

DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2013.06.020

基于光纤传感技术的地铁隧道冻结法施工监测

叶肖伟^{1,2}, 丁朋^{1,3}, 周诚⁴, 李勇军⁵, 倪一清¹, 董小鹏³

(1. 香港理工大学深圳研究院 智能结构健康监测研发中心, 广东 深圳 518057; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 3. 厦门大学 信息科学与技术学院光波技术研究所, 福建 厦门 361005; 4. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074; 5. 中铁隧道股份有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 为了掌握地铁隧道联络通道冻结法施工中冻土的温度场和应力场, 提出一种基于光纤布拉格光栅(FBG)传感技术的冻结法施工实时监测方法. 在低温潮湿工作环境下, FBG 传感器比传统电子式传感器在精度、灵敏度以及稳定性等方面存在较大优势. 基于此, 首次提出了整合 FBG 传感器的冷冻监测管设计方案及安装方法. 通过在联络通道冻土帷幕左右两侧监测孔内布置 FBG 传感器, 对冻结法施工过程中的冻土温度和应变进行实时监测. 根据 FBG 传感原理并采用小波变换去噪方法对原始温度和应变监测数据进行分析, 获得了冻土温度和应变沿厚度和深度方向的分布模式, 为进一步认识冻土帷幕的形成和发展规律提供依据.

关键词: 冻结法; 光纤布拉格光栅; 传感器; 地铁隧道; 联络通道; 小波变换

中图分类号: TU 752

文献标志码: A

文章编号: 1008-973X(2013)06-1072-09

Monitoring of metro-tunnel freezing construction using fiber sensing technology

YE Xiao-wei^{1,2}, DING Peng^{1,3}, ZHOU Cheng⁴, LI Yong-jun⁵,
NI Yi-qing¹, DONG Xiao-peng³

(1. *Intelligent Structural Health Monitoring R&D Centre, The Hong Kong Polytechnic University Shenzhen Research Institute, Shenzhen 518057, China*; 2. *College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*; 3. *Institute of Light-wave Technology, School of Information Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China*; 4. *School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*; 5. *China Railway Tunnel Stock Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China*)

Abstract: In order to grasp the temperature and strain fields of frozen soils during freezing construction of the metro-tunnel cross-passage, a method for real-time monitoring of freezing construction using fiber Bragg grating (FBG) sensing technology is proposed. Under the condition of low temperature and high humidity, FBG sensors have the advantages in terms of accuracy, sensitivity and stability in comparison with the traditional electrical sensors. In this connection, the design scheme and installation method of a novel freezing monitoring device integrated with FBG sensors is addressed. FBG sensors are deployed in freezing monitoring holes at both sides of the frozen soil wall of the cross passage to timely monitor the temperature and strain of the frozen soils in the process of freezing construction. The original temperature and strain monitoring data are analyzed based on the FBG sensing principle by use of the wavelet transform de-noising approach. The distribution pattern of the temperature and strain of the frozen soils in thickness and depth directions are recognized, which will provide a basis for further digesting the formation and expansion mechanism of frozen soil walls.

收稿日期: 2012-09-27.

浙江大学学报(工学版)网址: www.journals.zju.edu.cn/eng

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013QNA4023); 国家“十二五”科技支撑计划课题资助项目(2012BAK24B01); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100142110061).

作者简介: 叶肖伟(1980—), 男, 讲师, 博士, 从事土木工程结构健康监测和安全评估方面的研究. E-mail: cexwyc@zju.edu.cn

Key words: freezing method; optical fiber Bragg grating; sensor; metro tunnel; cross passage; wavelet transform

人工地层冻结技术以其在地下工程软弱土层强度和稳定性处理中的独特优势,被广泛应用于矿山凿井、隧道工程、港口工程、水工工程以及环境工程中,特别是在复杂的软弱(如淤泥、淤泥质土、流砂等)土层环境中^[1-2]。冻结法施工利用人工制冷技术对待挖地层供冷,降低土体的温度使含水土层形成冻结体,用以临时抵御水土压力,从而达到维护开挖面周围土体稳定以及防止地下水入侵的目的。该方法具有土层环境适应性强、冻结土体强度高、稳定性和隔水性好、对周围环境影响小、无污染等优点^[3]。然而,冻土层的形成机理相当复杂,影响因素众多,包括土层物理特性、地下水含量和流速、冷媒温度、冻结管直径和间距、冷冻时间等,是一个耦合温度场、渗流场以及应力场的强非线性时变问题^[4]。

如何准确掌握冻结法施工过程中冻结帷幕的形成机理和发展规律,一直以来是学术界和工程界关心的但又尚未解决的难题。对土体冻结加固过程中冻结帷幕温度、厚度及强度变化的及时认识和把握,有利于合理确定冻结法施工的设计参数以及准确掌握冻土开挖的有利时机。近年来,国内外学者采用理论建模^[5-7]、数值模拟^[8-10]、模型试验^[11-12]以及现场测试^[13-15]等方法对冻结法施工中的这一关键科学问题进行了大量的研究工作,包括冻土体本构关系及损伤演化规律、冻结技术涉及的土体导热相变及渗流和防渗问题、冻结法施工形成的冻结壁温度场分布规律以及土体冻胀融沉过程中的三场(温度场、渗流场和应力场)耦合作用等。

尽管冻结法施工冻土的形成规律基本满足冻土理论模型,但特定的制冷系统运行状况、地质条件、边界散热、施工工况等诸多因素,又决定了冻结法施工的复杂性以及冻土形成的不确定性。这就要求在冻结法施工过程中,实时掌握冻土体的温度和应变信息,以优化冻结设计方案并监控冻结施工过程。国内外,冻结法施工监测基本以监测冻土体温度为主,对冻土体的应变直接监测鲜有报道^[16],通常采用对冻土体旁的隧道管壁进行表贴式应变监测,间接获取冻土体的应变信息。此外,在冻土体温度监测中一般采用热电偶式或“一线总线”数字式传感器^[17];应变监测一般采用电阻应变片和振弦应变传感器^[11]。但上述电子式传感器易受电磁干扰,在低温潮湿工作环境下,电阻应变片和振弦应变传感器受温度影响较大,测量精度存在较大误差。

光纤传感器具有抗电磁干扰、耐腐蚀、灵敏度和测试精度高、体积小、重量轻、耐久性强等优点,已被广泛应用于土木工程监测领域^[18-24]。张巍等^[25]采用分布式光纤传感技术在实验室对冻土瞬态温度场进行实时监测,对传统冻土温度监测技术有了一定的突破。本文首次提出一种基于光纤布拉格光栅(FBG)传感技术的冻结法施工实时监测方法,以武汉地铁2号线越江隧道3#联络通道冻结法施工为工程背景,介绍了冻结监测管FBG传感器的设计安装方法,采用小波变换去噪方法对监测的温度和应变数据进行处理,得到冻结法施工过程中沿土体冻结厚度和深度方向的温度及应变随时间的变化规律,从而为进一步掌握冻土帷幕形成和发展规律提供依据,为冻结法施工监测提供经验借鉴,具有重要的理论和实践意义。

1 工程概况

1.1 联络通道地理位置及结构

武汉地铁2号线越江隧道工程为武汉市重点工程,是武汉市重要的过江通道,位于武汉长江一、二桥之间。隧道江北起点为江汉路站,江南终点为积玉桥站,越江区间长约3100m,共有5条联络通道,其中2#和3#联络通道位于江中段。3#联络通道内设有区间泵房,是第一个结合冻结法加固和暗挖工法施工的长江隧道带泵房联络通道,也是国内最深的江底地铁联络通道。武汉地铁2号线越江隧道及3#联络通道地理位置如图1所示,3#联络通道结构尺寸如图2所示。

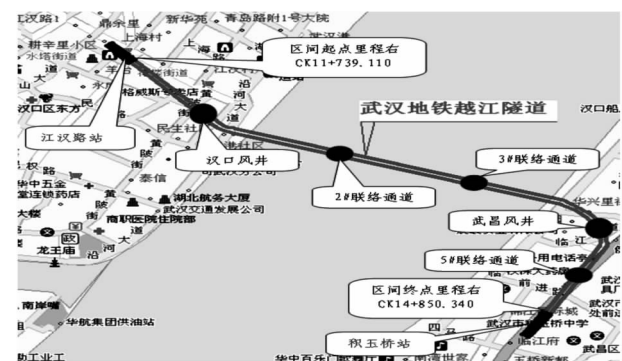


图1 越江地铁隧道及联络通道地理位置

Fig. 1 Location of metro tunnel and cross passages under Yangtze river

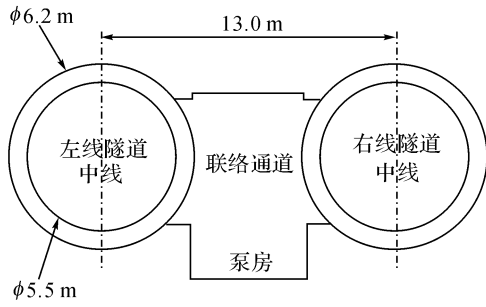


图 2 3# 联络通道示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cross passage No. 3

3# 联络通道的左右隧道中线间距为 13.0 m, 左线和右线隧道中心标高分别为 -23.486 m 和 -23.737 m, 江底标高为 -6.0~3.9 m, 平均埋深为 20.29 m. 3# 联络通道的隧道管片为钢管片, 隧道内径为 5.5 m, 管片厚度和 350 mm. 通道开挖宽度和高度分别为 3.8 m, 泵站开挖的长、宽、高尺寸分别为 5.6、4.1 和 4.5 m.

1.2 工程地质情况及冻结孔布置

3# 联络通道所在区域土层物理参数如表 1 所示. 表中: h 为土层厚度, φ 为有效应力内摩擦角, η 为水下休止角. 地下承压水头位于江面以下 49.24 m. 由表 1 可知, 在外力作用下土体的抗变形能力较差. 另外, 由于隧道处于高水头含水层中, 孔隙水压力较大, 在盾构施工过程中容易产生土层流动或砂层涌水现象, 从而导致开挖面失稳. 为此, 3# 联络通道采用“水平孔冻结加固土体, 隧道内开挖构筑”的施工方法. 在隧道内利用水平孔冻结加固地层, 使横通道外围土体冻结, 形成强度高、封闭性好的冻土帷幕, 然后采用矿山法进行横通道的开挖构筑施工.

表 1 土层物理参数

Tab. 1 Physical parameters of soil layers

层号	名称	h/m	$\varphi/(\circ)$	$\eta/(\circ)$
2-3	粉细砂	2.4	31	27
2-4	含砾中粗砂	6.2	34	31

采取左、右线隧道两侧布孔的方式对 3# 联络通道和泵房进行冻结孔布置, 结合冻结帷幕的厚度布置内、外两圈冻结孔. 联络通道左线隧道共布置 60 个冻结孔, 右线隧道共布置 46 个冻结孔, 并在联络通道的中部设置 6 个穿透孔, 用以校验钻孔方位及为冷冻系统两侧的冻结管和冷冻排管供冷. 冻结孔的布置如图 3 所示.

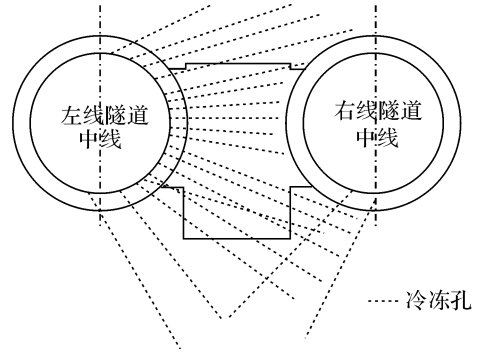


图 3 冻结孔布置图

Fig. 3 Deployment of freezing holes

2 FBG 传感器安装及布置方案

2.1 FBG 传感器安装方法

在本项目联络通道冻结法的施工监测中, FBG 传感器采用北京基康公司 BGK-FBG-4000T 型传感器. 每个传感器自带 2 个 FBG, 其中一个 FBG 用以测量监测对象的温度; 另一个 FBG 用以经过温度补偿后测量监测对象的应变, 从而实现应变和温度的同步实时监测. 在直径 89 mm 的无缝钢管中部安装 FBG 传感器, 尾端安装光纤夹具, 制作成冷冻监测管, 结构设计如图 4 所示.

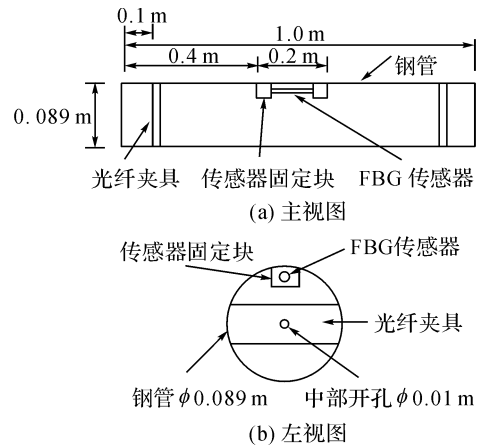


图 4 冷冻监测管设计图

Fig. 4 Design of freezing monitoring tube

带有 FBG 传感器的冷冻监测管现场安装具体流程如下:

- 1) 固定钢管内 FBG 传感器步骤为: (1) 车丝, 在 FBG 传感器的固定块上攻丝, 在钢管中间对应 FBG 传感器固定块丝口位置车丝; (2) 固定, 将 FBG 传感器用长铁块伸入钢管内, 固定块丝口与钢管丝口对上, 并上好螺丝固定; (3) 焊接, 将钢管上的丝口进行焊接, 保证其密封性.

2) 固定钢管内光纤夹具(同钢管内 FBG 传感器固定流程).

3) 光纤接头用纱布+锡箔纸+铝制线缆槽进行密封保护,铝制线缆槽卡入光纤夹具洞内.至此,冷冻监测管制作完成,其实物如图 5 所示.

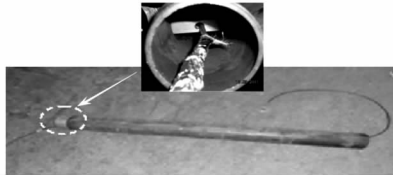


图 5 冷冻监测管实物图

Fig. 5 Photo of freezing monitoring tube

4) 用打桩机把冷冻监测管打入监测孔内.

5) 相邻冷冻监测管跳线接头用硅胶+锡箔纸进行密封保护.

6) 相邻冷冻监测管采用丝扣+焊接的方法连接.

7) 冷冻监测管尾部跳线接头用硅胶+锡箔纸进行密封保护.

通过以上步骤,冷冻监测孔内 FBG 传感器安装完成.当实施 FBG 传感器中心波长解调时,拆开冷冻监测管尾部跳线接头保护,连接光纤光栅解调仪即可进行数据采集.

2.2 FBG 传感器布置方案

在右线隧道冻土帷幕左右两侧共布设 5 个冷冻监测孔,孔内共布置 13 支 FBG 传感器,存活 7 支,具体为:冻土帷幕左侧 1、2 和 5 号冷冻监测孔内 FBG 传感器分别记为 S1、S2 和 S7,分别距离隧道外壁 0.55、0.57 和 0.5 m;冻土帷幕右侧 3 号冷冻监测孔内 FBG 传感器记为 S3,距离隧道外壁 0.65 m;4 号冷冻监测孔内 FBG 传感器记为 S4、S5 和 S6,分别距离隧道外壁 0.35、1.35 和 2.35 m;其余 6 支 FBG 传感器无法采集到信号,其原因是连接 FBG 传感器光纤跳线的法兰盘在施工过程中受到破坏,导致光信号无法传输.冷冻监测孔内 FBG 传感器分布情况如图 6 和图 7 所示,现场冷冻监测孔布置情况如图 8 和图 9 所示.

3 数据分析方法

3.1 FBG 传感器工作原理

FBG 传感器是通过改变光纤芯区折射率,使其产生小的周期性调制而形成,其反射中心波长决定于折射率调制的空间周期和调制的幅度^[26],如下式所示:

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda. \tag{1}$$

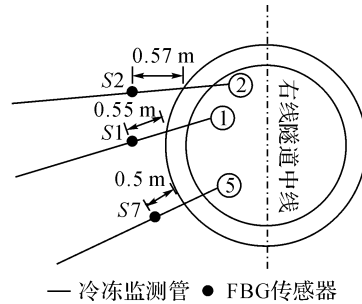


图 6 冻土帷幕左侧冷冻监测孔布设剖面图

Fig. 6 Layout of freezing monitoring holes at left of frozen soil wall

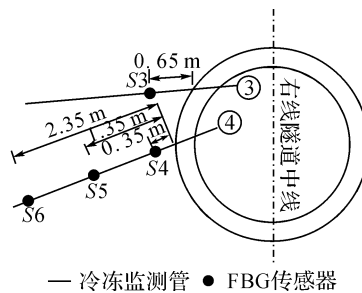


图 7 冻土帷幕右侧冷冻监测孔布设剖面图

Fig. 7 Layout of freezing monitoring holes at right of frozen soil wall

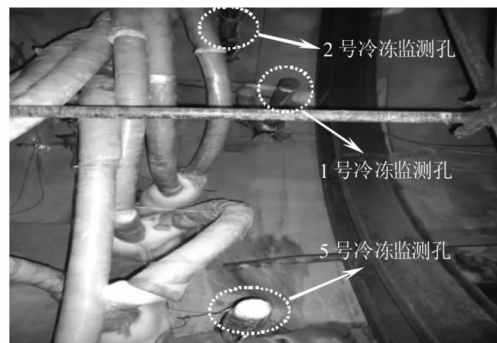


图 8 冻土帷幕左侧冷冻监测孔安装实物图

Fig. 8 Freezing monitoring holes at left of frozen soil wall

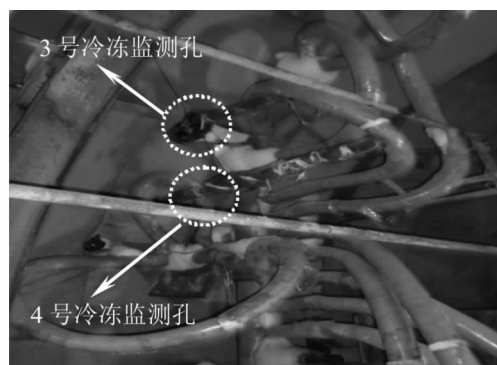


图 9 冻土帷幕右侧冷冻监测孔安装实物图

Fig. 9 Freezing monitoring holes at right of frozen soil wall
式中: λ 为反射中心波长, n_{eff} 为有效折射率, Λ 为空间调制周期.

对式(1)微分得

$$\Delta\lambda = 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda + 2\Lambda\Delta n_{\text{eff}} \quad (2)$$

从式(2)中可以看出,当 n_{eff} 或 Λ 改变时,反射中心波长会相应的发生改变.当 FBG 周围的温度、应力或其他待测物理量发生变化时,将导致 n_{eff} 或 Λ 的变化,从而使 λ 发生变化.通过检测 λ 产生的位移情况,即可获得待测物理量的变化情况.FBG 传感原理如图 10 所示.

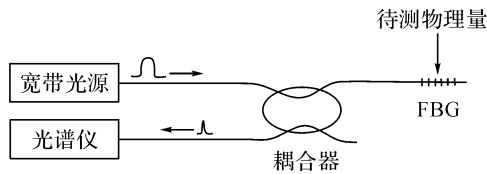


图 10 FBG 传感原理

Fig. 10 Sensing principle of FBG

在冻结法施工过程中,FBG 传感器受到外界温度和应变的作用,反射中心波长随温度和应变的变化关系为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = K_\epsilon\Delta\epsilon + K_\theta\Delta\theta \quad (3)$$

式中: K_ϵ 为应变敏感系数, K_θ 为热敏系数, $\Delta\epsilon$ 为应变变化量, $\Delta\theta$ 为温度变化量.

由式(3)可得外界应变变化量为

$$\Delta\epsilon = \frac{1}{K_\epsilon} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} - K_\theta\Delta\theta \right) \quad (4)$$

当 FBG 传感器只受温度作用时,式(3)变为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = K_\theta\Delta\theta \quad (5)$$

由式(5)可得 FBG 传感器温度变化量为

$$\Delta\theta = \frac{1}{K_\theta} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (6)$$

3.2 小波变换去噪原理

原始 FBG 传感器中心波长原始信号存在高频噪声,通过小波变换去噪技术可以去除高频噪声信号^[27].小波变换去除高频噪声信号过程为:首先选择一个基小波并确定分解的层次进行分解计算,然后对各个分解尺度下的高频系数选择一个阈值进行阈值量化处理;最后根据小波分解的最底层低频系数和高频系数进行一维小波重构.

设 $\psi(t)$ 为基小波的函数, $f(t)$ 为平方可积函数,其小波变换为

$$W_\psi(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt = \langle f(t), \psi_{a\tau}(t) \rangle \quad (7)$$

式中: $a > 0$ 为尺度因子, τ 为时间因子.

小波逆变换为

$$f(t) = \frac{1}{c_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [W_\psi(a, \tau) \psi \left(\frac{t-\tau}{a} \right)] \frac{1}{a^2} da d\tau \quad (8)$$

在实际信号处理中,把连续小波离散化.原始信号 $f(t)$ 由正交小波基表示为

$$f(t) = \sum_j \sum_k \alpha_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (9)$$

式中: $\psi_{j,k}(t)$ 为小波基, $\alpha_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{j,k}(t) dt$ 为小波系数.

对小波系数进行软阈值判断:

$$\eta(\alpha_{j,k}) = \alpha_{j,k} - \text{sgn}(\alpha_{j,k}R) I(|\alpha_{j,k}| > R) \quad (10)$$

式中: $\eta(\alpha_{j,k})$ 为软阈值判断后的小波系数, $I(\cdot)$ 为两数取小运算, R 为阈值估计.

4 监测数据分析

本项目监测数据采集的时间为 2012 年 1 月 18 日至 2012 年 3 月 22 日,共 65 d(冷冻机于 2012 年 1 月 13 日开始工作).结合上述 FBG 传感器中心波长与应变和温度的换算关系,FBG 传感器中心波长原始监测数据可以转换为监测点的应变和温度信息.对于其中的高频噪声信号,基于小波变换去噪技术,采用 MATLAB 软件依次调用小波分解函数,噪声阈值预估函数以及小波重构函数的方法进行处理.以 FBG 传感器 S2 为例,FBG 解调仪采集到的波长信号如图 11 所示,经过小波变换去除高频噪声后的波长信号如图 12 所示.

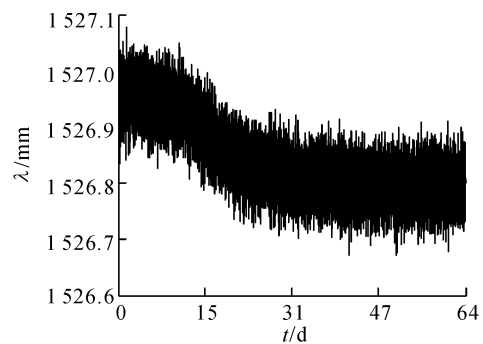


图 11 FBG 传感器 S2 原始波长随时间变化曲线

Fig. 11 Measured wavelength time history of FBG sensor S2

4.1 FBG 传感器温度和应变监测数据分析

图 13 为冷冻监测管内 FBG 传感器 S1~S7 温度随冷冻时间的变化曲线.由图 13 可知,冷冻初期 20 d 左右(由 2012 年 1 月 13 日冷冻机开始工作计算),冻土温度有较大的降幅,而后降幅呈现缓慢,并

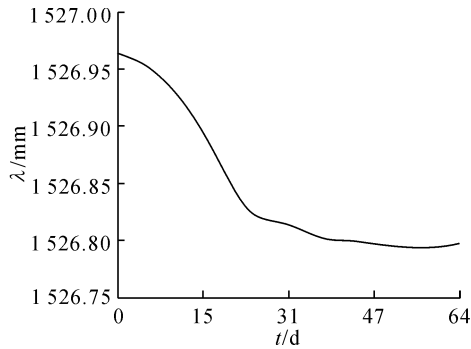


图 12 FBG 传感器 S2 去噪后的波长随时间变化曲线
Fig. 12 De-noised wavelength time history of FBG sensor S2

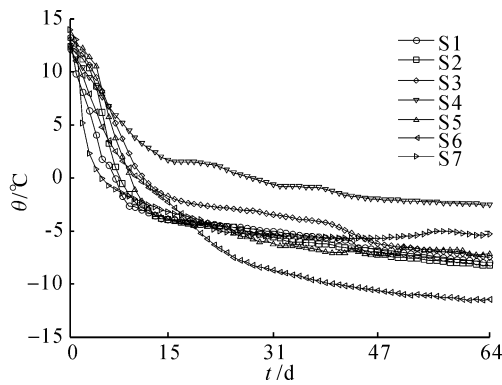


图 13 FBG 传感器温度随时间变化曲线
Fig. 13 Temperature time histories of FBG sensors

趋于稳定. 冷冻初期由于冻土帷幕处于冻土交圈前时期和积极冻结期, 冻土温度下降较快; 而后进入维持冻结期, 降温趋于缓慢, 并最终维持稳定.

图 14 为冷冻监测管内 FBG 传感器 S1~S7 应变随冷冻时间的变化曲线. 由图 14 可知, 冷冻初期 20 d 左右(由 2012 年 1 月 13 日冷冻机开始工作计算), 冷冻监测管的应变变化幅度比较大, 而后趋于稳定. 冷冻监测管最大拉应变约为 200×10^{-6} , 最大

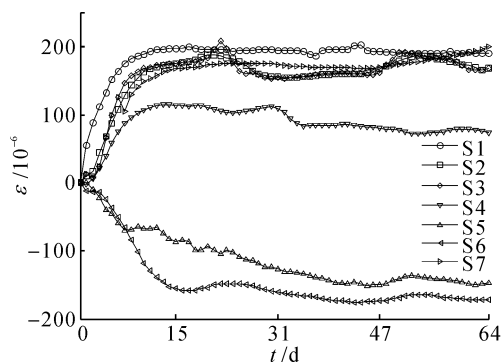


图 14 FBG 传感器应变随时间变化曲线
Fig. 14 Strain time histories of FBG sensors

压应变约为 180×10^{-6} . 值得注意的是, 冷冻监测管应变包括钢管热胀冷缩引起的热应变以及周围土体的冻胀力作用引起的应变, 本项目监测管内 FBG 传感器监测到的应变为上述两者综合作用引起的应变.

4.2 冻结厚度方向温度和应变随时间变化规律

图 15 为冻土帷幕左侧 1、2 和 5 号冷冻监测孔内 FBG 传感器 S1、S2 和 S7, 以及冻土帷幕右侧 3 和 4 号冷冻监测孔内 FBG 传感器 S3 和 S4 的温度随冷冻时间的变化曲线. 由图 15 可知, 安装于冻土帷幕左侧冷冻监测孔内的 FBG 传感器 S1、S2 和 S7, 以及安装于冻土帷幕右侧冷冻监测孔内的 FBG 传感器 S3 的温度变化趋势基本一致, 原因是这 4 支 FBG 传感器与隧道外壁的距离相近, 分别为 0.55 m (S1)、0.57 m (S2)、0.65 m (S3) 和 0.5 m (S7). 安装于冻土帷幕右侧冷冻监测孔内的 FBG 传感器 S4, 整体的降温速度及幅度均较其他 4 支 FBG 传感器小, 原因是 FBG 传感器 S4 与隧道外壁的距离最小, 为 0.35 m, 在冷冻期间 FBG 传感器 S4 附近冻土与隧道管片热交换速度较快.

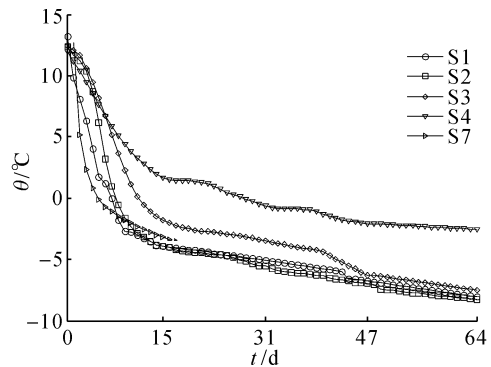


图 15 冻结厚度方向 FBG 传感器温度随时间变化曲线
Fig. 15 Temperature time histories of FBG sensors in thickness direction of frozen soils

图 16 为冻土帷幕左侧 1、2 和 5 号冷冻监测孔内 FBG 传感器 S1、S2 和 S7, 以及冻土帷幕右侧 3 和 4 号冷冻监测孔内 FBG 传感器 S3 和 S4 的应变随冷冻时间的变化曲线. 由图 16 可知, 5 支 FBG 传感器均为拉应变. 安装于冻土帷幕左侧冷冻监测孔内的 FBG 传感器 S1、S2 和 S7, 以及安装于冻土帷幕右侧冷冻监测孔内的 FBG 传感器 S3 的应变变化趋势基本一致, 原因是这 4 支 FBG 传感器与隧道外壁的距离相近, 分别为 0.55 m (S1)、0.57 m (S2)、0.65 m (S3) 和 0.5 m (S7). 安装于冻土帷幕右侧冷冻监测孔内的 FBG 传感器 S4, 整体的应变变化速度及幅度均较其他 4 支 FBG 传感器小, 表明靠近隧道外壁处冻土应力可能相对较小, 在联络通道开

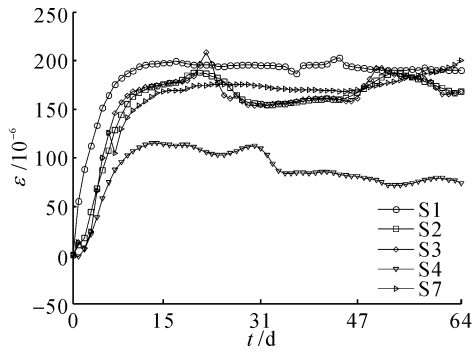


图 16 冻结厚度方向 FBG 传感器应变随时间变化曲线
Fig. 16 Strain time histories of FBG sensors in thickness direction of frozen soils

挖施工时应该注意隧道外壁冻土层的衬砌保护工作。

4.3 冻结深度方向温度和应变随时间变化规律

图 17 为冻土帷幕右侧 4 号冷冻监测孔内 FBG 传感器 S4、S5、S6 温度随冷冻时间的变化曲线。由图 17 可知,冻土帷幕右侧冻土在距离隧道外壁 0.35 m (S4)、1.35 m (S5)和 2.35 m (S6)处,温度最终稳定在 -2、-8 和 -12 °C。可以看出,随着冻土深度的增大,冻土温度降幅越大,冻土越不容易与外界隧道发生热交换,冻土沿深度方向温度呈现出梯次化分布。

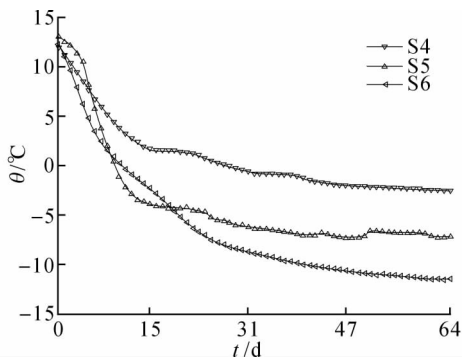


图 17 冻结深度方向 FBG 传感器温度随时间变化曲线
Fig. 17 Temperature time histories of FBG sensors in depth direction of frozen soils

图 18 为冻土帷幕右侧 4 号冷冻监测孔内 FBG 传感器 S4、S5、S6 应变随冷冻时间的变化曲线。由图 18 可知,冷冻监测管在距离隧道外壁 0.35 m (S4)处受拉应力,在距离隧道外壁 1.35 m (S5)和 2.35 m (S6)处受压应力。

5 结 论

本文以武汉地铁 2 号线越江隧道 3 号联络通道冻结法施工项目为工程背景,采用 FBG 传感技术对

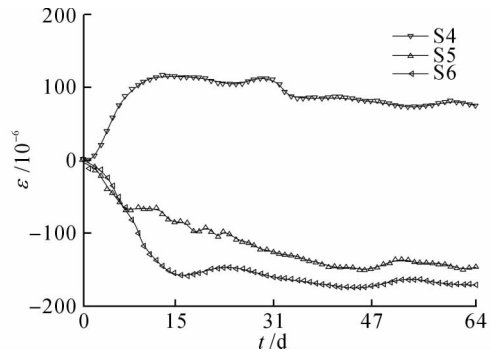


图 18 冻结深度方向 FBG 传感器应变随时间变化曲线
Fig. 18 Strain time histories of FBG sensors in depth direction of frozen soils

冻结法施工进行实时监测. 通过设计特定的带 FBG 传感器的冷冻监测管,植入冻土帷幕左右两侧的冷冻监测孔内对冻结法施工过程中的温度和应变进行实时监测. 通过分析监测结果,得出如下结论:

(1) 冷冻初期 20 d 左右,由于冻土帷幕处于冻土交圈前时期和积极冻结期,冻土温度和应变下降较快;而后进入维持冻结期,温度和应变降幅趋于缓慢,并最终维持稳定。

(2) 安装于冻土帷幕冷冻监测孔内与隧道外壁距离相近的 FBG 传感器温度和应变变化趋势基本上保持一致. 越靠近隧道外壁的 FBG 传感器,整体的降温速度和幅度均较其他 FBG 传感器小,说明越靠近隧道外壁的冻土与隧道管片的热交换速度越快;越靠近隧道外壁的 FBG 传感器,整体的应变变化速度和幅度均较其他 FBG 传感器小,说明越靠近隧道外壁的冻土受力较小。

(3) 通过分析安装于冻土帷幕冷冻监测孔内不同深度的 FBG 传感器温度和应变数据可知,随着冻土深度的增大,冻土越不容易与外界隧道发生热交换,冻土温度降幅越大,冻土沿深度方向温度呈现出梯次化分布。

本项目是首次基于 FBG 传感技术的冻结法施工实时监测,没有经验可以借鉴;而且在 FBG 传感器安装实践过程中受冻结法施工工艺的限制,无法准确获取 FBG 传感器与冻结监测管、钢管弯曲方向、以及冻土发展方向的准确空间关系,因此,应变监测结果有待做进一步深入的理论、数值及现场试验研究. 另外,本文作者建议在今后相关的项目实施过程中需重点加强对 FBG 传感器及其连接光纤跳线的保护,以提高 FBG 传感器的存活率,从而获取足够完整的监测数据用以分析冻土帷幕的形成和发展规律。

参考文献(References):

- [1] MA W. Review and prospect of the studies of ground freezing technology in China[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2001, 23(3): 218-224.
- [2] 马魏,王大雁. 中国冻土力学研究 50 年回顾与展望[J]. **岩土工程学报**, 2012, 34(4): 625-640.
MA Wei, WANG Da-yan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect[J]. **China Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(4): 625-640.
- [3] 陈瑞杰,程国栋,李述训,等. 人工地层冻结应用研究进展和展望[J]. **岩土工程学报**, 2000, 22(1): 40-44.
CHEN Rui-jie, CHENG Guo-dong, LI Shu-xun, et al. Development and prospect of research on application of artificial ground freezing[J]. **China Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(1): 40-44.
- [4] LAI Y M, ZHANG X F, YU W B, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for the coupled problem of the heat transfer of the surrounding rock and the heat convection between the air and the surrounding rock in cold-region tunnel [J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2005, 20(4): 323-332.
- [5] HOLDEN J T. Improved thermal computations for artificially frozen shaft excavations[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 1997, 123(8): 696-701.
- [6] LACKNER R, AMON A, LAGGER H. Artificial ground freezing of fully saturated soil: thermal problem [J]. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, 2005, 131(2): 211-220.
- [7] LACKNER R, PICHLER C, KLOIBER A. Artificial ground freezing of fully saturated soil: viscoelastic behavior[J]. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, 2008, 134(1): 1-11.
- [8] ZHANG X F, LAI Y M, YU W B, et al. Non-linear analysis for the freezing-thawing situation of the rock surrounding the tunnel in cold regions under the conditions of different construction seasons, initial temperatures and insulations[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2002, 17(3): 315-325.
- [9] LI S Y, LAI Y M, ZHANG M Y, et al. Minimum ground pre-freezing time before excavation of Guangzhou subway tunnel[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2006, 46(3): 181-191.
- [10] YANG P, KE J M, WANG J G, et al. Numerical simulation of frost heave with coupled water freezing, temperature and stress fields in tunnel excavation [J]. **Computers and Geotechnics**, 2006, 33(6/7): 330-340.
- [11] 周晓敏,王梦恕,陶龙光,等. 北京地铁隧道水平冻结和暗挖施工模型试验与实测研究[J]. **岩土工程学报**, 2003, 25(6): 676-679.
ZHOU Xiao-min, WANG Meng-shu, TAO Long-guang, et al. Model test and prototype observation on artificial ground freezing and tunneling of Beijing subway[J]. **China Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(6): 676-679.
- [12] PIMENTEL E, SRES A, ANAGNOSTOU G. Large-scale laboratory tests on artificial ground freezing under seepage-flow conditions [J]. **Geotechnique**, 2012, 62(3): 227-241.
- [13] 岳丰田,仇培云,杨国祥,等. 复杂条件下隧道联络通道冻结施工设计与实践[J]. **岩土工程学报**, 2006, 28(5): 660-663.
YUE Feng-tian, QIU Pei-yun, YANG Guo-xiang, et al. Design and practice of freezing method applied to connected aisle in tunnel under complex conditions[J]. **China Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(5): 660-663.
- [14] OU C Y, KAO C C, CHEN C I. Performance and analysis of artificial ground freezing in the shield tunneling [J]. **Journal of GeoEngineering**, 2009, 4(1): 29-40.
- [15] PIMENTEL E, PAPAKONSTANTINOUS S, ANAGNOSTOU G. Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunnelling [J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2012, 28(2): 57-69.
- [16] 崔广心,杨维好. 冻结管受力的模拟试验研究[J]. **中国矿业大学学报**, 1990, 19(2): 57-65.
- [17] 胡向东,刘瑞锋. 基于“一线总线”的冻结法温度监测系统[J]. **地下空间与工程学报**, 2007, 3(5): 937-940.
HU Xiang-dong, LIU Rui-feng. Temperature monitoring system for freezing method based on “1-wire bus” [J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2007, 3(5): 937-940.
- [18] BETZ D C, STAUDIGEL L, TRUTZEL M N, et al. Structural monitoring using fiber-optic Bragg grating sensors [J]. **Structural Health Monitoring**, 2003, 2(2): 145-152.

