

团 体 标 准

T/CCTAS XXXX—XXXX

公路隧道结构变形分布式光纤传感监测 技术指南

technical guidelines for monitoring highway tunnels structural
deformation using distributed optical fiber sensing

（征求意见稿）

（本草案完成时间：2025 年 5 月）

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。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国交通运输协会 发布

目 次

1 范围	错误! 未定义书签。
2 规范性引用文件	错误! 未定义书签。
3 术语和定义	1
4 基本规定	1
5 监测方法	2
5.1 裂缝扩展	2
5.2 接缝变位	3
5.3 差异沉降	4
5.4 衬砌表面变形	5
6 监测设备	6
6.1 一般规定	6
6.2 传感光纤	6
6.3 解调仪	7
7 设备安装	7
7.1 一般规定	7
7.2 传感光纤	7
7.3 解调仪	8
7.4 通信及供电	8
7.5 设备调试	8
8 数据处理分析	8
8.1 数据预处理	8
8.2 数据分析	9
附录 A （资料性）分布式传感光纤安装工艺要求	11
附录 B （资料性）分布式光纤传感调试数据记录表示例	12
附录 C （资料性）衬砌表面变形场数据处理与分析示例	15

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。

本文件由中国交通运输协会新技术促进分会提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

公路隧道结构变形分布式光纤传感监测技术指南

1 范围

本文件提出了采用分布式光纤传感技术监测公路隧道结构变形的的方法，以及设备选型、设备安装和数据处理与分析的相关建议。

本文件适用于公路隧道衬砌结构变形监测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

JTG H12	公路隧道养护规范
GB 4208	外壳防护等级(IP代码)
GB 50343	建筑物电子信息系统防雷技术规范
JTG D70/2	公路隧道设计规范 第二册交通工程与附属设施

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

准分布式光纤传感 quasi-distributed optic fiber sensing

基于弱光纤光栅和光时域反射原理在长距离传导光纤上串接大量光栅传感单元形成一维空间传感阵列的光纤传感技术。

3.2

全分布式光纤传感 distributed optic fiber sensing

基于布里渊散射原理在一维空间实现超长距离连续感测和传导的光纤传感技术。

4 基本规定

4.1 分布式光纤传感技术可用于监测公路隧道衬砌结构的裂缝扩展、接缝变位、差异沉降和表面变形场，监测范围宜符合 JTG H12 中的规定。（

4.2 采用分布式光纤传感技术监测隧道衬砌结构变形时，应根据监测需求选择准分布式传感光纤或全分布传感光纤及其对应的解调仪。两种传感光纤的技术特点和原理见表 1。

表1 分布式光纤传感技术特点和原理

类型	技术特点	技术原理
----	------	------

准分布式光纤传感	空间分辨率相对较低，变形测量的灵敏度和精度较高。	将弱光纤光栅与光时域反射技术相结合，通过一根传导光纤将多个长标距光纤光栅传感器串接起来，组成传感单元阵列。
全分布式光纤传感	空间分辨率高，变形测量的灵敏度和精度相对较低。	基于布里渊散射技术实现对被测物一维空间的长距离连续感测

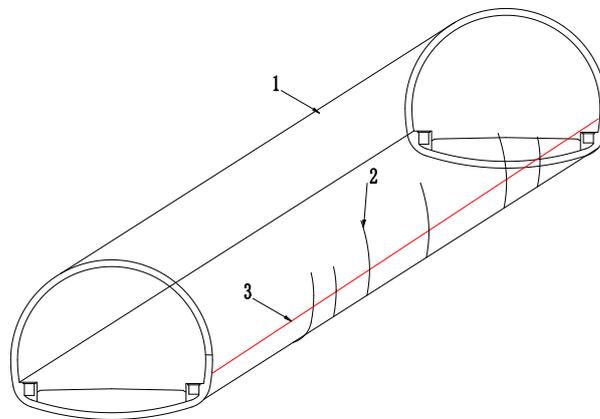
4.3 当监测测点的空间分辨率要求优于 0.5m 时，宜采用全分布式光纤传感技术；当监测测点的空间分辨率要求低于 0.5m 时，宜采用准分布式光纤传感技术。

5 监测方法

5.1 裂缝扩展

5.1.1 分布式光纤传感技术可用于监测公路隧道衬砌结构表面纵向、环向和斜向裂缝宽度的扩展增量。

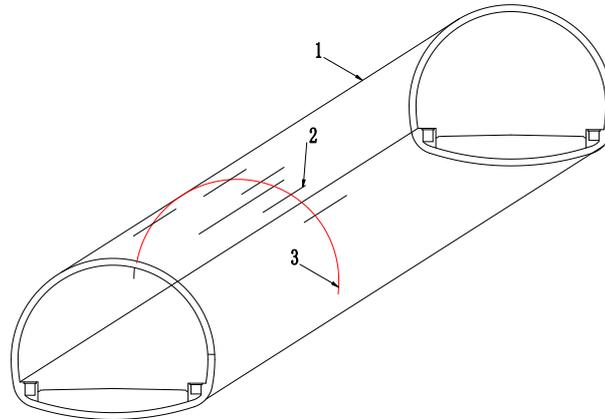
5.1.2 监测环向裂缝时，宜将分布式光纤测线在隧道衬砌表面纵向排布，测线宜尽量垂直跨越裂缝最宽处或其附近。测线布设方法见图 1。



标引序号说明：1-隧道衬砌结构；2-隧道衬砌环向裂缝；3-分布式光纤测线

图 1 环向裂缝的测线布设示意图

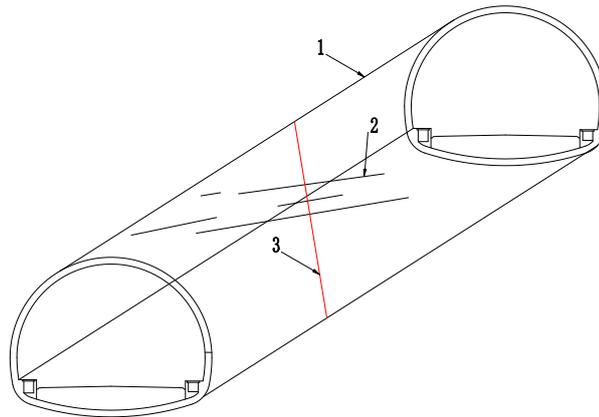
5.1.3 监测纵向裂缝时，宜将分布式光纤测线在隧道衬砌表面环向排布，测线宜尽量垂直跨越裂缝最宽处或其附近。测线布设方法见图 2。



1-隧道衬砌结构；2-隧道衬砌纵向裂缝；3-分布式光纤测线

图2 纵向裂缝的测线布设示意图

5.1.4 监测斜向裂缝时，宜将分布式光纤测线在隧道衬砌表面斜向排布，测线宜尽量垂直跨越裂缝最宽处或其附近。测线布设方法见图3。



1-隧道衬砌结构；2-隧道衬砌斜向裂缝；3-分布式光纤测线

图3 斜向裂缝的测线布设示意图

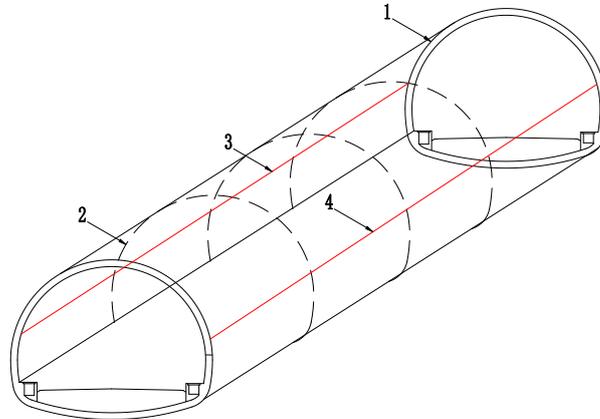
5.1.5 监测前应记录待测衬砌裂缝与测线相交的各测点桩号和部位、测点处裂缝初始宽度和深度、裂缝初始长度及延展方向等信息。

5.1.6 监测过程中宜同步采集测点附近的衬砌结构温度或环境温度数据。

5.2 接缝变位

5.2.1 分布式光纤传感技术可用于监测衬砌管片和管节缝、施工缝、以及变形缝的扩展及错台等变位情况。

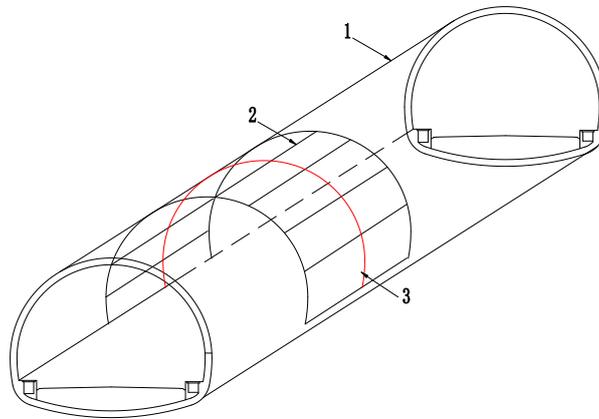
5.2.2 监测公路隧道环向接缝变位时，宜将测线纵向水平布设于隧道两侧拱腰位置。测线布设方法见图4。



1-隧道衬砌结构；2-隧道衬砌环向接缝；3-左侧分布式光纤测线；4-右侧分布式光纤测线

图4 环向接缝变位的测线布设示意图

5.2.3 监测公路隧道衬砌管片间纵向接缝的变位时，宜将测线环向往复环绕，测线与接缝尽量保持垂直。测线布设方法见图5。



1-隧道衬砌结构；2-隧道衬砌纵向施工缝；3-分布式光纤测线

图5 纵向接缝变位的测线布设示意图

5.2.4 监测前宜记录接缝与测线相交的各测点桩号和部位、以及接缝的初始宽度和错台高差。

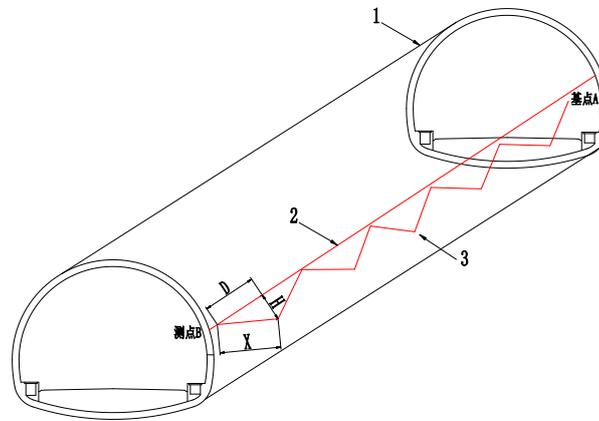
5.2.5 监测过程中宜同步采集测点附近的衬砌结构温度或环境温度数据。

5.3 差异沉降

5.3.1 采用分布式传感光纤监测隧道结构纵向差异沉降的基点宜设置在隧道衬砌结构相对稳定段落。

5.3.2 宜将传感光纤沿隧道边墙按锯齿状排布，并在相邻位置沿隧道纵向布设一条水平测线用以补偿

横向变形。测线布设方法见图 6。



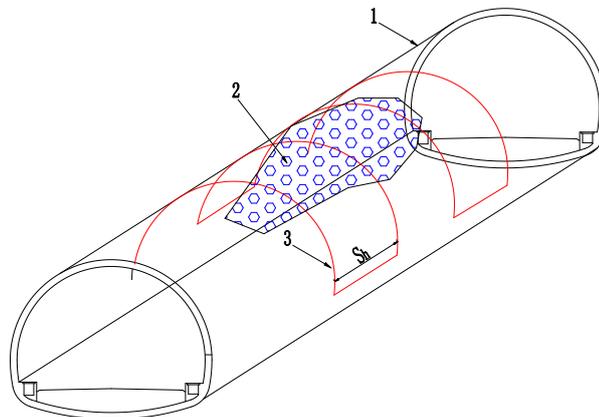
1-隧道衬砌结构；2-横向位移补偿传感光纤；3-锯齿状排布传感光纤

图 6 隧道结构纵向差异沉降监测示意图

5.3.3 监测过程中宜同步采集沉降风险段落的衬砌结构温度或环境温度数据。

5.4 衬砌表面变形

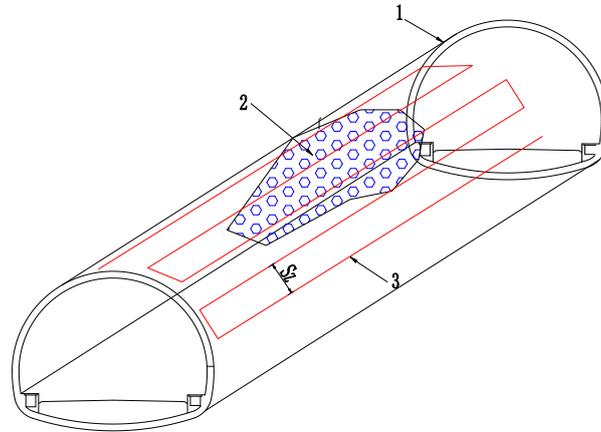
5.4.1 监测以纵向开裂为主的隧道衬砌表面变形场时，宜将分布式光纤在隧道拱顶衬砌表面往复环绕布置以形成一个环向测点阵列，各环向测线的间距 S_h 不宜大于 3m。测线布设方法见图 7。



1-隧道衬砌结构；2-隧道开裂掉块风险区域；3-分布式传感光纤环向环绕

图 7 衬砌表面应变场监测环向阵列的测线布设示意图

5.4.2 监测以环向开裂为主的隧道衬砌表面变形场时，宜将分布式光纤在隧道拱顶衬砌表面纵向往复布置以形成一个纵向测点阵列，各纵向测线的间距 S_z 不宜大于 3m。测线布设方法见图 8。



1-隧道衬砌结构；2-隧道开裂掉块风险区域；3-分布式传感光纤纵向环绕

图8 衬砌表面应变场监测测线纵向往复布设示意图

5.4.3 测点阵列的布设范围宜覆盖行车道正上方的拱顶区域，且由开裂掉块的高风险区段向低风险区段纵向延伸，延伸距离不少于10m。

6 监测设备

6.1 一般规定

6.1.1 公路隧道结构变形监测的分布式光纤传感系统主要由传感光纤、解调仪、及其配套的通信和供电设备组成。

6.1.2 传感光纤的使用寿命不宜低于15年，解调仪的使用寿命不宜低于5年。

6.2 传感光纤

6.2.1 准分布式传感光纤的主要技术参数要求见表2。

表2 准分布式传感光纤的技术要求

序号	设备参数	技术要求
1	分布形式	单个长标距传感器串联
2	量程范围	$\geq 20000\mu\epsilon$
3	峰值反射	$\leq -20\text{ dB}$
4	标距长度	$\leq 2000\text{mm}$
5	平均光损值	$\leq 0.3\text{dB/km}@1550\text{nm}$
6	工作温度区间	优于 $-30^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$
7	防护等级	优于IP65

6.2.2 全分布式传感光纤的主要技术参数要求见表3。

表3 全分布式传感光纤的技术要求

序号	设备参数	技术要求
1	分布形式	测点沿测线连续分布

2	量程范围	$\geq 20000\mu\epsilon$
3	平均光损值	$\leq 0.3\text{dB/km}@1550\text{nm}$
4	工作温度区间	优于 $-30^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$
5	防护等级	优于IP65

6.3 解调仪

6.3.1 准分布式光纤传感解调仪的主要技术参数见表 4。

表4 准分布式光纤传感解调仪的技术要求

序号	设备参数	技术要求
1	波长范围	包含 $1528\text{nm}\sim 1568\text{nm}$
2	分辨率	$\leq 1\mu\epsilon$
3	精度	$\leq 2\mu\epsilon$
4	动态范围	$\geq 10\text{dB}$
5	最大解调频率	优于 $1\text{HZ}@1\text{CH}$
6	工作温度	优于 $-20^{\circ}\text{C}\sim 55^{\circ}\text{C}$

6.3.2 全分布式解调仪的主要技术参数见表 5。

表5 全分布式光纤传感解调仪的技术要求

序号	设备参数	技术要求
1	频率扫描范围	$9.0\sim 13.0\text{GHz}$
2	采样分辨率	优于 0.1m
3	分辨率	$\leq 2\mu\epsilon$
4	精度	$\leq 10\mu\epsilon$
5	动态范围	$\geq 10\text{dB}$
6	最大解调频率	优于 $0.001\text{HZ}@1\text{CH}$
7	工作温度	优于 $-20^{\circ}\text{C}\sim 55^{\circ}\text{C}$

7 设备安装

7.1 一般规定

7.1.1 设备安装工艺设计宜考虑后期的可维护性和可更换性。

7.1.2 设备安装位置不应侵入隧道建筑限界，不应影响隧道内已有的机电设备的正常运行。

7.2 传感光纤

7.2.1 准分布式传感光纤宜采用定点锚固法安装，全分布式传感光缆宜采用整体粘贴法，具体安装工艺要求见附录 A。

7.2.2 采用定点锚固法安装准分布式传感光纤时，宜对传感光纤进行预张拉，预张拉控制量宜为 $3000\mu\epsilon$ 。

7.2.3 光纤敷设时弯曲半径不宜小于 5cm 。

7.2.4 单一通道上的传感光纤被熔接次数不宜超过 3 次。熔接完成后应对熔接部位进行保护，防止该部分弯折。

7.2.5 周边环境复杂恶劣或干扰较大时，可通过 U 型盖板防护敷设完成的传感光缆。

7.2.6 宜每间隔一段距离（约 300m~1000m）设置一段 10m 左右的冗余光纤便于用于后续光缆检修。

7.3 解调仪

7.3.1 解调仪宜安装设备机箱内，机箱防水防尘标准不宜低于 GB 4208 中规定的 IP55 防护等级。

7.3.2 解调仪宜布设在隧道的养护管理站或变电房内。

7.4 通信及供电

7.4.1 各测线的传感光纤可直接接入解调仪，也可经通信光缆串接后再接入解调仪。

7.4.2 宜为解调仪及其上位通讯设备提供市电，并配备 UPS 作为停电工况下的应急电源。UPS 蓄电池的蓄电量宜保障系统正常采集和传输数据不少于 48 小时。

7.4.3 设备防雷性能应满足 GB 50343 的要求。

7.4.4 监测设备的供电及通信线缆敷设应符合 JTG D70/2 的规定。

7.5 设备调试

7.5.1 设备安装过程中宜采用红光笔进行实地通断测试。每个区段安装完成后或不可逆工序实施前，宜采用光时域反射计进行损耗测试。

7.5.2 设备安装完成后，启动解调仪并进行数据调试，调试结果记录宜参考附录 B 中的表 B.1。

7.5.3 单通道解调得出的测点最强信号与最弱的信号强度比值不宜超过解调仪的动态范围。

7.5.4 调试数据稳定后宜进行连续 3 次的数据采集，并将 3 次测量的平均值作为监测数据的初始值。

8 数据处理分析

8.1 数据预处理

8.1.1 数据分析前宜采用中位值滤波、均值滤波等方法对原始监测数据的跳点和异常数据进行剔除或修正。

8.1.2 宜将隧道衬砌结构温度或环境温度的同步监测数据带入各类结构变形特征指标的计算公式中，以此补偿温度变化对分布式光纤变形监测数据的影响。

8.2 数据分析

8.2.1 表征裂缝宽度增量和接缝宽度增量的特征指标可由公式（1）或公式（3）计算得出：

a) 采用准分布式传感光纤监测：

$$LF_{(n)} = L\Delta\varepsilon_n \quad (1)$$

其中：

$$\Delta\varepsilon_n = K_\lambda\Delta\lambda_n + K_T\Delta T \quad (2)$$

式中：

$LF_{(n)}$ —编号为n的裂缝或接缝宽度增量，单位为毫米（mm）；

L—传感光纤光栅传感器标距，单位为毫米（mm）；

$\Delta\varepsilon_n$ —测点n位置的应变变化量，单位为应变（ ε ）；

K_λ —传感光纤光栅应变系数，可通过光缆供应商提供或通过光缆标定试验确定，单位为应变每纳米（ ε/nm ）；

$\Delta\lambda_n$ —测点n位置的中心波长变换量，单位为纳米（nm）；

K_T —传感光纤光栅温度影响系数，可通过光缆供应商提供或通过光缆标定试验确定，单位为应变每摄氏度（ $\varepsilon/^\circ\text{C}$ ）；

ΔT —监测环境温度变化量，单位为摄氏度（ $^\circ\text{C}$ ）；

b) 采用全分布式传感光纤监测：

$$LF_{(n)} = \int_0^C \Delta\varepsilon(x)dx \quad (3)$$

其中：

$$\Delta\varepsilon(x) = K_C\Delta C_x + K_T\Delta T \quad (4)$$

式中：

C—采样分辨率，即够准确测量物理量所需的最短长度，单位为毫米（mm）；

$\Delta\varepsilon(x)$ —传感光纤在采样分辨率内任意一点的应变变化量，单位为应变（ ε ）；

K_C —背向布里渊散射光频移量与光纤应变的比列系数，可通过光缆供应商提供或通过光缆标定试验确定，单位为应变每纳米（ ε/HZ ）；

ΔC_x —传感光纤在采样分辨率内任意一点的背向布里渊散射光频移变化量，单位为赫兹（Hz）。

8.2.2 表征隧道结构纵向差异沉降的特征指标可由公式（5）计算得出。

$$CJ_{(AB)} = \sum_{n=1}^i (-1)^n \Delta CJ_n \quad (5)$$

其中：

$$\Delta CJ_n = \frac{X^2\Delta\varepsilon_{Xn} - D^2\Delta\varepsilon_{Dn}}{H} \quad (6)$$

式中：

$CJ_{(AB)}$ —测点B处相对于基点A位置处的沉降量，单位为毫米（mm）；

ΔCJ_n —基点A位置起第n处光纤弯折点的相对于n-1处弯折点的相对沉降量；

X—第n处光纤弯折点的相对于n-1处弯折点之间的斜向光纤长度，如图6所示；

D—第n处光纤弯折点的相对于n-1处弯折点之间的水平光纤长度，如图6所示；

H—第n处光纤弯折点的相对于n-1处弯折点之间的垂直高度，如图6所示；

$\Delta \varepsilon_{Xn}$ —第n处光纤弯折点与n-1处弯折点之间的斜向光纤监测的应变变化量；

$\Delta \varepsilon_{Dn}$ —第n处光纤弯折点与n-1处弯折点之间的对应的水平光纤监测的应变变化量；

8.2.3 基于监测数据的统计分析还可计算以下特征指标：

- a) 裂缝宽度：月均扩展速率、年均变化速率；
- b) 接缝变位：月均扩展速率、年均扩展速率；
- c) 纵向差异沉降：月均沉降速率、年均沉降速率。

8.2.4 隧道衬砌结构表面变形场的监测数据宜采用双线性插值方法对应变分布进行平滑处理，并按照实际的比例尺将变形监测测点位置映射至隧道衬砌变形二维展布图中。数据处理示例见附录 C.2

8.2.5 可根据衬砌表面变形场监测结果进行拱顶开裂损伤风险区域的专项分析，分析结果宜包含：衬砌损伤风险区域定位，风险区域面积计算结果、变形发展速率计算结果，损伤风险模式识别结果。数据分析示例见附录 C.3。

附 录 A
(资料性)
分布式传感光纤安装工艺要求

A.1 定点锚固

准分布式传感光纤宜采用定点锚固的方法进行安装，工艺要求如下：

a) 光缆首点安装

确定第一个点安装位置，将光缆头部冗余足够长度（端头不少于10m）用于熔接引线/跳线，采用记号笔在配套夹具孔眼处做标记，采用冲击钻打眼，通过膨胀螺栓、铆钉、免钉胶、植筋胶等方式固定配套夹具，将光缆定点位置固定。

b) 光缆预拉伸安装

首点固定后，采用电子手提称对光缆进行预拉，按照固定拉力值拉伸光缆，快速完成光缆下一定点的固定，以此类推安装剩余所有定点。

c) 过渡骑马卡安装

为防止光缆固定点间距过渡下垂，在光缆处等间距安装多个骑马卡。

d) 环氧二次固定

为防止夹具受运营振动产生松动带来的测试误差，在每个夹具位置处采用环氧树脂进一步固定，固化24h左右即可达到完全固化。

A.2 整体粘贴

全分布式传感光纤宜采用整体粘贴的方法进行安装，工艺要求如下：

a) 打磨除尘：沿隧道衬砌洞壁监测测线进行打磨，去除表面污渍、灰尘、泛碱等。↔

b) 底胶涂覆：在传感光缆布设路径上涂刷一层底胶粘结剂，以提高光缆粘合度。

c) 光缆布设：在底胶区域平直布设传感光缆，避免光缆弯曲；布设完成后，在传感光缆上部再刷一层面胶粘结剂，使光缆与隧道衬砌结构表面充分贴合。

附 录 B

(资料性)

分布式光纤传感调试数据记录表示例

表B.1 准分布式光纤传感调试数据记录表（示例）

隧道名称											
光纤型号						解调仪型号					
通道	布设方式	测线	测点编号	纵向	环向	波长(nm)				温度(℃)	备注
						1次	2次	3次	均值		
1	环向排布	第一环	1-1	ZK0+ 000	左拱墙					25	
			1-2		左拱腰						
			1-3		拱腰						
			1-4		右拱腰						穿越纵向裂缝1
			1-5		右拱墙						
1	环向排布	第二环	2-1	ZK0+ 002	左拱墙					25	
			2-2		左拱腰						
			2-3		拱腰						
			2-4		右拱腰						穿越纵向裂缝2
			2-5		右拱墙						
...		
2	纵向排布	第一列	1-1	ZK0+ 100	右边墙					25	
			1-2	ZK0+ 102						25	
			1-3	ZK0+ 104						25	
			1-4	ZK0+ 106						25	
			1-5	ZK0+ 108						25	
			

隧道名称						解调仪型号					
通道	布设方式	测线	测点编号	纵向	环向	波长(nm)				温度(°C)	备注
						1次	2次	3次	均值		
						2	纵向 排布	第 二 列	2-1	ZK0+ 100	左边墙
			2-2	ZK0+ 102					25		
				
...	

调试人：

调试时间：

记录人：

表B.2 全分布式光纤传感调试数据记录表（示例）

隧道名称											
光纤型号						解调仪型号					
通道	布设方式	测线	测点编号	纵向	环向	背向布里渊散射光频移量(GHZ)				温度(°C)	备注
						1次	2次	3次	均值		
1	环向 排布	第一环	1-1	ZK0+000	0.1					25	以左边 墙为起 点
			1-2		0.2						
			1-3		0.3						
			1-4		0.4						
			1-5		0.5						
...		
1	环向 排布	第二环	2-1	ZK0+002	0.1					25	以左边 墙为起 点
			2-2		0.2						
			2-3		0.3						
			2-4		0.4						
			2-5		0.5						
...		
2	纵向 排布	第一列	1-1	ZK0+010.1	右边 墙					25	
			1-2	ZK0+010.2						25	
			1-3	ZK0+010.3						25	
			1-4	ZK0+010.4						25	
			1-5	ZK0+010.5						25	
			
2	纵向 排布	第二列	2-1	ZK0+010.1	左边 墙					25	
			2-2	ZK0+010.2						25	
			
...		

调试人：

调试时间：

记录人：

附录 C

(资料性)

衬砌表面变形场数据处理与分析示例

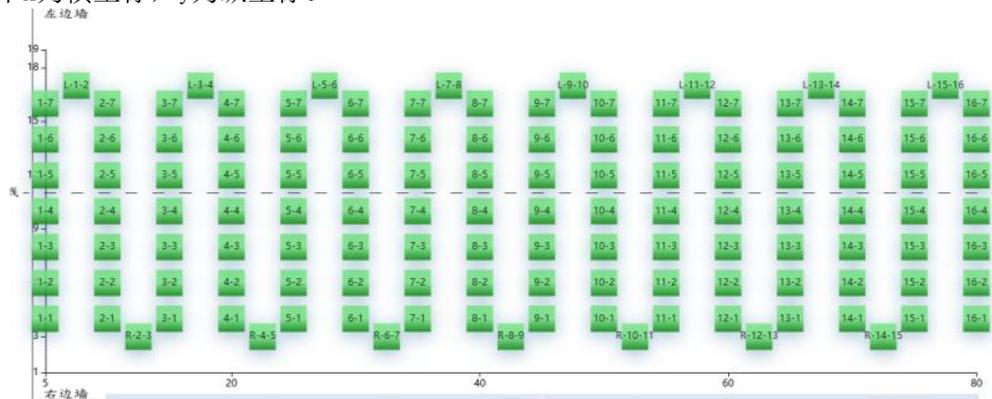
C.1 工程概况

以一座两车道的公路隧道为例，隧道净宽为10.25m，具有完整的钢筋混凝土二次衬砌结构。根据该隧道的专项检查结果，该隧道部分段落具有衬砌空洞及欠厚问题。因此在某段落环向布设准分布式应变光纤，用以监测该隧道衬砌欠厚及空洞区域潜在的开裂变形风险。

准分布式应变光纤布设起点为K200+105右边墙，每环对称布设7个测点，测点环向间距为2米，沿隧道纵向往复环绕共16环，每环纵向间距为5米。

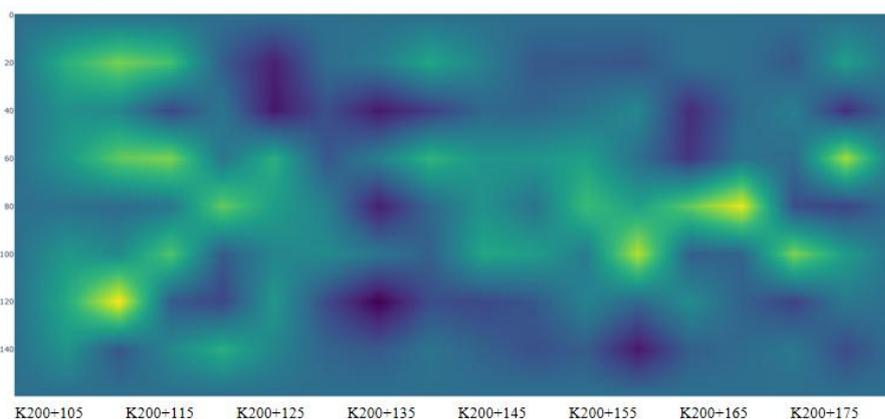
C.2 数据处理

a) 二维展布：将环绕于衬砌表面的光纤传感测点 P_i 的位置信息，以二维坐标 (x, y) 的方式进行记录，其中 x 为横坐标， y 为纵坐标。



图C.1 分布式传感光纤测点二维展布示意图

b) 二维平滑：基于测点间的变形连续且线性的假设，按照指定的插值精度，采用双线性插值方法对测值分布进行平滑处理。



图C.2 分布式传感光纤测点二维平滑示意图

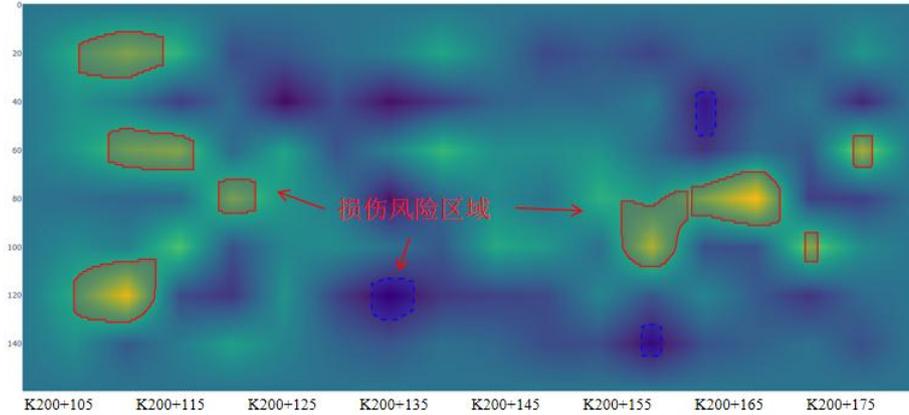
C.3 数据分析

a) 定位损伤风险区：根据该段落前一年应变监测情况（监测周期不满一年时，依据同类隧道衬砌应变监测项目确定经验取值）计算历史应变数据均值为 $27.96 \mu\epsilon$ ，标准差为 $86.07 \mu\epsilon$ ，损伤风险阈值设定如表C.1所示。将二维平滑结果中超过阈值线的数据点进行标记，标记区域即为损伤风险区域。

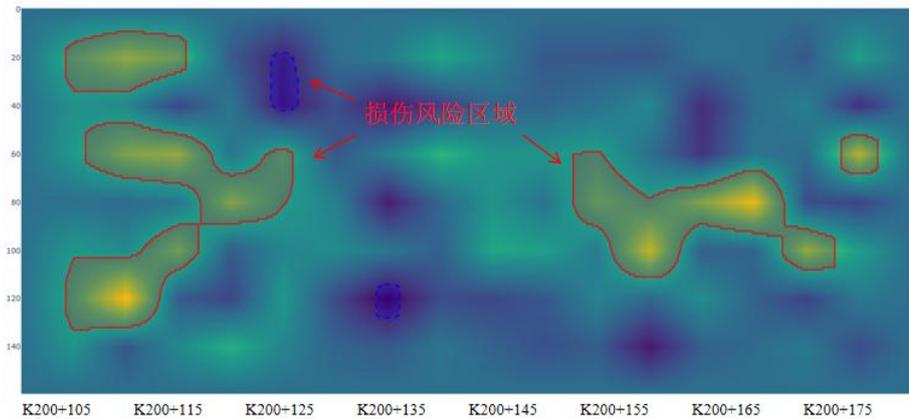
表C.1 损伤风险阈值设定表

标记类型	阈值表达式	阈值 ($\mu\epsilon$)
1类	$u_\epsilon \pm 3\sigma_\epsilon$	(-230.25, 286.17)
2类	$u_\epsilon \pm 4\sigma_\epsilon$	(-316.32, 372.24)
3类	$u_\epsilon \pm 5\sigma_\epsilon$	(-402.39, 458.31)

注： u_ϵ 为该段落历史应变监测数据均值， σ_ϵ 为该段落历史应变监测数据标准差。



图C.3 2024年5月29日损伤区域定位示意图



图C.4 2024年5月30日损伤区域定位示意图

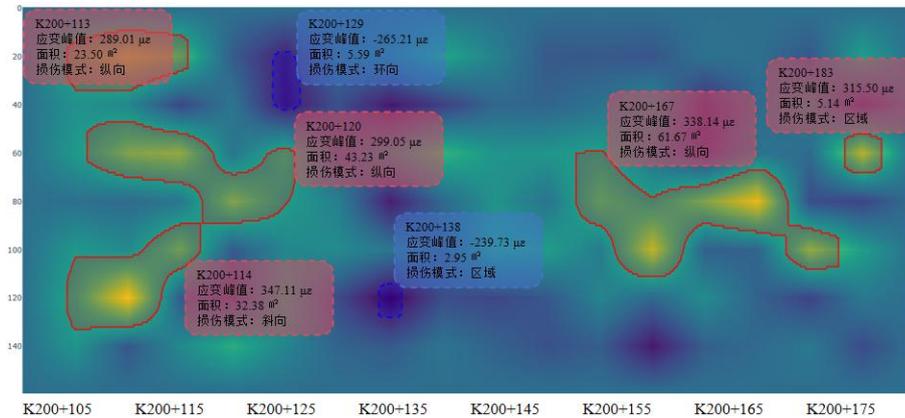
b) 损伤风险区域面积由公式 (C.1) 计算得出：

$$S_P = \frac{1}{2} k^2 \sum_{i=1}^n \begin{vmatrix} x_i & y_i \\ x_{i+1} & y_{i+1} \end{vmatrix} \quad (C.1)$$

式中：

x_i, y_i ——损伤区轮廓点集 $P\{(x_i, y_i)|i = 0, 1, \dots, n\}$ 中轮廓点 p_i 的坐标，其中 $p_1 = p_{n+1}$ ，无量纲；
 k ——二维坐标与实际距离的比例因子，无量纲。

c) 推测衬砌损伤模式：将单个损伤区的点集进行连线，根据连线形态推测损伤区发生的开裂形态——纵向开裂、环向开裂和斜向开裂等。结果示意如图C.5所示。



d) 衬砌多点变形场的发展速率由公式 (C. 2) 计算得出:

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i) \tag{C. 2}$$

其中:

$$v_i = \frac{\epsilon_{ir2} - \epsilon_{ir1}}{t_2 - t_1} \tag{C. 3}$$

式中:

v—多点变形场的变形发展速率, 单位为应变每天 (ε/d); ;

v_i—传感光纤某一测点P_i处的测值变化速率, 单位为应变每天 (ε/d);

ε_{ir2}—传感光缆某一测点P_i处的在t₂时刻测值, 单位为应变 (ε);

ε_{ir1}—传感光缆某一测点P_i处的在t₁时刻的应变监测值, 单位为应变 (ε)。

e) 数据分析结果如表C. 2所示。

表C. 2 衬砌表面变形场数据分析结果

日期: 2024年5月30日

监测范围	XX隧道右洞 K200+105~K200+180段落					
阈值设定	1类		2类		3类	
	(-230.25, 286.17)		(-316.32, 372.24)		(-402.39, 458.31)	
损伤风险区域信息						
编号	位置	超限类别	应变峰值 (με)	损伤风险面积 (m²)	推测损伤风险模式	变形发展速率 (με/d)
20240529-1	K200+113	1类	289.01	23.50	纵向	2.00
20240529-2	K200+114	1类	347.11	32.38	斜向	20.00
20240529-3	K200+120	1类	299.05	43.23	纵向	6.00
20240529-4	K200+167	1类	338.14	61.67	纵向	16.00
20240529-5	K200+183	1类	315.50	5.14	区域	11.00
20240529-6	K200+129	1类	-265.21	5.59	环向	42.00
20240529-7	K200+138	1类	-239.73	2.95	区域	-8.00