

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.02.012

基于BOTDA技术和菱形布设方案的盾构隧道管片位移监测方法研究

孙雪兵¹, 陈健², 栗晓龙¹, 张礼仁¹

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063;
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 现有光纤传感布设方式主要用于管片的一维或二维位移监测, 难以有效监测管片环间的三维变形, 针对此问题, 提出一种基于分布式光纤的菱形布设方案, 建立适用于盾构管片的三维变形监测方法。通过分析隧道管片的三维变形模式, 提出3种管片位移的计算方法。在此基础上, 为验证这些方法的有效性, 设计了一套易于操作的管片三维变形模拟试验装置, 并开展室内试验。将试验结果与理论计算进行对比, 验证了本文提出的光纤菱形布设方案在管片变形监测中的有效性, 以及3种位移计算方法的合理性。结果表明, 采用菱形布设的分布式光纤传感器结合K值分解法进行管片位移计算, 可获得最佳监测效果; 基于分布式光纤散射时域分析技术(BOTDA), 可实现对隧道管片位移变化的广泛实时监测。

关键词: 城市轨道交通; 隧道管片; 隧道位移监测; BOTDA; 分布式光纤; 菱形布设

中图分类号: U231; U456.3 文献标志码: A 文章编号: 1672-6073(2025)02-0082-08

Research on Shield Tunnel Segment Displacement Monitoring Method Based on BOTDA Technology and Diamond-Shaped Layout

SUN Xuebing¹, CHEN Jian², LI Xiaolong¹, ZHANG Liren¹

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract: Traditional fiber optic sensing methods mainly focus on one-dimensional or two-dimensional displacement monitoring of tunnel segments, making it difficult to effectively monitor three-dimensional deformation between segment rings. This paper proposes a diamond-shaped layout scheme based on distributed fiber optics, establishing a three-dimensional deformation monitoring method suitable for shield tunnel segments. By analyzing the three-dimensional deformation patterns of tunnel segments, three methods for calculating segment displacement are introduced. To validate the effectiveness of these methods, a simple and operable experimental device simulating three-dimensional deformation of tunnel segments was designed, and indoor tests were conducted. The test results were compared with theoretical calculations, confirming the effectiveness of the proposed diamond-shaped fiber optic layout for segment deformation monitoring, as well as the rationality of the three displacement calculation methods. The results demonstrate that the diamond-shaped distributed fiber optic sensors, combined

收稿日期: 2024-06-04 修回日期: 2024-11-01

第一作者: 孙雪兵, 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事隧道及地下工程设计研究工作, 004141@crfsdi.com

通信作者: 栗晓龙, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事隧道及地下工程设计研究工作, 007584@crfsdi.com

基金项目: 国家自然科学基金(52079135); 中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研究开发计划项目(2022K113)

引用格式: 孙雪兵, 陈健, 栗晓龙, 等. 基于BOTDA技术和菱形布设方案的盾构隧道管片位移监测方法研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(2): 82-89.

SUN Xuebing, CHEN Jian, LI Xiaolong, et al. Research on shield tunnel segment displacement monitoring method based on BOTDA technology and diamond-shaped layout[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(2): 82-89.

with the K-value decomposition method, provide optimal monitoring performance for segment displacement. The implementation of Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA) technology enables extensive real-time monitoring of tunnel segment displacement variations.

Keywords: urban rail transit; tunnel segment; tunnel displacement monitoring; BOTDA; distributed fiber optic; diamond-shaped layout

近年来,随着城市化进程的快速推进,城市人口规模急剧上升。为缓解人口增加带来的交通运输压力,突破地面交通发展的瓶颈,我国各大城市均开展了大规模的地下轨道交通建设,其结构形式主要为地铁盾构隧道^[1-2]。地铁盾构隧道是利用盾构机在地下进行掘进施工,同时铺设合适的盾构管片拼接而形成的地下通道。管片衬砌结构作为地铁隧道最主要的组成部分,其结构的变形和位移直接影响隧道结构的安全稳定。由于复杂地质条件的影响,盾构管片经常会发生接缝张开、环间不均匀沉降、横向和竖向收敛变形等诸多危及人身和工程安全的问题^[3]。因此,开展隧道管片位移的长期精准监测,对于保障地铁隧道的安全施工和后期运营具有重要意义。

现有隧道结构的主要监测方法为人工监测和自动化监测。其中,人工监测手段主要包括测斜仪、全站仪以及人工巡检等;自动化监测手段主要包括三维激光扫描仪和 GPS 工作站等。尽管上述监测手段已经得到了广泛的应用,但这些方法仍存在操作复杂、易受外界环境影响以及布设站点较多等缺点,无法满足现代轨道交通工程自动化、智能化的监测要求。近年来,迅速发展的光纤传感监测技术具有监测精度高、距离长、结构简单、耐久性强、可分布式重复利用等诸多优势。因此,国内外众多学者从科学研究与工程应用的角度,针对光纤传感技术在岩土工程监测方面的应用开展了大量研究^[4-7]。王飞等^[8]提出一种基于 BOTDA 光纤传感技术的盾构隧道断面变形感知方法,并开展室内原型试验验证了该方法的有效性能。侯公羽等^[9]研究光纤护套效应对隧道监测结果的影响,为基于布里渊应变监测技术的工程应用提供了理论基础。梁斯铭等^[10]从定点光缆和 Z 形布设的角度研究分布式光纤技术在隧道工程监测中的应用,实现了隧道变形位置及变形大小的精确测量。上述研究有效促进了光纤监测技术在岩土工程中的应用,但均未解决基于光纤监测技术的盾构管片的三维变形监测问题。

针对盾构隧道管片位移监测的需求,本文研究了一种基于光纤散射时域分析(BOTDA)技术的盾构隧道管片变形监测新方法。首先,提出一种分布式光纤

的菱形布设方案;其次,通过理论分析给出 3 种管片位移的计算方法;最后,设计试验装置开展室内试验,验证了光纤菱形布设方案的有效性与准确性。所得结果可为光纤传感技术在盾构隧道的监测应用提供参考。

1 BOTDA 技术及光纤布设方法

1.1 BOTDA 技术原理

BOTDA 技术全称为光纤散射时域分析(Brillouin optical time domain analysis)技术,是一种高分辨率、高灵敏度的光纤传感技术。该技术基于布里渊散射效应,通过激发光脉冲与光纤中的声子相互作用,产生散射光信号。布里渊散射光的频率与光纤中的声子密度相关,而声子密度受到光纤周围环境温度和应变的影响。因此,通过测量布里渊散射光的频移,可以实现对光纤所处环境温度和应变的监测。

BOTDA 技术以其高灵敏度、高分辨率和长测距等优点在盾构隧道管片位移监测中具有广泛的应用。通过在隧道管片周围布设光纤传感器,可以实时监测管片所受到的温度和应变变化。当管片发生位移或受到外力作用时,会引起周围环境温度和应变的改变,从而导致光纤中的布里渊频移变化。通过分析这些变化,可以实现对管片位移、变形和受力情况的精确监测和分析,为盾构隧道的安全施工和结构监测提供重要支持。

1.2 光纤 Z 形布设方法及监测原理

Z 形布设是一种常见的光纤传感布设方案,光缆沿着盾构隧道走向侧壁呈 Z 字形布设,隧道管片发生移动时会引起光缆的拉伸和收缩变形,当监测到由于管片位移导致的光纤应变信号后,通过简单的三角关系以及应变-位移换算可以计算出管片的实际位移。同时,通过设置分布式温补光缆,可以实现温度自补偿,以提高监测系统对管片位移、温度和应变监测的准确性和稳定性。光纤传感器的 Z 形布设方案示意如图 1 所示。

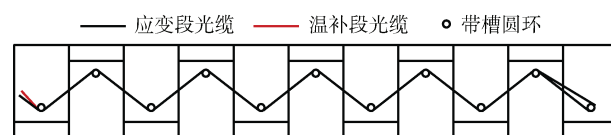


图 1 Z 形布设方案示意

Figure 1 Z-shaped layout

Z 形布设方案管片位移的计算原理如图 2 所示。

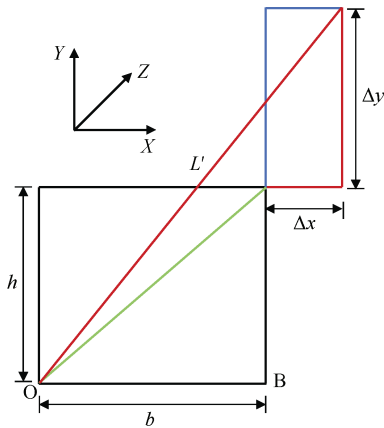


图 2 Z 形布设方案管片位移计算原理

Figure 2 Displacement calculation principle of Z-shaped layout

该方案仅对 X-Y 平面的 Δy 进行求解, 并假定 Δx 和 Δz 为 0, 因此有:

$$b^2 + (h^2 + \Delta y^2) = L'^2 \quad (1)$$

在小变形情况下, 有:

$$\Delta y = \frac{\epsilon l^2}{h} \quad (2)$$

式中, ϵ 为光纤的轴向应变。在实际工程中, 管片环间结构变形形式并非单一存在, 往往以多种组合方式呈现, 实际变形模式多为三维变形, 而 Z 形布设假定管片仅发生管壁平面内的变形, 这一假定与实际工程不符, 导致光纤应变-位移换算时会产生计算误差^[1]。当隧道相邻的两环管片发生上下、前后错台或左右张开的位移时, 通过光缆测量的应变值是上述位移综合作用的结果, 而 Z 形布设方案难以对测量的应变进行分解, 无法准确反映隧道管片的变形情况。因此, 有必要对 Z 形布设方案进行进一步改进, 以利于应变的解耦分析。

2 光纤菱形布设方法及管片位移计算

2.1 菱形布设

考虑到 Z 形布设方案存在的缺点, 本文提出了一种分布式光纤菱形布设方案, 具体布设方式如图 3 所示。光纤菱形布设是在 Z 形布设方案的基础上, 通过补充部分反向的 Z 形分布光纤而形成的。菱形布设方案可以用于判断隧道管片的位移形式, 当位于相邻两环管片的光纤发生水平位移时, 由于光纤沿着管片接缝对称, 故同时受到拉应力作用; 同理, 当管片发生竖向位移时, 两根光纤分别受到拉应力以及压应力的影响。此外, 采用菱形布设方案, 有利于应变信号的

解耦分析, 对比 Z 形布设方案, 管片发生相同位移时可监测到更大的应变信号, 从而减少了人为测量以及外界环境带来的误差影响, 可以更准确地监测隧道的变形。

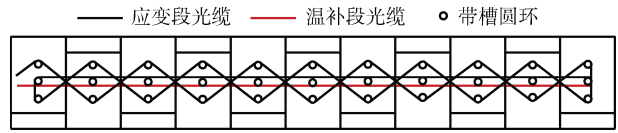


图 3 菱形布设示意

Figure 3 Diamond-shaped layout

由于三维空间中的各方向变形相互独立, 管片之间的位移可以分解成 X、Y、Z 方向的平动, 而每个方向的管片平动都可以分为 3 种形式, 即双环相向运动、同向运动和背向运动。无论管片之间发生上述 3 种形式中的任意变形运动, 菱形传感网络中的各段光纤均可以保持交点对称, 各方向的平移效果如图 4 所示。因此, 在利用该网络进行位移求解时, 可以将变形后的光纤交点平移到原始交点, 从而简化计算。

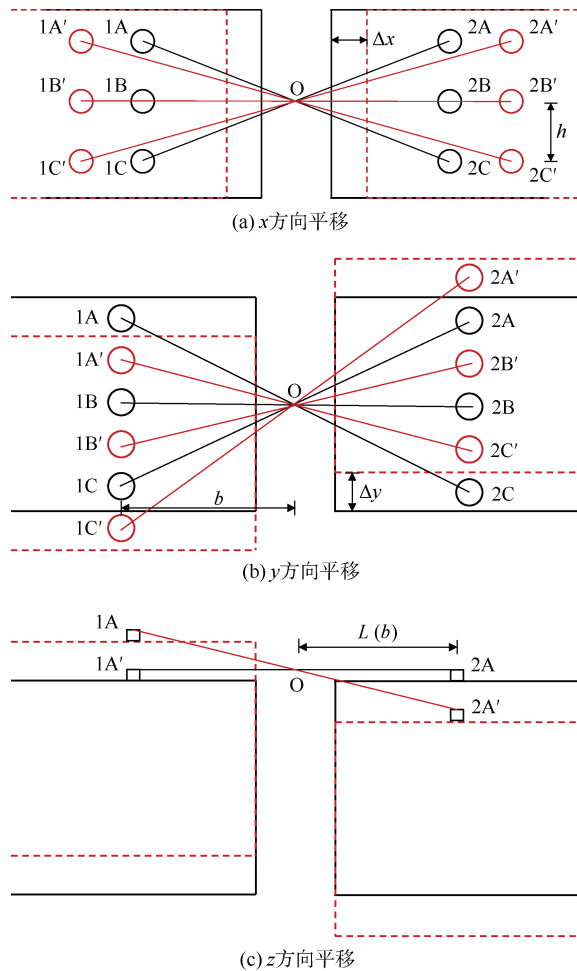


图 4 管片位移模式原理

Figure 4 Schematic of segment displacement modes

由于菱形传感网络始终保持对称结构, 平移后的菱形传感网络位移计算可简化为单侧菱形网络进行计算。在后续对菱形传感网络位移计算公式推导中均基于该原则。

2.2 K 值分解法

K 值分解法计算管片位移的原理如图 5 所示。该方法以水平段光纤所在的平面作为计算基准面, 同时将光纤传感网络视为一个三维立体结构, 以建立各段光纤的应变-位移计算公式。在图 5 中, 点 O 为光纤的布设交点, b 、 h 和 k 分别为光纤在 X 、 Y 和 Z 方向的距离, $L1$ 和 $L3$ 为斜向布设光纤的原长, $L2$ 为水平布设光纤的原长, 光纤变形后的长度分别用 $L1'$ 、 $L2'$ 和 $L3'$ 表示, 管片的横向、竖向和径向位移分别为 Δx 、 Δy 和 Δz 。

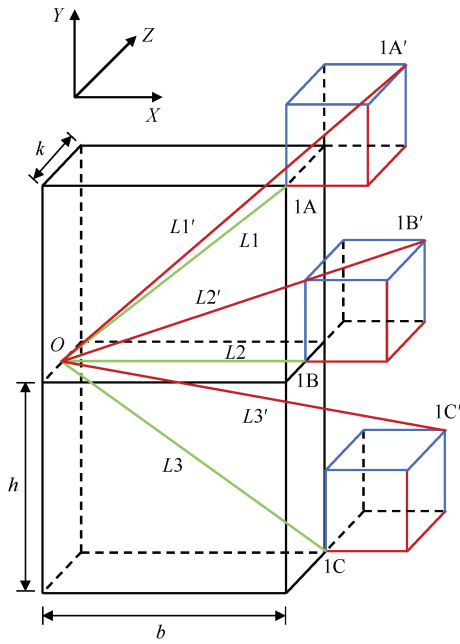


图 5 K 值分解法计算原理

Figure 5 Principle of K-value decomposition method

以光纤 $L1$ 段为例, 其原长为:

$$L1 = \sqrt{b^2 + h^2 + k^2} \quad (3)$$

变形后的长度 $L1'$ 为:

$$L1' = \sqrt{(b + \Delta x)^2 + (h + \Delta y)^2 + (k + \Delta z)^2} \quad (4)$$

该段光纤的应变为 $\varepsilon_1 = (L1' - L1) / L1$ 。同理可以求出各段光纤位移后的应变。综合各段光纤的应变, 可以得出管片位移为:

$$\Delta x = \sqrt{L1'^2 - (h + \Delta y)^2 - (k + \Delta z)^2} - b \quad (5)$$

$$\Delta y = \frac{L4'^2 - L1'^2}{4h} = \frac{L^2(\varepsilon_4 - \varepsilon_1)(\varepsilon_1 + \varepsilon_4 + 2)}{4h} \quad (6)$$

$$\Delta z = \frac{L4'^2 - L3'^2}{4k} = \frac{L^2(\varepsilon_4 - \varepsilon_3)(\varepsilon_3 + \varepsilon_4 + 2)}{4k} \quad (7)$$

式中, ε_1 、 ε_3 、 ε_4 分别为各段光纤的轴向应变值。

使用 K 值位移分解法时, 为了保证该算法计算位移的准确性, 需要对菱形传感网络中的各长度参数进行范围划定, 即 L 、 b 、 h 、 k 需满足要求:

$$\delta_k = \sqrt{b^2 + h^2 + k^2} - L \quad (8)$$

$$\frac{\delta_k}{L} \leq 0.01\varepsilon \quad (9)$$

式中, δ_k 为光纤的布设误差。在满足式(9)的前提下, 可以对计算的位移值进行误差修正:

$$\Delta y = \frac{L^2(\varepsilon_4 - \varepsilon_1) \left(\varepsilon_1 + \varepsilon_4 + 2 \left(1 + \frac{\delta_k}{L} \right) \right)}{4h} \quad (10)$$

$$\Delta z = \frac{L^2(\varepsilon_3 - \varepsilon_4) \left(\varepsilon_3 + \varepsilon_4 + 2 \left(1 + \frac{\delta_k}{L} \right) \right)}{4k} \quad (11)$$

2.3 应变分解 η 法

应变分解 η 法的计算原理如图 6 所示。该方法将光纤传感网络的初始状态视为平面结构, 忽略光纤传感网络在 Z 方向的厚度 k , 同时在计算时不考虑光纤应变的二次方项; 随后, 将变形后的光纤传感网络

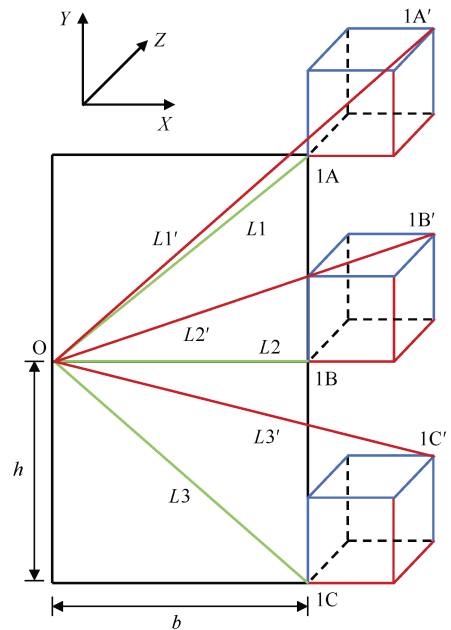


图 6 应变分解 η 法计算原理

Figure 6 Principle of strain decomposition η method

视为三维空间结构。当光纤发生位移时，首先在二维平面上求解出 Y 方向的位移，然后分别求解各个方向位移产生的光纤轴向应变，建立光纤轴向应变与位移之间的关系，从而进一步求解 X 和 Z 方向的位移。

限于文章篇幅，此处直接给出管片位移为：

$$\Delta x = \sqrt{\eta_1 - \eta_3} \quad (12)$$

$$\Delta z = \sqrt{\eta_3 - 2b\Delta x} \quad (13)$$

式中， η_1 和 η_3 为相关的位移参数，其表达式如下：

$$\eta_1 = 2L^2 \varepsilon_1 - \Delta y^2 - 2h\Delta y \quad (14)$$

$$\eta_3 = 2b^2 \varepsilon_3 - \Delta y^2 \quad (15)$$

与 K 值位移分解法类似，为了保证应 η 分解法的准确性，各长度参数 L 、 b 、 h 需满足要求：

$$\delta_\eta = \sqrt{b^2 + h^2} - L \quad (16)$$

$$\frac{\delta_\eta}{L} \leq 0.01\varepsilon \quad (17)$$

2.4 应变分解 λ 法

应变分解 λ 法是在应变分解 η 法的基础上，考虑小变形的前提，计算时忽略光纤距离 b 和 L 间的差距，同时保留光纤应变的二次方项，通过将中间变量 η 变为 λ ，在进行 X 和 Z 方向的位移求解。使用该方法求解管片位移为：

$$\Delta x = \Delta x = \frac{(\lambda_1 + \lambda_3 - L)(\lambda_1 - \lambda_3 - L) - h^2}{2(\lambda_1 - \lambda_3 - L)} \quad (18)$$

$$\Delta z = \sqrt{(\lambda_3 - \Delta x)^2 - b^2} \quad (19)$$

其中， λ_1 和 λ_3 为相关的位移参数，其表达式如下：

$$\lambda_1 = L(\varepsilon_1 + 3) - \sqrt{\Delta y^2 + 2h\Delta y + L^2} \quad (20)$$

$$\lambda_3 = b(\varepsilon_3 + 2) - \sqrt{\Delta y^2 + b^2} \quad (21)$$

类似地， λ 分解法对各长度参数 L 、 b 、 h 需满足的要求与 η 分解法的一致，即式(16)和(17)所示。

3 菱形布设室内试验验证

3.1 试验原理及流程

为验证光纤传感器菱形布设方案的合理性和监测准确性，本文设计了一套模拟管片三维变形的室内试验装置，并进行标定试验。通过试验结果与管片位移的计算结果对比，确保所提出的监测方法在实际应用中的可行性和有效性。试验所需的原材料主要包括定

制尺寸的木板、直径为 15 cm 的开孔圆盘(孔径 ≤ 50 mm)、千分表、水平尺、0.9 mm 分布式光纤、光纤跳线、配重块及其他辅助工具。试验装置布设如图 7 所示。需要说明的是，由于在实际工程中，光纤只会布置在管片接缝处一块面积很小的区域内，而管片的半径远大于该区域的长度，可以将该区域视为一个平面，因此本文使用平板模拟隧道衬砌结构是合理的。

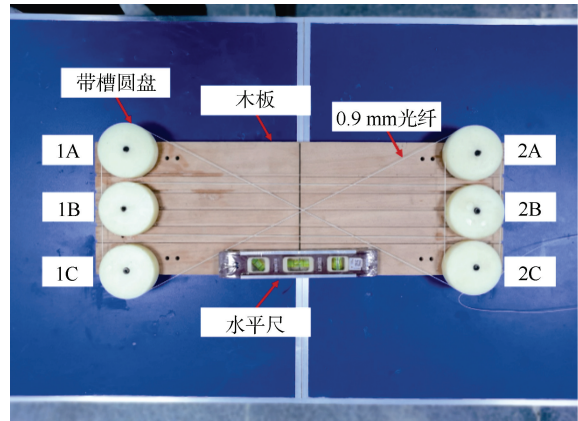


图 7 管片变形模拟试验装置

Figure 7 Experimental apparatus for segment deformation simulation

在试验过程中，首先对布设的光缆进行一定程度的拉伸，拉伸长度分别设置为 $0.01\%L$ 、 $0.05\%L$ 、 $0.1\%L$ 、 $0.5\%L$ 、 $1\%L$ ，其中 L 为 0.9 mm 分布式光纤的原长。然后，在每个拉伸长度下，针对木板的 X 、 Y 、 Z 方向分别施加一定的位移，以模拟管片的实际变形情况，同时测量并记录此时光纤的频率值。最后，针对不同位移作用下分布式光纤的频率数据进行处理分析，得到木板的位移值，即模拟的管片位移值。试验过程中，保持室内的温度恒定，防止光纤因温度改变产生形变；此外，试验过程中对光纤施加的位移较小，因此光纤的形变处于可恢复的弹性范围内，不涉及塑性变形。试验的具体流程如下。

1) 固定带槽圆盘。采用螺栓和 502 胶水将带槽的圆盘固定在木板表面，圆盘编号如图 7 所示。借助水平尺保证木板处于水平状态，同时确保左右两块木板相互对齐。

2) 布设光纤并进行跳线熔接。将直径 0.9 mm 光纤放置于 1A 圆盘槽内，使用 502 胶水固定光纤，待胶水的胶合强度超过 80% 后，将光纤绕至圆盘 2C 底部的槽内。拉紧光纤后，使用胶水固定。光纤的布设顺序为：1A-2C-2A-1C-1B-2B-1B-1A-1C。在跳线熔接

时,需要注意熔接点的光损应控制在小于 0.2 dB 的范围内,以保证光纤传感器的灵敏度和稳定性。

待所有光纤布设完成后,应使用线卡固定住各光纤在中间位置的交叉点,使得平行光缆位于正向光缆与反向光缆之间。

3) 安装百分表。在两块木板的背面安装 4 个百分表,用于测量木板的位移,如图 8 所示。在安装过程中,为保证百分表与木板之间接触良好,需预先调整百分表的读数,并利用重物固定百分表的位置。

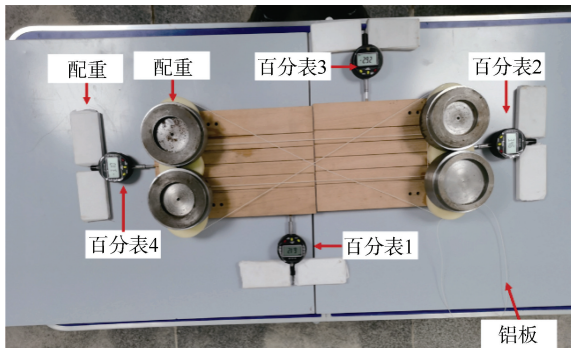


图 8 试验装置背面布置

Figure 8 Rear layout of experimental apparatus

4) 安装配重块。根据需要,在相应的位置安装配重块以保证木板的稳定,并施加预设的位移,如图 8 所示。施加位移时,右边木板产生位移而左边木板不产生位移,反之亦然。

5) 施加位移并测量数据。通过楔形体插入两块木板的缝隙进行 X 和 Y 方向的位移加载,通过抬升铝板并垫入木片进行 Z 方向的位移加载。每块木片厚度为 1 mm。试验时,加载位移的大小如表 1 所示。对三个方向进行位移加载后,使用分布式光纤信号解调仪采集相应的光纤频率数据,经过计算处理即可得到光纤监测的位移值。

表 1 试验加载位移

Table 1 Test loading displacements		mm						
位移方向	1	2	3	4	5	6	7	
Δx	1.15	1.88	3.62	1.03	1.09	1.06	0.8	
Δy	-0.14	1.35	2.07	1.42	3.51	5.42	4.86	
Δz	0	0	3	4	4	5	6	

3.2 试验结果分析

图 9 给出了与表 1 中加载位移相对应的频率大小。对采集到的光纤频率数据,使用初始状态作为基准计算相应的频移量。从图 9 中可以观察到,在不同阶段,

三段光纤的频移均呈现平稳的趋势,这表明光纤整体受力状态稳定。在计算应变时,应取平稳段的平均频移量;此外,1A、2C 与 1B、2B 段的光纤频移间存在过渡段,呈现上升的趋势,可用作应变范围的判定依据。

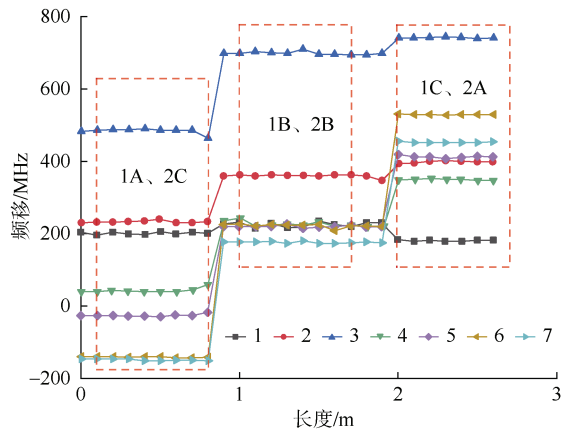


图 9 监测有效段频移

Figure 9 Frequency shift of effective segments

在实验过程中,由于位移加载时采用了楔形体插入式的方法,为保证加载位移的准确性, Δx 应当等于百分表 2 与百分表 4 的差值, Δy 应当等于百分表 1 与百分表 4 的差值。以初始状态为零值,右侧木板向右发生的位移被视为正值。对于各阶段的各项位移,采用第 2 节介绍的 3 种解法进行计算,并将计算结果与室内试验施加的位移值大小进行对比。

图 10 展示了 X 方向施加的位移与通过光纤监测计算得到的位移值对比。图中横坐标表示在 X 方向施加的特定位移,纵坐标表示通过光纤监测计算得到的

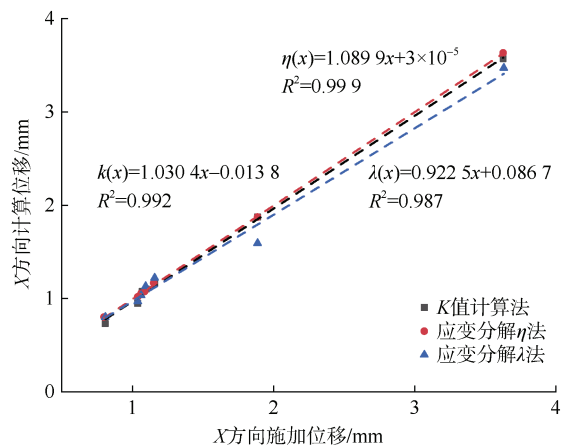


图 10 X 方向监测位移与计算位移对比

Figure 10 Comparison of monitored and calculated displacements in X direction

X 方向位移。可以观察到, 3 种计算方法得到的位移值与施加的位移值之间呈现出良好的线性关系。采用线性函数进行拟合时, 拟合优度 R^2 均大于 0.98。此外, 从拟合函数的系数可以得知, K 值分解法的计算精度高于其他两种计算方法, 各计算位移值的大小关系为: $\lambda(x) < k(x) < \eta(x)$, 与试验施加的位移值 Δx 的误差在 4%~8% 之间。

图 11 和图 12 分别展示了施加在 Y 和 Z 方向的位移与通过光纤监测计算得到的位移值对比。与 X 方向的位移分析相似, 3 种计算方法得到的计算位移值与施加的位移值均较为接近。对于 Y 方向的位移计算, 3 种方法得到的计算结果几乎一致, 且拟合优度 R^2 均大于 0.99, 与施加的位移值 Δy 的误差小于 0.2%;

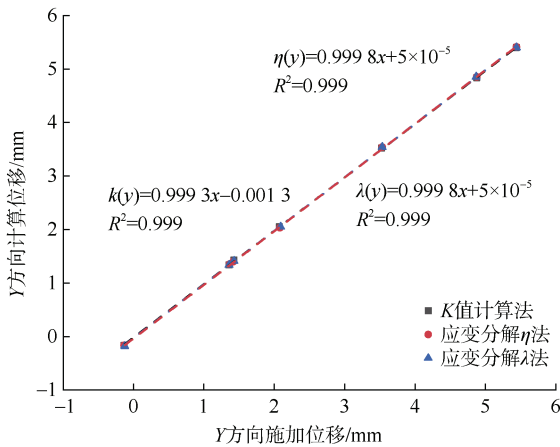


图 11 Y 方向监测位移与计算位移对比

Figure 11 Comparison of monitored and calculated displacements in Y direction

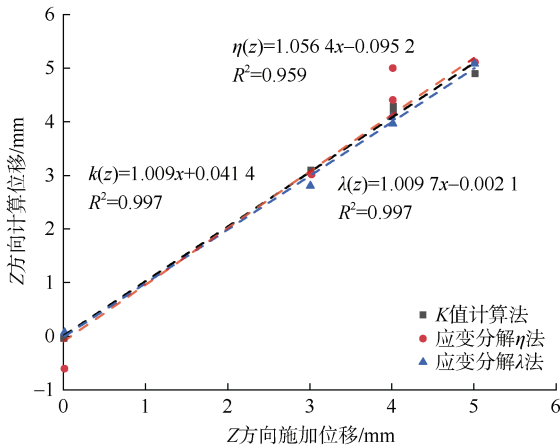


图 12 Z 方向监测位移与计算位移对比

Figure 12 Comparison of monitored and calculated displacements in Z direction

而对于 Z 方向的位移计算, K 值分解法的计算精度最高, λ 值分解法次之, 但 3 种方法的计算误差均小于 5%。

综合对比 X、Y 和 Z 三个方向的位移计算结果可知, K 值分解法的计算精度最高, 在实际工程中应优先考虑采用该方法。

4 结论

针对盾构隧道管片的三维变形特征, 提出一种光纤传感器的菱形布设方案, 通过空间几何分析, 给出了管片变形的 3 种位移计算公式, 设计了一套模拟管片三向变形的室内标定装置并进行了标定试验。通过对比试验结果与理论计算结果, 验证了分布式光纤菱形布设方案的合理性和准确性, 形成了基于菱形布设方案的盾构隧道管片变形监测方法, 主要结论如下。

1) 相较于传统的光纤传感器 Z 型布设, 菱形布设方案可以测量出盾构隧道管片位移的三维变化, 有利于应变解耦分析, 具备更高的测量准确性。

2) 对于菱形布设方案的 3 种位移计算方法, 通过对比室内标定试验结果发现, 3 种计算方法的计算误差均小于 5%, 满足误差要求。其中, K 值计算法展现出最高的精度, 而应变分解 η 法和应变分解 λ 法的精度稍低。

本文提出的菱形布设方案结合基于 BOTDA 技术的隧道管片位移监测方法具有一定的科学和工程应用意义。在未来的研究中, 可以进一步优化布设方案和计算方法, 提高监测精度和实用性, 以满足更高水平的工程需求。

参考文献

[1] 陈福斌, 祁恒远, 张称呈. 长距离共线基坑下卧隧道上浮控制措施及效果研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(6): 69-74.
CHEN Fubin, QI Hengyuan, ZHANG Chengcheng. Control measures and corresponding effectiveness for tunnel heave induced by long collinear overlying excavation[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(6): 69-74.

[2] 于松伟, 刘巍, 仲莹莹. 基于复杂巨系统理论的城市轨道交通可持续发展综合评价[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(5): 1-10.

- YU Songwei, LIU Wei, ZHONG Yingying. Comprehensive evaluation of sustainable development of urban rail transit based on open complex giant system theory[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(5): 1-10.
- [3] 葛双双, 高玮, 汪义伟, 等. 我国交通盾构隧道病害、评价及治理研究综述[J]. 土木工程学报, 2023, 56(1): 119-128.
- GE Shuangshuang, GAO Wei, WANG Yiwei, et al. Review on evaluation and treatment of traffic shield tunnel defects in China[J]. China civil engineering journal, 2023, 56(1): 119-128.
- [4] 朱鸿鹄, 施斌. 地质和岩土工程分布式光电传感监测技术现状和发展趋势: 第四届 OSMG 国际论坛综述[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 166-169.
- ZHU Honghu, SHI Bin. Current progress and trends on distributed opto-electronic sensor-based monitoring in geo-engineering: a summary of 4TH osmg-2012[J]. Journal of engineering geology, 2013, 21(1): 166-169.
- [5] MOFFAT R, SOTOMAYOR J, BELTRÁN J F. Estimating tunnel wall displacements using a simple sensor based on a Brillouin optical time domain reflectometer apparatus[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2015, 75: 233-243.
- [6] 侯公羽, 李子祥, 胡涛, 等. 基于分布式光纤应变传感技术的隧道沉降监测研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 3148-3158.
- HOU Gongyu, LI Zixiang, HU Tao, et al. Study of tunnel settlement monitoring based on distributed optic fiber strain sensing technology[J]. Rock and soil mechanics, 2020, 41(9): 3148-3158.
- [7] 随意, 程晓辉, 李官勇, 等. 基于分布式光纤监测的盾构隧道管片变形受力反演分析[J]. 工程力学, 2022, 39(增刊 1): 158-163.
- SUI Yi, CHENG Xiaohui, LI Guanyong, et al. Inversion analysis of deformation and force of shield tunnel segments based on distributed optical-fibre monitoring[J]. Engineering mechanics, 2022, 39(S1): 158-163.
- [8] 王飞, 黄宏伟, 张冬梅, 等. 基于 BOTDA 光纤传感技术的盾构隧道变形感知方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1901-1908.
- WANG Fei, HUANG Hongwei, ZHANG Dongmei, et al. Deformation sensing method of shield tunnel based on optical fiber sensing technology of botda[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(9): 1901-1908.
- [9] 侯公羽, 谢冰冰, 胡涛, 等. 使用 BOTDR 技术进行隧道监测的光纤护套效应[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2441-2447.
- HOU Gongyu, XIE Bingbing, HU Tao, et al. Fiber sheath effect in tunneling monitoring based on BOTDR technology[J]. Rock and soil mechanics, 2017, 38(8): 2441-2447.
- [10] 梁斯铭, 谢长岭, 蒋儿, 等. 分布式光纤技术在隧道变形监测中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(S1): 436-443.
- LIANG Siming, XIE Changling, JIANG Er, et al. Application of distributed optical fiber technology in tunnel deformation monitoring[J]. Tunnel construction, 2020, 40(S1): 436-443.
- [11] 朱栋梁. 基于光纤传感技术的轨道交通工程监测技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021: 10-15.
- ZHU Dongliang. Research on monitoring technology of rail transit engineering based on optical fiber sensing technology[D]. Nanning: Guangxi University, 2021: 10-15.

(编辑: 傅依萱)