

ICS 35.240.01

CCS P 07

团体标准

T

准

T/TMAC ×××—202X

隧道隧底自动化监测技术规程

Technical specification for automated monitoring of tunnel bottoms

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

已授权的专利证明材料为专利证书复印件或扉页，已公开但尚未授权的专利申请证明材料为专利公开通知书复印件或扉页，未公开的专利申请的证明材料为专利申请号和申请日期。

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中国技术市场协会 发布

中国技术市场协会（TMAC）是科技领域内国家一级社团，以宣传和促进科技创新，推动科技成果转移转化，规范交易行为，维护技术市场运行秩序为使命。为满足市场需要，做大做强科技服务业，依据《中华人民共和国标准化法》《团体标准管理规定》，中国技术市场协会有序开展标准化工作。本团体成员和相关领域组织及个人均可提出制修订 TMAC 标准的建议并参与有关工作。TMAC 标准按《中国技术市场协会团体标准管理办法》《中国技术市场协会团体标准工作程序》制定和管理。TMAC 标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议多数专家、成员的同意，方可予以发布。

在本文件实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料反馈至中国技术市场协会，以便修订时参考。

本文件著作权归中国技术市场协会所有。除了用于国家法律或事先得到中国技术市场协会正式授权或许可外，不许以任何形式复制本文件。第三方机构依据本文件开展认证、评价业务，须向中国技术市场协会提出申请并取得授权。

中国技术市场协会地址：北京市海淀区复兴路甲 23 号城乡华懋大厦 12 层 1217 室

邮政编码：100036 电话：010-68270447 传真：010-68270453

网址：www.ctm.org.cn 电子信箱：136162004@qq.com

目次

前 言	II
引 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 基本规定	4
5 监测要求	5
5.1 一般规定	5
5.2 监测项目	6
5.3 断面布置	6
5.4 测点布置	8
5.5 监测频率	9
5.6 监测系统及传感器技术要求	10
6 监测方法	11
6.1 一般规定	11
6.2 仰拱三向形变量测	11
6.3 应力、应变监控量测	11
6.4 围岩压力、接触压力量测	12
6.5 围岩内部位移量测	12
6.6 水压和水量量测	12
7 门限阈值	12
7.1 一般规定	12
7.2 仰拱三向形变阈值	12
8 数据采集与管理	13
8.1 一般规定	13
8.2 数据采集	13
8.3 数据传输	14
8.4 数据存储	14
9 数据分析与预警	14
9.1 一般规定	14
9.2 数据分析	14
9.3 监测预警	15
10 监测成果	16
附录 A (资料性) 设备建议清单	17
附录 B (资料性) “数据筛选与错时入库” 机制示例	18

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。

本文件由中铁二院贵阳勘察设计研究院有限责任公司提出。

本文件由中国技术市场协会提出并归口。

本文件起草单位：XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX、XXXXX。

本文件主要起草人：XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX、XXX。

引 言

随着隧道工程规模的快速增加，隧底结构出现变形开裂、翻浆冒泥等病害的情况日益严重。一些严重的隧底病害不得不通过拆除重建来整治，代价高昂。新建隧道的隧底病害一旦延续至运营阶段，可能导致铁路降速、中断运营甚至列车脱轨等严重后果。

《铁路隧道监控量测技术规程》将隧底隆起监测列为可选项目，但由于缺乏具体可操作的技术规程，隧底隆起的监测难以在设计和施工中有效实施。《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》未规定隧道隧底病害监测。

本规程提出了适用于隧道隧底结构的自动化监测技术方法，通过连续自动监测和预警体系，及时发现和分析隧底病害的发展，保障隧道施工和运营安全。

本规程主要应用场景包括但不限于：

- a) 施工期预防性监测：对隧道施工过程中不良地质地段等关键段落的隧底实施连续监测，及时发现隧底隆起、开裂等潜在病害隐患，以便及早采取加固措施；
- b) 运营期健康监测：对已有隧道（尤其曾发生过隧底病害或经评估存在风险的隧道）在运营期间进行长期自动化监测，获取隧底变形和受力状态，用于评估结构稳定性，为养护维修提供依据；
- c) 病害整治过程监测：在隧底病害整治施工前、施工中及施工后实施监测，整治前通过监测分析病害成因，优化整治方案；整治过程中监测围岩和支护变化，及时调整施工参数；整治后评估加固效果，为类似工程提供参考。

通过以上应用，可形成隧道隧底病害监测与评估的闭环管理，提高隧道工程安全管理的信息化和科学化水平。

隧道隧底自动化监测技术规程

1 范围

本文件规定了隧道隧底自动化监测的基本规定、监测要求、监测方法、门限值、数据采集与管理、数据分析与预警、监测成果等技术内容。

本文件适用于铁路和公路隧道隧底施工期病害预防性监测和运营期健康监测，以及隧底病害整治施工期间和整治完成后的自动化监测。城市地铁隧道的隧底结构监测可参照本文件执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅所注日期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 15314 精密工程测量规范

GB/T 22239-2019 信息安全技术网络安全等级保护基本要求

GB/T 25742（所有部分） 机器状态监测与诊断数据处理、通信与表示

GB 50026-2020 工程测量标准

GB 50497-2019 建筑基坑工程监测技术标准

GB 55018-2021 工程测量通用规范

GB 50911-2013 城市轨道交通工程监测技术规范

CJJ/T 202-2013 城市轨道交通结构安全保护技术规范

JTG/T 3660-2020 公路隧道施工技术规范

TB 10101-2009 铁路工程测量规范

TB 10121-2024 铁路隧道监控量测技术规程

TB 10181-2017 铁路隧道盾构法技术规程

TB 10314-2021 邻近铁路营业线施工安全监测技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

初期支护 tunnel support

隧道开挖后及时施作的支护结构，一般由喷射混凝土、锚杆、钢筋网、钢架等组成。

[来源：TB 10003-2016，2.1.16]

3.2

二次衬砌 tunnel second lining

支持和维护隧道结构功能长期稳定和耐久性施作的模筑或预制混凝土永久结构物。

[来源：TB 10003-2016，2.1.18，有修改]

3.3

围岩 surrounding rock

隧道周围一定范围内对洞身产生影响的岩土体。

[来源：TB 10003-2016，2.1.5]

3.4

隧道仰拱开挖 tunnel invert excavation

挖出隧道仰拱轮廓，并运走土石。

3.5

自动化监测 continuous monitoring of slope geological hazards

综合利用计算机技术、通信技术和传感技术等构建监测系统，实现监测数据的自动采集、传输、处理、存储、查询、预警和信息反馈等功能的监测方式。

注：本规程中“自动化监测”主要指代隧底结构的自动化连续监测，与传统人工监测相对。

3.6

监控量测 monitoring measurement

隧道施工中对围岩、地表、支护结构的变形和稳定状态，以及周边环境动态进行的经常性观察和量测工作。

3.7

变形监控量测 deformation measurement

对建（构）筑物及其地基或一定范围内岩体及土体的位移、沉降等项目所进行的监控量测工作。

3.8

基准点 basic benchmark

建在稳定的岩层或原土层或构（建）筑物上的经确认固定不动的点。

3.9

工作基点 working reference point

为直接观测变形点而在现场布设的相对稳定的测量控制点。

3.10

测点 object points(survey points)

布设在被观测对象（结构或介质）上或内部的固定标志，用于测量变形、位移、应力或应变等特征量的点。

3.11

隧底观测点 monitoring point

设置在隧道隧底结构上，能够反映隧底（仰拱及底板）变形和受力特征的监测点。

3.12

底鼓 floor heave

隧道开挖后，由围岩性质、围岩应力释放、水压作用 and 支护刚度等因素引起的隧道底部结构向上隆起的现象。

3.13

监测网点 point of monitoring network

安装或布置在监测网中的点位，包括基准点和工作基点。

3.14

仰拱三向位移 three directional displacement of inverted arch

仰拱观测点在垂直方向（高程）和横向、纵向水平方向上的位移变化量组合。通常以相对于基准点的高程变化和相对于初始位置的水平位移来表征。

3.15

结构预防性监测 preventive monitoring of structures

通过有计划、系统性的监测活动，收集相关数据并进行分析，从而及时采取预防措施，避免或减少不良后果发生的过程。

3.16

结构健康监测 structural health monitoring

通过系统性、周期性或持续性的手段，对影响结构健康的相关因素进行监测、数据收集与分析的过程。

3.17

监测控制值 limit value of monitoring

为确保监测对象的安全，对监测对象变形量所设定的监控值。

注：用以判断铁路运营设备设施是否出现变形超限。

3.18

监测报警值 warning value of monitoring

为确保监测对象的安全，对监测对象变形量所设定的警告值。

注：一般为监测控制值的 80%，用以警告铁路运营设备设施变形量已接近监测控制值。

3.19

监测预警值 early warning value of monitoring

为确保监测对象的安全，对监测对象变形量所设定的预先警告值。

注：一般为监测控制值的 60%，用以判断铁路运营设备设施变形是否出现异常。

4 基本规定

- 4.1 隧道隧底自动化监测应符合安全适用、技术先进、经济合理的要求，工程实施宜避免对施工的干扰。
- 4.2 隧道隧底自动化监测分为施工期监测和运营期监测，其中施工期监测包含预防性监测和病害监测，运营期监测包括健康监测和病害监测。
- 4.3 依据工程类别、地质条件和病害严重程度把病害分成三类，病害分类宜由勘察设计单位确定，也可按表 1 给出。

表 1 病害类别划分

病害类别	高速铁路	普速铁路/高速公路	备注
A	a) 仰拱或底板裂损连续长度大于 1m 或裂缝宽度大于 1mm，将影响道床稳定； b) 整体道床变形、错牙、下沉、上拱大于 3mm； c) 月变形速率大于 1mm	a) 仰拱或底板裂损连续长度大于 3m 或裂缝宽度大于 2mm，将影响道床稳定； b) 整体道床变形、错牙、下沉、上拱大于 5mm； c) 月变形速率大于 2mm	
B	a) 仰拱或底板连续裂损长度小于 1 m，或裂缝宽度小于 1mm，继续发展将影响道床稳定； b) 整体道床局部裂损，有发展趋势； c) 上拱或下沉 1mm~3mm	a) 仰拱或底板连续裂损长度小于 3 m 或裂缝宽度小于 2mm，继续发展将影响道床稳定； b) 整体道床局部裂损，有发展趋势； c) 上拱或下沉 3mm~5mm	
C	a) 仰拱或底板断续裂损； b) 整体道床局部裂损	a) 仰拱或底板断续裂损； b) 整体道床局部裂损； c) 上拱或下沉 1mm~3mm	

- 4.4 施工期有长期监测需求的预防性监测段落，应永临结合、统筹兼顾，为运营期健康监测奠定基础。
- 4.5 设计单位应进行隧道隧底自动化监测专项设计，施工单位或管理单位应编制监测实施方案。
- 4.6 隧道隧底自动化监测专项设计应包括以下主要内容：
- 确定监控量测项目及范围。
 - 确定监测等级。
 - 确定测点布置原则、监控量测断面及监控量测频率。
 - 确定监控量测控制值。
 - 确定是否采取永临结合监测。
- 4.7 隧底自动化监测应由具备相关资质和有监测经验的监测单位承担，其中病害监测应由第三方具有测绘乙级以上资质单位承担。
- 4.8 监测设备及传感器功能、性能及可靠性应满足设计要。
- 4.9 在监测期间应对监测设施采取必要的保护和维护措施，定期巡检监测仪器设备并进行系统维护，确保监测系统持续可靠运行。
- 4.10 隧底病害自动化监测工作应与隧道结构养护和加固措施相衔接。
- 4.11 监测获得的信息应及时进行处理、分析，并反馈给相关单位，以便及时采取措施。

5 监测要求

5.1 一般规定

5.1.1 隧底病害自动化监测应达到以下目的：

- a) 确保隧底安全及结构的长期稳定性；
- b) 验证隧底支护结构效果，确认支护参数和施工方法的合理性，为调整支护参数和施工方法提供依据；
- c) 确定施工期找平层施作时间；
- d) 监控隧道隧底结构长期稳定性；
- e) 积累隧底数据，为隧道隧底量测设计与病害整治提供依据。

5.1.2 应根据地质条件和病害分类、防护措施等，综合确定监测范围、监测项目、监测方法、测点布置与监测频率等。

5.1.3 隧道隧底自动化监测实施方案应根据设计要求及工程特点编制，内容应包括：

- a) 监控量测项目；
- b) 设备及元器件；
- c) 量测断面、测点布置、量测频率及控制值；
- d) 数据记录格式；
- e) 数据处理及分析方法；
- f) 信息反馈及对策等；
- g) 人员组织。

5.1.4 隧道隧底自动化监测应采用成熟、可靠、易维护的自动化监测设备和数据通信设备。

5.1.5 依据监测区域的风险等级、重要性程度和历史数据及趋势，分为重点监测区和一般监测区，一般由勘察设计单位确定。

5.1.6 依据病害分类，结合监测对象重要程度，以及划分的重点和一般监测区，病害监测分为三个监测等级。监测分级宜由设计单位确定，也可按表 2 给出。

表 2 监测等级划分

病害类别	高速铁路		普速铁路/高速公路	
	重点监测区	一般监测区	重点监测区	一般监测区
A	一等	二等	二等	三等
B	二等	三等	三等	三等
C	三等	三等	三等	三等

注：预防监测和健康监测一般按三等处理，也可由设计单位确定。

5.2 监测项目

- 5.2.1 隧道隧底自动化监测项目可分为常规监测项目和专项监测项目。常规监测项目应根据现场情况并结合设计、施工等需求选择开展；专项监测项目一般结合病害分类，按专项设计要求开展。
- 5.2.2 预防性监测和健康监测归为常规监测项目，病害监测归为专项监测项目。
- 5.2.3 隧道隧底自动化监测项目一般由设计单位给出，也可按照表 3 选择。

表 3 隧道隧底自动化监测项目一览表

监测项目	施工期				运营期				常用量测仪器
	预防 监测	病害整治			健康 监测	病害整治			
		A 类 病害	B 类 病害	C 类病 害		A 类 病害	B 类 病害	C 类病 害	
仰拱三向位移	√	√	√	√	√	√	√	√	3D 变形监测仪、全自动全站仪、机器视觉
应力应变量测	√	√	△	△	√	√	√	△	钢筋计、应变计
围岩和接触压力量测	√	√	△	△	√	√	√	△	土压力计
水压量测	△	△	△	○	√	√	△	△	压力表、渗压计
围岩内部位移	△	△	△	○	△	√	△	△	单点或多点位移计
水量量测	△	○	○	○	△	√	△	○	三角堰、流量计

√-应做；△-宜做；○-视情做；×-可不做

5.3 断面布置

5.3.1 隧道隧底变形监测断面布置

变形监测断面布置通常依据围岩等级或病害类别确定，见表 4。

表 4 隧道隧底变形监测断面间距

围岩级别	病害类别	断面间距 (m)
VI~IV	A 类病害	5~10
IV	B 类病害	10~30
III	C 类病害	30~50

注 1：预防性监测和健康监测依据围岩等级，病害段监测依据病害类别；
注 2：不良地质和特殊岩土地段应取小值。

5.3.2 应力应变和压力监测断面布置

应力应变和压力监测断面布置通常依据围岩等级或病害类别确定，见表 5。

表 5 隧道隧底应力监测断面间距

围岩级别	病害类别	断面间距 (m)
VI~IV	A 类病害	10~20
IV	B 类病害	20~50
III	C 类病害	50~100

注 1: 预防性监测和健康监测依据围岩等级, 病害段监测依据病害类别;
注 2: 不良地质和特殊岩土地段应取小值。

5.3.3 水压力监测断面布置

水压力监测断面布置通常依据病害类别确定, 见表 6。

表 6 隧道隧底水压力监测断面间距

病害类别	断面间距 (m)
A 类病害	10~20
B 类病害	20~50
C 类病害	50~100

注 1: 预防性监测和健康监测, 结合地质条件, 参照病害段监测断面间距执行;
注 2: 不良地质和特殊岩土地段应取小值。

5.3.4 围岩内部位移

围岩内部位移监测断面布置通常依据病害类别确定, 见表 7。

表 7 隧道隧底变形监测断面间距

病害类别	断面间距 (m)
A 类病害	5~10
B 类病害	10~30
C 类病害	30~50

注 1: 预防性监测和健康监测, 结合地质条件, 参照病害段监测断面间距执行;
注 2: 不良地质和特殊岩土地段应取小值。

5.3.5 水量量测

水量量测断面布置通常依据病害类别确定, 见表 8。

表 8 隧道隧底变形监测断面间距

病害类别	断面间距 (m)
A 类病害	50~100
B 类病害	100~200
C 类病害	洞口处

注 1: 不良地质和特殊岩土地段应取小值。

5.4 测点布置

5.4.1 隧道隧底变形观测点布置

隧道仰拱(底板)施作前后,每个观测断面宜在仰拱(底板)两侧及中间附近布设沉降观测点,如图1所示。

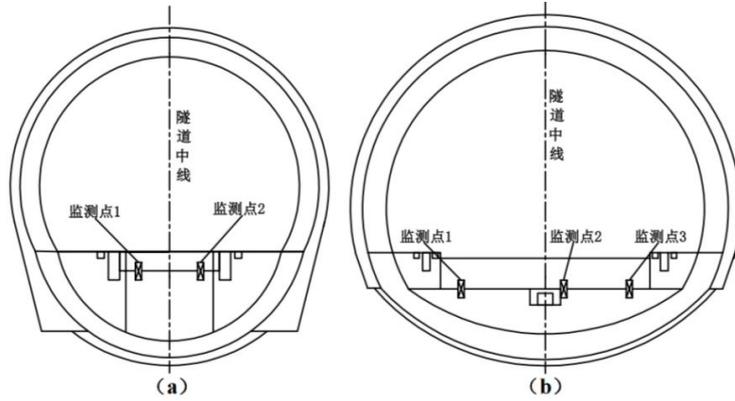


图 1 变形观测点位置布置图

5.4.2 应力应变和压力测点布置

仰拱上的监测点宜选在仰拱中心、左右 1/4 位置等部位,如图2所示。

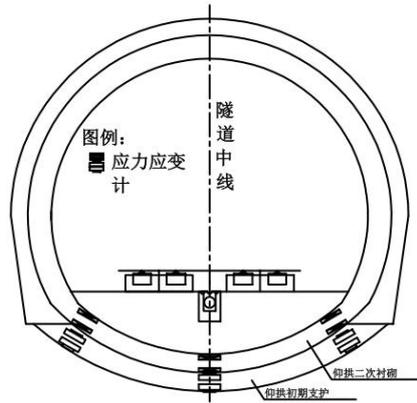


图 2 应力应变和压力测点位置布置图

5.4.3 水压力监测观测点布置

仰拱上的孔隙水压力监测点宜选择仰拱中心、左右 1/4 位置等部位,如图3所示。

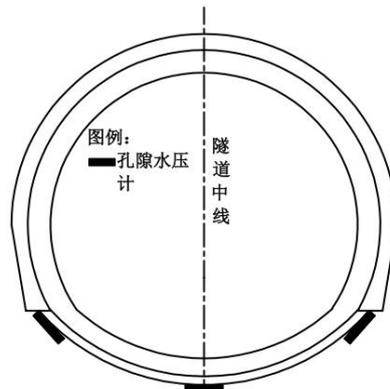


图 3 孔隙水压计测点位置布置图

5.4.4 围岩内部位移

围岩内部位移监测宜选在在仰拱中心、左右 1/4 位置等部位。每个部位单点位移监测点数不少于 5 个，如图 4 所示。

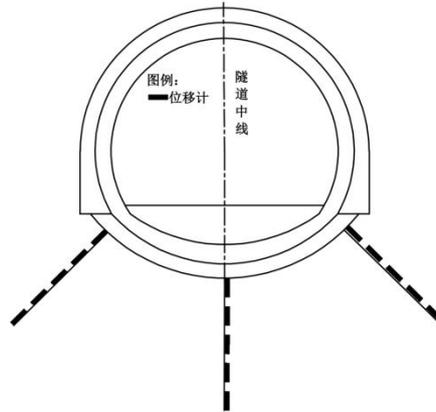


图 4 围岩内部位移测点位置布置图

5.4.5 水量量测观测点布置

隧道排水量监测断面应布设在洞口处，并根据洞内出水情况增设水量监测断面，如图 5 所示。

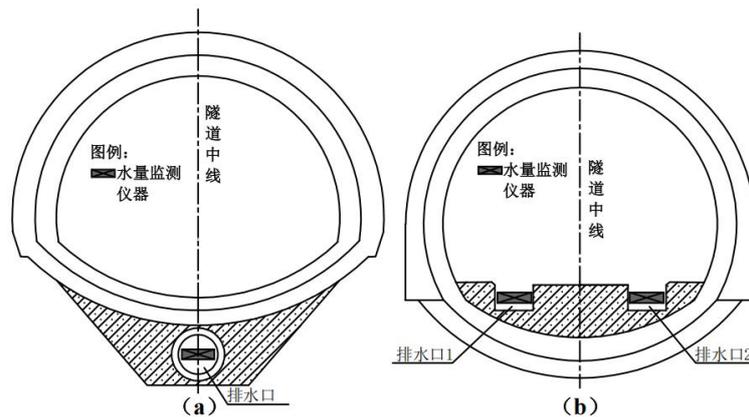


图 5 水量测点位置布置图

5.5 监测频率

5.5.1 监测频率应根据铁路营业线等级、监测等级及工程实施阶段确定，并符合表 9 的规定。

表 9 隧道隧底自动化监测频率一览表

监测项目	施工期				运营期				备注
	预防监测	病害整治			健康监测	病害整治			
		A 类病害	B 类病害	C 类病害		A 类病害	B 类病害	C 类病害	
仰拱三向位移	4 次/d	12 次/d	8 次/d	4 次/d	6 次/d	24 次/d	12 次/d	8 次/d	
应力应变变量测	4 次/d	12 次/d	8 次/d	6 次/d	6 次/d	24 次/d	12 次/d	8 次/d	
围岩和接触压力量	4 次/d	12 次/d	8 次/d	6 次/d	6 次/d	24 次/d	12 次/d	8 次/d	

测									
水压量测	4次/d	12次/d	8次/d	6次/d	6次/d	24次/d	12次/d	8次/d	
围岩内部位移	4次/d	12次/d	8次/d	6次/d	6次/d	24次/d	12次/d	8次/d	
水量量测	4次/d	12次/d	8次/d	6次/d	6次/d	24次/d	12次/d	8次/d	

5.5.2 当出现下列情况之一时，应提高监测频率或对个别点进行实时监测，直至趋势稳定或隐患消除，待风险降低后，方可恢复常规监测频次。并应及时向铁路运输企业报告监测结果，包括：

- a) 监测数据达到预警、报警值。
- b) 监测数据持续变化较大。
- c) 结构裂缝变大或出现明显新增裂缝。
- d) 暴雨等自然灾害引起的其他变形异常情况。
- e) 其他影响铁路运营设备设施使用安全的异常情况。

5.6 监测系统及传感器技术要求

5.6.1 监控量测系统的测试精度应满足设计要求，并应满足表 10 中规定，其它量测项目的测试精度应结合元器件的精度确定。

表 10 量测项目精度

序号	量测项目	测试精度
1	仰拱三向位移	0.5mm~1mm
2	围岩内部位移	0.5mm~1mm

注：由多种传感器能实现的监测项目，按量测项目给出精度要求。

5.6.2 元器件的精度应满足表 11 中的精度要求，元器件的量程应满足设计要求，并具有良好的防震、防水、防腐性能。

表 11 传感器精度

序号	元器件	测试精度
1	压力计	$\leq 0.5\%F.S.$
2	应变计	$\pm 0.1\%F.S.$
3	钢筋计	拉伸 $\leq 0.5\%F.S.$ ，压缩 $\leq 1.0\%F.S.$
4	渗压计	$\leq 0.5\%F.S.$
5	三角堰	$\leq 0.1L/s$

6 监测方法

6.1 一般规定

- 6.1.1 现场量测方法应简单、可靠、经济、实用，在满足监测要求的前提下，应尽可能提升经济性。
- 6.1.2 隧道隧底自动化监测应由施工单位或主管单位负责组织实施，包括实施方案评审。
- 6.1.3 隧道隧底自动化监测应根据已批准的监控量测实施方案进行断面布置、测点埋设、自动量测和数据处理，及时反馈信息，并根据地质条件的变化和施工异常情况，及时调整监控量测计划。
- 6.1.4 自动化监测项目宜采用人工方式获取初始值，便于定期或阈值超限时进行人工校核。

6.2 仰拱三向形变量测

- 6.2.1 变形监控量测可采用接触量测或非接触量测方法。接触测量采用 3D 变形监测仪，非接触测量采用全自动全站仪、机器视觉。
- 6.2.2 隧道洞内变形监测基准点和工作基点应设置在受影响范围外的稳定区域，并与隧道外监控量测基准点进行联测。
- 6.2.3 隧道洞内变形监测项目测点布置及仪器设备除应满足 5.4、5.6 规定外，尚应满足下列要求：
 - a) 监测点可通过钻孔预埋，钻孔预埋件伸入围岩最小长度不小于 20cm，并与围岩连为一体；
 - b) 仰拱填充完成后，测点也可通过取芯办法埋设，埋设的 3D 变形监测仪应能维护和更换；
 - c) 仰拱三向形变测点宜埋设在隧道中线附近，有中心水沟时，应在中心水沟一侧小于 0.5m 范围内分别布设；
 - d) 采用全自动全站仪或机器视觉监测时，监测点应采用带瞄准标志的反射膜片作为监测点标靶，反射膜片粘附在打入围岩的预埋件上，反射膜片埋设时反射面应尽量与全站仪观测视线垂直，可采用自由设站或固定测站进行测量；
 - e) 仰拱三向形变监测点应及时埋设并读取初始数据。

6.3 应力、应变监控量测

- 6.3.1 应力、应变监控量测宜采用振弦式传感器、光纤光栅传感器。
- 6.3.2 振弦式传感器可通过频率计获得频率读数，光纤光栅传感器可通过调制解调仪获得读数，并换算出相应量测值。
- 6.3.3 钢架应力量测时，传感器应成对埋设在钢架的内、外侧，并应符合下列要求：
 - a) 型钢应力或应变量测应把传感器焊接在钢架翼缘内侧；
 - b) 格栅拱架应力量测应将格栅主筋截断并把钢筋计焊接在截断部位。
- 6.3.4 混凝土、喷混凝土内力量测时，传感器固定于混凝土结构内的相应测点位置。

6.4 围岩压力、接触压力量测

6.4.1 围岩压力与接触压力监测可采用振弦式传感器。

6.4.2 传感器埋设应符合下列规定：

- a) 传感器应根据监测要求布设在围岩与初期支护、初期支护与二次衬砌之间。
- b) 传感器埋设时受力面应与所监测的压力方向垂直，并紧密接触。
- c) 传感器的量程宜为设计压力的 2 倍。

6.5 围岩内部位移量测

6.5.1 围岩内部位移监测可采用单点或多点位移计进行。

6.5.2 围岩内部位移监测点应符合下列规定：

- a) 监测钻孔应垂直于仰拱填充面，孔深应满足设计要求，孔口应保持平整，钻孔后应清孔。
- b) 位移计应组装检测合格后再送入孔内，传递杆入孔后应固定安装基座，并应采用水泥砂浆密封孔口和锚固锚头。
- c) 位移计测量头应与传递杆对接牢固，并引出电缆。

6.6 水压和水量量测

6.6.1 水压力监测可采用水压计进行，水量监测可采用三角堰进行。

6.6.2 水压计的埋设应符合下列规定：

- a) 埋设前，水压计透水石应在清水中浸泡饱和，并应排除透水石中的气泡。
- b) 埋设水压计的钻孔应圆直、干净，水压力监测段应回填透水材料。
- c) 水压计的量程宜为静水压力和超孔隙水压力之和的 2 倍。

6.6.3 采用三角堰进行水量监测时应符合下列规定：

- a) 应根据水流速度和水量大小在隧道内设置一条平流水道与出水口相接，在水道尽头固定薄壁三角堰。
- b) 平流水道两侧保持平行，顶部平齐，沟壁和沟底平整。
- c) 三角堰应竖直放置，顶部与沟顶平齐，使水流方向与三角堰竖直面垂直。

7 门限阈值

7.1 一般规定

7.1.1 隧道隧底自动化监测的门限阈值分为预警值、报警值和控制值。

7.1.2 控制值一般由勘察设计单位根据工程地质条件、重要程度等给出。

7.1.3 工程监测实施中可结合业务场景、数据特征和风险容忍度，经有关部分审定调整门限阈值。

7.1.4 应力、应变监控量测，围岩压力、接触压力量测的控制值一般取设计值的 80%。

7.1.5 水压力和流量量测的控制值一般取设计值的 85%

7.2 仰拱三向形变阈值

7.2.1 铁路隧道施工期预防性监测仰拱沉降不应大于 15mm；高速公路隧道仰拱沉降应大于 $L/300$ ，其中 L 为隧底宽度。

7.2.2 铁路运营隧道仰拱监控监测和病害监测测预警值、报警值和控制值可按表 12 确定。公路隧道仰拱监控监测和病害监测测预警值、报警值和控制值，一般由专项设计给出，也可参照表 12 确定。

表 12 仰拱位移变形监测预警值、报警值和控制值

检测项目		累计量预警值	累计量报警值	控制值
高速铁路	仰拱竖向位移	±1.2mm	±1.6mm	±2mm
	仰拱水平位移	±1.2mm	±1.6mm	±2mm
普速铁路	仰拱竖向位移	+1.8mm	+2.4mm	+3mm
		-4.8mm	-6.4mm	-8mm
	仰拱水平位移	±4.2mm	±5.6mm	±7mm

8 数据采集与管理

8.1 一般规定

- 8.1.1 数据采集与传输应确保各监测量的数据真实准确、不失真，满足监测精度要求。采集系统应能自动识别异常或错误数据，并具备一定的数据校正、补偿功能。
- 8.1.2 数据存储应具有完备的网络安全防护、自动备份等功能，应符合 GB/T 22239 的要求，以保障监测数据的机密性、完整性和可用性。
- 8.1.3 数据采集设备（如数据记录仪、数据采集站等）应考虑与后续数据传输和管理平台的接口兼容性。不同厂商或不同类型设备采集的数据格式应规范统一，必要时通过中间件或转换程序进行标准化处理，保证数据可融合共享。
- 8.1.4 监测系统的软件平台宜符合开放式状态监测体系结构的要求，实现数据采集、处理、通信、显示等模块的标准化与模块化设计。可参考 GB/T25742（所有部分）规划系统架构，使不同监测子系统能够无缝集成，数据流转高效可靠。

8.2 数据采集

- 8.2.1 数据采集应能真实反映监测对象的变化规律，具有良好的连续性和周期性，并避免系统性偏差。各传感器采集的时间间隔和触发条件应根据监测对象特性合理设定，确保重要变化被及时捕获。
- 8.2.2 对于同类型的监测量，各监测点的数据采集时间同步误差宜小于 0.1ms；对于不同类型监测量（如应力与变形）的数据采集时间同步误差宜小于 1ms。监测系统应具备时钟同步机制（如 GPS 校时或网络对时），保证多传感器数据的时间一致性。
- 8.2.3 数据采集站（节点）应根据监测范围和信号传输距离合理布局。各站需满足时间同步精度要求。采集站位置应便于维护与信号汇总，并具备防潮、防尘、防雷等保护措施。
- 8.2.4 数据采集系统应具备一定的本地存储缓冲能力。当通信中断或服务器故障时，前端采集设备应能临时存储一定时段的监测数据，待通信恢复后再自动补传，避免数据丢失。

8.3 数据传输

- 8.3.1 监测系统的数据传输应确保系统各模块间的有效集成，保证数据和指令在各模块间传递的高效、可靠和实时。数据传输过程应有错误校验和确认机制，防止数据丢包或重复。
- 8.3.2 数据传输系统应具备多种数据接入和交换能力，能够同时处理有线和无线网络传输的数据，并支持不同协议的数据接口，以便与其他监测或信息系统互联。
- 8.3.3 采用电信号传输时，传感器信号电缆应尽量使用屏蔽双绞线或同轴电缆，以减小电磁干扰。传感器前置放大器与数据采集设备之间的信号电缆长度宜小于 150m，如超过 150m 应加设中继放大器或信号调理装置，以确保信号传输质量。
- 8.3.4 采用无线传输时，应评估隧道环境对无线信号的影响，合理布置信号中继或天线。在有条件下可铺设漏缆（泄漏同轴电缆）增强隧道内无线信号覆盖。无线通信协议应采取必要的加密和认证措施，保障数据传输安全。

8.4 数据存储

- 8.4.1 数据存储模块应能实现监测数据的自动归档、快速调阅和报告自动生成等功能。监测软件应提供数据库管理界面，方便查询历史数据、导出数据报表和生成图表。
- 8.4.2 应定期对原始监测数据进行异地备份，关键监测数据宜实时双机冗余保存。后处理生成的数据应至少保存 3 个月的在线历史记录，统计分析得到的结果数据应分类专项存储，重要数据长期保存。
- 8.4.3 监测数据及相关图像资料应具有可追溯性。系统应保存每条数据的采集时间、采集设备 ID、采集人员（如适用）等元数据，以备倒查。对数据的任何修改、处理操作也应留有日志记录。
- 8.4.4 对于监测产生的海量数据，应建立数据筛选与分级存储机制。一般情况下，数据库可只保存周期性的关键数据点，以降低存储压力；当监测值发生突变或达到预警阈值时，系统应自动保存高频数据详细记录，确保关键过程数据完整。有关数据筛选与错时入库的机制示例见附录 B。
- 8.4.5 所有监测数据和报表资料应纳入工程档案管理，实现数字化存储和备份。监测数据库应设置适当的访问权限和安全措施，确保数据在整个生命周期内的安全和有效。

9 数据分析与预警

9.1 一般规定

- 9.1.1 数据分析工作包括对监测数据的处理、判别，进行安全预警以及对结构状态的评估等内容。数据分析应贯穿监测全过程，根据需要实时或定期进行。
- 9.1.2 监测预警阈值宜根据隧道隧底的风险等级和允许变形值来设定。可按 7 门限阈值给出。也可通过对初始监测数据的统计分析来动态调整合理的阈值。
- 9.1.3 预警判别应综合考虑巡查发现情况、监测数据变化以及隧道隧底的地质条件等因素进行。发现明显的灾害前兆迹象时（如隧底出现突发快速隆起、渗水翻浆加剧等），应立即发布临灾预警，并通知相关单位采取应急措施。
- 9.1.4 当监测数据达到预警阈值或出现异常趋势时，监测单位应在第一时间向隧道施工或运营管理部门报告，并建议进一步的现场检查或加固处置。对处于报警状态的监测点应加密采集频率，并持续跟踪其变化，直至风险降低。

9.2 数据分析

- 9.2.1 数据分析应结合监测所得的变形、应力、水位、围岩内部位移、流量等数据以及自然环境、施工工况等背景信息，对隧底结构状态的发展趋势进行评估和预测。分析应指出隧底变形或应力的演化规律以及当前所处的发展阶段（稳定、逐渐发展、迅速发展等）。
- 9.2.2 数据分析宜围绕关键指标进行。可采用单参数分析（如仅分析沉降随时间变化曲线），也可进行多参数综合分析（如联表分析沉降与地下水位、应力的关系）。通过多指标联动分析，可提高对复杂致灾机制的识别精度。
- 9.2.3 数据处理应能实现包括预处理和后处理在内的完整功能。数据预处理功能至少应包括：过滤干扰数据、去除噪声、截取有效时间段以及异常值识别与剔除等，以保证进入分析阶段的数据可靠有效；数据后处理方式应根据专项分析要求确定，例如进行拟合回归分析、频谱分析、相关性分析或趋势外推等。
- 9.2.4 当发现监测数据中存在异常波动或突跳时，应结合现场情况分析其原因。若为传感器或系统故障，应及时更换设备或修正数据；若为真实结构响应，则要判断其可能机制（如是否因施工扰动、列车冲击、暴雨渗水等引起），并评估其对隧底稳定性的影响。
- 9.2.5 监测数据分析结果应包含对隧底结构当前安全状态的评价。可采用分级评定的方法，将隧底稳定状态划分为正常、异常、危险三个等级，分别对应监测值在安全范围内、接近或超过阈值、远超阈值的情形。分析报告中应对此给出明确判断结论。

9.3 监测预警

- 9.3.1 预警判据应综合考虑隧底结构的变形量及速率、内部应力变化、地下水位升降、施工或运营工况，以及临灾前兆特征等因素共同确定。宜针对不同的监测参数分别设定阈值，并建立多参数联合预警准则，提高预警的可靠性。
- 9.3.2 预警级别可根据隧底病害的发展趋势和可能造成危害程度划分为不同等级。通常将预警从高到低划分为一级、二级、三级和四级，对应红色、橙色、黄色和蓝色预警信号。各级别的判定条件及建议的应急响应措施应按表 13 规定。

表 13 预警级别划分及应急响应措施

预警级别	颜色标示	风险程度等级	应急响应措施
一级	红色	隧底发生严重病害的可能性极大，监测到明显的临灾前兆特征（如隧底变形速率急剧加大、轨道或路面出现显著隆起、多个测点应力持续急升等）	此时应立即采取最高等级的应急响应措施，包括停止隧道内一切施工或运营活动，迅速撤离人员，并加密监测频次，加强现场监控。必要时启动应急预案，组织抢险加固
二级	橙色	隧底病害发生的可能性大，出现一定的宏观前兆特征（如隧底局部变形明显加速、渗水冒泥量显著增大等）	应采取较高级别的应急响应措施，如限制隧道内施工强度或降低列车运行速度，安排应急队伍待命。同时加强巡查和监测，密切关注病害发展变化

三级	黄色	隧底病害发生的可能性较大，已有明显的变形迹象但尚处于可控范围（如隧底沉降接近报警值但变化速率不高）	应采取预防性措施，如加密监测频次，现场安排专人盯控，做好应急抢险准备。根据情况可适当减少现场作业，防止局部问题恶化
四级	蓝色	隧底病害发生的可能性小，仅有轻微变形特征或初始异常	此级别主要为提醒注意，通常不需要采取紧急措施，但应加强日常巡视检查和后续监测。保持警惕，防止细小变化演变为严重问题

- 9.3.3 预警信息应至少包括工程名称、预警项目、测点编号、当前监测值及其变化速率、预警阈值、预警级别、预警时间等内容，并应明确建议采取的措施。预警信息一经确认应立即通过监测系统平台和通信手段通知相关单位和人员。对于一级和二级预警，应同时以电话或现场警报等方式进行重点通知，确保及时响应。
- 9.3.4 进入预警状态后，监测单位应及时调整监测方案：提高监测频率、增加监测项目或扩展监测范围，以进一步查明险情动态。同时应将预警期间的监测数据和现场处置情况详细记录，预警解除后编制专门报告备案。

10 监测成果

- 10.1 监测成果应包括专项报告、阶段报告和总结报告等不同层级的文档资料。
- 10.2 专项报告（针对特定事件或时段的专题分析报告）应包括但不限于以下内容：
- 特殊事件发生前后的工程概况、气象水文情况和周边环境状况简述；
 - 相关监测点在事件前后的单次变化量、变化速率及累计变化量，可用表格或曲线图形式表示关键数据变化过程；
 - 对监测数据进行分析判断，给出正常、异常或危险的结论性评价；
 - 对于达到或超过预警阈值的监测点，应在报告中予以醒目标识，通过多种形式发出预警信息，并附加必要的原因分析和处置建议。
- 10.3 阶段报告（按阶段或周期性的定期报告，如月报、季报或施工阶段报告）应包括但不限于以下内容：
- 监测阶段内对应的工程进展情况、气象及周边环境概况；
 - 本阶段开展的监测项目和测点布置示意图；
 - 各项监测数据的整理统计结果及监测期间的过程曲线（如沉降-时间曲线、应力-时间曲线等）；
 - 各监测项目数据的变化趋势分析、评价及对未来发展的预测判断；
 - 阶段性监测结论和建议（如是否需要调整监测方案，是否存在需警惕的异常等）。
- 10.4 总结报告（整个监测工作的总报告，如竣工验收监测报告）应包括但不限于以下内容：
- 工程概况、监测工作依据、监测目的和范围；
 - 监测点布置方案、所采用的监测设备和监测方法说明；
 - 整个监测期间的成果数据分析，含隧底变形和应力的演变规律、发生的异常情况及其原因分析；
 - 监测工作的总体结论和对隧底结构安全状态的评价，提出后续维护建议；
 - 附图及附表（包括监测点布置图、主要监测曲线图、历史数据表格、监测设备检定证书复印件等档案资料）。各级监测报告的格式和详细内容应符合相关行业标准或业主要求，并在监测实施方案中明确规定。所有监测成果资料应及时提交相关单位审核存档，并作为今后隧道养护与维修的重要参考依据。

附录 A
(资料性)
设备建议清单

A.1 监测设备

A.1.1 变形监测设备

A.1.1.1 3D 变形监测仪

3D 变形监测仪由压差式静力水准仪、双轴倾斜仪和震动传感器集成，用于监测隧底的沉降与倾斜一体化监测，可计算观测点三向变形。

A.1.1.2 深层位移监测

多点位移计和单点位移计等，为便于工程实施和提高传感器存活率，多传感器测点可采用单点组合方式实施。

A.1.1.3 应力监测设备

振弦式土压力计、振弦式钢筋计和混凝土应变计等，用于监测仰拱填充层与围岩接触压力、支护结构内部应力等。必要时可采用光纤光栅传感器作为补充，以实现长距离多点的应力监测。

A.1.2 地下水监测设备

振弦式孔隙水压力计、地下水位计，用于监测隧底及周边地下水位和孔隙水压力变化。通常包括观测孔管、渗压传感器和通气电缆等部件，需做好封孔和保护。

A.1.3 水量监测设备

A.2 数据采集与传输设备

多通道数据采集仪、数据记录器、工业计算机、通信接口模块（以太网/光纤/4G/5G 模块）等，用于接收传感器信号、存储数据并向监控中心传输。设备应具有良好的环境适应性和供电保障（如不间断电源、太阳能供电装置等）。

A.3 监控中心系统

包括监测服务器、监控软件平台、数据库及客户端工作站等。用于接收和存储前端传来的监测数据，进行实时显示、分析处理和预警管理，可配置大屏幕显示或移动终端访问。

以上设备在实际应用中应根据工程需要进行选型和集成。

附录 B

(资料性)

“数据筛选与错时入库”机制示例

B.1 为了减轻海量监测数据对系统存储和处理的压力，并避免多个测点数据同时写入造成的冲突，可采用“数据筛选与错时入库”机制。其主要原理与流程如下：

- a) 前端连续采集：各监测传感器按照设定采样间隔进行高频率数据采集（例如每 10 分钟采集一次）。实时采集的数据首先缓存在前端采集设备或边缘计算单元中。缓存中可存储最近若干小时的大量原始数据点。
- b) 定期筛选上传：后端数据库无须存储全部高频原始数据，而是由系统按预定规则对缓存数据进行筛选，降低入库频率。筛选规则可按时间间隔或变化幅度设定。例如，可设定每隔 30 分钟从缓存中选取该时刻的监测值上传数据库，平时仅记录整点或每半小时的读数。当监测数据变化平稳时，此举可大幅减少入库数据量；而当监测值突变或达到预警条件时，系统可自动放宽筛选策略（缩短筛选间隔或将所有瞬时数据入库），以确保关键数据不被遗漏。
- c) 错时分散入库：若同时有多个监测点或多种类型传感器同步采集数据，为避免它们的数据在同一时刻集中入库造成数据库写入压力峰值，可为不同传感器设定错开的上传时间。例如，不同测点的数据上传时间相隔几分钟，或不同类型数据采用错时偏移。这种“错峰”策略可确保即使各传感器前端采集同步进行，但数据入库过程是分散错开的，从而降低数据库瞬时负荷。错时规则可通过软件调度实现（如为每个采集通道设置不同的上传时间偏移）。
- d) 数据完整性保障：采用筛选与错时上传机制时，必须确保监测采集频率高于数据入库频率。即数据采集间隔应小于数据筛选上传的间隔，否则在一个监测周期内可能出现数据空窗。因此应根据预警阈值、变形速率等因素，合理选择采样频率与入库频率之比。此外，在后台数据库中宜保留一定数量的原始高频数据用于异常核查，必要时可随时调整筛选策略重新补录历史数据。
- e) 阈值触发与人工干预：数据筛选上传模块应提供阈值触发功能：当某监测值超出预警阈值或发生异常剧烈变化时，系统可自动暂停筛选（即改为所有数据都实时入库），并立即上传异常数据触发预警。同时，系统界面应允许管理人员手动调整筛选参数，如临时提高某区段的数据上传频率，以应对突发状况。所有筛选和上传策略的调整操作应记录日志，确保数据处理过程可追溯。

B.2 通过上述机制，可实现连续监测与高效存储的平衡：既保留了监测数据的连续性，又避免了海量冗余数据给系统带来的负担。同时确保在关键时刻捕获完整数据，为及时预警和科学决策提供支撑。