



# 团 体 标 准

T/CUPTA 021—2023

## 城市地面基础设施群运行健康状态评估 及突发事件应急处置技术指南

Technical guideline for operational health condition assessment of  
urban ground infrastructure cluster and contingency plan

2023-11-27 发布

2023-11-27 实施

中国城市公共交通协会 发 布  
中 国 标 准 出 版 社 出 版

中国标准出版社

目 次

前言 ..... III

引言 ..... IV

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语、定义和符号..... 2

    3.1 术语和定义 ..... 2

    3.2 符号 ..... 3

4 基本规定 ..... 4

    4.1 一般规定 ..... 4

    4.2 监测系统 ..... 5

    4.3 传感器布置 ..... 6

5 监测内容和方法 ..... 6

    5.1 温湿度监测 ..... 6

    5.2 风荷载监测 ..... 6

    5.3 地震荷载监测 ..... 7

    5.4 交通荷载监测 ..... 7

    5.5 变形监测 ..... 7

    5.6 振动监测 ..... 8

    5.7 应变监测 ..... 8

    5.8 拉索索力监测 ..... 8

    5.9 腐蚀监测 ..... 8

6 监测系统的设计、验收和管理维护..... 9

    6.1 传感器系统模块 ..... 9

    6.2 数据采集与传输模块 ..... 9

    6.3 数据存储与管理模块 ..... 10

    6.4 数据分析与结构安全评估模块 ..... 11

    6.5 结构安全预警与预警信息发布模块 ..... 12

    6.6 可视化系统模块 ..... 12

    6.7 监测系统的验收 ..... 13

    6.8 监测系统的管理与维护 ..... 13

7 城市地面基础设施群的监测预警和安全评估..... 14

    7.1 建筑基础设施监测 ..... 14

    7.2 桥梁基础设施监测 ..... 15

7.3 隧道和道路基础设施监测 ..... 17

7.4 输电塔基础设施监测 ..... 17

7.5 预警阈值设置和预警方式 ..... 18

7.6 结构安全评估 ..... 21

8 地面基础设施突发事故应急处置 ..... 23

8.1 地面基础设施突发事故 ..... 23

8.2 事故报告和紧急措施 ..... 23

8.3 应急处置内容 ..... 23

8.4 事故调查与总结 ..... 24

附录 A（规范性） 硬件设备技术要求 ..... 25

附录 B（规范性） 基础设施监测内容和采样频率要求 ..... 29

附录 C（规范性） 不同结构类型的建筑和桥梁基础设施监测项目要求 ..... 30

附录 D（规范性） 基础设施监测参考阈值及预警等级 ..... 31

附录 E（资料性） 安全事故报告表和特殊事件应急管理处置措施 ..... 39

参考文献 ..... 41

## 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。

本文件由中国城市公共交通协会提出并归口。

本文件起草单位：深圳防灾减灾技术研究院、深圳市城市交通规划设计研究中心股份有限公司、深圳大学、西南交通大学、香港理工大学、同济大学、深圳市建筑科学研究院股份有限公司。

本文件主要起草人：林健富、林涛、王立新、王俊芳、黄剑涛、任伟新、徐幼麟、倪一清、董优、郭礼豪、张颖、贾磊、刘军香、胡荣攀、赵贤任、何少林、陈林、黄洪葳、汪四新、田超跃、安茹、张超东、朱青、郑越、王幼明、林思健、汪羽凡、廖峰、覃金庆。

中国标准出版社

## 引 言

城市地面基础设施群是城市基本功能的重要载体,由自然灾害和意外事件导致的城市地面基础设施群的破坏和功能丧失是影响城市正常运转的关键因素。本文件是面向城市地面基础设施群运行健康状态评估及突发事件应急处置的技术指南。本文件的编制目标是提升城市地面基础设施群的综合防灾减灾抗灾能力,为相关行业领域的专家和政府管理部门提供综合有效的技术指引。

本文件适用对象为城市地面基础设施群,是指在特定空间区域范围内、由空间组织紧凑、运行环境特征相似、相互作用的多种地面基础设施构成的联合体,包括房屋建筑、桥梁、隧道、道路和输电塔。本文件应用的技术领域为结构健康监测、安全预警与评估、防灾减灾以及应急处置领域。

中国标准出版社

# 城市地面基础设施群运行健康状态评估 及突发事件应急处置技术指南

## 1 范围

本文件规定了城市地面基础设施群的监测内容和方法、监测系统的设计、验收和管理维护、监测预警和安全评估、突发事件应急处置的技术要求。

本文件适用于城市地面基础设施群,包括房屋建筑、桥梁、隧道、道路和输电塔的运行健康状态评估及突发事件应急处置管理。

## 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 1589 汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值
- GB/T 21296(所有部分) 动态公路车辆自动衡器
- GB/T 31167 信息安全技术 云计算服务安全指南
- GB/T 31168 信息安全技术 云计算服务安全能力要求
- GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范
- GB 50009—2012 建筑结构荷载规范
- GB 50011—2010 建筑抗震设计规范(附条文说明)(2016 年版)
- GB 50300 建筑工程施工质量验收统一标准
- GB 50868—2013 建筑工程容许振动标准
- GB 50911—2013 城市轨道交通工程监测技术规范
- GB 50982—2014 建筑与桥梁结构监测技术规范
- CECS 333—2012 结构健康监测系统设计标准
- JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程
- JJF 1918 电容式加速度传感器校准规范
- JJG 036 钢弦式锚索测力计
- JT/T 1037—2022 公路桥梁结构监测技术规范
- JTG/T 2231-01—2020 公路桥梁抗震设计规范
- JTG/T 3360-01 公路桥梁抗风设计规范
- JTG 3363—2019 公路桥涵地基与基础设计规范
- JTG 5142 公路沥青路面养护技术规范
- JTJ 073.1 公路水泥混凝土路面养护技术规范
- T/CECS 529—2018 大跨桥梁结构健康监测系统预警阈值设置标准
- T/CECS 652—2019 结构健康监测系统运行维护与管理标准

### 3 术语、定义和符号

#### 3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

##### 3.1.1

**城市地面基础设施群 urban ground infrastructure cluster**

在特定空间区域范围内,由空间组织紧凑、运行环境特征相似、相互作用的多种地面基础设施构成的联合体。

注:包括房屋建筑、桥梁、隧道、道路和输电塔。

##### 3.1.2

**基础设施健康监测系统 infrastructure health monitoring system**

由安装在基础设施上的传感器以及数据采集与传输、数据处理与管理等硬件和软件构成的综合系统,对基础设施的荷载、结构性能参数和运行环境因素进行数据测量、采集、处理和分析,实现结构运行状态与安全水平的预警与评估。

##### 3.1.3

**传感器 transducer/sensor**

能将被测物理量按照一定规律转换成可用信号的器件或装置。

注:通常由敏感元件和转换元件组成。

##### 3.1.4

**传感器优化布置 optimal sensor placement**

通过调整传感器布设位置,使传感器网络测量信息在一个或者多个维度上达到最优的过程。

##### 3.1.5

**荷载 load**

使结构或构件产生内力和变形的力。

示例:风荷载、地震荷载和交通荷载等。

##### 3.1.6

**结构整体响应 global structural response**

在荷载作用下结构整体的反应。

示例:振动、位移、变形和转角等。

##### 3.1.7

**结构局部响应 local structural response**

在荷载作用下结构构件局部的反应。

示例:应变、裂缝、腐蚀、拉索索力、支座反力等。

##### 3.1.8

**损伤识别 damage detection**

利用结构响应数据来分析结构物理参数的变化,进而识别结构损伤的过程。

##### 3.1.9

**模态分析 modal analysis**

通过分析测量得到的结构动力响应数据,获得结构模态参数的过程。

##### 3.1.10

**模态参数 modal parameters**

结构的固有振动特性,包括固有频率、阻尼比和模态振型。

注:模态参数可分为实模态和复模态。



## 3.1.11

**模型修正 model updating**

通过识别或修正分析模型中的参数,使模型计算分析结果与实际量测值尽可能接近的过程。

## 3.1.12

**耐久性 durability**

结构抵抗自身材料老化和自然环境双重因素长期破坏作用的能力。

## 3.1.13

**运行健康状态评估 operational health condition assessment**

基础设施建成和进入运行阶段后,对反映结构运行健康状态的各项指标进行分析并评价结构运行健康状态的过程。

## 3.1.14

**安全评估 safety assessment**

通过各种结构安全监测数据,分析结构当前的工作状态,并与其临界失效状态进行比较,评价其安全等级。

## 3.1.15

**预警 early warning**

在危险发生之前,根据结构监测、损伤诊断和安全评定结果,向相关部门发出报警信息的过程。

## 3.1.16

**预警阈值 early warning threshold**

为保证工程结构安全或周边环境安全,对表征监测对象可能发生异常或危险状态的监测量所设定的警戒值。

## 3.1.17

**应急处置 contingency plan**

突发事件发生后,为了尽快控制和减少事件造成危害而采取的应急措施。

## 3.1.18

**维护 maintenance**

为保持结构应有的性能而进行的例行检查修复活动。

## 3.1.19

**数字孪生 digital twin**

城市地面基础设施群数字孪生包括物理实体的数字孪生体、物理实体数据收集及融合、物理实体与数字孪生体的互动协作、数字孪生体提供评估和预测功能四个基本要素。

## 3.2 符号

下列符号适用于本文件。

$d$  —— 变形量

$d_{\max}$  —— 桥梁抗震设计的支座水平剪切变形和竖向压缩变形最大值

$F$  —— 支座反力

$F_{\max}$  —— 支座反力设计最大值

$h$  —— 楼层层高

$Pd_{\text{RMS}}$  —— 每小时桥墩位移有效值

$R_{\text{Acc}}$  —— 每分钟加速度均方根值

$R_{\text{Acc}}^*$  —— 扣除风致振动后的每分钟加速度均方根值

$T$  —— 绝对索力

|               |                           |
|---------------|---------------------------|
| $T_{\max}$    | ——索力设计最大值                 |
| $T_m$         | ——慢变索力                    |
| $T_h$         | ——标准温度下的恒载索力              |
| $T_h^*$       | ——标准温度下的设计恒载索力            |
| $\Delta u_e$  | ——多遇地震作用标准值产生的楼层内最大弹性层间位移 |
| $\Delta u_p$  | ——弹塑性层间位移                 |
| $u_R$         | ——每分钟加速度均值                |
| $u_R^*$       | ——扣除风致振动后的每分钟加速度均值        |
| $[\theta_e]$  | ——弹性层间位移角限值               |
| $[\theta_p]$  | ——弹塑性层间位移角限值              |
| $\mu_{Pd}$    | ——每小时桥墩位移均值               |
| $\sigma_{Pd}$ | ——每小时桥墩位移标准差              |
| $\sigma_R$    | ——每分钟加速度标准差               |
| $\sigma_R^*$  | ——扣除风致振动后的每分钟加速度标准差       |

## 4 基本规定

### 4.1 一般规定

4.1.1 基础设施结构健康监测方案编制前,应收集分析相关资料,根据各方的监测要求与设计文件明确监测目的,结合工程结构特点、现场及周边环境条件等因素,以保障基础设施群长期运营的安全性、可持续性、耐久性和韧性为基本原则,制定实用合理的监测方案。

4.1.2 根据监测项目及现场情况对结构的整体或局部关键部位建立监测系统,并宜对硬件系统状态进行远程监控。

4.1.3 针对超限高层或结构复杂建筑、大跨或结构复杂桥梁、长大隧道以及场地环境特殊或结构特殊的基础设施的结构健康监测符合下列规定:

- 应对超限高层建筑工程进行监测,包括高度超限工程、规则性超限工程和屋盖超限工程;
- 应对抗震设防烈度为7度、8度、9度时高度分别超过160 m、120 m、80 m或大跨屋盖建筑或抗震设防烈度7度Ⅲ类、Ⅳ类场地上高度超过120 m的大型公共建筑进行监测;
- 应对主跨跨径大于160 m的梁桥、200 m的拱桥、300 m的斜拉桥、500 m的悬索桥和处于抗震设防烈度为7度、8度、9度场地或复杂环境或结构特殊的其他桥梁结构进行监测。

4.1.4 监测期间,应对监测设备、采集设备、监测系统进行日常管理与维护。

4.1.5 城市地面基础设施群宜通过物联网、云平台/云计算、4G/5G无线数据传输等信息技术,将基础设施群的多元感知信息紧密关联起来。

**【条文说明】**多元感知信息是指在城市地面基础上通过安装不同种类的传感器对多种与结构健康或安全相关的物理参数进行监测而获得的数据。

4.1.6 城市地面基础设施群运行健康状态评估宜基于大数据分析和人工智能算法进行多层级评估,先对个体层级的各类基础设施进行健康状态评估,再将个体层级的评估信息进行汇聚和融合,实施网络集群层级的基础设施健康状态评估。

4.1.7 城市地面基础设施群健康监测系统设计宜考虑设施群空间位置,对于空间位置相邻或所受荷载情况相似的基础设施结构,可共享其相关监测数据,提高基础设施群健康监测系统的监测与结构评估费比。

4.1.8 地面基础设施群宜采用仿真技术进行灾害情景构建模拟仿真分析,预测和评估不同灾害情景下

设施群的易损性和可能的灾损情况。

【条文说明】地面基础设施群在城市或区域层面上是一个相互联系和相互影响的整体,可考虑结合基础设施群的简化有限元模型、灾害情景构建模拟仿真技术和超算技术,进行极端灾害作用下设施群整体运行健康状态评估,实现设施群地震、台风/强风和火灾等极端灾害发生、演化过程的推演分析,评估不同灾害情景下设施群的易损性和可能灾损情况,筛选出风险抵御能力薄弱和需要进行结构安全检测或监测的基础设施。

4.1.9 城市地面基础设施群的智慧化安全运维,可考虑建立基础设施群结构健康数字孪生系统,通过结合基础设施群检/监测技术和数值模拟技术,将实体基础设施映射到数字模型形成基础设施群数字孪生体,再采用基于实际检/监测数据更新的数字孪生体对基础设施群的性能进行评估和预测,实现基础设施群全生命周期的智慧化安全运维,符合下列规定:

- a) 城市地面基础设施群结构健康数字孪生系统应根据智能运维的目标来确定物理对象和数值模型交互映射的关键元素以及确定感测这些关键元素的传感器类型、位置和数量;
- b) 城市地面在基础设施群结构健康数字孪生系统中,检测数据和监测数据相互关联和相互补充,宜将结构健康检/监测系统采集到的信息进行数据融合,并按信息重构和扩展理论映射到数值模型中,实现基础设施群运行健康状态的综合评估,结构性能演化趋势预测,并提供及时的预警信息。

## 4.2 监测系统

4.2.1 基础设施健康监测系统宜包含数据实时采集与传输模块、数据储存与管理模块、数据分析与结构安全评估模块、结构安全预警与预警信息发布模块、系统可视化模块五大基本功能模块。

4.2.2 数据实时采集与传输模块由采集设备、传输设备及软件组成,应能实现多种传感器数据的同步采集与传输功能,并可进行采集参数调整,数据采集与传输的软硬件选型应满足监测要求。

4.2.3 数据储存与管理模块由数据库、数据管理软件和硬件组成,应能实现对基础设施群监测系统各类信息的储存和管理功能。宜采用云平台动态资源配置的方式。采用云服务技术的监测系统应符合 GB/T 31167 和 GB/T 31168 的相关规定。

【条文说明】本文件面向的城市地面基础设施群地理位置分散,监测数据量大且会动态增加,宜采用云平台动态资源配置的方式,CPU、内存和硬盘容量可根据工程实际需求动态调整。

4.2.4 数据分析与结构安全评估模块,宜满足下列要求:

- a) 数据分析内容宜包括频谱分析、最值、平均值、峰峰值、有效值等指标统计;
- b) 结构安全评估宜内嵌自动分析和实时诊断算法,评估过程无需人工干预,即可实现自动化和高效率的结构状态评估。

4.2.5 结构安全预警与预警信息发布模块应根据安全预警阈值进行预警,将实时监测数据或计算的指标与阈值进行对比,应对阈值超限情况进行报警。预警信息可根据需要,通过邮件和手机短信等多种形式自动推送给管理人员。

4.2.6 系统可视化模块应满足下列功能:

- a) 提供基于 C/S 或 B/S 架构用户友好的系统可视化界面;
- b) 实现远程维护、结构信息管理、传感器管理;
- c) 实时数据可视化展示、实时数据后台自动分析和结果存储、历史数据调用及分析;
- d) 结构安全状态评估与预警信息管理发布。

【条文说明】C/S 架构又称 Client/Server 或客户/服务器模式。服务器通常采用高性能的 PC、工作站或小型机并安装数据库软件,如 ORACLE、SQL Server、SYBASE 或 InfORMix,而且客户端需要安装专用的客户端软件。B/S 架构又称 Browser/Server 或浏览器/服务器模式。Web 浏览器是客户端最主要的应用软件。客户机上只要安装一个浏览器,如 Netscape Navigator 或 Internet Explorer,服务器安装

Oracle、SQL Server、MYSQL 等数据库,浏览器通过 Web Server 同数据库进行数据交互。

### 4.3 传感器布置

基础设施传感器的安装布置位置满足下列原则:

- a) 传感器的种类、位置和数量应根据基础设施运行健康状态评估和监测预警的需求确定;
- b) 根据结构类型和控制断面关键参数的监控要求,可采用结构的有限元模型进行静力和动力分析以确定不同种类传感器的安装位置,结构振动测点位置宜根据结构的主要振型合理布设,风速仪等特殊类型的传感器可依其测量特点进行布置;
- c) 测点布设应能反映监测对象的环境、荷载、结构响应和结构变化等特征,反映监测对象的实际服役状态及其变化趋势;
- d) 结构响应和结构变化监测的测点宜布置在受力较大、变形较大、易损、影响主要部件安全耐久和结构整体安全的位置,以及已有病害和损伤的位置;
- e) 测点的数量和布置范围应有冗余量,重要部位、性能退化和损伤劣化严重的构件应增加测点;当发生紧急情况时,应加密测点;
- f) 测点布置宜考虑代表性、经济性、可更换性和安装便利性进行优化布置;
- g) 测点布设宜减少信号的传输距离,并考虑设备布设条件所受约束。

## 5 监测内容和方法

### 5.1 温湿度监测

5.1.1 温湿度监测包括环境的温湿度监测以及结构封闭空间的温湿度监测。

5.1.2 温度监测应符合下列规定:

- a) 温度传感器宜选用量程大、精度高、线性及稳定性好的传感器;
- b) 可通过有限元模型仿真或参考相关设计规范并结合截面温度梯度及结构整体升降温和空间分布特点确定测点位置;
- c) 监测整个结构的温度场分布和不同部位结构温度与环境温度对应关系时,测点宜覆盖整个结构区域;
- d) 相对独立空间应设 1 个~3 个点;面积或跨度较大时,以及结构构件应力及变形受环境温度影响大的区域,宜增加测点。

5.1.3 湿度监测应符合下列规定:

- a) 湿度传感器误差应小于 $\pm 5\%RH$ (相对湿度),长期稳定性要求年漂移量宜小于 $\pm 2\%$ ;
- b) 湿度测点宜布置在结构内湿度变化大、对结构耐久性影响大的部位;
- c) 单体基础设施的湿度测点不宜少于两个,宜布设于结构内外湿度变化较大和对湿度敏感的结构内部或外部。

5.1.4 大气温湿度传感器宜与风速仪一并安装。

### 5.2 风荷载监测

5.2.1 风荷载监测参数应包括风速、风向、风压和风攻角。

5.2.2 风速及风向监测应符合下列规定:

- a) 风速及风向监测宜选用机械式风速仪或超声式风速仪;处于台风区域的基础设施,宜选择三向超声风速仪;
- b) 风速仪量程应大于由设计风速换算的风速仪安装位置处最大风速的 1.2 倍,风速监测误差宜小于 0.1 m/s,风向监测误差宜小于 $3^\circ$ ;

- c) 结构绕流风影响区域宜采用计算流体动力学数值模拟或风洞试验方法确定；
- d) 风速仪应安装在工程结构绕流影响区域之外，测点宜选择在房屋建筑顶层、桥面侧面、塔顶和拱顶位置，其安装位置应能监测自由场风速和风向。

#### 5.2.3 风压监测符合下列规定：

- a) 风压监测宜选用微压量程、具有可测正负压的压力传感器，也可选用专用的风压计；
- b) 风压测点宜根据风洞试验的数据和结构分析结果确定；在无风洞试验数据情况下，也可根据风荷载分布特征及结构分析结果布置测点；
- c) 进行表面风压监测的项目，宜绘制监测表面的风压分布图；
- d) 风压计量程应满足结构设计中对面风场的要求，可选择可调量程的风压计，风压计的误差宜小于 0.4%F.S.，且分辨率宜小于 10 Pa，非线性度应小于 0.1%F.S.，响应时间应小于 200 ms。

#### 5.2.4 对风敏感的结构，风致响应监测符合下列规定：

- a) 对位移或加速度有限制要求的结构部位应布置位移或者加速度传感器，传感器记录结果应与限值进行对比；
- b) 在应力或应变较大或刚度突变的结构部位应布置应变传感器反映结构风致响应特征；
- c) 风致响应监测应对不同方向的风致响应进行量测，现场实测时应根据监测目的和内容布置传感器。

### 5.3 地震荷载监测

5.3.1 地震荷载监测参数宜包括地震动加速度响应，宜采用力平衡式加速度传感器或强震仪。

5.3.2 地震荷载监测测点布置应能反映结构地震动荷载输入。

### 5.4 交通荷载监测

5.4.1 宜采用动态称重仪、视频摄像头、流量计进行交通荷载监测；动态称重模块结合视频监控系统软件监测轴重、速度、车辆位置、行驶方向以及通过时间等；根据实时视频监控，可记录车流量并进行实时车辆称重和超载报警。动态称重传感器技术参数和安装要求应符合 GB/T 21296(所有部分)的相关规定。

5.4.2 动态称重系统量程应根据桥梁的限行车辆载重确定，单轴监测量程不宜小于限载车辆轴重的 200%；动态称重系统宽度应能覆盖整个车道宽度。

5.4.3 动态称重系统应具备数据自动采集和存储功能，现场单车荷载数据存储能力不宜少于 90 d，视频数据存储能力宜不少于 30 d；动态称重监测系统应与其他监测系统软硬件接口兼容。

5.4.4 视频摄像头包括可变焦摄像机和视频服务器，当动态称重系统记录到超出阈值的车辆荷载应触发报警系统，通过视频监测模块拍摄涉事的车辆，并通过车辆监控与流量统计软件上传，为相关管理部门提供警报信息。

### 5.5 变形监测

5.5.1 根据被测基础设施的特点和监测要求，可选用全球导航卫星定位系统(GNSS)、光电挠度仪、静力水准仪、位移计和倾角仪等进行结构整体或结构局部的变形监测。

5.5.2 结构整体变形、位移和倾角测点布设，应根据最不利荷载组合作用下基础设施关键构件的变形、位移和倾角包络线，选择变形、位移和倾角极值点位置。

5.5.3 基础设施的绝对位移监测可选用 GNSS 设备，基准站应选址在地基稳定、上方天空开阔、远离电磁干扰、易受保护及维修的区域；监测站应安装在被测结构或构件顶部，上方无遮挡，并远离电磁干扰。

5.5.4 基础设施沉降导致的相对位移监测可选用光电挠度仪或静力水准仪，应将安装、调试后监测到的初始值作为测量基准值。

5.5.5 桥面板的倾覆监测可选用顶针式位移计,沿桥面板横向位置左右两侧对称安装。

5.5.6 基础设施裂缝宽度和伸缩缝位移监测可选用拉绳式或拉杆式线性位移计,传感器量程应大于裂缝或伸缩缝的预警宽度,传感器测量方向应与裂缝或伸缩缝的走向垂直,监测误差宜小于 0.1 mm。

## 5.6 振动监测

5.6.1 振动监测测点应根据动力特性分析,宜布置在需识别的振型关键点上,且宜覆盖结构整体,也可根据需求对结构局部增加测点。

5.6.2 振动监测设备应选择加速度计,根据监测位置和监测要求可选用单向或三向传感器。

5.6.3 接触式振动监测传感器应与被测对象之间刚性连接,使传感器测量方向与所测结构振动方向一致。

5.6.4 振动监测采样频率选择应根据不同结构形式及监测目的确定。

## 5.7 应变监测

5.7.1 应变监测设备可选用电阻应变计、振弦式应变计、光纤类应变计等。宜根据监测要求,以及被测结构或构件应力场、动态特性和环境特性确定传感器类型。

5.7.2 应变计满足要求如下:

- a) 量程应与量测范围相适应,监测值宜控制为 30%F.S.~80%F.S.,量测误差宜小于 0.5%F.S.;
- b) 混凝土构件宜选择长标距应变计,应变梯度较大的应力集中区域,宜选用标距较小的应变计;
- c) 应变计应具备温度补偿功能。

## 5.8 拉索索力监测

5.8.1 斜拉索索力宜采用振动传感器或压力传感器进行监测。压力传感器应在安装前进行校准,压力传感器应在斜拉索张拉前进行安装。

5.8.2 应选择具有代表性、索力较大或索力变化较大的拉索进行索力监测。

5.8.3 索力监测宜采用间接测力法或直接测力法,并应符合 JT/T 1037—2022 中 8.4.4 的相关规定;索力传感器量程应大于索力设计值的 1.2 倍,测量误差宜小于被测索力设计值的 10%。间接测力法宜采用频率法或电磁弹式传感器,频率法可选用电容式加速度传感器、压电式加速度传感器,电容式加速度传感器的传感器技术指标宜符合 JJF 1918 的相关规定。直接测力法可采用锚索计,锚索计技术指标宜符合 JJG 036 的相关规定。

5.8.4 采用振动频率法监测时,应符合 GB 50982—2014 中 4.8.2 的相关规定,传感器安装位置应远离拉索下锚点而接近拉索中点,量测索力的加速度传感器布设位置距索两端距离一般宜大于 0.17 倍索长;对于索长较长的桥梁,加速度传感器安装位置距离拉索端部可考虑小于 0.17 倍索长,且安装位置宜选择受端部边界条件影响较小和便于施工的区域。

## 5.9 腐蚀监测

5.9.1 氯离子含量较高或受腐蚀影响较大的区域或有设计要求时,可进行腐蚀监测。

5.9.2 腐蚀监测测点宜选择在侵蚀环境荷载作用的典型区域或节点。

5.9.3 腐蚀监测宜选用电化学方法,腐蚀监测传感器宜选用沿混凝土保护层深度安装的多电极传感器,可监测腐蚀电位、腐蚀电流、混凝土温度、腐蚀速率等参数,监测方法应符合 GB 50982 的相关规定。

5.9.4 腐蚀监测传感器测定的电流或电位差应能判别钢筋混凝土的腐蚀进程,并应选择与基础设施结构钢筋及保护层匹配的安装方式。

## 6 监测系统的设计、验收和管理维护

### 6.1 传感器系统模块

#### 6.1.1 传感器选型应符合下列原则：

- a) 传感器选择应符合监测期、监测方法及系统功能的要求,并具有稳定性、耐久性、兼容性和可扩展性;
- b) 传感器应根据结构状态、体系和形式以及经济条件选择,并结合结构健康监测中具体监测内容和目的选择适宜的传感器类型和数量;
- c) 传感器应在监测期间具有良好的稳定性和抗干扰能力,采集信号的信噪比应满足实际工程需求;
- d) 传感器应符合监测系统对灵敏度、通频带、动态范围、量程、线性度、稳定性、供电方式及寿命等要求。

#### 6.1.2 硬件设备技术要求按附录 A。

【条文说明】参考交通运输部公路局 2021 年 7 月发布的《公路长大桥梁结构健康监测系统试点建设技术指南》第 6.2 节。

### 6.2 数据采集与传输模块

#### 6.2.1 数据采集应包括数据采集硬件、软件和数据采集制度。

6.2.2 数据采集的硬件选型、软件预处理、数据传输软硬件设计与选型应保证及时获得数据,数据采集硬件应根据传感器输出信号类型、范围、兼容性、精度和分辨率等要求进行设备选型,数据采集及传输硬件设备技术指标应符合 CECS 333—2012 的相关规定。

6.2.3 数据采集硬件设备的采样频率应根据监测应用分析要求、功能要求以及国家标准、行业标准或团体标准的要求设定,并符合附录 B 的 B.1 的规定。

#### 6.2.4 数据采集软件应符合下列规定：

- a) 具有数据实时采集、自动存储、缓存管理、即时反馈和自动传输等功能;
- b) 与数据库系统和数据分析软件稳定、可靠地通信,可本地或远程调整各配置,可通过标签数据库或本地配置文件进行信息读取;
- c) 能对传感器输出信号、数据采集和传输设备的运行状态信号进行实时采集,对系统运行状态进行监控,异常时可及时报警;
- d) 能接受并处理数据采集参数的调整指令,并记录和备份处理过程。

#### 6.2.5 数据采集设备和数据采集方案符合下列规定：

- a) 数据采集方案,应保证信号信噪比高、不失真,动态信号还应满足采样定理;
- b) 信号调理与数据采集设备应基于接口匹配性、环境适应性、稳定性、耐久性等要求进行选型;
- c) 采集设备与传感器之间应有明确的拓扑关系;根据工程特点与现场具体条件,可选择数据集中式采集和分布式采集两种模式;
- d) 不同监测数据采集同步性,时间同步精度应满足数据处理、数据分析及状态评估的要求。动态信号的时间同步误差宜小于 0.1 ms,静态信号的时间同步误差宜小于 1 ms;
- e) 数据采集宜考虑自校准功能,无自校准功能时应根据监测要求定期检测。

#### 6.2.6 数据传输符合下列基本规定：

- a) 数据传输应确保系统各模块之间无缝连接,以成为一个有机协调的整体,应确保监测数据和指令在各模块之间高效可靠地传输;
- b) 宜以包为单元进行,应具备对数据进行分包处理和解包复原的功能;

- c) 应将采集到的监测数据传输到数据中心,宜采用信息认证、数字签名等技术保证数据传输的完整性、实时性、安全性和鲁棒性;
- d) 数据传输协议和数据交换标准应统一设计,与外部系统之间的数据交换宜采用数据服务接口形式;
- e) 应根据监测项目的环境条件、监测规模、传感器及采集设备选择适宜的有线或无线数据传输方式。

#### 6.2.7 数据传输软件符合下列规定:

- a) 应具有对各种数据接收、处理、交换和传输的能力,应保证通讯的可靠性、高效性及数据传输质量;
- b) 应具有良好的鲁棒性,当在某个传输线路发送故障时,能保证数据的完整性和可靠性;
- c) 应考虑数据传输的一致性、完整性、可靠性和安全性,应满足系统开放性和可扩展性要求;
- d) 宜采用 TCP/IP 协议进行数据交换和传输,并应符合 IEEE 802 标准委员会发布的系列标准的规定。

#### 6.2.8 有线数据传输方式选用符合下列规定:

- a) 应选用带宽高、传输距离远、可靠性高、抗干扰能力强的光纤传输,传输网络宜采用基于 TCP/IP 协议的光纤专网;
- b) 当传输距离相对较短且无强电磁干扰时,可采用模拟信号进行传输;
- c) 当传输距离较远或有较强电磁干扰时,宜采用 RS485、工业以太网等数字信号或光纤传输技术进行传输;
- d) 应采用屏蔽电缆,数据传输线缆衰减损失应小于  $1/30$  (dB/m),传感器到前置放大器之间的信号电缆长度不应超过 2 m,前置放大器与采集设备之间的信号电缆长度宜小于 150 m,超过 150 m 应增加中继放大器。

6.2.9 无线传输方式可选用电磁波传输技术,信号发射装置和接收装置应远离强电磁干扰源。应根据监测规模、监测需求及具备的网络条件设计适宜的无线通信网络,带宽、传输距离、时延应满足监测需求。

### 6.3 数据存储与管理模块

6.3.1 数据存储方式宜分为在线存储和离线存储。在线存储可采用租用云服务商提供的云存储方式,云存储方案应综合考虑网络带宽、数据安全、存储容量等要求,应满足应用要求;离线存储应选用硬盘和专业存储器等作为离线存储介质,对于超过时限的离线备份数据应妥善保管并建立电子档案,以便查找追溯。

6.3.2 应对监测的数据依据监测系统自身的属性信息、重要程度、使用频率和数据量大小进行分级分类存储管理;宜采用数据库形式存储监测数据,并具备数据压缩存储和异地备份功能,对关键数据宜定期进行异地备份。

**【条文说明】**关键数据是指强(台)风事件、地震事件、涡振事件、船舶/车辆撞击桥梁事件以及其他对基础设施造成损伤事件记录的监测数据,以及在日常监测和运维过程中发生异常报警事件的监测数据。

#### 6.3.3 数据存储与管理模块应包括下列主要功能:

- a) 数据预处理、数据归档、自动生成报告报表、快速显示和高效存储;
- b) 可通过操作系统中心数据库进行数据查询和管理;
- c) 备份数据、自动导入和导出数据及手工导入和导出数据;
- d) 统一的数据标准格式和接口;
- e) 数据安全性,可采取设定不同用户级别权限和密码,以及网络防护等技术措施。

#### 6.3.4 数据存储和管理符合下列规定:



- a) 监测系统中存储数据的单位,宜采用国际单位制;数据的时间应采用公历,最低精度为秒;
- b) 应存储结构的设计资料、结构有限元模型、传感采集和传输设备的基本信息、结构的动力性能参数等;
- c) 原始监测数据应定期存储、备份存档,后处理数据宜保持不少于3个月在线存储;经统计分析的数据应专项存储,每季度或每年数据分析后宜存储某一段或某几段典型数据;突发事件数据应进行转移备份存储并永久保存;
- d) 监控中心计算机机房实时监测数据存储时间不宜少于5年;经处理后的特征数据、超限报警、评估结果等结构化数据存储时间不宜少于20年;
- e) 宜采用容灾备份机制,可具备各类数据压缩存储和异地备份功能。

## 6.4 数据分析与结构安全评估模块

### 6.4.1 数据分析处理符合下列规定:

- a) 数据分析宜采用多线程、分布式并行计算、Redis(Remote Dictionary Server,远程字典服务)等技术提升数据处理和存取效率,最大限度提升数据处理时效性;
- b) 应正确判断异常数据,宜采用数字滤波、去噪、去趋势项、截取和隔离异常点等方法纠正或剔除异常数据;
- c) 数据分析时应考虑数据类型和分析要求,对数据进行特征提取、数据解耦、转换与统计等处理;
- d) 需要进行频谱分析的数据,应选择合适的窗函数,考虑被分析信号的性质与处理要求,减少截断对谱分析精度的影响;
- e) 对于平稳信号宜采用离散傅里叶变换的频谱分析方法,非平稳信号宜采用时频域信号处理分析的方法或具有较好计算精度的数据处理方法。

### 6.4.2 数据分析应对荷载与环境数据、结构整体响应数据和结构局部响应数据进行全面统计分析和特殊分析,为结构安全评估提供基础数据。

### 6.4.3 数据分析应包括统计分析和特殊分析,符合下列规定:

- a) 统计分析宜包括最大值、最小值、平均值、均方根值、累计值等统计值;
- b) 特殊分析宜包括荷载谱分析、风参数分析、模态分析、疲劳分析等;
- c) 采样频率大于1 Hz的数据应以10 min、日、月、年为统计间隔获得其统计值;
- d) 温湿度、静应变、静位移等监测变量,应给出以日、月、年为统计间隔的统计值。

### 6.4.4 荷载与环境监测数据分析符合下列规定:

- a) 温度数据应分析最高温度、最低温度和最大温差等;湿度数据应分析最大值、平均值和超限持续时间等;结构温湿度分布监测时,宜绘制结构温湿度分布等温线图;
- b) 风速风向监测数据应分析10 min风速、风向和玫瑰图;风压监测数据宜分析10 min平均风压和均方根值;
- c) 地震数据宜分析加速度峰值、速度峰值、持续时间、频谱和反应谱等;
- d) 交通荷载应分析车流量、轴重、车重,超载车数量、车重、轴重和时间,宜分析年极值、车辆疲劳荷载谱和荷载校验系数。

### 6.4.5 结构响应监测数据分析符合下列规定:

- a) 变形监测数据应分析平均值、绝对最大值、均方根值、绝对值累积量、其随时间变化趋势;
- b) 振动监测数据应分析绝对最大值、均方根值、频谱,宜进行模态参数分析,模态参数应剔除环境等因素影响;
- c) 关键截面应变监测数据应分析平均值、绝对最大值、疲劳累积损伤指数,索塔、主拱关键截面应变监测数据应分析平均值、绝对最大值;
- d) 索力监测数据应分析平均值、最大值、最小值、均方根值、疲劳损伤指数及其随时间变化趋

势,监测索力宜与成桥索力、设计值、破断索力以及定期检测索力进行对比分析。

6.4.6 腐蚀监测数据宜分析氯离子浓度、侵蚀深度最大值、最小值、梯度及其变化趋势。

6.4.7 结构因遭受洪水、流冰、漂流物和车船撞击、滑坡、泥石流、地震、风灾、海啸、火灾、化学剂腐蚀和特殊车辆过路桥等突发事件后进行专项评估时,应对事件发生前后数据进行对比分析。

6.4.8 安全评估应选用可靠的评估方法,兼顾结构安全评估技术发展预留升级接口。

6.4.9 结构遭受撞击、滑坡、泥石流、地震、风灾、海啸、火灾、化学剂腐蚀等突发事件后,应采用专业分析方法进行安全评估,形成安全评估结果。

6.4.10 安全评估应对监测数据统计特征值与规范设计值进行比对分析,并基于修正的有限元模型、监测荷载、规范设计荷载进行极限承载能力分析,进行安全评估。

6.4.11 数据分析报告报表应提供月报、季报、年报和特殊事件后的专项结构安全评估报告等,报告报表应导出办公系统易于调用的通用文档格式。

## 6.5 结构安全预警与预警信息发布模块

6.5.1 安全预警应根据监测数据流和数据分析结果进行实时预警。

6.5.2 预警应遵循下列原则:

- a) 日常运营过程中,当出现影响结构安全、行车安全和人员安全的状况时,应进行报警;
- b) 遭受地震、撞击、台风、风致异常振动等突发事件时,应进行报警。

6.5.3 基础设施结构安全预警可设黄色和红色两级预警:

- a) 黄色预警:提醒管理单位应对结构整体或局部响应、荷载和环境等参数加强关注,并进行跟踪观察;
- b) 红色预警:警示管理单位应对结构整体或局部响应、荷载和环境等参数持续密切关注,查明报警原因,采取适当检查、应急管理措施以确保结构安全运营,并应及时进行结构安全评估。

6.5.4 报警规则和报警阈值的确定符合下列规定:

- a) 报警阈值应基于监测数据历史统计值、设计值和规范容许值设定;
- b) 报警阈值设定应考虑监测变量数据动态特征、统计特性以及监测变量异常特征。

【条文说明】监测变量数据动态特征包括振动加速度、振动频率、振型 MAC(Modal Assurance Criterion,模态置信矩阵)值等;统计特性包括最大平均风速、10 min 平均风速、水平地震动加速度峰值、最高温度、最低温度、最大温差和最大温度梯度等;监测变量异常特征指监测车辆总重或轴重、索应力等监测值过大,以及结构频率、振型 MAC 值、相关性模型参数变化过大等。当既有基础设施具有承载力检测评定结果时,可采用承载力评定结果替代承载力设计值。

6.5.5 报警功能符合下列规定:

- a) 应具有实时和自动报警功能,应在监测系统软件界面显示报警信息;
- b) 报警内容应包括报警级别、报警传感器编号和位置、报警监测值和报警阈值;
- c) 应能发布、调整 and 解除报警;
- d) 报警阈值应能依据基础设施系统运行状况动态调整。

【条文说明】报警应通过软件实现,除了在监测系统软件界面自动实时显示报警信息外,还可通过声光报警、邮件和短信等形式发送报警信息。报警值指各报警内容在不同报警级别下的报警阈值。

## 6.6 可视化系统模块

6.6.1 可视化系统应采用加密、分级授权等网络安全措施,可通过互联网远程安全登录、查阅系统监测数据和报告。

6.6.2 可视化系统应根据监测系统整体要求,确保各个子系统和模块的兼容性、数据传输可靠性、系统整体稳定性、环境适应性、可展性与技术先进性。

6.6.3 可视化系统应基于统一软件工具平台开发,硬件集成应考虑匹配性,并兼顾系统定期扩容的便捷性。

6.6.4 可视化系统宜根据监测要求综合考虑选择 C/S 模式或 B/S 模式。

6.6.5 可视化系统具有以下功能:

- a) 应具有用户图形界面能显示监测设施的相关信息,包括基础设施的基本信息、系统信息、监测数据、数据采集和传输、数据处理和管理、安全预警及评估等静态和动态信息,用户界面应开放兼容、美观友好和操作便利;
- b) 应采用模块化、单元化、标准化设计,确保软硬件模块无缝连接;
- c) 软件应与各数据库无缝衔接,保证数据交换高效;
- d) 监测数据和实时预警信息应实时在线显示,并可将预警信息进行发布;
- e) 传感器、数据采集和传输、数据处理和管理的设备信息应实时在线显示,并可对各模块功能参数进行在线设置和修改;
- f) 应有进入数据分析模块的通道,并有链接、存储、调用或显示各类评估结果、报告的接口。

## 6.7 监测系统的验收

6.7.1 监测系统建设完成后,应编写系统建设报告。

6.7.2 监测系统连续试运行应不少于 3 个月,系统正常运行率高于 95%,连接通讯通畅,可视为试运行合格;当出现更换主要观测设备或者主要仪器设备不能正常工作 48 h 以上的情况,视为试运行中断,应及时查明原因,排除故障。系统恢复正常后,应从恢复之日起重新开始计算试运行时间。

6.7.3 试运行结束后应编写试运行报告。

6.7.4 应对监测人员进行技术培训。

6.7.5 完成 6.7.1~6.7.4 要求后,方可进行监测系统验收。监测系统验收时应提交下列资料:系统建设报告、系统试运行报告以及相关仪器、软件使用说明书等技术资料。

6.7.6 监测系统工程竣工验收应按 GB 50300 的有关规定执行,在检查各种记录、资料和检验系统施工的基础上对工程质量做出结论,并填写工程质量竣工验收表。

6.7.7 监测系统验收应包括下列内容:

- a) 设备、装置及配件的安装;
- b) 监测系统软件功能应符合设计文件的规定,当无相关规定时应具备数据采集、存储、下载、读取、分析、显示和报表功能;
- c) 监测系统的结构损伤预警功能、记录显示功能和系统故障自检功能;
- d) 视频、图像监测系统的控制功能、监视功能、显示功能、记录功能;
- e) 与 BIM(Building Information Modeling)模型结合的监测系统应提交 BIM 模型的测试记录。

6.7.8 验收不合格的项目应在整改完毕后再次组织验收,未通过总体验收的工程不得交付使用单位。

## 6.8 监测系统的管理与维护

6.8.1 监测系统的运行管理应纳入工程的日常管理工作。

6.8.2 监测系统应进行巡视检查、定期检测和系统维护。

6.8.3 巡视检查内容应包括监测范围内的结构和构件变形、开裂、测点布设及监测设备或结合当地经验确定的其他巡视检查内容。

6.8.4 巡视检查符合下列规定:

- a) 巡视检查的重点是确认基准点、测点的位置未改变及完好状况,确认监测设备运行正常及保护状态;
- b) 发出预警信号时,应加强巡视检查;当发现异常或危险情况,应及时通知相关单位;

- c) 巡视检查宜由熟悉本工程情况的人员参加,并相对固定;
  - d) 巡视检查应做好记录。
- 6.8.5 定期检测分为远程访问、年度现场检测和特别检测 3 类。
- 6.8.6 远程访问每月不应少于 1 次,并填写记录表。
- 6.8.7 年度现场检测符合下列规定:
- a) 监测系统每年应进行一次全面检测;
  - b) 检测对象应包括传感器、信号传输和记录器,并对仪器灵敏度进行标定;
  - c) 年度现场检测完成后,应填写年度检测表,并编写年度检测报告。
- 6.8.8 在监测系统遭受极端自然灾害后,应对监测系统工作状况进行特别检测,并填写检测表;经检测发现监测系统存在故障时,应进行维修。
- 6.8.9 对于达到使用年限的监测仪器,应进行性能检测。对性能达不到要求的仪器,应进行更换。
- 6.8.10 系统维护应确保监测系统运行正常,并进行系统更新。
- 6.8.11 监测系统的管理与维护应符合 T/CECS 652—2019 的相关规定。

## 7 城市地面基础设施群的监测预警和安全评估

### 7.1 建筑基础设施监测

7.1.1 根据 GB 50982—2014 中 5.1.6 和 6.1.5 的相关规定,不同类型房屋建筑基础设施使用期间常规监测项目应根据结构特点按附录 C 的 C.1 进行选择。

7.1.2 温湿度监测符合下列规定:

- a) 环境温湿度监测宜将温度或湿度传感器布置在离地面或楼面 1.5 m 高度空气流通的百叶箱内;
- b) 监测结构梯度温度时,宜在结构的受阳光直射面和相对的结构背面以及结构内部沿结构高度布置测点,结构同一水平面上测点不应少于 3 个;
- c) 温度监测测点可根据截面温度梯度及结构整体升降温和空间分布特点,通过有限元模拟或参考相关设计规范确定测点位置;
- d) 结构温度监测点布置宜与应变监测的温度补偿测点统一设计、数据共享。

7.1.3 对季节效应和不均匀日照作用下的温度效应敏感的高层结构,应进行日照变形监测。

7.1.4 风参数及风致响应监测符合下列规定:

- a) 已进行风洞试验的结构,宜根据风洞试验结果布置测点;对于未进行风洞试验的结构,宜选择自由场及对风致响应敏感的构件及节点位置,并宜与地震动及地震响应监测的测点布置相协调;
- b) 高层、高耸结构顶部风速仪宜高于顶部 1 m~2 m,测量位置应尽量避免建筑结构对流场的影响,并处于避雷针的覆盖范围之内。环境风速监测宜安装在距结构 100 m~200 m 外相对开场地,高出地面 10 m 处;
- c) 对风敏感的建(构)筑物有验证要求时,可监测建(构)筑物表面的风压分布;
- d) 舒适度控制区域宜布置测点,对相应控制参数进行监测;
- e) 膜结构主要膜面进行风及风致响应监测时,监测区域宜分为风压、风振主监测区和风压副监测区,监测项目为膜面振动以及上下表面风压。

7.1.5 地震动监测测点应布置在结构地下室的底面。当条件具备时,也可在自由场上增加布置测点,用于记录结构的输入地震动。还应结合结构振动测点,选择测点位置。空间位置相近的建筑结构,可共享地震动监测数据。

7.1.6 变形监测可采用 GNSS、激光位移计或工业数码相机测量,测点可选择下列位置:

- a) 结构刚度突变或质量突变处；
- b) 影响结构安全性的特征构件、变形较显著的关键点、承重墙柱拐角、大的工程结构截面转变处；主要墙角、间隔 2 根~3 根柱基以及沉降缝的顶部和底部、工程结构裂缝的两边、结构突变处、主要构件斜率变化较大处；
- c) 结构体型的联系构件及不同结构分界处的两侧；
- d) 结构外立面中间部位的墙或柱上，且一侧墙体的测点不宜少于 3 个；
- e) 框架-核心筒体系的外框架竖向最大总位移楼层处、核心筒竖向最大总位移楼层处、核心筒与外框架竖向最大相对变形楼层处；
- f) 高层与高耸结构的楼顶；
- g) 隔震支座、阻尼器、隔震缝、柔性连接、减震装置处；
- h) 网架结构、网壳结构、索结构、膜结构、特殊大跨空间结构结构跨中、支座和端部，悬挑大跨空间结构应监测悬挑端外檐。

7.1.7 根据动力响应监测目的和需求，测点的布置应符合下列规定：

- a) 测点宜设置在建筑顶层、地上一层、结构突变(质量突变和刚度突变)处楼层以及对结构安全性要求较高的重点楼层；
- b) 平移振动监测测点宜布置在建筑物的刚度中心，扭转振动监测测点宜布置在结构的四周边缘转动最大的点；
- c) 若进行动力特性分析时，振动测点宜沿结构不同高度布置，尽可能设置在结构各段的质量中心处；
- d) 已进行振动台模型试验的高层与高耸结构，可根据振动台模型试验结果布置测点。

7.1.8 根据结构的特点、有限元模型分析结果以及实际工程需求，可选择下列重要部位进行应变监测：

- a) 转换梁、转换柱、转换桁架等转换部位及相邻上下楼层；
- b) 伸臂桁架受力较大的杆件及相邻部位；
- c) 巨型柱、巨型斜撑、竖向构件平面外收进以及竖向刚度分布不连续区域等结构不规则位置及相邻部位；
- d) 关键支座及受力主要构件，超大悬挑结构悬挑端根部或受力较大部位；
- e) 发生过重大质量事故并已采取措施补救确认为安全的结构，对补救部位的应变情况宜进行监测；
- f) 不同结构区域的交界处，应力集中程度非常高的部位及构件、几何突变处、特征位置构件、重要支撑构件等重要部位和构件。

## 7.2 桥梁基础设施监测

7.2.1 根据 GB 50982—2014 中 7.1.5 的相关规定，不同类型桥梁基础设施使用期间常规监测项目应根据结构特点按 C.2 进行选择。

7.2.2 温度监测测点位置和数据量应根据桥梁结构温度场分布特点确定，宜在主梁跨中、索塔、拱圈、主缆等关键截面布设温度监测测点，测点数量和位置应根据跨径、缆径、梁高、铺装体系、日照情况等因素综合确定。

7.2.3 单体桥梁湿度测点不宜少于两个，宜布设于桥梁结构内外湿度变化较大和对湿度敏感的桥梁结构内部或外部；大型桥梁关键钢结构应布设湿度测点，宜布设在桥面上、钢结构箱梁内、斜拉桥的斜拉索锚固区、悬索桥的锚室内、主缆内及鞍罩内部温湿度变化大或对结构影响大的位置。

7.2.4 缆索结构体系桥梁可进行雨量监测。进行风雨振动相关分析或有设计要求时，雨量计可布置在桥面及索塔顶位置。同时宜与风速仪等环境监测设备布置在同一位置。监测参数宜包括降雨量及降雨强度。

7.2.5 风及风致响应监测应符合下列规定：

- a) 风及风致响应监测的测点应布置在主跨桥面、塔顶或拱顶处,各个方向无遮挡；
- b) 对风敏感的特大跨桥梁,宜根据钢箱梁绕流场特性进行钢箱梁表面风压监测,测点应沿钢箱梁截面周向和纵向布置；
- c) 对于空间位置邻近的桥梁,可共享部分风参数监测数据。

7.2.6 地震动监测测点应布置在桥址附近自由场地、桥墩承台顶部、锚碇的锚室内；长度小于 800 m 的桥梁,宜布设一个测点；长度不小于 800 m 的桥梁,考虑地震地面运动非一致性,宜增设一个测点。

7.2.7 交通荷载监测内容应包括交通流量、车型、车速、车轴重、车轴数、总重,可包括车辆荷载空间分布。对车流量大、重车多或需要进行荷载静动力响应对比分析的桥梁结构,宜采用动态称重系统,称重测点宜选择在路基或有稳定支撑的混凝土结构铺装层内,应覆盖所有行车道。测点宜布设在主桥上桥方向振动较小的断面。动态称重系统与摄像头应相配套,摄像头的监视方向为来车方向。位于同一交通线路上的桥梁,可共享交通荷载监测数据,用于未安装监测系统的桥梁进行安全评估。

7.2.8 应对桥梁的裂缝变形、支座位移、伸缩缝位移、主梁挠度、主梁横向变形、墩顶偏位、拱顶偏位、拱脚偏位、塔顶偏位、主缆偏位、锚碇或主缆锚固点位移进行监测。

7.2.9 动力响应监测内容应包括：结构自振频率、振型及阻尼比。应根据桥梁结构动力计算结果、振型特点以及所需监测振型阶数综合确定测点位置。传感器宜布设在结构主要振型振幅较大部位,并应避免开节点位置；测点选择宜结合以识别振型为目标、以结构损伤识别与模型修正为目标的最优测点选择方法。

7.2.10 应变监测应结合桥梁结构特点,测点布设应符合下列规定：

- a) 宜根据结构易损性分析选择最易破坏或局部破坏易导致结构倒塌的关键构件、截面和部位；
- b) 索塔、主梁、拱圈、拱肋、立柱、斜杆等关键构件截面应变测点位置和数量应根据结构计算分析选择受力较大或影响结构整体安全的关键截面和部位,应考虑数据相关性分析需求,主梁顶板应变监测点,应布置在重车道或行车道车轮轮迹线对应位置；
- c) 钢结构桥梁应进行疲劳监测,监测参数可包括疲劳应力及钢结构温度,疲劳监测宜采用监测动应变方法,监测测点宜根据结构局部计算分析结果,选择钢箱梁正交异性钢桥面板顶板、U 肋和横隔板过焊缝等易产生疲劳效应的部位；
- d) 受力复杂的构件、截面和部位,宜布设三向应变测点。

7.2.11 索力监测项主要包括吊杆索力、系杆索力、斜拉索索力等,索力监测应符合下列规定：

- a) 应选取具有代表性的索构件进行索力监测；
- b) 应选取索力最大的索、索力变化幅值最大的索进行监测；
- c) 测点布置宜包括上游、下游及中跨、边跨。

7.2.12 结合桥梁结构的重要程度及桥址桥位特点,可选择增加腐蚀、雨量及冲刷等监测项目。

7.2.13 宜对位于海洋环境、盐碱地区和石油化工等侵蚀性工业环境的桥梁进行腐蚀监测,腐蚀监测应符合下列规定：

- a) 腐蚀监测宜选择代表性桥墩的水位变动区、浪溅区的关键截面；
- b) 混凝土腐蚀监测位置宜布设在钢筋混凝土梁受拉区的保护层内,测点位置、数量根据氯离子浓度梯度测试要求确定；
- c) 宜对墩身和承台的混凝土氯离子浓度和侵蚀深度、钢结构、拉索、主缆、锚具、吊索、体外预应力筋、吊杆、系杆腐蚀进行监测,得到相应的腐蚀速率、腐蚀深度。

7.2.14 宜对水文和地质条件复杂、冲刷严重的桥梁进行冲刷深度、流速及水位的监测；基础冲刷监测宜根据桥梁基础局部冲刷专题研究成果以及水文勘测资料综合选择冲刷监测区域,应选择冲刷最大区域以及桩基薄弱区域。

### 7.3 隧道和道路基础设施监测

【条文说明】按空间位置分类,隧道可分为地面以上或地面下的隧道两种类型。两种隧道的结构健康监测内容相似,在本文件中不进行具体的类型区分。

7.3.1 隧道基础设施的温湿度监测宜沿隧道结构走向布设若干温湿度测点,根据温湿度变化监测衬砌壁渗漏水,并获得隧道结构温度场的分布。

7.3.2 隧道和道路交通荷载监测内容应符合 7.2.7 的规定。位于同一交通线路上的隧道和道路,可共享交通荷载监测数据,用于未安装监测系统的隧道和道路进行安全评估。

7.3.3 高速公路改扩建路基加宽沉降观测应以路基面沉降和路基基底沉降为主,路基水平位移观测根据具体要求确定。

7.3.4 存在下列情况的道路路段应采用 GNSS 或静力水准仪进行变形监测:

- a) 不良地质作用对道路结构的安全有影响的区段;
- b) 存在软土、膨胀性土、湿陷性土等特殊岩土,且对线路结构的安全可能带来不利影响的区段;
- c) 因地基变形使线路结构产生不均匀沉降、裂缝的区段;
- d) 地震、堆载、卸载、列车振动等外力作用对线路结构或路基产生较大影响的区段;
- e) 既有线路保护区范围内有工程建设的区段;
- f) 采用新的施工技术、基础形式或设计方法的线路结构等。

7.3.5 隧道和道路采用 GNSS 或静力水准仪进行竖向位移监测,测点的布设符合下列规定:

- a) 在直线地段宜每 100 m 布设 1 个监测点;
- b) 在曲线地段宜每 50 m 布设 1 个监测点,在直缓、缓圆、曲线中点、圆缓、缓直等部位应有监测点控制;
- c) 道岔区宜在道岔理论中心、道岔前端、道岔后端、辙叉理论中心等结构部位各布设 1 个监测点,道岔前后的线路应加密监测点;
- d) 线路结构的沉降缝和变形缝、车站与区间衔接处、区间与联络通道衔接处、附属结构与线路结构衔接处等,应有监测点或监测断面控制;
- e) 隧道、高架桥梁与路基之间的过渡段应有监测点或监测断面控制;
- f) 地基或围岩采用加固措施的轨道交通线路结构或附属结构部位应布设监测点或监测断面;
- g) 线路结构存在病害或处在软土地基等区段时,应根据实际情况布设监测点;
- h) 隧道下穿高速公路、城市重要道路时,应布设路基竖向位移监测点,路肩或绿化带上应有地表监测点控制。

7.3.6 动力响应监测点宜沿隧道纵向间隔布设。

7.3.7 对隧道环向和纵向应变进行监测,应沿着隧道走向在不同方位布设测点,监测管片间沉降、水平位移及各衬砌片间位移变化。

7.3.8 道路挡墙竖向位移监测点宜沿挡墙走向布设,挡墙位于主要影响区时,测点间距宜不大于 5 m~10 m;位于次要影响区时,监测点间距宜为 10 m~15 m。

7.3.9 地震动监测测点可布设于自由场地上。

7.3.10 道路挡墙倾斜监测点应根据挡墙的结构形式选择监测断面布设,每段挡墙监测断面应不少于 1 个,测点宜布设在挡墙顶部。

7.3.11 应对容易腐蚀的关键构件进行腐蚀监测,将腐蚀传感器埋设在构件的钢筋混凝土内部。

### 7.4 输电塔基础设施监测

7.4.1 输电塔基础设施进行温湿度监测,沿输电塔结构竖直方向布设若干温湿度测点,宜在结构的受阳光直射面和相对的结构背面布置测点;可根据截面温度梯度及结构整体升降温和空间分布特点,通过

有限元模拟或参考相关设计规范确定测点位置。

7.4.2 风及风致响应监测符合下列规定：

- a) 已进行风洞试验的结构,宜根据风洞试验结果布置测点;对于未进行风洞试验的结构,宜选择自由场及对风致响应敏感的构件及节点位置,并宜与地震动及地震响应监测的测点布置相协调;
- b) 输电塔结构顶部风速仪宜高于顶部 0.5 m,并处于避雷针的覆盖范围之内,且考虑输电线的安全距离,避免发生闪络等事故。

7.4.3 地震动监测测点应布置在输电塔结构底部。还应结合结构振动测点,以及杆塔能够安装传感器的区域,选择测点位置。

7.4.4 变形监测可采用 GNSS、激光位移计或工业数码相机测量,测点可选择下列位置:

- a) 结构刚度突变或质量突变处;
- b) 影响结构安全性的特征构件、变形较显著的关键点;
- c) 杆塔顶部、塔身中部、支座和端部以及横担等悬挑结构。

7.4.5 根据动力响应监测目标 and 需求,布设加速度传感器,测点的布设宜符合下列规定:

- a) 测点宜设置在输电塔顶部、基础、结构突变(质量突变和刚度突变)处以及对结构安全影响较大的关键节点;
- b) 平移振动监测测点宜布置在输电塔节点层处的主材位置,扭转振动监测测点宜布置在结构主材四周边缘转动最大的位置;
- c) 若进行动力特性分析时,振动测点宜沿结构不同高度布置,并考虑杆塔能够安装传感器的区域,尽可能设置在结构各段的质量中心处;
- d) 对于长距离的输电线路还应根据线缆的模式振型在关键节点上布设加速计进行舞动监测。

7.4.6 应对下列重要部位进行应变监测:

- a) 关键支座及受力主要构件,超大悬挑结构悬挑端根部或受力较大部位;
- b) 发生过重大质量事故并已采取措施补救确认为安全的结构,对补救部位的应变情况宜进行监测;
- c) 不同结构区域的交界处,应力集中程度非常高的部位及构件、几何突变处、特征位置构件、重要支撑构件等重要部位和构件。

7.4.7 倾斜监测的测点宜布置在输电塔顶部、中部以及悬挑结构。

7.4.8 对于高寒地区的长距离输电线路宜采用分布式光纤对全程的电线覆冰和融冰过程进行实时动态监测。

7.4.9 应对容易腐蚀的关键构件或塔身已经发生腐蚀区域的构件进行腐蚀监测,将腐蚀传感器布设在结构构件的表面。

## 7.5 预警阈值设置和预警方式

### 7.5.1 房屋建筑基础设施

7.5.1.1 环境监测预警值宜符合下列规定:

- a) 当最高温度、最低温度、最大温差和最大温度梯度大于设计值时,进行黄色预警;
- b) 当最大平均风速大于 0.8 倍设计风速时,进行黄色预警;大于设计风速时,进行红色预警;
- c) 当水平地震动加速度峰值大于设计 E1 地震作用加速峰值时,进行黄色预警;大于设计 E2 地震作用加速峰值时,进行红色预警。

7.5.1.2 根据 GB 50011—2010 中 5.5.1 的相关规定,多遇地震作用下的楼层内最大弹性层间位移监测预警阈值应符合式(1)的要求:



$$\Delta u_e \leq [\theta_e]h \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$\Delta u_e$  ——多遇地震作用标准值产生的楼层内最大的弹性层间位移;计算时,除以弯曲变形为主的高层建筑外,可不扣除结构整体弯曲变形;应计入扭转变形,各作用分项系数均应采用 1.0;钢筋混凝土结构构件的截面刚度可采用弹性刚度;

$[\theta_e]$  ——弹性层间位移角限值,可按附录 D 的 D.1 确定;

$h$  ——楼层层高。

7.5.1.3 根据 GB 50011—2010 中 5.5.5 的相关规定,结构薄弱层(部位)弹性层间位移监测预警阈值应符合式(2)的要求:

$$\Delta u_p \leq [\theta_p]h \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$\Delta u_p$  ——弹塑性层间位移;

$[\theta_p]$  ——弹塑性层间位移角限值,可按 D.2 确定;对于钢筋混凝土框架结构,当轴压比小于 0.40 时,可提高 10%;当柱子全高的箍筋构造比 GB 50011—2010 中 6.3.9 规定的体积配箍率大 30%时,可提高 20%,但累计不超过 25%;

$h$  ——薄弱层楼层高度或单层厂房上柱高度。

7.5.1.4 建筑结构沉降允许值按照 GB 50007—2011 中 5.3.4 的相关规定取值。建筑地面沉降预警等级宜按 D.3 确定。

7.5.1.5 当位移或变形大于 0.8 倍设计值时,进行黄色预警;大于设计值或 1 个月内发现 10 次以上黄色预警时,进行红色预警。

7.5.1.6 房屋高度不小于 150 m 的高层建筑结构应满足风振舒适度要求。根据 GB 50009—2012 中第 8 章规定的 10 年一遇的风荷载标准值作用下,结构顶点的顺风向和横风向振动最大加速度计算值不应超过 D.4 的限值。结构顶点的顺风向和横风向振动最大加速度按照 GB 50009—2012 中第 8 章相关规定计算,也可通过风洞试验结果判断确定。

7.5.1.7 根据 JGJ 3—2010 中 3.7.7 的相关规定,楼盖结构的舒适度竖向振动加速度峰值不应超过 D.5 的限值。

7.5.1.8 根据 GB 50868—2013 中 7.1.2 的相关规定,交通振动对建筑结构影响评价的频率范围应为 1 Hz~100 Hz,交通振动对建筑结构影响在时域范围内的容许振动值,宜按 D.6 的规定采用。

7.5.1.9 根据 GB 50868—2013 中 8.0.2 的相关规定,建筑施工振动对建筑结构影响评价的频率范围应为 1 Hz~100 Hz;建筑结构基础和顶层楼面的振动速度时域信号测试应取竖向和两个水平向主轴方向,评价指标应取三者峰值的最大值及其对应的振动频率。容许值参考 D.7~D.8。

7.5.1.10 当建筑主要受力构件应力大于 0.95 倍设计值时,进行黄色预警;大于设计值或 1 个月内发现 10 次以上黄色预警时,进行红色预警。

## 7.5.2 桥梁基础设施

7.5.2.1 根据 T/CECS 529—2018 中第 4 章的相关规定,环境荷载作用限定值应符合下列规定:

- 考虑低温导致路面结冰影响行车安全,大跨桥梁路面温度预警阈值宜按 D.9 确定。
- 钢箱梁、主缆、锚锭散索室内相对湿度预警阈值,宜按 D.10 确定;混凝土箱梁内部相对湿度预警阈值,宜按 D.11 确定。
- 考虑车辆行驶安全的风速预警阈值,宜按 D.12 确定。
- 地震动参数指标可选用桥址地震动水平向加速度,大跨桥梁地震动水平方向加速度预警阈值,宜按 D.13 确定。
- 车辆荷载的监测主要针对单个车辆的轴重和总重,宜选用动态称重系统进行监测,预警阈值宜

按 D.14 确定。

7.5.2.2 根据 T/CECS 529—2018 中 5.6.1 的相关规定,墩台沉降值预警阈值宜按 D.15 确定。

7.5.2.3 根据 T/CECS 529—2018 中 5.4.1 的相关规定,桥墩宜以墩顶位移作为预警指标,应以 1 年为周期,以每小时桥墩位移有效值  $Pd_{RMS}$  为参量统计其均值  $\mu_{Pd}$  和标准差  $\sigma_{Pd}$ ,宜按 D.16 确定预警阈值。

7.5.2.4 根据 T/CECS 529—2018 中 5.3.2 的相关规定,主梁自振频率应作为通用指标设置预警阈值。主梁自振频率宜采用 25℃ 时的频率,不同温度下的自振频率宜根据主梁第一年监测数据得到的自振频率与温度的对应关系进行转化,并与第一年 25℃ 频率对比,得到变化百分比,宜按 D.17 确定预警阈值。

7.5.2.5 根据 T/CECS 529—2018 中 5.3.3 的相关规定,预应力混凝土主梁控制截面出现主拉应力导致的斜裂缝,应按 D.18 确定预警阈值;主梁出现横桥向及竖向受力裂缝,宜按 D.19 确定预警阈值;主梁出现沿预应力钢筋方向的纵向裂缝,宜按 D.20 确定预警阈值。

7.5.2.6 根据 T/CECS 529—2018 中 5.3.5 的相关规定,对于各种使用钢-混凝土组合主梁的桥型,宜在其主梁梁端截面,主跨跨中截面,或恒载+交通活荷载组合下的最大弯矩截面,设置针对顶底板纵向滑移的监测项目。钢-混凝土组合主梁顶底板纵向滑移预警阈值宜按 D.21 确定。

7.5.2.7 根据 T/CECS 529—2018 中 5.8.2 和 5.8.3 的相关规定,支座反力的预警阈值应以支座反力  $F$  与支座反力设计最大值  $F_{max}$  的比值计算,宜按 D.22 确定;水平剪切变形和竖向压缩变形的预警阈值,应以变形量  $d$  与桥梁抗震设计的支座水平剪切变形和竖向压缩变形最大值  $d_{max}$  的比值计算,宜按 D.23 确定。

7.5.2.8 根据 T/CECS 529—2018 中 5.8.2 和 5.8.3 的相关规定,索力预警应分为绝对索力预警和索力变化异常预警,并应符合下列规定:

- a) 绝对索力预警应以避免断索等事故发生为目的,应以 1 h 采样间隔的采样数据为样本,将绝对索力  $T$  与索力设计最大值  $T_{max}$  进行比较,当  $T/T_{max} - 1 \geq 0.2$  时进行黄色预警;当  $T/T_{max} - 1 \geq 0.4$  时进行红色预警,宜按 D.24 确定预警阈值。
- b) 索力异常变化预警应以对拉索或主梁等构件损伤或超载等事件警示为目的,并应符合下列规定:
  - 1) 应以每小时采样间隔的数据  $T$  为样本,滤除周期 2 h 以下的动态信号,获得慢变索力  $T_m$ ;
  - 2) 建立慢变索力  $T_m$  与温度的相关关系,从慢变索力中扣除温度相关索力,获得标准温度(如 25℃)下的恒载索力  $T_h$ ;
  - 3) 对标准温度下的恒载索力  $T_h$  与相应的标准温度下设计恒载索力  $T_h^*$  进行比较,宜按 D.25 确定预警阈值。
- c) 索过大振动加速度预警,应以 1 年为周期,以每分钟加速度均方根  $R_{Acc}$  为参量,统计其均值  $u_R$  和标准差  $\sigma_R$ ,宜按 D.26 确定预警阈值。
- d) 扣除风致振动后索加速度变化过大预警,应以 1 年为周期,建立每分钟拉索振动加速度均方根与每分钟风速和风向均方根的相关函数,获得扣除风致振动后的每分钟加速度均方根  $R_{Acc}^*$ ,统计其均值  $u_R^*$  和标准差  $\sigma_R^*$ ,宜按 D.27 确定预警阈值。

### 7.5.3 隧道和道路基础设施

7.5.3.1 当水平地震动加速度峰值大于 0.9 倍设计基本地震加速度时,进行黄色预警;大于 1.0 倍设计基本地震加速度时,进行红色预警。

7.5.3.2 隧道结构变形控制值可按 D.28 确定。

【条文说明】隧道结构变形控制值参考 GB 50911—2013 中 9.3.5 的相关规定。

7.5.3.3 道路地面沉降监测阈值的确定符合下列规定:

- a) 应在调查分析道路等级、路基路面材料、道路现状情况和养护周期等的基础上,结合其与工程的空间位置关系和当地工程经验等进行阈值确定,并应符合 JTJ 073.1 和 JTG 5142 中的相关

规定；

- b) 对风险等级较高或有特殊要求,宜通过现场探测和安全性评估等确定其沉降控制值；
- c) 当无地方工程经验时,对风险等级较低且无特殊要求的高速公路与城市道路,路基沉降控制值可按 D.29 确定。

【条文说明】路基沉降控制值参考 GB 50911—2013 中 9.3.4 的相关规定。

#### 7.5.4 输电塔基础设施

##### 7.5.4.1 环境监测预警值应符合下列规定：

- a) 当最高温度、最低温度、最大温差和最大温度梯度大于设计值时,进行黄色预警；
- b) 当最大平均风速大于 0.8 倍设计风速时,进行黄色预警；大于设计风速时,进行红色预警；
- c) 当水平地震动加速度峰值大于 0.8 倍设计基本地震加速度时,进行黄色预警；大于设计基本地震加速度时,进行红色预警。

7.5.4.2 多遇地震作用下的输电塔各层内最大弹性层间位移可参考 GB 50011—2010 中 5.5.1 的多、高层钢结构相关规定执行。

7.5.4.3 输电塔结构薄弱层(部位)弹性层间位移可参考 GB 50011—2010 中 5.5.5 的多、高层钢结构相关规定执行。

7.5.4.4 输电塔结构沉降允许值可根据 GB 50007—2011 中 5.3.4 的相关规定执行。

7.5.4.5 当位移或变形大于 0.8 倍设计值时,进行黄色预警；大于设计值或 1 个月内发现 10 次以上黄色预警时,进行红色预警。

7.5.4.6 交通振动对输电塔结构影响评价的频率范围应为 1 Hz~100 Hz,交通振动对输电塔结构影响在时域范围内的容许振动值,宜按 D.6 的规定采用。

7.5.4.7 施工振动对输电塔结构影响评价的频率范围应为 1 Hz~100 Hz,输电塔基础和结构的振动速度时域信号测试应取竖向和两个水平向主轴方向,评价指标应取三者峰值的最大值及其对应的振动频率。容许值参考 D.7~D.8。

7.5.4.8 当应力大于 0.95 倍设计值时,进行黄色预警；大于设计值或 1 个月内发现 10 次以上黄色预警时,进行红色预警。

#### 7.6 结构安全评估

7.6.1 应根据城市地面基础设施的日常运营监测数据分析和突发事件监测数据分析结果,研判其使用功能,进行安全评估。

7.6.2 当遭遇地震、台风等其他突发事件,或发生下列情况时,应对结构整体或部分构件进行安全评估并进行检查：

- a) 钢结构内相对湿度大于 60% 的累计时长超过 1 年；
- b) 出现严重沉降或位移,达到或超出设计值；
- c) 顺桥向梁端位移达到伸缩缝设计值的 80% 或梁端位移最大值达到设计值；
- d) 结构局部响应异常,结构频率突然发生明显降低或持续降低；
- e) 关键构件拉、压应力大于设计值,判定监测点处构件应力状态异常；关键构件疲劳状态超过中等损伤,判定监测点处构件疲劳状态异常；
- f) 车辆荷载水平超过设计值,运营荷载结构校验系数显著增加并接近 1；
- g) 拉索、吊索、吊杆和系杆索力大于或等于设计值,或相对于初始监测值变化大于 10%,判定索体结构状态异常；
- h) 构件监测点处钢筋发生腐蚀,判定监测点处腐蚀状态异常；
- i) 桥墩冲刷深度大于 70% 设计冲刷深度,判定桥墩冲刷状态异常。

7.6.3 利用结构动力特性进行安全评估应符合下列规定：

- a) 应通过环境激励下监测的加速度数据,识别结构自振频率、振型、阻尼比等模态参数;
- b) 基于当前实测数据获取的模态参数宜与基于健康状态实测数据进行模型修正后的有限元模型计算获得的设计值进行对比,监测获取的结构自振频率不小于设计理论计算频率,判定结构处于正常状态;否则,判定结构状态异常。

7.6.4 基于结构动力响应的损伤识别和模型修正应符合下列规定：

- a) 可根据模态参数进行损伤识别,也可采用其他可靠的损伤识别方法;
- b) 损伤识别宜融合构件或局部损伤分析、多种识别方法和专项检查的结果、多传感器信息以及对比分析结构整体响应和监测点处构件或部位的损伤状态,进行综合判断;
- c) 模型修正宜采用有限元模型,也可采用其他等效模型进行参数修正;
- d) 可根据构件的监测数据、安全评估和专项检查结果,对发现异常状态的构件进行损伤分析,根据损伤分析结果修正相应构件或单元弹性刚度矩阵;
- e) 根据模态参数进行模型修正,宜采用有限元模型与实测自振频率之差的平方和、有限元模型振型与实测振型的模态置信因子(MAC)值,或者两者的组合值来确定模型修正的优化目标函数,也可采用其他与结构自振频率和振型相关的结构振动参数作为模型修正的目标函数;
- f) 可采用变形或应变作为模型修正的优化目标函数;
- g) 在模型修正优化求解前,宜对采用的模型进行参数灵敏度分析,选取对目标函数敏感的结构参数,宜根据参数物理意义设置参数变化范围。

7.6.5 利用应变对关键构件进行安全评估应符合下列规定：

- a) 根据应变计算应力时应考虑温度对应变的影响,对钢筋混凝土结构还应考虑收缩、徐变对应变的影响;
- b) 当应力未超过设计值时,监测点处构件应力状态正常;当应力超过设计值时,监测点处构件应力状态异常。

7.6.6 利用应变传感器进行钢结构疲劳安全评估应符合下列规定：

- a) 对只承受压力的构件不宜进行疲劳状态评估;
- b) 宜采用容许应力法或疲劳损伤指数法进行监测点处构件疲劳状态评估;
- c) 采用容许应力法进行疲劳状态评估时,当应力最大值小于规范规定的构件疲劳容许应力时,监测点处构件疲劳状态正常;否则,监测点处构件疲劳状态异常,宜按 7.6.6d) 的规定进行桥梁疲劳状态评估;
- d) 应力时程宜采用雨流计数法和 Miner 准则计算疲劳累计损伤指数,按 D.30 的规定进行疲劳状态评估。

7.6.7 利用运营荷载校验系数进行安全评估应符合下列规定：

- a) 应在日常车辆荷载作用下,获取位移影响线最不利位置的结构响应与该时刻车辆荷载作用下结构响应计算值的比值;
- b) 在特定时刻桥上有重车通行,单辆车总重不宜低于 30 t;
- c) 运营荷载结构校验系数小于 0.8 时,判定结构处于正常状态;否则,判定结构状态异常。

7.6.8 针对未监测构件,宜按照下列规定利用结构整体内力状态进行安全评估：

- a) 应基于结构实际物理特性参数、几何特性参数以及结构边界条件建立有限元模型;
- b) 利用监测的环境及结构响应,计算结构整体内力和线形,与设计值进行对比;
- c) 结构整体内力满足设计规范要求,判定结构处于正常状态;否则,判定结构状态异常。

7.6.9 结构状态评定宜符合 D.31 规定,评定结果宜进行专家评审论证。

## 8 地面基础设施突发事件应急处置

### 8.1 地面基础设施突发事件

8.1.1 地面基础设施发生地基沉降、塌陷、承重或支护结构倾斜、倒塌等事故应立即处置。

8.1.2 地面基础设施事故应按性质、严重程度、可控性和影响范围等因素进行分级处理,包括特别重大(Ⅰ级)、重大(Ⅱ级)、较大(Ⅲ级)、一般(Ⅳ级)四个级别:

- a) 凡符合下列情形之一的,为特别重大地面基础设施安全事故(Ⅰ级):
  - 1) 造成死亡 30 人以上的;
  - 2) 造成重伤 100 人以上的;
  - 3) 造成直接经济损失 1 亿元以上的。
- b) 凡符合下列情形之一的,为重大地面基础设施安全事故(Ⅱ级):
  - 1) 造成死亡 10 人以上、30 人以下的;
  - 2) 造成 50 人以上、100 人以下重伤的;
  - 3) 造成 5 000 万元以上、1 亿元以下直接经济损失的。
- c) 凡符合下列情形之一的,为较大地面基础设施安全事故(Ⅲ级):
  - 1) 造成死亡 3 人以上、10 人以下的;
  - 2) 造成 10 人以上、50 人以下重伤的;
  - 3) 造成 1 000 万元以上、5 000 万元以下直接经济损失的。
- d) 凡符合下列情形之一的,为一般地面基础设施安全事故(Ⅳ级):
  - 1) 造成死亡 3 人以下的;
  - 2) 造成 10 人以下重伤的;
  - 3) 造成 1 000 万元以下直接经济损失的。

【条文说明】根据《生产安全事故报告和调查处理条例》(国务院令 493 号发布,自 2007 年 6 月 1 日起实施)中第三条相关规定进行等级划分;其中所称的“以上”,包括本数,所称的“以下”不包括本数。

### 8.2 事故报告和紧急措施

8.2.1 基础设施安全事故发生后,安全责任人或获悉安全事故信息的公民、法人及其他组织,应迅速、准确、多渠道向事发地街道办事处、区/市级应急管理局、区/市级住房建设局、区/市级交通运输管理局或其他主管部门(含 110、119、120 等紧急求助电话)上报事故信息。

8.2.2 一般基础设施安全事故发生后,电话报告时间不超过 30 min、书面报告时间不超过 2 h;特别重大、重大、较大基础设施安全事故发生后,电话报告时间不超过 15 min、书面报告时间不超过 40 min。事故报告可参考附录 E 的 E.1 格式。

8.2.3 安全责任人和有关部门应立即组织应急救援力量和工作人员营救受伤害人员,搜寻、疏散、撤离、安置安全受到威胁的人员;标明危险区域,封锁危险场所;控制危险源,采取停电、停气、停水及其他防止危害扩大的必要措施。

8.2.4 事发地居委会、社区工作站和其他企事业单位应按照街道办事处的决定、命令,进行宣传动员,组织群众开展自救和互救,协助维护社会秩序。

### 8.3 应急处置内容

8.3.1 应按照基础设施安全事故的具体情况选取结构工程、岩土工程、安全工程、结构健康监测、安全鉴定、事故鉴定与调查等领域的专家组成应急专家组。并迅速开展监测数据分析、安全评估、现场检查等工作,对事故程度和事态发展进行研判,撰写安全事故分析报告以及提出应急处置建议。

8.3.2 应组建专业检测和监测队伍,对事故基础设施、周边受影响的基础设施及其他相关工程,开展安全应急监测、安全应急鉴定、安全鉴定等工作,为事故应急处置提供决策依据:

- a) 安全应急监测:在事故基础设施及周边布设相关仪器设备开展应急监测,为可能出现的危险情况提供预警;应急监测的内容主要包括沉降和位移监测、倾斜监测、振动监测等,应急监测的方式包括仪器自动监测和人工巡查等;
- b) 安全应急鉴定:在接到安全预警通知时,对基础设施进行以消除安全隐患为目标的紧急检查和鉴定;或在安全事故发生后,对基础设施的破坏程度及其危险性进行以排险为目的的紧急检查和鉴定;
- c) 安全鉴定:对事故基础设施及周边基础设施的承载能力和整体稳定性等的安全性以及可靠性进行调查、检测、分析、验算和评价,提供基础设施安全鉴定意见,为基础设施的加固或重修提供决策依据。

8.3.3 当基础设施遭受强(台)风、地震、涡振、船舶/车辆撞击桥梁特殊事件时,宜采取 E.2 对应的应急管理处置措施。

#### 8.4 事故调查与总结

8.4.1 事故调查应查明事故发生的经过、原因、人员伤亡情况及直接经济损失;认定事故的性质和事故责任;提出对事故责任者的处理建议;总结事故教训,提出防范和整改措施;提交事故调查报告。

8.4.2 事故调查报告应包括:事故发生单位概况;事故发生经过和事故处置情况;事故造成的人员伤亡和直接经济损失;事故发生的原因和事故性质;事故责任的认定以及对事故责任者的处理建议;事故防范和整改措施。事故调查报告应附具有关证据材料。事故调查组成员应在事故调查报告上签名。

8.4.3 应急处置工作结束后,有关单位应对基础设施安全事故处置的启动、决策、指挥、处置和后勤保障等全过程进行评估,分析总结应急抢险经验教训,提出改进意见和建议报送应急指挥部。

附录 A  
(规范性)  
硬件设备技术要求

A.1 温湿度监测温湿度传感器的技术要求见表 A.1。

表 A.1 温湿度传感器的技术要求

| 项目         | 技术要求        |
|------------|-------------|
| 测量范围(相对湿度) | 0~100%RH    |
| 误差(相对湿度)   | ±2%RH~±5%RH |
| 测量范围(温度)   | -40℃~+60℃   |
| 误差(温度)     | ≤±0.5℃      |

A.2 风荷载监测超声风速仪的技术要求见表 A.2。

表 A.2 超声风速仪的技术要求

| 项目   | 技术要求  |
|------|---|
| 测量参数 | 三个正交方向的风速和风向  |
| 风速   | 测量范围:0 m/s~40 m/s(台风区为 0 m/s~65 m/s);<br>分辨率≤0.1 m/s                                    |
| 风向   | 水平测量范围:0°~360°;<br>俯仰测量范围:±60°;<br>分辨率≤0.1°;<br>误差:≤±2°(1 m/s~30 m/s),±5°(0 m/s~40 m/s) |
| 采样频率 | ≥20 Hz  |

A.3 风荷载监测机械式风速仪的技术要求见表 A.3。

表 A.3 机械式风速仪的技术要求

| 项目   | 技术要求                               |
|------|------------------------------------|
| 测量参数 | 水平风速和风向                            |
| 风速   | 测量范围:0 m/s~100 m/s;<br>误差≤±0.3 m/s |
| 风向   | 测量范围:0°~360°;<br>误差:≤±3°           |
| 采样频率 | ≥10 Hz                             |

A.4 地震荷载监测强震仪的技术要求见表 A.4。

表 A.4 强震仪的技术要求

| 项目     | 技术要求                               |
|--------|------------------------------------|
| 量程     | $\pm 2.0 \text{ g}$ (可定制)          |
| 分辨率    | $\leq 1 \mu\text{g}$               |
| 误差     | $\leq 1\%$                         |
| 灵敏度    | $\geq 2.5 \text{ V/g}$ (可定制)       |
| 横向灵敏度比 | $\leq 1\%$                         |
| 频率响应   | $0 \text{ Hz} \sim 120 \text{ Hz}$ |
| 动态范围   | $\geq 120 \text{ dB}$              |

A.5 交通荷载监测动态称重系统的技术要求见表 A.5。

表 A.5 动态称重系统的技术要求

| 项目       | 技术要求                                    |
|----------|---|
| 整车称重误差   | $\leq 15\%$                             |
| 荷载能力(单轴) | $\geq 15 \text{ t}$                     |
| 过载能力(单轴) | $\geq 200\%$                            |
| 车速范围     | $15 \text{ km/h} \sim 200 \text{ km/h}$ |
| 车速误差     | $\leq \pm 2 \text{ km/h}$               |
| 车流量统计准确性 | $\geq 95\%$                             |

A.6 变形监测 GNSS 接收机的技术要求见表 A.6。

表 A.6 GNSS 接收机的技术要求

| 项目                       | 技术要求   |
|--------------------------|--|
| 静态误差                     | 水平 $\leq 3 \text{ mm} + 0.5 \times 10^{-6} \times D$ |
|                          | 竖直 $\leq 5 \text{ mm} + 0.5 \times 10^{-6} \times D$ |
| 动态误差                     | 水平 $\leq 10 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} \times D$  |
|                          | 竖直 $\leq 20 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} \times D$  |
| 采样频率                     | 动态: $\geq 10 \text{ Hz}$                             |
|                          | 静态: $1/1800 \text{ Hz}$                              |
| 注: $D$ 为传感器距基站的距离,单位为毫米。 |  |

A.7 变形监测光电挠度仪的技术要求见表 A.7。

表 A.7 光电挠度仪的技术要求

| 项目   | 技术要求                               |
|------|------------------------------------|
| 适用距离 | $0.5 \text{ m} \sim 500 \text{ m}$ |
| 测量误差 | $0.2 \text{ mm}/35 \text{ m}$      |
| 测量频率 | $0 \text{ Hz} \sim 10 \text{ Hz}$  |



A.8 变形监测静力水准仪的技术要求见表 A.8。

表 A.8 静力水准仪的技术要求

| 项目   | 技术要求          |
|------|---------------|
| 测量范围 | 0~150 mm(可定制) |
| 分辨率  | ≤0.025 %F.S.  |
| 误差   | ≤0.1 %F.S.    |

A.9 变形监测位移计的技术要求见表 A.9。

表 A.9 位移计的技术要求

| 项目   | 技术要求            |
|------|-----------------|
| 量程范围 | 100 mm~1 000 mm |
| 频率范围 | 0 Hz~10 Hz      |
| 线性度  | ≤0.15 %F.S.     |
| 分辨率  | 0.01 %          |
| 精度   | 0.1 mm          |

A.10 变形监测倾角仪的技术要求见表 A.10。

表 A.10 倾角仪的技术要求

| 项目  | 技术要求        |
|-----|-------------|
| 量程  | ±30°        |
| 误差  | 动态误差≤±0.5°  |
|     | 静态误差≤±0.05° |
| 分辨率 | 0.05°       |

A.11 振动监测三向加速度传感器的技术要求见表 A.11。

表 A.11 三向加速度传感器的技术要求

| 项目     | 技术要求               |
|--------|--------------------|
| 测量范围   | ±2 g(XYZ 三个方向,可定制) |
| 误差     | ≤1%                |
| 灵敏度    | ≥2.5 V/g(可定制)      |
| 横向灵敏度比 | ≤1%                |
| 频率响应   | 0~80 Hz            |
| 动态范围   | ≥120 dB            |

A.12 应变监测应变计的技术要求见表 A.12。

表 A.12 应变计的技术要求

| 项目   | 技术要求                      |
|------|---------------------------|
| 测量范围 | $\pm 1\ 500\ \mu\epsilon$ |
| 分辨率  | $\leq 0.5\ \mu\epsilon$   |
| 误差   | $\leq \pm 2\ \mu\epsilon$ |

A.13 拉索索力监测加速度传感器(频率法)的技术要求见表 A.13。

表 A.13 加速度传感器(频率法)的技术要求

| 项目   | 技术要求                               |
|------|------------------------------------|
| 测量范围 | $\pm 5\ \text{g}$ (可定制)            |
| 误差   | $\leq 1\%$                         |
| 灵敏度  | $\geq 2.5\ \text{V/g}$ (可定制)       |
| 频率响应 | $0\ \text{Hz} \sim 100\ \text{Hz}$ |
| 动态范围 | $\geq 70\ \text{dB}$               |

A.14 腐蚀监测腐蚀传感器(频率法)的技术要求见表 A.14。

表 A.14 腐蚀传感器(频率法)的技术要求

| 项目   | 技术要求                                    |
|------|---|
| 测量范围 | $0\ \text{mpy} \sim 1\ 000\ \text{mpy}$ |
| 稳定性  | $\pm 0.1\ \text{mpy/年}$                 |
| 误差   | $\pm 1\ \text{mpy}$                     |

A.15 数据采集设备的技术要求见表 A.15。

表 A.15 数据采集设备的技术要求

| 项目   | 技术要求                        |
|------|-----------------------------|
| 测量范围 | $\pm 10\ \text{V}$ (可定制)    |
| 分辨率  | 24 位 AD                     |
| 误差   | $\leq 0.01\%$               |
| 采样频率 | $\geq 100\ \text{Hz}$ (可定制) |
| 动态范围 | $\geq 70\ \text{dB}$        |
| 时间同步 | IEEE 1588、卫星授时系统等           |
| 共模干扰 | 120 dB                      |

附 录 B  
(规范性)

基础设施监测内容和采样频率要求

监测内容和传感采样频率要求见表 B.1。

表 B.1 监测内容和传感器采样频率表

| 监测内容 | 采样频率  |
|------|---|
| 温湿度  | 1/600 Hz  |
| 风荷载  | 机械式风速仪:1 Hz;<br>超声风速仪:10 Hz;<br>风压:10 Hz  |
| 地震荷载 | 触发采集加速度:50 Hz   |
| 交通荷载 | 动态称重设备:触发采集;<br>视频:25 FPS   |
| 变形   | 静位移:1 Hz;<br>动位移:20 Hz;<br>静态裂缝:1/3 600 Hz;<br>动态裂缝:10 Hz;<br>静态倾角:1/30 Hz;<br>动态倾角:10 Hz~50 Hz |
| 振动   | 振动加速度:50 Hz~100 Hz;<br>撞击触发采集加速度:50 Hz;<br>对结构加速度动态反应进行监测时,采样频率宜为需监测到的结构最大振动频率的 2 倍以上           |
| 应变   | 静应变:1/600 Hz;<br>动应变:10 Hz  |
| 拉索索力 | 电磁弹式传感器:1/3 600 Hz;<br>压力传感器:1 Hz;<br>加速度传感器:50 Hz  |
| 腐蚀   | 1/3 600 Hz  |

附 录 C  
(规范性)

不同结构类型的建筑和桥梁基础设施监测项目要求

C.1 房屋建筑基础设施监测项目见表 C.1。

表 C.1 房屋建筑基础设施监测项目

| 结构类型                    | 环境及荷载监测 |     |      | 基础沉降 | 变形监测 |    | 动力响应监测 | 应变监测 |
|-------------------------|---------|-----|------|------|------|----|--------|------|
|                         | 温湿度     | 风荷载 | 地震荷载 |      | 竖向   | 水平 |        |      |
| 高层和高耸结构                 | ▲       | ▲   | ★    | ▲    | ▲    | ★  | ▲      | ▲    |
| 网架结构                    | ▲       | ○   | ○    | ▲    | ★    | ○  | ○      | ▲    |
| 网壳结构                    | ▲       | ○   | ○    | ▲    | ★    | ○  | ▲      | ▲    |
| 悬索结构                    | ▲       | ○   | ○    | ▲    | ★    | ○  | ▲      | ▲    |
| 膜结构                     | ▲       | ○   | ○    | ▲    | ★    | ○  | ○      | ▲    |
| 悬挑结构                    | ▲       | ○   | ○    | ▲    | ★    | ○  | ○      | ▲    |
| 特殊结构                    | ▲       | ○   | ○    | ▲    | ★    | ○  | ○      | ▲    |
| 注：★为应监测项，▲为宜监测项，○为可监测项。 |         |     |      |      |      |    |        |      |

C.2 桥梁基础设施监测项目见表 C.2。

表 C.2 桥梁基础设施监测项目

| 结构类型                            | 环境及荷载监测 |     |      |      | 基础沉降 | 变形监测 |    | 动力响应监测 | 应变监测 | 支座反力和位移 | 索力监测 |
|---------------------------------|---------|-----|------|------|------|------|----|--------|------|---------|------|
|                                 | 温湿度     | 风荷载 | 地震荷载 | 交通荷载 |      | 竖向   | 水平 |        |      |         |      |
| 梁桥                              | ★       | ○   | ▲    | ★    | ▲    | ★    | ○  | ▲      | ★    | ▲       | —    |
| 拱桥                              | ★       | ○   | ▲    | ★    | ▲    | ★    | ▲  | ▲      | ★    | ▲       | —    |
| 刚架桥                             | ★       | ★   | ▲    | ★    | ▲    | ★    | ▲  | ▲      | ★    | ▲       | —    |
| 斜拉桥                             | ★       | ★   | ▲    | ★    | ▲    | ★    | ▲  | ▲      | ★    | ▲       | ★    |
| 悬索桥                             | ★       | ★   | ▲    | ★    | ▲    | ★    | ▲  | ▲      | ★    | ▲       | ★    |
| 注：★为应监测项，▲为宜监测项，○为可监测项，—为不涉及内容。 |         |     |      |      |      |      |    |        |      |         |      |

附录 D  
(规范性)

基础设施监测参考阈值及预警等级

D.1 建筑基础设施弹性层间位移角限值见表 D.1。

表 D.1 弹性层间位移角限值

| 结构类型   | 弹性层间位移角( $\theta_e$ ) |
|--|-----------------------|
| 钢筋混凝土框架  | 1/550                 |
| 钢筋混凝土框架抗震墙、板柱抗震墙、框架-核心筒  | 1/800                 |
| 钢筋混凝土抗震墙、筒中筒   | 1/1 000               |
| 钢筋混凝土框支层   | 1/1 000               |
| 多、高层钢结构  | 1/250                 |
| 注：根据 JGJ 3—2010 高度不大于 150 m 的常规高度高层建筑的整体弯曲变形相对影响较小，层间位移角的限值按不同的结构体系在 1/550~1/1 000 之间分别取值。但当高度超过 150 m 时，弯曲变形产生的侧移有较快增长，所以超过 250 m 高度的建筑，层间位移角限值按 1/500 作为限值。150 m~250 m 之间的高层建筑按线性插值考虑。 |                       |

D.2 建筑基础设施弹塑性层间位移角限值见表 D.2。

表 D.2 弹塑性层间位移角限值

| 结构类型                      | 弹塑性层间位移角( $\theta_e$ ) |
|---------------------------|------------------------|
| 单层钢筋混凝土柱排架                | 1/30                   |
| 钢筋混凝土框架                   | 1/50                   |
| 底部框架砌体房屋中的框架-抗震墙          | 1/100                  |
| 钢筋混凝土框架-抗震墙、板柱-抗震墙、框架-核心筒 | 1/100                  |
| 钢筋混凝土抗震墙、筒中筒              | 1/120                  |
| 多、高层钢结构                   | 1/50                   |

D.3 建筑基础设施建筑地面沉降预警等级见表 D.3。

表 D.3 建筑地面沉降预警等级

| 预警级别 | 评定规则  |
|------|---|
| I    | 不均匀沉降小于 GB 50007—2011 规定的允许沉降差；建筑物无沉降裂缝、变形或位移   |
| II   | 不均匀沉降不大于 GB 50007—2011 规定的允许沉降差；且连续两个月地基沉降量小于每月 2 mm；建筑物的上部结构虽有轻微裂缝，但无发展迹象  |
| III  | 不均匀沉降大于 GB 50007—2011 规定的允许沉降差；或连续两个月地基沉降量大于每个月 2 mm；或建筑物上部结构砌体部分出现宽度大于 5 mm 的沉降裂缝，预制构件连接部位可能出现宽度大于 1 mm 的沉降裂缝，且沉降裂缝短期内无终止趋势          |
| IV   | 不均匀沉降远大于 GB 50007—2011 规定的允许沉降差；连续两个月地基沉降量大于每月 2 mm，且尚有变快趋势；或建筑物上部结构的沉降裂缝发展显著；砌体的裂缝宽度大于 10 mm；预制构件连接部位的裂缝宽度大于 3 mm；现浇结构个别部分也已开始出现沉降裂缝 |

D.4 建筑基础设施混凝土结构顶点的顺风向和横风向风振加速度限值  $a_{lim}$  见表 D.4。

表 D.4 混凝土结构顶点的顺风向和横风向风振加速度限值  $a_{lim}$

| 使用功能  | 混凝土结构 $a_{lim}/(m/s^2)$ | 钢结构 $a_{lim}/(m/s^2)$ |
|-------|-------------------------|-----------------------|
| 住宅、公寓 | 0.15                    | 0.20                  |
| 旅馆、办公 | 0.25                    | 0.28                  |

D.5 建筑基础设施楼盖竖向振动加速度限值见表 D.5。

表 D.5 楼盖竖向振动加速度限值

| 人员工作环境                                    | 峰值加速度限值 $(m/s^2)$ |                |
|---|-------------------|----------------|
|   | 竖向自振频率不大于 2 Hz    | 竖向自振频率不小于 4 Hz |
| 住宅、办公                                     | 0.07              | 0.05           |
| 商场及室内连廊                                   | 0.22              | 0.15           |
| 注：楼盖结构竖向自振频率为 2 Hz~4 Hz 时，峰值加速度限值按线性插值选取。 |                   |                |

D.6 建筑基础设施交通振动对建筑物结构影响在时域范围内的容许振动值见表 D.6。

表 D.6 交通振动对建筑物结构影响在时域范围内的容许振动值

| 建筑物类型                        | 顶层楼面处容许振动速度<br>峰值 $(mm/s)$ | 基础处容许振动速度峰值 $(mm/s)$ |       |        |
|------------------------------|----------------------------|----------------------|-------|--------|
|                              | 1 Hz~100 Hz                | 1 Hz~10 Hz           | 50 Hz | 100 Hz |
| 工业建筑、公共建筑                    | 10.0                       | 5.0                  | 10.0  | 12.5   |
| 居住建筑                         | 5.0                        | 2.0                  | 5.0   | 7.0    |
| 对振动敏感、具有保护价值、<br>不能划归上述两类的建筑 | 2.5                        | 1.0                  | 2.5   | 3.0    |

D.7 建筑基础设施打桩、振冲等基础施工对建筑结构影响在时域范围内的容许振动值见表 D.7。

表 D.7 打桩、振冲等基础施工对建筑结构影响在时域范围内的容许振动值

| 建筑物类型                        | 顶层楼面处容许振动速度<br>峰值 $(mm/s)$ | 基础处容许振动速度峰值 $(mm/s)$ |       |        |
|------------------------------|----------------------------|----------------------|-------|--------|
|                              | 1 Hz~100 Hz                | 1 Hz~10 Hz           | 50 Hz | 100 Hz |
| 工业建筑、公共建筑                    | 12.0                       | 6.0                  | 12.0  | 15.0   |
| 居住建筑                         | 6.0                        | 3.0                  | 6.0   | 8.0    |
| 对振动敏感、具有保护价值、<br>不能划归上述两类的建筑 | 3.0                        | 1.5                  | 3.0   | 4.0    |
| 注：表中容许振动值按频率线性插值确定。          |                            |                      |       |        |

D.8 建筑基础设施强夯施工对建筑结构影响在时域范围内的容许振动值见表 D.8。

表 D.8 强夯施工对建筑结构影响在时域范围内的容许振动值

| 建筑物类型                    | 顶层楼面处容许振动速度峰值/(mm/s) | 基础处容许振动速度峰值/(mm/s) |       |
|--------------------------|----------------------|--------------------|-------|
|                          | 1 Hz~50 Hz           | 1 Hz~10 Hz         | 50 Hz |
| 工业建筑、公共建筑                | 24.0                 | 12.0               | 24.0  |
| 居住建筑                     | 12.0                 | 5.0                | 12.0  |
| 对振动敏感、具有保护价值、不能划归上述两类的建筑 | 6.0                  | 3.0                | 6.0   |
| 注：表中容许振动值按频率线性插值确定。      |                      |                    |       |

D.9 桥梁基础设施桥面结冰温度预警阈值见表 D.9。

表 D.9 桥面结冰温度预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值/℃ |
|------|--------|
| I    | 5      |
| II   | -3     |
| III  | 0      |

D.10 桥梁基础设施钢箱梁、主缆、锚锭散索室内相对湿度预警阈值见表 D.10。

表 D.10 钢箱梁、主缆、锚锭散索室内相对湿度预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值/% |
|------|--------|
| I    | 70     |
| II   | 60     |
| III  | 50     |
| IV   | 40     |

D.11 桥梁基础设施混凝土箱梁内部相对湿度预警阈值见表 D.11。

表 D.11 混凝土箱梁内部相对湿度预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值/% |
|------|--------|
| I    | 50     |
| II   | 40     |
| III  | 25     |

D.12 桥梁基础设施风速预警阈值见表 D.12。

表 D.12 风速预警阈值

| 预警级别  | 预警阈值  | 级别描述 |
|---|---|------|
| I   | $0.84 V_d$ 和 $32.6 \text{ m/s}$ 中较小值,但大于 $25 \text{ m/s}$ | 非常严重 |
| II  | $25 \text{ m/s}$  | 严重   |
| III   | $20.8 \text{ m/s}$  | 较严重  |
| IV  | $17.2 \text{ m/s}$  | 一般严重 |
| 注:表中风速为 $10 \text{ min}$ 平均风速,并以桥面高处风速仪设备采集数据作为判断依据;当采用气象站或桥塔等其他位置处风速仪的风速值作为预警值时,将此表数据按照 JTG/T 3360-01 进行高度修正; $V_d$ 为重现期 100 年的主梁设计基准风速。 |   |      |

D.13 桥梁基础设施地震动水平向加速度预警阈值见表 D.13。

表 D.13 地震动水平向加速度预警阈值

| 预警级别  | 预警阈值                 |
|---|----------------------|
| I   | E2 设计地震动加速度峰值        |
| II  | E1 设计地震动加速度峰值 1.35 倍 |
| III   | E1 设计地震动加速度峰值        |
| IV  | $0.4 \text{ m/s}^2$  |
| 注:桥梁 E1、E2 地震加速度设计值根据各桥“地震安全性评价报告”相关条款或 JTG/T 2231-01—2020 中的相关规定确定,可分别取 50 年超越概率为 10% 与 2% 的加速度峰值。 |                      |

D.14 桥梁基础设施车辆荷载预警阈值见表 D.14。

表 D.14 车辆荷载预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值                                 |
|------|--------------------------------------|
| I    | 车辆总重/轴重 $> 2$ 倍设计车辆荷载                |
| II   | 车辆总重/轴重与设计车辆荷载之比介于 $1.5 \sim 2.0$ 之间 |
| III  | 车辆总重/轴重与设计车辆荷载之比介于 $1.0 \sim 1.5$ 之间 |
| IV   | 车辆总重/轴重超出 GB 1589 中规定的限值             |

D.15 桥梁基础设施墩台不均匀沉降预警阈值见表 D.15。

表 D.15 墩台不均匀沉降预警阈值

| 预警级别  | 预警阈值         |
|---|--------------|
| I   | $\delta$     |
| II  | $0.85\delta$ |
| III   | $0.70\delta$ |
| IV  | $0.55\delta$ |
| 注: $\delta$ 为相邻墩台间的最大允许不均匀沉降值。桥梁墩台间的不均匀沉降值宜取行业标准 JTG 3363—2019 中规定的最大不均匀沉降值和设计要求允许的最大墩台沉降值之间的最小值。 |              |



D.16 桥梁基础设施桥墩位移预警阈值见表 D.16。

表 D.16 桥墩位移预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值   |
|------|--|
| I    | $ Pd_{RMS} - \mu_{Pd}  / \sigma_{Pd} \geq 4.5$ |
| II   | $ Pd_{RMS} - \mu_{Pd}  / \sigma_{Pd} \geq 4.0$ |
| III  | $ Pd_{RMS} - \mu_{Pd}  / \sigma_{Pd} \geq 3.5$ |
| IV   | $ Pd_{RMS} - \mu_{Pd}  / \sigma_{Pd} \geq 3.0$ |

D.17 桥梁基础设施主梁一阶自振频率变化百分比预警阈值见表 D.17。

表 D.17 主梁一阶自振频率变化百分比预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值 |
|------|------|
| I    | 25 % |
| II   | 15 % |
| III  | 10 % |
| IV   | 5 %  |

D.18 桥梁基础设施混凝土主梁斜裂缝预警阈值见表 D.18。

表 D.18 混凝土主梁斜裂缝预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值            |
|------|-----------------|
| I    | 主梁控制截面出现主拉应力斜裂缝 |

D.19 桥梁基础设施混凝土主梁横向及竖向受力裂缝预警阈值见表 D.19。

表 D.19 混凝土主梁横向及竖向受力裂缝预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值        |         |
|------|-------------|---------|
|      | 全预应力及 A 类构件 | B 类构件   |
| I    | 开裂          | 0.15 mm |
| II   | —           | 0.10 mm |
| IV   | —           | 0.05 mm |

D.20 桥梁基础设施混凝土主梁沿预应力钢筋纵向裂缝预警阈值见表 D.20。

表 D.20 混凝土主梁沿预应力钢筋纵向裂缝预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值            |
|------|-----------------|
| I    | 纵向裂缝宽度等于 0.2 mm |
| II   | 纵向裂缝宽度等于 0.1 mm |
| IV   | 出现纵向裂缝          |

D.21 桥梁基础设施钢-混凝土组合主梁顶底板纵向滑移预警阈值见表 D.21。

表 D.21 钢-混凝土组合主梁顶底板纵向滑移预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值   |
|------|--------|
| I    | 0.6 mm |
| II   | 0.4 mm |
| IV   | 0.1 mm |

D.22 桥梁基础设施支座反力预警阈值见表 D.22。

表 D.22 支座反力预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值  |
|------|---|
| I    | $F/F_{\max} - 1 = 0.4$ 或 $F/F_{\max} - 1 = 0.4$ |
| II   | $F/F_{\max} - 1 = 0.3$                          |
| III  | $F/F_{\max} - 1 = 0.2$                          |
| IV   | $F/F_{\max} - 1 = 0.1$                          |

D.23 桥梁基础设施支座变形预警阈值见表 D.23。

表 D.23 支座变形预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值                   |
|------|------------------------|
| I    | $d/d_{\max} - 1 = 1.0$ |
| II   | $d/d_{\max} - 1 = 0.9$ |
| III  | $d/d_{\max} - 1 = 0.8$ |
| IV   | $d/d_{\max} - 1 = 0.7$ |

D.24 桥梁基础设施绝对索力预警阈值见表 D.24。

表 D.24 绝对索力预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值                   |
|------|------------------------|
| I    | $T/T_{\max} - 1 = 0.4$ |
| II   | $T/T_{\max} - 1 = 0.3$ |
| III  | $T/T_{\max} - 1 = 0.2$ |
| IV   | $T/T_{\max} - 1 = 0.1$ |

D.25 桥梁基础设施相对索力预警阈值见表 D.25。

表 D.25 相对索力预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值                |
|------|---------------------|
| I    | $ T_h/T_h^*-1 =0.4$ |
| II   | $ T_h/T_h^*-1 =0.3$ |
| III  | $ T_h/T_h^*-1 =0.2$ |
| IV   | $ T_h/T_h^*-1 =0.1$ |

D.26 桥梁基础设施索过大振动加速度预警阈值见表 D.26。

表 D.26 索过大振动加速度预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值                         |
|------|------------------------------|
| I    | $ R_{Acc}-u_R /\sigma_R=4.5$ |
| II   | $ R_{Acc}-u_R /\sigma_R=4.0$ |
| III  | $ R_{Acc}-u_R /\sigma_R=3.5$ |
| IV   | $ R_{Acc}-u_R /\sigma_R=3.0$ |

D.27 桥梁基础设施扣除风致振动后索加速度变化过大预警阈值见表 D.27。

表 D.27 扣除风致振动后索加速度变化过大预警阈值

| 预警级别 | 预警阈值                               |
|------|------------------------------------|
| I    | $ R_{Acc}^*-u_R^* /\sigma_R^*=4.5$ |
| II   | $ R_{Acc}^*-u_R^* /\sigma_R^*=4.0$ |
| III  | $ R_{Acc}^*-u_R^* /\sigma_R^*=3.5$ |
| IV   | $ R_{Acc}^*-u_R^* /\sigma_R^*=3.0$ |

D.28 隧道和道路基础设施隧道结构变形控制值见表 D.28。

表 D.28 隧道结构变形控制值

| 监测项目                                     | 累计值/mm      | 变化率/(mm/d) |
|--|-------------|------------|
| 隧道结构沉降                                   | 3~10        | 1          |
| 隧道结构上浮                                   | 5           | 1          |
| 隧道结构水平位移                                 | 3~5         | 1          |
| 隧道差异沉降                                   | $0.04\%L_s$ | —          |
| 隧道结构变形缝差异沉降                              | 2~4         | 1          |
| 隧道结构收敛变形值                                | $0.2\%D$    | 3          |
| 注：L <sub>s</sub> 为沿隧道轴向两监测点间距；D 为隧道开挖直径。 |             |            |

D.29 隧道和道路基础设施路基沉降控制值见表 D.29。

表 D.29 路基沉降控制值

| 监测项目 |            | 累计值/mm | 变化速率/(mm/d) |
|------|------------|--------|-------------|
| 路基沉降 | 高速公路、城市主干道 | 10~30  | 3           |
|      | 一般城市道路     | 20~40  | 3           |

D.30 地面基础设施疲劳状态分级见表 D.30。

表 D.30 疲劳状态分级

| D 值       | 构件测点状态 |
|-----------|--------|
| 0~0.05    | 完好状态   |
| 0.05~0.20 | 较好状态   |
| 0.20~0.45 | 中等损伤状态 |
| 0.45~0.80 | 严重损伤状态 |
| >0.80     | 危险状态   |

注：表中给出的疲劳状态未考虑腐蚀对疲劳寿命的影响，当发生腐蚀时应考虑腐蚀对钢构件疲劳寿命的不利影响。

D.31 地面基础设施结构安全状态等级划分与评定依据见表 D.31。

表 D.31 结构安全状态等级划分与评定依据

| 分类  | 总体评定 | 评定依据   |
|-----|------|--|
| 1 类 | 基本完好 | 结构完好，在监测荷载作用下，所有构件的内力、变形均小于设计值，不影响结构安全、舒适性和耐久性             |
| 2 类 | 较好   | 在监测荷载作用下，关键构件良好，部分次要结构的内力、变形大于设计值的 5%，但不影响结构安全、舒适性和耐久性     |
| 3 类 | 中等损伤 | 在监测荷载作用下，部分关键结构内力大于设计值的 5%，较多次要构件内力大于设计值的 10%，影响结构的舒适性和耐久性 |
| 4 类 | 严重损伤 | 在监测荷载作用下，部分关键构件内力达到设计极限值，承载能力下降，影响结构安全性                    |
| 5 类 | 危险   | 在监测荷载作用下，关键构件内力大于设计极限值，出现重大破损，影响结构的稳定性和安全性                 |

## 附录 E

(资料性)

## 安全事故报告表和特殊事件应急管理处置措施

E.1 基础设施安全事故报告表见表 E.1。

表 E.1 基础设施安全事故报告表

报送单位/个人：

|  |  |
|--|--|
| 事故发生时间：_____年____月____日____时____分  |  |
| 事故发生地点：_____市_____区_____路_____号  |  |
| 事故类别： <input type="checkbox"/> 自然灾害 <input type="checkbox"/> 基础设施自身事故 <input type="checkbox"/> 外因诱发 <input type="checkbox"/> 人为破坏<br><input type="checkbox"/> 其他(请描述)_____ |  |
| 事故影响程度： <input type="checkbox"/> 有人员伤亡(伤____人、亡____人) <input type="checkbox"/> 受影响范围(____户)<br><input type="checkbox"/> 其他(请描述)_____                                       |  |
| 事故起因、经过、损失和影响：   |  |
| 已采取的措施及效果：   |  |
| 发展趋势及对策建议：   |  |
| 现场联络方式：(一) 现场指挥员_____联系电话_____   |  |
| (二) 单位联络员_____联系电话_____  |  |

经办人：

联系电话:

审核人：

注 1: 当发现安全事故时, 应迅速将事故信息上报给事发地街道办事处、区/市级应急管理局或区/市级住房和城乡建设局、区/市级交通运输局或其他主管部门。

注 2: 一般地面基础设施安全事故发生后,电话报告时间不超过 30 min、书面报告时间不超过 2 h;特别重大、重大、较大地面基础设施安全事故发生后,电话报告时间不超过 15 min、书面报告时间不超过 40 min。

## E.2 应急管理处置措施见表 E.2。

表 E.2 特殊事件应急管理处置措施表

| 事件类型        | 应急管理和处置措施  |
|-------------|--|
| 强(台)风事件     | a) 当强(台)风风速超限预警时,应提醒封闭基础设施、检查基础设施构件状态和按 7.6 的规定进行基础设施结构安全状态评定。<br>b) 应提供桥梁强(台)风分析报告,报告内容宜包括:强(台)风前、强(台)风全过程、强(台)风后数据分析结果。数据分析宜包括:分析基础设施 10 min 平均风速、平均风向、风攻角、湍流度、阵风因子;分析基础设施振动加速度均方根值、模态参数变化;分析基础设施竖向和横向位移等最大值   |
| 地震事件        | a) 当地震动加速度超限预警时,应提醒封闭基础设施,并对基础设施进行全面检查,按 7.6 的规定进行基础设施结构安全状态评定或采用可靠的考虑土与结构相互作用的非线性结构有限元模型,通过计算分析在地震动作用下基础设施加速度、位移、支座反力、构件内力和应力等结构响应的最大值和残余量,进行基础设施结构安全状态评定。<br>b) 提供地震事件分析报告,报告内容宜包括:震前、震中和震后数据分析结果。数据分析宜包括:分析地震过程中基础设施地表场地和基础处加速度峰值、均方根值、反应谱;分析基础设施竖向和横向位移的最大值和残余位移、关键截面应变最大值和残余应变、索力基准值变化、支座反力的最大值和残余力;分析基础设施振动加速度的峰值和均方根值;分析震前和震后基础设施模态参数变化 |
| 涡振事件        | a) 当涡振振动超限预警时,应提醒持续关注、采取限速或限流、封闭基础设施,按 7.6 的规定进行基础设施结构安全状态评定。<br>b) 应提供涡振事件分析报告,报告内容宜包括:涡振前、涡振事件全过程、涡振后数据分析结果。数据分析宜包括:分析基础设施 10 min 平均风速、平均风向、风攻角、湍流度;分析基础设施 10 min 振动加速度均方根值、模态参数变化;分析涡振全过程持续时间、风况条件、加速度和位移均方根值、振动频率  |
| 船舶/车辆撞击桥梁事件 | a) 当发生船舶/车辆撞击桥梁后,应提醒进行基础设施结构检查,按 7.6 的规定进行基础设施结构状态评定,提供分析报告,报告内容宜包括:船舶/车辆撞击前、撞击全过程、撞击后数据分析结果。<br>b) 数据分析宜包括:对船舶/车辆撞击基础设施全过程视频监测数据进行分析;分析基础设施振动加速度、横向和竖向位移、支座位移、关键截面静应变、索力、支座反力等监测数据的绝对最大值与残余值、模态参数等  |

### 参 考 文 献

- [1] 超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点,中华人民共和国建设部印发,自 2015 年 5 月 2 日起实施。
- [2] 国家突发公共事件总体应急预案,国务院办公厅印发,2006 年 1 月 8 日发布并实施。
- [3] 中华人民共和国突发事件应对法,第十届全国人民代表大会常务委员会第二十九次会议通过,自 2007 年 11 月 1 日起实施。
- [4] 突发事件应急预案管理办法,国务院办公厅印发,自 2013 年 10 月 25 日起实施。
- [5] 城市危险房屋管理规定,中华人民共和国建设部印发,自 2004 年 7 月 20 日起实施。
- [6] 大跨连续刚构桥梁建设及结构健康监测评估技术指南,云南省公路开发投资有限责任公司,2015 年 10 月发布。
- [7] 公路长大桥梁结构健康监测系统试点建设技术指南,交通运输部公路局 2021 年 7 月发布。

---

中国标准出版社