光干涉误差。
- 3 激光束路径上应无杂物遮挡；靠近墙面安装时，应使光轴与墙面平行，或对墙面进行消光处理，以减少墙面反射光干扰。
- 4 在振动较强的环境中，应在安装基座与结构之间增设隔振装置，避免环境振动导致传感器偏移或测量噪声增大。

4.4 受力监测传感器安装

4.4.1 接触压力传感器安装应符合下列规定。

- 1 二次衬砌为钢筋混凝土结构时，可采用绑扎或焊接的方式将传感器固定在二次衬砌的钢筋上，传感器凸出高度应与保护层厚度一致或略高，传感器受压面应紧贴防水板并均匀接触。

2 二次衬砌为素混凝土结构时，传感器安装有三种方式，不同安装方式应符合下列规定。

1) 可采用机械设备将初期支护表面磨平，在打磨处垫一层无纺布，可采用射钉枪或膨胀螺栓将传感器固定在初期支护表面；

2) 可将初期支护表面锤击平整，并采用水泥砂浆或石膏砂浆抹平，再钻孔固定钢筋并采用绑扎的方式将传感器固定在钢筋上，传感器受压面应紧贴初期支护表面并均匀接触；

3) 可根据传感器尺寸制作环形抱箍，将抱箍稳定固定在初支上，传感器应通过抱箍保护、约束，充分与初支接触。

3 隧道路面为弧形构件时，传感器尺寸应充分考虑构件和管片间空间，同时，考虑构件安装位置整平的质量，保障接触充分、受力均匀。

4 安装过程中，测量线缆应集结成束，并采用保护套管密封防护，线缆端头应做防水处理。

4.4.2 压力盒安装应符合下列规定。

1 接触压力盒在隧道衬砌与围岩之间的安装应采用边界式埋设，承压膜面应朝向被测围岩一侧，背板应埋入衬砌混凝土内；承压膜面应与围岩表面紧密贴合，不应有脱空。

2 安装位置的围岩表面应清理平整，去除浮石、浮土及杂物；局部凹凸处应采用水泥砂浆或细砂找平，找平层应均匀密实，承压膜面水平度偏差不应大于 $\pm 2^\circ$ 。

3 采用预埋模盒法固定时，模盒尺寸应符合设计要求，深度应以承压膜面与围岩表面齐平为准。

4 采用钢筋支架固定时，可将 U 型卡子焊接在平行钢筋上，压力盒置于卡子内，用细铁丝绑扎定位，铁丝两端固定在钢筋上。

5 承压膜面周围应铺设一层厚度约 20mm~30mm 的细砂或细粒土，轻轻压实，起到缓冲和均布应力的作用。

4.4.3 柔性压力计安装应符合下列规定。

1 柔性压力计埋设前应进行气密性与标定测试，确认量程、灵敏度满足设计要求，并记录初始读数。

2 安装过程中，压力计感应面应保持平整，不应受尖锐物穿刺或过度弯折，可采用无纺布或细砂层包裹保护。

3 预埋式压力计应按设计位置固定于模板或钢筋笼上,感应面应与结构受力面平行,周边应采用细骨料混凝土或砂浆包裹,避免骨料直接冲击。

4 后装式压力计应采用专用卡槽或粘结剂固定于结构表面,安装面应清理平整、无浮灰油污,确保与结构紧密贴合。

5 压力计引出线缆应采用柔性保护套管,弯曲半径不应小于规定值,接头处应做防水密封处理,引至集线箱集中保护。

6 压力计周边及线缆路径应增设防挤压、防穿刺措施,混凝土浇筑时应防止振捣棒直接接触,穿越施工缝时应预留松弛段。

4.4.4 土压力传感器安装应符合下列规定。

1 土压力传感器应根据隧道结构形式、地质条件等选择不同工作原理的设备,对于岩层或碎石成分较高时,应优先选择液压式传感器。

2 衬砌或管片预埋土压力传感器时,应保证浇筑后受压面与管片外表面平齐,可通过增加垫板或其他结构调整传感器安装高度,保证充分接触。

3 土压力传感器可采用焊接的方式固定在钢筋笼上或垫板上,焊接过程应注意降温,焊接后应测试成活效果。

4 安装过程中,线缆应背向浇筑方向与钢筋绑扎牢固,且应处于无紧绷或冗余的自然状态,转弯位置宜采用倒角过渡,线缆端头应做防水处理。

4.4.5 渗压计安装应符合下列规定。

1 渗压计埋设前应将透水石在清水中浸泡饱和,并排除透水石中的气泡。

2 渗压计安装过程中,透水石不应被封堵,可采用外置砂盒、饱和细砂袋或纱布包裹等方式保护透水探头,透水探头应朝向围岩。

3 预埋式渗压计应采用绑扎或焊接的方式安装在钢筋笼上,底部宜焊接辅助钢筋固定位置,探头应露出衬砌表面或与之平齐。

4 后装式渗压计应采用洞内钻孔埋设法,钻孔位置宜为隧道墙脚位置,钻孔深度宜略大于衬砌厚度,钻孔应圆直、平整。应在孔底填细砂并埋设渗压计,采用注浆封孔,砂浆终凝后填筑混凝土保证隧道结构强度。

5 线缆应集结成束,引至集线箱进行保护,并采取防水、防潮措施。

6 渗压计环向四周应增加防水措施。走线路径上每 500mm 长度应增加遇水膨胀材料,且走线过程应适当增加线缆长度,保障足够的渗水路径,减小渗水风险。

4.4.6 水压力计安装应符合本标准 4.4.5 规定。

4.4.7 光纤光栅应变传感器安装应符合下列规定。

1 光纤光栅式应变传感器安装方向应与设计测量方向一致,传感器敏感方向与结构应变方向的偏差应满足设计要求。

2 采用粘贴方式安装时,结构表面处理、胶结材料选择及固化过程应满足产品技术要求,保证传感器与结构之间应变传递可靠。

3 采用焊接或夹持方式安装时,应避免安装过程产生的热量、冲击和变形影响传感器性能。

4 光纤露出混凝土的光缆长度不应小于 1m,引出过程中不应受到过度拉伸、挤压或弯折,光纤弯曲半径应满足产品技术要求。

5 光纤接续及封装完成后,应检查光谱响应特征,并记录初始中心波长值。

6 对采用温度补偿方式的光纤光栅式应变传感器,应同步安装温度补偿元件或采用有效补偿措施。

4.4.8 振弦式应变传感器安装应符合下列规定。

1 振弦式应变传感器安装方向应与设计测量方向一致,并应避免安装过程中对传感器产生附加应力。

2 采用预埋方式安装时,应采取措施防止混凝土浇筑、振捣过程中传感器发生移位、碰撞或损坏。

3 采用表面安装方式时,传感器与结构之间应连接可靠,固定方式应满足长期稳定监测要求。

4 传感器安装过程中,不应应对振弦施加超过允许范围的拉伸、压缩或冲击作用。

5 多支振弦式应变传感器同时安装时,应统一测点编号,并记录传感器型号、安装位置、初始频率及安装时间。

6 安装完成后,应读取传感器初始频率值,并检查采集设备数据读取是否正常。

4.4.9 电阻应变传感器安装应符合下列规定。

1 电阻应变传感器安装方向应与结构主应变方向一致,安装位置应满足设计要求。

2 采用粘贴式安装时,应保证敏感栅与结构表面充分贴合,粘贴层应均匀连续,不应存在气泡、脱胶等影响应变传递的缺陷。

3 采用焊接式安装时,应采取措施减少焊接热影响,避免高温导致传感器性能降低。

4 传感器引出导线应固定可靠,避免导线摆动、振动或自身变形对测量结果产生影响。

5 安装完成后，应检测传感器电阻值、绝缘性能，并记录初始应变值。

4.4.10 钢筋计安装应符合下列规定。

1 采用对焊方式安装钢筋计时，钢筋计直径与材质应与主筋相同，且宜与主筋焊接在同一轴线上。应根据钢筋计长度截取一段主筋，并将钢筋计替换到相应位置，再焊接固定。钢筋为弧形时，其曲率半径应大于 2m，并应保证钢筋计中间的钢套部分不弯曲。

2 焊接过程中，应在焊接部位和钢筋计中心区放置湿抹布或在钢筋计中间部位浇水，防止线圈骨架和防护环氧树脂融化。

3 光纤光栅式钢筋计安装应防止焊接高温熔化光纤。

4 对于截取主筋会影响隧道结构安全的结构，可采用底座焊接的方式在钢筋计两侧安装底座，在主筋表面直接焊接固定。焊接过程中应进行降温处理。

5 焊接降温后，应立即进行传感器状态检测，损坏的传感器应立即更换。

4.4.11 螺栓轴力计分为垫圈式和嵌入式，安装固定应符合下列规定。

1 垫圈式螺栓轴力计两端应设置钢垫圈，并与防水橡胶垫圈黏结牢固，螺栓轴力计厚度及直径应根据手孔位置确定，不宜超出手孔范围。

2 垫圈式螺栓轴力计的安装螺栓应采用定制加长螺栓，不应影响螺栓预埋端锚固长度。

3 嵌入式螺栓轴力计应采用螺栓开槽的方式安装，开槽尺寸不应影响螺栓受力特性，开槽尺寸宜为 2mm，深度宜为 4mm，长度不宜超出光杆部分。

4 感知元件应通过在螺栓顶端螺帽上开孔引出，孔口尺寸不应影响结构完整，且应采用结构耐久胶密封，防止漏水。

5 螺栓轴力计紧固过程，不应超出轴力计量程范围，必要时，采用人力紧固。

6 垫圈式螺栓轴力计紧固过程中，出线口宜朝向隧道结构外侧，满足接线及检修要求。

7 螺栓不适宜加长和开槽时，可采用应变片监测，应变片应采用粘贴的方式成对固定在螺杆螺纹上方光滑表面。安装位置应先打磨，并采用结构耐久胶固定、密封。

4.5 病害特征监测传感器安装

4.5.1 表面测缝计安装应符合下列规定。

1 安装过程中，禁止大幅度旋转伸缩杆，宜与定位槽保持在同一轴线。

2 传感器安装前，宜将伸缩杆拉伸至满量程的 1/2，保证其伸缩空间。

3 传感器安装固定宜采用焊接、灌浆锚头、膨胀螺栓等方式，锚头或螺栓固定深度不宜低于 30mm。

4 安装过程中，传感器轴线应与所测裂缝垂直，并与裂缝所在平面平行。

4.5.2 内埋式测缝计安装应符合下列规定。

1 传感器结构形式应为顶针式结构。

2 传感器固定后，浇筑前，测杆应处于压缩状态，压缩长度应充分考虑接缝间距，保证拼装后测杆仍有伸缩余量。

3 传感器测杆浇筑前应采取措施防止混凝土进入。

4 安装位置应考虑结构间防水橡胶、榫卯结构等障碍物，确保传感器与相邻结构主体接触。

4.5.3 位移计安装应符合下列规定。

1 位移计安装前应进行行程与精度校验，确认无卡滞、变形，并记录初始读数。

2 安装时应保证位移计与测点位移方向同轴，安装支架应牢固可靠，避免振动或施工扰动影响。

3 预埋式位移计锚头应埋入稳定围岩或结构内，锚固体长度与注浆材料应满足设计锚固力要求。

4 后装式位移计应采用钻孔安装，钻孔深度、孔径应满足锚头安装要求，孔内应清理干净并按设计注浆。

5 位移计测杆及线缆应设置保护装置，避免施工碰撞、浆液污染或锈蚀，接头应做好防水防潮处理。

6 安装完成后应进行复测，确认位移计初始状态正常，周边应设置警示标识，防止人为或机械破坏。

4.5.4 裂缝探测仪安装应符合下列规定。

1 检测前应清理裂缝及周边混凝土表面的浮浆、油污，裂缝内不应有积水、泥浆；被测表面应平整、清洁。

2 应将仪器两端的万向节、球形铰等连接部件与两侧基座连接，并确保连接处能自由偏转。

3 应根据当前裂缝的初始宽度，调整仪器伸缩杆的长度，使其大致等于两基座间距，并预拉至量程的中间位置。

4 在最终拧紧连接螺丝前，必须确保仪器和万向节处于完全自由、无弯曲、无拉伸或压缩的“松弛”状态，消除安装应力。

4.5.5 红外热成像仪安装应符合下列规定。

- 1 设备布设前应检查镜头、电池及存储设备状态，确认设备精度、分辨率满足监测要求。
- 2 安装位置应避开强光直射、高温热源及水汽干扰，监测视角应覆盖全部目标区域，无遮挡物。
- 3 固定式热成像仪应采用专用支架固定，安装高度、角度应符合设计要求，支架应牢固、防振。
- 4 设备安装面应平整稳固，当设备处于露天环境或存在机械碰撞风险时，应设置遮阳、防雨及防砸保护罩，避免环境因素影响监测结果。
- 5 线缆应采用防水、防紫外线保护套管，电源及信号接头应做防水密封处理，引至安全区域。
- 6 设备周边应设置防护栏或警示标识，定期检查镜头清洁度与设备运行状态，避免人为或施工破坏。

4.5.6 流量计安装应符合下列规定。

- 1 流量计安装前应进行外观与性能检查，确认型号、量程、精度满足设计要求。
- 2 安装位置应满足上下游直管段长度要求，避免弯头、阀门等管件干扰流场，介质流向应与设备标识一致。
- 3 安装过程中应保证流量计轴线与管道轴线同轴，法兰连接应密封良好无渗漏，避免应力集中。
- 4 流量计应安装在方便检修、无强烈振动、无强电磁干扰的位置；当流量计自重较大、管道支撑能力不足或运行过程中存在振动影响时，应设置固定支架。
- 5 线缆应采用屏蔽电缆，做好接地与防水处理，信号接头应密封可靠，引至采集设备。
- 6 安装完成后应进行通水、通气测试，确认设备运行正常，周边设置防护措施，防止碰撞与污染。

4.6 环境监测传感器安装

4.6.1 水位计的安装应符合下列规定。

- 1 水位计安装前应进行零点标定与精度校验，确认量程、分辨率满足监测要求。
- 2 安装位置应避开漩涡、回流及水流冲击区，水位计探头应垂直安装，感应

面朝向水面。

3 投入式水位计应采用专用支架或浮筒固定，探头应置于最低水位以下，避免杂物缠绕或淤积影响。

4 接触式水位计安装时应保证电极与水体接触良好，电极间无短路；当安装环境存在机械碰撞、杂物影响或水流扰动风险时，应设置防护套管。

5 线缆应采用防水防腐电缆，接头应做防水密封处理，引至集线箱或采集设备，避免浸泡或磨损。

6 水位计周边应设置防冲刷、防淤积及防漂浮物撞击措施，定期清理探头附着物。

4.6.2 温湿度传感器安装应符合下列规定。

1 温度传感器不应受到阳光的直接照射。

2 湿度传感器不应安装在空气不流通的结构或保护装置内的死角处，安装时宜加装透气防尘罩。

3 混凝土内部预埋温度传感器应符合下列规定。

1) 应将温度传感器与钢筋牢固绑扎，监测点位置远离结构钢筋时，宜采用直径不小于 $\phi 6$ 的钢筋作为定位辅助钢筋；

2) 混凝土浇筑过程中应避免防止振动棒直接接触温度传感器。

4 混凝土钻孔中安装温度传感器应符合下列规定。

1) 钻孔前应确认钻孔深度范围内无预应力钢筋；

2) 钻孔方向应与设计孔位方向一致，钻孔深度不应小于设计深度，钻孔直径与设计偏差应小于 3mm；

3) 达到钻孔深度后，应将孔内残留物清理干净；

4) 沿孔深方向宜采用钢筋等辅助工具进行温度传感器的定位；

5) 传感器安装到位后应采用细石混凝土或砂浆将钻孔填塞密实。

5 结构表面安装温度传感器应符合下列规定。

1) 在混凝土表面安装时，传感器的敏感元件应紧贴混凝土表面，并应采用细石混凝土或砂浆等材料将温度传感器完全包裹；

2) 在钢结构表面安装时，应除去钢结构表面的防腐层，使传感器的敏感元件紧贴钢结构表面，并应采用绝热材料隔绝传感器与外界环境之间的热交换。

4.6.3 应根据有害气体成分选用适宜的气体探测仪进行瓦斯及有害气体监测，并应符合下列规定。

1 安装固定式气体探测仪时，探头可采用隧道内表面安装或抱管安装方式，安装应牢固可靠，并便于维护、标定。安装时应将传感器朝下固定，拧紧锁紧螺母，探头盖应完全盖好并拧紧螺钉。探头布线应采用三芯屏蔽电缆，屏蔽层应确保接地。

2 采用便携式气体探测仪时，探头不应接触油、水等液体或直冲大量气体，探头调零后应靠近测区并缓慢移动探头进行探测，探头不应接触结构。

3 采用复合式气体探测仪监测时，应选择有单独开关各个传感器功能的仪器。

4 为保证探头的灵敏度，应定期检查、清理探头。

4.6.4 测振仪安装应符合下列规定。

1 拾振器灵敏度主轴方向应保持铅垂，测试过程中不应产生倾斜和附加振动。

2 拾振器应平稳放置在平坦、坚实的地面或结构面上，不应置于松软、不平整或不坚实的表面；安装基面应清洁，去除油污、浮浆及疏松层。

3 应采用螺钉刚性安装或胶粘安装，传感器底座应与安装基面完全贴合、无间隙；采用胶粘时粘贴层应薄而均匀，固化期间不得扰动。

4 安装于隧道侧壁或拱顶等部位时，应采用专用支架或膨胀螺栓固定，固定应牢固，传感器与被测结构之间应形成刚性连接。

4.6.5 振动加速度传感器安装应符合下列规定。

1 基座安装应符合下列规定。

1) 安装基座应与被测构件牢固连成一体；

2) 基座的尺寸应符合设计规定，当设计无规定时，基座边缘与最近传感器边缘的距离不应小于 20mm；

3) 水平安装振动加速度传感器时，基座的安装面应水平，传感器几何中心轴线应在水平面上；

4) 竖向安装振动加速度传感器时，基座的安装面应竖直，传感器几何中心轴线应垂直于水平面。

2 传感器的安装应符合下列规定。

1) 安装前应在安装基座和传感器的安装面分别满涂环氧树脂，再按设计规定方式安装；

- 2) 应确认传感器敏感轴方向和设计方向一致后固定传感器;
- 3) 传感器完全固定后宜安装保护罩, 保护罩不应与传感器相接触;
- 4) 测试方向与设计方向的角度偏差不应大于 1° ;
- 5) 加速度传感器不应采用单螺栓固定;
- 6) 加速度传感器外壳与接地体之间的阻抗不应大于 1Ω 。

4.6.6 频率计应符合下列规定。

- 1 安装位置应远离大功率无线电设备、变压器、变频器等强电磁干扰源, 与干扰源距离不应小于 1m ; 不应与大功率设备共用同一电源插座。
- 2 频率计接地柱应可靠接地, 接地电阻应符合现行相关标准的规定。

4.7 其他监测传感器安装

4.7.1 钢筋锈蚀仪安装应符合下列规定。

- 1 作业前应进行设备标定, 确认电极、参比电极状态正常, 精度满足检测要求。
- 2 作业面应清理至混凝土基层, 去除浮浆、油污及碳化层, 露出新鲜混凝土面。
- 3 电极应与混凝土表面保持良好接触, 宜采用湿海绵等导电介质降低接触电阻。
- 4 测点应按设计网格布置, 间距均匀, 避开钢筋密集区及缺陷部位, 必要时加密测点。
- 5 安装过程中应记录环境温度、湿度及混凝土含水率, 修正环境因素对检测结果的影响。
- 6 安装完成后应清洁电极, 存放于干燥环境, 定期进行电极维护与设备校准, 保证检测精度。

4.7.2 锈蚀传感器的安装应符合下列规定。

- 1 传感器埋设前应进行性能测试, 确认灵敏度、稳定性满足设计要求, 并记录初始电位与电流。
- 2 预埋式传感器应按设计位置绑扎或焊接于钢筋上, 与被测钢筋保持良好电连接, 避免与其他金属构件接触。
- 3 传感器安装位置应避开钢筋接头、保护层薄弱区及施工缝; 当传感器或引

出线在混凝土浇筑、振捣过程中存在受损风险时，应设置保护套管。

4 传感器线缆应采用防腐、防水电缆，接头应做密封处理，引至集线箱，避免浸泡或腐蚀。

5 混凝土浇筑时应防止振捣棒直接接触传感器，传感器周边混凝土应振捣密实，无蜂窝孔洞。

6 安装完成后应进行功能测试，确认传感器工作正常，线缆路径应设置防破坏措施，定期检查运行状态。

4.7.3 钢筋检测仪的安装应符合下列规定。

1 作业前应对设备进行开机自检与标定校准，确认设备工况、检测精度满足现场检测要求。

2 结构表面应清理干净，剔除浮浆、油污、积水及凸起杂物，清除检测区域周边临时金属构件、带电线缆等干扰源。

3 探头应平稳贴合混凝土表面，保持水平无倾斜，匀速缓慢移动，不应跳跃、悬空或反复摩擦磕碰构件表面。

4 应严格按照设计及规范要求布设检测网格与测点，重点区域应适当加密测点，准确测定钢筋位置、保护层厚度、钢筋间距等参数。

5 检测完成后应及时在构件表面标记钢筋分布位置，同步做好数据记录，避免后续施工对检测区域造成破坏。

4.7.4 钢筋扫描仪安装应符合下列规定。

1 被测结构表面应平整、清洁，去除浮浆、油污及附着物；探头应与被测表面紧密贴合，不应悬空或倾斜。

2 检测钢筋位置时，探头应垂直或平行于构件轴线方向匀速移动，移动速度应均匀，不应过快或骤停。

3 需固定连续监测时，应采用专用支架固定探头，支架应与结构表面牢靠连接，探头位置应与被测钢筋对应；固定安装的设备防护等级应满足隧道洞内环境要求。

4.7.5 探地雷达安装应符合下列规定。

1 安装前应清理检测作业面，保证表面平整干燥，无碎石、积水、金属杂物，作业区域应远离高压设备、大型机械等强电磁干扰源。

2 应根据探测深度、结构尺寸及检测精度要求，匹配对应频率天线，完成设备整机调试、校准，确认设备运行稳定。

3 检测天线应紧贴构件表面，无悬空、无偏移。应严格按预设测线匀速推进，

测线间距、布设范围应符合设计要求，关键部位应增设交叉测线复核。

4 安装完成后应及时清洁天线设备，做好防尘防潮防护，整理留存原始探测数据。

4.7.6 超声波检测仪安装应符合下列规定。

1 被测表面应平整、清洁，换能器与被测面之间应涂抹耦合剂，耦合应良好，不应存在空气间隙。

2 采用超声回弹综合法时，应在同一测区内先进行回弹测试，后进行超声测试。

4.7.7 钻芯机应符合下列规定。

1 钻芯机就位并安放平稳后，应将钻机固定，固定方式可根据现场条件采用膨胀螺栓、顶杆支撑、配重或真空吸附等方法，确保工作时不产生位置偏移。

2 钻机立轴中心、天轮中心与孔口中心应在同一铅垂线上；应调整地脚螺丝使钻机水平，钻头应垂直于混凝土表面。

3 设备安装后应进行试运转，确认运转正常、冷却水路畅通后方可开钻；钻进初始阶段应对钻机立轴进行校正，及时纠正偏差。

5 采集及供电传输设备安装

5.1 一般规定

5.1.1 采集设备宜具备数据自动采集、状态监测和异常识别功能；具备条件时，可采用边缘计算、智能采集等技术，提高数据采集效率和可靠性。

5.1.2 采集箱规格应根据内置设备数量、尺寸、布置方式、现场安装条件等因素确定。

5.1.3 采集箱内部宜配备温湿度监测装置，并根据设备运行环境设置温控措施或安置于有温控设备的场所，避免高温、潮湿环境对设备运行产生不利影响。

5.1.4 采集箱安装场所应符合设计文件及相关标准要求，应具有良好的通风、防尘条件。

5.1.5 采集箱安装应稳固，并采取可靠的接地措施。

5.1.6 采集箱内线缆敷设应整齐有序，强电、弱电线缆应分开布设。

5.1.7 设备绝缘电阻、安全接地电阻、防雷接地电阻等应符合现行工程验收相

关规范要求。

5.1.8 设备布设应严格按照设计图纸执行，布局应规整合理，并符合现行《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》GB 50150、《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》GB 50169 及其他现行相关标准的规定。

5.1.9 设备安装完毕后应进行系统调试，确认各硬件、软件工作正常。

5.2 采集设备安装

5.2.1 落地式采集箱安装应符合下列规定。

- 1 采集箱应及时固定，避免倾倒造成人员伤亡和设备损坏。
- 2 应及时紧固采集箱上的固定螺丝、垫片和弹簧垫圈等。
- 3 有抗震要求时，应按设计要求对采集箱固定装置进行抗震加固。

5.2.2 壁挂式采集箱安装应符合下列规定。

- 1 采集箱距离地面不应小于 300mm，采集箱门应垂直于地面开启。
- 2 采集箱与隧道或安装基座的固定点不应少于 4 个。

5.2.3 采集箱固定后应安装采集箱内的设备和部件，设备、部件应与采集箱牢固固定。

5.2.4 采集箱内部分配架、配线架和支架的排列应整齐合理，强电和弱电应分别在采集箱内部两侧走线且应采用扎带将线缆理顺扎好，挂贴标签。

5.2.5 线缆安装完毕后，应采用防火胶泥封堵采集箱的进出线缆孔洞，并做好防水和防潮处理。

5.2.6 采集箱门应配置门锁，门锁应具有防盗功能。

5.2.7 采集箱内设备与机柜应连接牢固，无漏连、虚连现象，铆钉或锚固螺母应排列整齐，无歪头、裂头及松动，铆接面无下凹、变形或破损。

5.2.8 采集设备内置的嵌入式采集软件应符合设计文件要求，安装完成后应完成采集通道映射、采样频率、通信传输协议、数据上传地址及断点续传策略等参数配置。

5.3 设备接入

5.3.1 传感器接入自动化采集设备时，穿线口应采用防水密封措施，线缆宜从

采集设备底部引入采集箱内。

条文说明

设备接入为传感器引线或延长线接入自动化采集设备。

5.3.2 振弦式和数字式传感器线缆均应使用四芯屏蔽线缆，线芯颜色及接入要求应严格遵循说明书要求，准确区分信号线、温度线及电源线。

5.3.3 光纤光栅类传感器接入应采用跳线形式插入采集通道内，跳线接口应与光纤光栅解调仪相匹配。

5.3.4 传感器接入前，应明确通信线缆对应的传感器类型、编号等信息；串联式连接时，应明确线路中传感器数量、编号、识别码等信息。

5.3.5 传感器接入后，应及时利用配套采集软件或调试软件进行数据采集测试，确保数据可正常采集及上传。

5.3.6 所有传感器接入后，应采用配线架或配线槽梳理剩余线缆，通信线缆绑扎应规整有序。

5.4 通信传输设备安装

5.4.1 应根据现场网络结构形式、采集设备类型，合理选择交换机、光端机、串口服务器、收发器等通信元器件进行网络系统组建。

5.4.2 长大隧道结构监测系统宜采用光纤网络进行数据传输。采用振弦式采集仪、数字式采集仪等设备进行数据传输时，应通过通信转换设备实现监测数据与通信传输协议的转换，并接入光纤传输网络。

条文说明

振弦式采集仪、数字式采集仪等设备不具备光信号输出能力，在进行数据传输时，主要利用串口服务器（DTU）实现与 TCP/IP 网络接口的数据双向传输，再利用光端机或具备光电转换的交换机将信号转换为光信号，再接入光纤网络。

5.4.3 光纤光栅解调仪输出的光信号宜直接接入光纤传输网络。

5.4.4 相邻采集箱宜共用一个光纤接口，应通过光纤收发器将输出信号汇集在光纤接口处，再接入光纤传输网络。

5.4.5 主通信光缆应先接入光纤终端盒，与终端盒内预留的跳线接头进行熔接后再接入采集箱。

5.4.6 光纤终端盒规格应根据主通信光缆线芯数量及实际需求确定，终端盒接口类型应根据光纤跳线接头类型进行选择。

5.4.7 数据传输网络拓扑结构应根据监测规模、设备分布情况、通信距离及网络稳定性等因素综合确定，可采用总线型、星形、环形或树形等组网方式。

条文说明

考虑到网络稳定性、传输质量及实施性等因素，建议优先选择环形方式进行网络组建。

5.4.8 数据传输网络使用的光缆应根据传输距离、敷设方式及环境条件合理选型。传输距离较长的隧道应优先选择单模铠装光缆。

条文说明

单模铠装光缆传输距离可达 50~100 公里。

5.4.9 通信传输设备配套的固件及协议转换软件应符合设计要求，应完成网络参数、通信传输协议、数据加密策略等配置，保障数据传输链路稳定、安全。

5.5 供电设备安装

5.5.1 供电设备的型号规格、技术参数应符合设计文件及相关标准规定，设备进场前应检验产品合格证、性能检测报告及技术说明书，资料齐全、外观完好方可安装。

5.5.2 现场电源箱、配电箱安装应符合下列规定。

1 箱体安装应牢固可靠，壁挂式安装距地高度宜为 1.2m~1.5m；落地式安装应设置混凝土或型钢基础底座不应小于 100mm。

2 隧道洞内安装的箱体防护等级不应低于 IP65，应具备防尘、防潮、防凝露功能。

3 箱内元器件排布应规整，强电回路与弱电回路应分侧布设；接线端子应压接牢固，标识清晰准确。

5.5.3 不间断电源（UPS）安装应符合下列规定。

1 设备应平稳固定于基础或机柜内，周边应预留不少于 0.5m 的操作空间，安装位置应避开潮湿、积水、高温及强电磁干扰区域。

2 蓄电池组安装应固定可靠，组间间距应满足散热要求，应设置防短路、防电解液渗漏措施。

3 安装完成后应进行断电切换测试，切换时间、持续供电时长及输出电压稳定性应满足设计要求。

5.5.4 防雷与接地装置的施工应符合现行国家标准《建筑物电子信息系统防雷技术规范》GB50343 的规定，并应符合下列规定。

1 防雷保护器的安装及接线应牢固、可靠，多个防雷保护器的安装位置及顺序应符合设计文件和产品说明书的要求。

2 当隧道有接地装置时，宜将监测系统的接地体与结构接地体焊接牢固，并应采取防腐措施。

3 当隧道无接地装置时，监测系统的接地体埋设位置和深度应符合设计文件要求。

4 接地电阻值无法满足设计文件要求时，应采取物理或化学降阻措施。

5 接地线直径应符合规范及设计文件要求，不应有机械损伤，接头处应设有防松动装置

6 接地端子应设置在方便操作的位置，并做明显标记。

5.6 综合布线

5.6.1 预埋传感器线缆敷设应符合下列规定。

1 屏蔽线缆宜选择带屏蔽线的四芯线缆。

2 光纤宜选择铠装光纤，无铠装保护的光纤应采用保护管保护敷设。

3 光纤排布过程不应硬性弯折，弯曲半径应不小于 40mm，剩余光纤宜采用圆形盘绕。

4 线缆敷设固定宜采用扎带，若采用绑丝等硬性材质，应严格控制紧固程度，并冗余适当长度线缆。

5 线缆固定间距不宜大于 20cm，遇辅筋、箍筋等，应在两侧采用扎带固定。

6 线缆敷设遇直角转弯时，应采用倒角过渡。

7 结构内预埋多支传感器时，多支传感器线缆宜汇总后进行固定，汇总的线缆数量不宜过多，且不宜产生堆叠。

8 线缆沿钢筋固定时，应固定在钢筋内侧，宜背向浇筑方向和外部围岩，减少浇筑冲击和外部环境磨损。

9 线缆应汇总在藏线盒内，进线口内外应增加防水胶密封。

10 藏线盒位置不应影响隧道结构本身其他结构正常施工；对于管片结构，藏线盒位置应错开注浆孔且不应影响吸盘操作。

11 藏线盒尺寸应满足结构预埋传感器线缆数量、预留长度等。

12 屏蔽线缆预留长度不少于 20cm，光纤预留长度不少于 1m。

5.6.2 采集箱内线缆敷设应符合下列规定。

1 采集箱进线孔应一孔一线，进线口应加设防水垫圈，满足设计防护等级要求。

2 采集箱内线缆长度应满足设备接线和维护要求，不宜留有过长余量，确保能接入采集模块即可；当接入线缆数量较多或箱内布线空间不足时，应增设配线架。

3 线缆端部应配有标识标牌，标牌应清晰记录传感器类型、编号、安装位置等信息。

4 线缆接入采集模块后，应立即进行测试，保证所有线缆均能正常进行数据采集。

5.6.3 供电及通信传输线缆敷设应符合下列规定。

1 线缆规格、型号及敷设路径应符合设计要求，线缆外观应无破损、龟裂、老化现象。

2 供电线缆与数据信号线缆应分槽、分桥架敷设；受条件限制同桥架敷设时，应采取金属隔板物理隔离措施。

3 线缆接头应采用压接或焊接方式，接头处应做绝缘防护及防水密封处理；线缆穿墙、穿结构缝处应采用防火封堵材料密实封堵。

4 供电线缆两端应设置清晰的永久性标识，标明回路编号、电压等级及起止位置。

5.6.4 线缆集成敷设应符合下列规定。

1 线缆集成过程应减少接头，并做好接头防水保护措施。

2 线缆集成全过程应采用线槽、保护管等措施，监测断面周围表面安装传感器应通过保护管引接至主线槽内。

3 主线槽敷设路线应尽可能覆盖所有藏线盒，减少预埋传感器线缆接入线槽长度。

4 线槽沿结构表面固定时，应采用膨胀螺栓固定，锚固深度应符合设计要求，若无具体要求，锚固深度不应低于保护层厚度。

5 线缆延长时，光纤熔接应满足熔接损耗要求，且热缩管、保护钢管应满足保护要求。

6 线缆中继接头应按设计要求制作，无虚焊。同轴线缆连接应采用专用接头。

7 线缆不应敷设在有腐蚀性物质排放、强磁场和强电场干扰的区域。当无法避免时，应采取防护或屏蔽措施。

8 电源线、信号线接头应放置在暗线箱或接线盒内。接头宜采用压接，当采用焊接时应采用无腐蚀性的助焊剂。

9 线缆垂直铺设于桥架内时，其顶部和每隔 1.5m 处宜与桥架固定。线缆水平铺设于桥架内时，每隔 3~5m 处宜与桥架固定。

10 线缆在进入桥架前，宜采用软波纹管进行保护。

征求意见稿

6 监测数据管理平台

6.1 一般规定

6.1.1 监测数据的采集、存储、处理、分析与信息反馈宜通过监测数据管理平台统一实施，实现数据集中管理、共享应用与智能化分析。

6.1.2 数据采集过程中应与历史数据进行对比，发现异常数据时，应连续不少于3次复采确认后，方可开始记录。数据记录应准确、完整、可追溯。

6.1.3 数据采集频率应根据监测目的、结构状况和设计文件要求确定，并满足预警和数据分析需求。

6.1.4 数据处理应按照设备检定、校准文件及技术参数进行换算，处理结果的单位应与符合国家现行计量单位规定。

6.1.5 原始数据应采用电子存档或纸质文件与电子存档相结合的方式，并建立数据备份和追溯机制。

6.2 数据采集

6.2.1 数据采集模式应根据隧道结构特点、传感器类型、测点数量及布设位置确定，可采用一体化采集、集中式采集或基于边缘网关的汇聚化采集方式。

6.2.2 数据采集与传输系统应具备自动采集和远程传输功能，并可通过配套软件对采集传输的关键参数进行远程配置和调整。

6.2.3 振弦式、数字式、差阻式传感器的数据采集应采用相匹配的自动化采集设备，光纤光栅式传感器的数据采集应采用光纤光栅解调设备。

6.2.4 施工期宜采用便携式采集仪、解调仪进行人工数据采集，数据采集前应检查设备状态，并保证设备功能正常。

6.2.5 运营期宜采用自动化采集仪、自动化光纤光栅解调仪进行连续或定时采集。

6.2.6 监测数据采集方式应根据监测目的和结构状态变化特点确定，可采用连续采集、触发采集、定时采集或即时采集等方式，采集频率应满足实时报警和数据应用要求。

6.2.7 关键节点的数据采集应作为后续数据的初始值，采集过程应准确、完

整。

6.2.8 隧道结构监测主要数据采集节点应符合下列规定。

1 预埋式传感器主要数据采集节点应符合下列规定。

- 1) 安装前应采集现场环境数据；
- 2) 设备绑扎或焊接在钢筋笼后，应确认设备成活状态并采集当前数据；
- 3) 水养完成后或衬砌施作前应进行数据采集，采集后藏线盒内应重新密封；
- 4) 衬砌施作后宜立即进行数据采集；若不允许，应在条件允许时，第一时间进行数据采集。

2 表面安装传感器主要数据采集节点应符合下列规定。

- 1) 安装前应测试设备状态，并采集现场环境数据；
- 2) 安装后应采集初始值。

6.3 数据处理

6.3.1 原始数据预处理应包括数据完整性检查、异常值识别、缺失值插补和噪声过滤等内容。

6.3.2 原始数据初始取值应根据监测项目、监测部位及传感器工作原理确定，并能准确反映结构或构件实际受力、变形状态。

6.3.3 各类监测项目初始值选取应符合表 6.3.3 的规定。

表 6.3.3 初始值取值标准

序号	类型	监测项目	初始值取值	备注
1	变形、位移 监测	接缝张开	安装后第一次测值	
2		纵向沉降		
3		倾斜		
4		净空收敛		
5	受力监测	接触压力	养护后拼装前测值或拼装 后即时测值	管片间、初支与 二衬间
6		土压力		
7		水压力		

8		结构应力应变	拼装后第一次测值	混凝土应变
9		钢筋应力	拼装后第一次测值	
10		螺栓轴力计	现场环境下，安装前测值	
11	环境监测	振动加速度	无初始值，当前显示即为结果值	
12		温湿度		
13		气体浓度		

6.3.4 原始数据采集后，应根据设备标定证书进行相应物理量换算。常规换算公式应符合下列规定。

1 振弦式传感器换算应按式（6.3.5-1）计算。

$$P=G(R_1-R_0)+K(T_1-T_0) \quad (6.3.5-1)$$

式中：

G—系数；

R₁—当前测值；

R₀—初始测值；

K—温度系数；

T₁—当前温度测值；

T₀—初始温度测值。

2 光纤光栅传感器换算应按式（6.3.5-2）计算。

$$F=K[(\lambda_1-\lambda_0)-G(\lambda_{t1}-\lambda_{t0})] \quad (6.3.5-2)$$

式中：

K—钢筋测力计拉力系数；

λ₁—应变光栅当前的波长值(nm)；

λ₀—应变光栅初始的波长值(nm)；

G—温补系数；

λ_{t1}—温补光栅当前波长值(nm)；

λ_{t0}—温补光栅初始波长值(nm)。

6.3.5 原始数据换算为相关物理量后，应进行本次变化量、累计变化量和变化速率计算。

1 本次变化量应为本次测值与上次测值的差值，应按式（6.3.6-1）计算。

$$\Delta_i = D_i - D_{i-1} \quad (6.3.6-1)$$

式中：

Δ_i—本次变化量；

D_i—第*i*次监测物理量；

D_{i-1} —第 $i-1$ 次监测物理量。

2 累计变化量应为本次测值与初始值的差值，应按式（6.3.6-2）计算。

$$\Delta = D_i - D_0 \quad (6.3.6-2)$$

其中：

Δ —累计变化量；

D_i —第 i 次实测值；

D_0 —初始值。

3 变化速率应为对应变化量与时间间隔间的比值。

6.4 数据分析

6.4.1 数据分析宜采用对比分析和综合分析方法。对比分析应与各监测项目控制标准值进行对比，综合分析应综合不同监测项目的特点制定专项分析方案。

6.4.2 监测项目控制标准应根据现行有关标准、设计文件及建设单位确认文件确定。

6.4.3 监测数据超出控制标准后，应进行数据核定，核定方式应符合下列规定。

1 应对异常数据出现位置进行人工或机器人现场巡查，确认是否出现病害或其他反映。

2 应对异常数据出现位置的传感器进行状态排查，确认是否有人人员触碰、机械碰撞、仪器松动等情况。

3 若确定为设备失稳或破坏，应重新更换设备进行监测。

6.4.4 数据分析内容应包括轴力及弯矩计算、相关性分析、关联性分析等，并应符合下列规定。

1 轴力及弯矩计算应综合应力应变数据，推算管片内力。应力应变应按式（6.4.4-1）和式（6.4.4-2）计算。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (6.4.4-1)$$

$$\sigma = \frac{M}{I} \times \frac{h}{2} + \frac{N}{A} \quad (6.4.4-2)$$

式中：

ε —应变；

σ —应力，MPa；

E —弹性模量，MPa；

M—截面弯矩，kN·m；

I—截面惯性矩，m⁴；

h—截面中性轴到截面任意一点的位置；

N—截面轴力，kN；

A—截面面积，m²。

2 相关性分析应分析监测数据与温度补偿间的相关性，确定温度补偿对监测数据的影响程度。相关性分析应按式（6.4.4-3）计算。

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (6.4.4-3)$$

判断标准如下：

$|r| > 0.95$ ，显著性相关

$|r| \geq 0.8$ ，高度相关

$0.5 \leq |r| < 0.8$ ，中度相关

$0.3 \leq |r| < 0.5$ ，低度相关

$|r| < 0.3$ ，弱相关

3 关联性分析应通过计算不同测项、不同点位上监测数据之间的关联度，分析各测项、各测点的数据变化趋势是否一致。关联性分析应按式（6.4.4-4）、式（6.4.4-5）计算。

$$\xi_k = \frac{\Delta(\min) + \rho \Delta(\max)}{\Delta_k(t) + \rho \Delta(\max)} \quad (6.4.4-4)$$

$$r_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_k(t) \quad (6.4.4-5)$$

其中： r_k 为关联度，越接近1，表明两条数据的关联程度越高，变化趋势相似。 ρ 为分辨系数， $0 < \rho < 1$ 。

6.5 信息反馈

6.5.1 施工期隧道结构监测应根据工程阶段和管理要求提交监测日报、周报、月报及总结报告等监测成果资料。当监测数据异常或发生重要施工节点时，应根据实际情况增加报告提交频次。

6.5.2 运营期隧道结构监测信息宜通过监测数据管理平台进行数据查看、状态展示、信息推送和预警管理。

6.5.3 监测报告应对当前监测成果、结构安全状态有明确的结论，并对下一阶段工作有明确的建议；监测报告提交前应经过现场审核并签字确认。

6.5.4 监测报告内容应包括工程概况、监测项目汇总、监测点布置图、监测成

果表、监测时程变化曲线、监测数据分析说明、现场巡视等。监测成果表宜包括阶段测值、累计测值、变形差异、变形速率、数据预警判断结论等内容。

6.5.5 监测报告、监测方案及其他与外部单位流转资料提交后,应由接收人员进行签字确认。签收表内应明确记录资料类型、提交日期、签字等内容。

6.5.6 应根据设计要求、结构状态和监测数据分析结果设置异常报警阈值。当监测数据达到或超过报警阈值时,应及时进行数据复核并同步报警。

征求意见稿

7 测试与试运行

7.1 一般规定

7.1.1 公路隧道结构监测系统测试及试运行应覆盖现场监测传感器、数据采集设备、供电及通信传输设备、监测数据管理平台及相关辅助措施。

7.1.2 系统测试应在现场施工完成、设备安装调试完毕、供电及通信传输链路通畅的条件下进行。

7.1.3 测试全过程应形成测试记录、调试台账、影像资料及问题整改记录，并确保资料真实、完整、可追溯。

7.1.4 系统试运行周期不应少于 3 个月，并应满足设计文件及现行有关标准的规定。试运行期间应保持系统不间断运行，非维护、检修或故障处理需要，禁止随意断电、停机或改动系统参数。

7.1.5 测试及试运行中发现软硬件缺陷、数据异常、通信故障等问题时，应建立问题整改台账，明确整改措施、整改期限和复查核验要求，所有问题闭环后方可完成验收。

7.1.6 现场硬件测试及试运行应遵守隧道施工现场安全管理规定，做好用电安全、高空作业防护。监测软件测试及试运行应做好数据安全防护，严禁违规篡改监测数据。

7.1.7 采用智能感知、智能采集或智能分析技术的监测系统，应开展相关功能测试，验证设备状态识别、数据质量检查、异常识别和智能分析功能。

7.2 硬件测试

7.2.1 监测传感器测试应包含安装质量检查、性能测试和数据有效性验证。应检查传感器安装位置、固定状态及外观质量，测试传感器灵敏度及采集精度，并校验采集数据的真实性和有效性。

7.2.2 采集设备测试应对采集仪、网关及信号转换装置的硬件性能及内置软件功能进行调试，验证数据采集、转换、存储和传输稳定性，并检查数据丢失、延迟、乱码等异常问题。

7.2.3 供电及通信传输设备测试应检测供电系统续航、稳压能力，测试网络通信带宽、连通性、抗干扰能力，并验证断网、断电情况下的应急保障功能和恢复

能力。

7.3 软件测试

7.3.1 监测软件测试应以监测数据管理平台为核心，并应覆盖采集传输类软件、配套工具软件的功能、性能与安全性测试。

7.3.2 监测软件测试中的单元测试、集成测试，配置项测试和系统测试等应符合现行国家标准《计算机软件测试规范》GB/T 15532 的规定。

7.3.3 监测数据管理平台基础功能测试应覆盖账号权限管理、界面展示、数据查询、设备管理、日志记录等功能模块，验证系统操作流畅性与功能完整性。

7.3.4 数据处理功能测试应核验前端数据接入、存储、数据计算和分析能力，验证数据曲线生成、可视化展示、历史数据调取等功能，并校验分析结果准确性。

7.3.5 预警功能测试应通过模拟异常监测数据，验证预警阈值设置、分级预警、信息推送、预警记录和预警解除等功能。

7.3.6 设备管理功能测试应核验管理平台对现场监测设备的管控能力，平台应能实时、准确展示传感器、采集设备、供电及通信传输设备等前端设备的在线/离线状态、工作电压、信号强度等运行参数。

7.3.7 性能安全测试应开展平台稳定性测试，排查系统安全漏洞，检测数据加密、权限隔离等安全防护措施的防护能力。

7.4 联调联试

7.4.1 系统联调联试应在现场设备安装完成、测试合格、通信链路正常的基础上进行，应验证监测系统各组成部分之间的数据交互、功能联动及运行稳定性。

7.4.2 系统供电调试应符合下列规定。

1 应检查供电设备运行状态、输出电压稳定性、备用电源切换功能及接地保护措施。

2 电源设备的带电部分与金属外壳之间的绝缘电阻应满足产品设计要求，当设计无要求时，用 500V 兆欧表测量时应不小于 5MΩ。

3 不间断电源应进行自动切换性能试验，切换时间和切换电压值应符合设计文件的规定。

7.4.3 系统通信传输调试应符合下列规定。

- 1 应验证通信链路连通性、通信协议配置及网络参数设置。
- 2 应验证监测数据传输的完整性、实时性和稳定性。
- 3 应测试通信异常情况下的数据缓存、自动恢复及重新传输功能。
- 4 采用无线通信方式时，应测试通信信号强度和抗干扰能力。

7.4.4 系统数据采集调试应符合下列规定。

- 1 各传感器采集参数设置应满足设计要求。
- 2 应针对不同采集策略验证传感器响应数据的准确性。
- 3 单个传感器数据采集的响应时间应满足设计和产品技术文件要求。

7.4.5 系统数据管理调试应符合下列规定。

- 1 传感器编号、设备编号与监测数据应在数据库中正确关联。
- 2 数据存储精度不应低于传感器测量精度。
- 3 数据单位、格式和时间标识应符合设计要求。
- 4 各传感器的测量数据不应超过传感器测量范围。
- 5 数据异常识别、缺失数据处理等功能应运行正常。

7.4.6 系统联合调试以功能调试为主，调试应覆盖监测系统下列功能。

- 1 自动化及人工数据采集、传输和存储功能。
- 2 数据查询、显示、回放及统计分析功能。
- 3 监测阈值设置、系统预警报警和信息推送功能。
- 4 结构安全状态评估与辅助分析功能。
- 5 设计文件规定的其他功能。

7.4.7 传感器及其他设备应进行时间同步，系统时钟月最大计时误差不应大于 5s。

7.4.8 对于可采用参考计量仪器进行验证的监测参量，应采用人工测量方式进行复验，系统实测数据与同时、同条件人工测量数据偏差应符合表 7.4.8 的规定。

表 7.4.8 传感器验证允许偏差

类别	温度	湿度	应变	挠度	固有基频
允许最大偏差	0.5℃	5%	3 $\mu\epsilon$	1mm	0.2Hz

注：表中允许误差可为正、负误差。

7.4.9 同一监测断面处，人工定期观测结果应与监测系统监测结果的变化趋

势相吻合。

7.5 系统试运行

7.5.1 系统联调联试合格后方可进行系统试运行。系统试运行周期应符合设计文件规定，当无相关规定时，试运行期不应少于 3 个月。

7.5.2 应编制系统试运行方案，明确试运行周期、值守人员配置及巡查制度，对前端设备与平台运行状态开展巡查。

7.5.3 试运行过程中应记录设备故障、数据异常、平台功能缺陷、网络波动等各类运行问题，并及时建立问题整改台账。

7.5.4 试运行期间监测系统的可靠性应符合下列规定。

- 1 系统设备每月平均无故障工作时间不应低于每月总时长的 95%。
- 2 系统自动采集数据每日的数据完整率不应低于 95%。

7.5.5 试运行期间监测系统的稳定性应符合下列规定。

- 1 当隧道结构受力、周边环境情况基本不变时，监测静态参数的传感器在一分钟内连续采集数据的变动幅值应小于设计规定值。
- 2 自动监测点与人工测试点相同或邻近的条件下，系统自动采集数据应与对应时段内人工测试数据的规律一致。
- 3 监测数据应具有较好的周期性、与环境的相关性，不应出现明显的系统性偏移。

7.5.6 试运行期间，应根据监测数据质量和系统运行情况优化预警阈值、算法参数及系统配置，并对软硬件缺陷等问题实施整改。

7.5.7 应汇总试运行期间的运行数据与整改资料，编制试运行总结报告，评估系统整体可靠性、稳定性，满足设计要求后方可投入正式运行。

8 质量验收

8.1 一般规定

8.1.1 监测系统在完成硬件安装、软件部署和系统联调联试后应进行交工验收；监测系统试运行结束后，应进行竣工验收。

8.1.2 监测系统质量验收应包含系统硬件验收和软件验收。

8.1.3 监测系统质量验收宜划分为单位工程、分部工程和分项工程，验收工程的划分应符合表 8.1.3 的规定，并宜符合下列规定。

1 监测系统与新建结构同期建设时，宜按专项工程进行分部工程和分项工程划分。

2 监测系统在已运营隧道结构上单独建设时，每个独立合同宜划分为一个单位工程。

表 8.1.3 监测系统单位、分部、分项工程划分

单位工程	分部工程	分项工程
公路隧道结构监测系统	传感器安装	变形、位移监测传感器安装
		受力监测传感器安装
		病害特征监测传感器安装
		环境监测传感器安装
	设备安装	采集设备安装
		通信传输设备安装
		供电设备安装
	综合布线	桥架与线管安装
		线缆铺设
	系统软件	软件部署
		数据管理平台配置
	系统测试与试运行	硬件测试
		软件测试
		系统联调联试
		试运行

8.2 硬件验收

8.2.1 传感器质量验收宜按本标准附录 A 表 A.0.1 的要求进行记录与汇总，并应符合下列规定。

- 1 传感器初始值测定记录、安装记录和调试记录应完整。
- 2 传感器的安装位置应准确、牢固，引出线缆的保护措施应符合安装技术要求，外观应无明显破损、变形及锈蚀。
- 3 设备信息标识应载明传感器类型、型号、编号及对应采集设备的编号和通道号，标识应齐全、牢固、清晰。
- 4 预埋或无法更换的传感器应全数检验。
- 5 表面粘贴且可更换的传感器，每类抽检比例不应低于 30%且不应少于 1 个，抽检合格率应达到 100%。

8.2.2 采集设备实施质量验收宜按本标准附录 A 表 A.0.2 的规定进行记录与汇总，并应符合下列规定。

- 1 采集设备安装应牢固可靠，具备散热、防尘、防潮、防水等防护措施。
- 2 采集设备安装对结构产生的影响应已恢复，设备外部应设置信息完整准确的固定标识。
- 3 每类采集设备抽检比例不应低于 30%，且不应少于 1 台，抽检合格率应达到 100%。
- 4 采集设备应能正常工作，输出数据格式应符合产品说明书及相关标准的规定。
- 5 设备箱外观应无明显破损、变形和锈蚀；箱内设备安装及线缆排布应规整，插头牢固，出线孔处应具有可靠的密封措施。

8.2.3 供电及通信传输设备实施质量验收应符合下列规定。

- 1 电源箱、配电箱规格型号、防护等级及安装方式应符合设计要求，外观无破损、变形及锈蚀，箱内元器件应齐全、固定牢固。
- 2 供电线缆敷设应规整，标识清晰，绝缘电阻及接地电阻应符合现行相关标准的规定。
- 3 通信传输设备安装应牢固可靠，洞内安装设备的防护等级应符合设计要求，外观应无破损、变形；设备金属外壳应可靠接地。
- 4 通信线缆的规格型号、敷设路径及方式应符合设计要求，光纤熔接损耗应符合现行相关标准规定。
- 5 光纤终端盒、配线架等配套设施安装应规整，接口标识应清晰准确，跳线

布设应整齐有序。

6 通信传输设备及链路标识应齐全耐久，应标明设备编号、类型、所属链路及对应采集箱等信息。

8.2.4 综合布线工程实施质量验收应按本标准附录 A 表 A.0.3 的规定进行记录与汇总，并应符合下列规定。

- 1 线缆、防护管槽的规格型号、材质及安装方式应符合设计文件的要求。
- 2 线缆及防护管槽外观应无明显破损、变形和锈蚀现象，线缆终端接线处及经过伸缩缝处应预留有足够的冗余度。
- 3 电缆和数据信号线应分隔敷设，同一桥架内的强弱电缆应采取隔离措施。
- 4 线缆和数据传输设备的功能应正常，数据传输应稳定可靠，响应延迟时间应满足设计要求。
- 5 所有线缆和数据传输设备均应进行连通性检验，抽检合格率应达到 100%。
- 6 综合布线工程对结构产生的影响应已恢复，线缆接头处应设有清晰的信息标识。

8.3 软件验收

8.3.1 监测数据管理平台验收应进行功能完整性、一致性和安全性检验，并应符合下列规定。

- 1 平台应具备监测数据接入、传输、存储、处理、分析与管理功能。
- 2 平台应支持监测测点、设备编号、监测参数等基础信息管理功能，且应与现场设备信息一致。
- 3 平台应具备数据查询、统计分析、趋势分析和报表生成等功能。
- 4 平台应具备异常识别、预警报警和信息推送功能。
- 5 平台用户权限管理、请求响应速度、数据刷新率、数据备份及安全防护功能等应满足设计文件要求。

8.3.2 软件运行性能验收应符合下列规定。

- 1 监测系统软件功能应符合设计文件的规定。
- 2 监测数据采集、传输和存储过程应保持一致，数据时间标识应准确。
- 3 监测数据应具有连续性和合理性。
- 4 监测数据采集、传输、与存储的同步性应符合设计文件的规定，设计无相关规定时，动态采集的同步时差应小于 10ms，静态采集的同步时差应小于 30ms。

8.3.3 监测系统试运行情况验收宜按本标准附录 A 表 A.0.4 的规定进行记录。

征求意见稿

附录A 监测系统验收记录表

A. 0. 1 监测传感器安装验收宜按表 A. 0. 1 的规定进行记录。

表 A.0.1 监测传感器安装验收记录表

工程名称： 传感器类型： 施工单位： 监理单位：

序号	检查项目	是否满足要求	问题描述
1	编号	☐ 是 ☐ 否	
2	型号	☐ 是 ☐ 否	
3	外观	☐ 是 ☐ 否	
4	安装要求	☐ 是 ☐ 否	
5	性能	☐ 是 ☐ 否	
6	标识牌	☐ 是 ☐ 否	
7	安装信息档案	☐ 是 ☐ 否	
⋮	⋮	☐ 是 ☐ 否	

验收负责人： 验收人： 记录人： 复核人： 年 月 日

A. 0. 2 采集站和监控中心设备安装验收宜按表 A. 0. 2 的规定进行记录。

表 A.0.2 采集设备安装验收记录表

工程名称： 施工单位： 监理单位：

序号	验收对象	检查项目	是否满足要求	问题描述
1	采集箱	编号	☐ 是 ☐ 否	
		型号	☐ 是 ☐ 否	
		数量	☐ 是 ☐ 否	
		外观	☐ 是 ☐ 否	
		安装要求	☐ 是 ☐ 否	
		性能	☐ 是 ☐ 否	
		标识牌	☐ 是 ☐ 否	
		安装信息档案	☐ 是 ☐ 否	
...		...	☐ 是 ☐ 否	

验收负责人： 验收人： 记录人： 复核人： 年 月 日

A.0.3 综合布线分类验收宜按表 A.0.3 的规定进行记录。

表 A.0.3 综合布线分类验收记录表

工程名称： 施工单位： 监理单位：

序号	线缆类型	安装数量 (个)	抽检数量 (个)	抽检合格率 (%)	问题描述
1	类型 1				
2	类型 2				
	...				

验收负责人： 汇总人： 复核人： 年 月 日

A.0.4 监测系统试运行情况验收宜按表 A.0.4 的规定进行记录。

表 A.0.4 监测系统试运行验收记录表

工程名称： 施工单位： 监理单位：

检查项目 类型	检查项目	要求	是否满足要求	问题描述
试运行时长	起：____年__月__日__时 __分止：____年__月__日 __时__分	≥3 个月	☐ 是 ☐ 否	
功能和性能	功能完整性	满足要求	☐ 是 ☐ 否	
	系统稳定性	≥95%	☐ 是 ☐ 否	
	数据完整率	≥95%	☐ 是 ☐ 否	
	数据同步性	静态<30ms 动态<10ms	☐ 是 ☐ 否	

验收负责人： 验收人： 记录人： 复核人： 年 月 日

本标准用词用语说明

1 本标准执行严格程度的用词，采用下列写法：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词，正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

1) 在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本标准的规定外，尚应符合国家、行业和中国工程建设标准化协会标准现行有关标准的规定”；

2) 在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《×××××》（×××）的有关规定”；

3) 当引用本标准中的其他规定时，表述为“应符合本标准第×章的有关规定”、“应符合本标准第×.×节的有关规定”、“应符合本标准第×.×.×条的有关规定”或“应按第×.×.×条的有关规定执行”。