

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0048

基于 FRP 筋自感知监测技术的隧道衬砌施工 全过程应变分析

郭 东¹, 魏 强², 李锦辉¹, 黄正凯³, 白 石⁴, 贾大鹏², 钱林峰⁴, 欧进萍¹

(1. 哈尔滨工业大学(深圳) 深圳市土木工程智能结构系统重点实验室, 广东 深圳 518055; 2. 中国国家铁路集团有限公司 工程管理中心, 北京 100844; 3. 中铁十一局集团有限公司, 湖北 武汉 430061; 4. 智性纤维复合加固南通有限公司, 江苏 南通 226010)

摘 要: 作为地下结构, 隧道衬砌的隐蔽性导致其全天候的实时监测非常困难。提出了一种基于内嵌光纤自感知纤维增强复合材料(fiber reinforced plastic, FRP)筋的隧道衬砌智能监测方法, 将光纤传感器嵌入 FRP 材料中形成自感知 FRP 筋并嵌入隧道衬砌中, 实现对隧道衬砌不同位置全天候、长时间、高精度监测, 监测结果能够定量给出隧道衬砌环向的实时受力状态, 反映裂缝生成风险。采用该智能监测方法对广汕高铁陈塘隧道进行了监测, 监测数据反映了隧道衬砌施工全过程的力学机制。影响衬砌结构安全的因素主要有隧道围岩压力、水化热导致的温差应力以及混凝土干缩导致的应力; 其中, 混凝土水化热产生的温差效应导致衬砌内侧受到较大拉应力, 需采取合理的施工措施以避免温差效应引起的拉应力过大而产生温度裂缝。所提出的智能监测方法能够全天候、长时间、实时监测隧道衬砌应力-应变状态, 此自感知系统将在隧道运营过程中持续、及时反映隧道衬砌开裂风险, 为高速铁路列车的运行安全提供技术保障。

关 键 词: 衬砌智能监测; 全阶段受力状况; 衬砌裂缝; 光纤光栅; 自感知 FRP 筋

中图分类号: U456.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2022)12-3503-10

Strain analysis of tunnel lining during construction based on self-sensing monitoring technology of FRP

GUO Dong¹, WEI Qiang², LI Jin-hui¹, HUANG Zheng-kai³, BAI Shi⁴, JIA Da-peng²,
QIAN Lin-feng⁴, OU Jin-ping¹

(1. Shenzhen Key Laboratory of Intelligent Structure System in Civil Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong 518055, China; 2. Engineering Management Center, China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China; 3. China Railway 11 Bureau Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430061, China; 4. Zhixing FRP Reinforcement Nantong Co., Ltd., Nantong, Jiangsu 226010, China)

Abstract: It is difficult to monitor the underground tunnel lining in an all-weather manner due to its concealment. An intelligent monitoring method of tunnel lining based on self-sensing FRP (fiber reinforced plastic) bar embedded with optical fiber is proposed in this paper. The optical fiber sensor is embedded in the fiber reinforced plastic to form self-sensing FRP bar, which is installed in the tunnel lining, to monitor the stress state of the tunnel lining in a real-time and all-weather manner. The monitoring results can show the circumferential stress of the tunnel lining and predict the risk of crack generation. The intelligent monitoring method is used to monitor Chentang tunnel in Guangzhou-to-Shantou high-speed railway. The main factors affecting the safety of lining structure during the period from lining construction to operation are surrounding rock pressure, temperature difference stress caused by hydration heat and stress caused by concrete drying shrinkage. The temperature difference stress caused by hydration heat can lead to a large tensile stress on the inner side of the lining. Therefore, reasonable construction measures need to adopt to avoid cracking caused by temperature effect. The proposed intelligent monitoring method is capable of monitoring the tunnel lining stress-strain state in real time, for a long period of time and in all weather. This self-sensing system will continuously and timely reflect the risk of tunnel lining cracking during the tunnel operation, providing a technical guarantee for the operational safety of high-speed railroad trains.

Keywords: intelligent monitoring of lining; stress state at full stage; lining cracks; fiber bragg grating; self-sensing FRP bar

收稿日期: 2022-01-10

修回日期: 2022-05-19

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2019YFC1511101); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划; 深圳市重点实验室筹建启动项目 (No.ZDSYS20200810113601005)。

This work was supported by the National Key R&D Program of China (2019YFC1511101), the Science and Technology R&D Plan of China State Railway Group Co., Ltd., and the Shenzhen Key Laboratory Launching Project (ZDSYS20200810113601005).

第一作者简介: 郭东, 男, 1993 年生, 博士研究生, 主要从事隧道健康监测方面的研究工作。E-mail: 13713510895@163.com

通讯作者: 李锦辉, 女, 1978 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程风险分析与智能岩土工程方向的研究。E-mail: jinhui.li@hit.edu.cn

1 引言

高速铁路隧道具有服役环境差、地质条件复杂、运营荷载动力作用强、空气动力学效应显著等特点。在施工阶段,目前的施工技术水平和机械装备能力还不能完全杜绝质量缺陷的产生,尤其是隧道衬砌质量缺陷,如开裂、厚度不足等,导致在运营期发生混凝土掉块等问题,严重影响高速铁路运营安全^[1]。

隧道混凝土结构属于薄壁、大体积、大面积混凝土类型,目前基本按经验类比法进行设计。由于地下工程地质条件的不确定性、复杂性以及隐蔽性,隧道衬砌结构受力状态也具有较强的不确定性。为了更好地把握隧道结构的安全状态,目前多采用以定期检测为主^[2]的技术手段进行灾害防控,较为典型的技术如探地雷达技术^[3-5]、高清摄像技术^[6-9]以及三维激光扫描技术^[10-15]等。探地雷达技术通过电磁波在材料间传播时介电常数的差异反映隧道深部的状况,通过分辨反射波的属性,可以对隧道的病害进行检测与识别。高清摄像技术是对隧道衬砌进行拍摄,然后对收集到的图像数据进行分析处理,进而对各类病害进行识别判断。三维激光扫描技术是基于激光测距原理,对隧道衬砌整体的坐标进行测量,得出隧道的坐标数据,进而描绘隧道的原型,再根据重建的隧道三维图像进行检测。以上检测技术主要针对衬砌成型后进行缺陷性检测,并不能从结构力学原理上解释存在的问题和形成机制。传统的电阻式传感器虽然能够测量混凝土结构力学性能,但由于安装不便、布线复杂、易于破坏以及耐久性问题,常常导致测量数据不准确或者失效,不是隧道混凝土衬砌监测的理想手段。

光纤传感器具有精度高、抗腐蚀性能好、抗电磁干扰能力强、防水性能好、信号安全度高、能够实现分布式测量等特点,已广泛应用于建筑结构^[16-18]、桥梁结构^[19-20]、岩土工程^[21]等基础设施的结构健康监测领域。近年来,基于光纤传感技术的隧道结构安全监测研究得到了关注,付华等^[22]利用光纤布拉格光栅传感器监测隧道温度,研发了一套隧道火灾预警预报系统,该火灾监测系统能够实时显示隧道内部温度,进而对火灾情况进行判断。施斌等^[23]利用布里渊光纤传感器对隧道进行了变形监测,证明了该方法对于隧道健康监测是有效的。Bremer 等^[24]利用光纤技术设计了一套湿度传感器系统,该系统可以实时监测污水管道接口是否发生泄漏。Cheng 等^[25]采用光纤传感器对盾构隧道的管

片变形进行监测,效果良好。毛江鸿^[26]在衬砌混凝土浇筑完成后将布里渊光纤传感器挤入到隧道衬砌预埋的微管中,对隧道衬砌应变进行分布式监测。侯公羽等^[27-30]针对隧道中光纤传感器的布设、保护以及光纤与衬砌的耦合作用开展了研究,基于分布式光纤监测数据提出了隧道沉降的反演方法,并且通过模型试验验证了该方法。

光纤传感器具有优良的感知传感特性,可以对隧道结构受力与变形进行长期监测,尤其对于围岩破碎的高风险地段,实施监测的必要性显著提高。但目前已开发的光纤传感监测系统均是针对浇筑完成的隧道衬砌进行受力监测,无法监测初始围岩压力,只能针对后续荷载引起的衬砌变化进行监测;无法体现衬砌混凝土早期水化热导致温度效应引起的内应力影响,无法完整评价隧道结构的安全状态。此外,光纤传感器自身十分脆弱,一直以来,将其应用于实际工程的过程中,涉及传感器安装、线路铺设与保护等都是亟待解决的难题^[2]。

本文提出一种基于内嵌光纤自感知纤维增强复合塑料(fiber reinforced plastic, FRP)筋的隧道结构实时监测方法,从而实现隧道结构的长期安全监测。利用光纤可以与玻璃、碳、玄武岩等纤维天然融合的特点,将光纤与 FRP 材料进行一体化制作,形成内嵌光纤自感知 FRP 筋。该技术不仅保护了脆弱的光纤,且制品具备受力承载与感知传感的双重功能,解决了传感器工程现场安装的问题;同时,FRP 筋也可以代替部分受力钢筋承受荷载作用。因此,在隧道结构中使用内嵌光纤自感知 FRP 筋,不仅可以加固隧道衬砌,同时实现了隧道结构的受力监测。在混凝土浇筑之前预埋内嵌光纤自感知 FRP 筋,对隧道衬砌全阶段受力状态进行监测,通过监测结果反映隧道混凝土应变情况和开裂风险,进而对隧道健康状况进行实时预报。

2 内嵌光纤自感知 FRP 筋

光纤布拉格光栅传感器由光源、信号传输光纤、布拉格光栅传感器件和信号处理仪器组成。光源发射的光波经过光纤传输到光栅传感器件中,光波中满足 Bragg 条件的光波会被反射,光栅 Bragg 条件为^[31]

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: λ_B 为光栅波长; n_{eff} 为光栅的有效折射率; Λ 为光栅周期。

经过光栅传感器反射的光波被分成了反射光波

和透射光波，反射光波和透射光波的波长取决于光栅的有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 。轴向拉力或温度改变等外界物理过程会导致光栅的有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 发生改变，进而引起反射光波的波长发生漂移，测出此波长的漂移量即能感知外界物理量的变化。当光栅传感器受到轴向拉力与温度影响时，光栅传感器的 Bragg 波长为^[31]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1-P)\epsilon + (a + \xi)\Delta T \quad (2)$$

式中： $\Delta\lambda_B$ 为光栅波长变化量； P 为弹光系数； ϵ 为轴向应变导致的光栅周期变化； a 为热胀系数； ξ 为光胀系数； ΔT 为温度变化量。

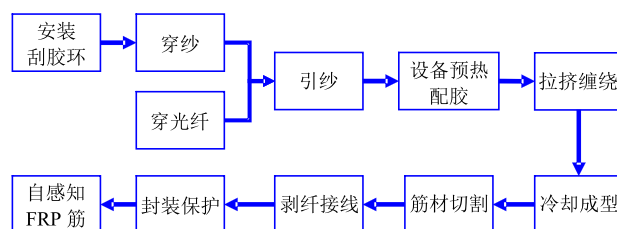
内嵌光纤自感知 FRP 筋是由智性纤维复合加固南通有限公司研发的一种兼具受力承载与感知传感功能的结构智能加固与安全监测制品。在玻璃纤维增强复合塑料（Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP）拉挤成型过程中将光纤传感器预埋到 FRP 材料中，利用 GFRP 材料对光纤传感器进行封装保护，形成内嵌光纤传感器的 FRP 智能筋，生产工艺如图 1(a)所示。内嵌光纤自感知 FRP 筋直径为 8 mm，密度为 1.9 g/cm³，弹性模量为 40 GPa，线膨胀系数为 7.2×10^{-6} ，抗拉强度为 550 MPa，极限应变为 1.2%。自感知 FRP 筋的测量精度为 1×10^{-6} ，量程为 $-1\,500 \times 10^{-6} \sim 6\,000 \times 10^{-6}$ （正值代表 FRP 筋受拉，下同）。

内嵌光纤自感知 FRP 筋是由 FRP 材料内嵌光纤光栅传感器一体化制作成型，如图 1(b)所示，从根本上解决了传统外贴传感器监测精度差、成本高、易损坏、耐久性差等缺点，不但对衬砌有加固作用，还能长期监测衬砌的受力状态，且光纤与监测对象实现了完全耦合，完整继承了光纤传感器优良的感知特性，极大地提高了传感器工作的精度与耐久性。此外，自感知 FRP 筋可在施工中与钢筋一同安装到钢筋网中，无需其他多余的施工步骤，相较于传统二次人工投入的监测方式，极大地节约了人力与时间成本。自感知 FRP 筋测量系统由电源、解调仪、光纤跳线/光缆、自感知 FRP 筋及数据采集仪组成，如图 1(c)所示。

3 隧道衬砌智能监测系统设计与安装

采用光纤准分布式测量方案，即在一根传输线路上按设计要求分布多个光栅测点，形成内嵌准分布式光栅串的多测点自感知 FRP 筋材，为了防止由于自感知 FRP 筋与混凝土之间黏结力不足而产生

滑动，在各个光栅测点两侧安装限位环。如图 2(a)所示。通过在同一根光纤上等间距刻印多个光栅，可以实现局部范围内的分布式监测。通过对隧道衬砌不同位置进行高精度监测，即可以反映隧道衬砌环向整体受力状态，同时也可以通过局部范围的分布式监测结果，预测裂缝生成风险。



(a) 自感知 FRP 筋制作流程图



(b) 内嵌光纤自感知 FRP 筋



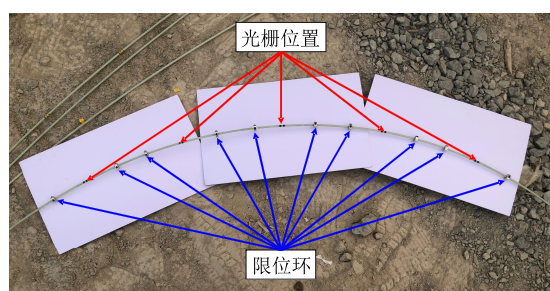
(c) 测量系统

图 1 内嵌光纤自感知 FRP 筋及其测量系统
Fig.1 Measurement system of self-sensing FRP bar

由于温度变化会引起光纤光栅传感器数据的变化，在监测隧道衬砌应力变化时需剔除温度的影响，否则会造成测量精度下降。采用金属封装的光纤光栅传感器作为温度传感器消除温度对监测数据的影响，光纤光栅温度传感器如图 2(b)所示。在衬砌内布置不受力的光纤光栅温度传感器，温度传感器只

受温度影响而不受外力影响。因此,在不考虑应力与温度耦合作用的情况下便可剔除温度的影响,同时还可以对衬砌温度进行监测。

在明确监测断面后,依次安装自感知 FRP 筋、光纤光栅解调仪、数据采集云系统等,从而实现隧道衬砌监测数据远程采集与分析。考虑到隧道为隐蔽的地下工程,隧道内信号较差,为了方便数据远程传输以及隧道的安全运营,无线传输设备宜放置在隧道外,该监测系统如图 3 所示。



(a) 多测点自感知 FRP 筋材



(b) 光纤光栅温度传感器

图 2 智能监测测量元件

Fig.2 Self-sensing FRP bar embedded with optical fiber

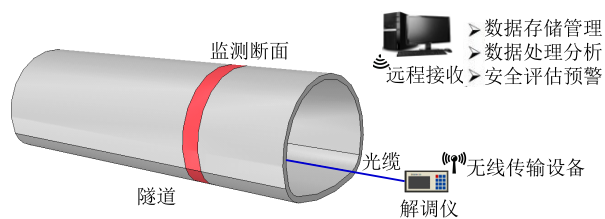


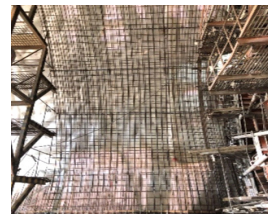
图 3 隧道衬砌监测示意图

Fig.3 Schematic of tunnel lining intelligent monitoring

隧道衬砌智能监测系统施工流程如图 4 所示。在隧道衬砌铺设钢筋网后,将自感知 FRP 筋与光纤光栅温度传感器绑扎在钢筋网中,随混凝土一同浇筑到衬砌之中。隧道衬砌施工完成后,将自感知 FRP 筋与数据采集设备进行连接,实现对隧道衬砌的实时监测与安全分析。自感知 FRP 筋自身具备感知性能,在浇筑和振捣混凝土过程中需注意对感知元件和连接光缆进行保护。



(a) 作业平台就位



(b) 铺设钢筋网



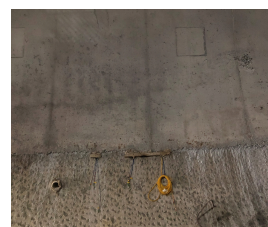
(c) 安装 FRP 筋



(d) 衬砌台车就位



(e) 浇筑混凝土



(f) 混凝土脱模



(g) 连接无线设备



(h) 运营监测

图 4 智能监测系统安装流程图

Fig.4 Installation of intelligent monitoring system

4 广汕高铁陈塘隧道衬砌智能监测

广州至汕尾高速铁路陈塘隧道位于广东省惠州市惠东县,长 344 m,埋深 10~40 m,直径 13 m,单洞双线。隧道进出口里程分别为 DK173+666 m 与 DK174+010 m。DK173+750 m 里程处围岩破碎,围岩等级为 V 级,施工过程中有地下水涌出。选择该断面作为监测断面,布置自感知 FRP 筋对衬砌受力情况进行监测。监测断面衬砌为钢筋混凝土结构,混凝土标号为 C35,钢筋型号为 HRB 400,直径为 14 mm。

监测断面的自感知 FRP 筋安装在衬砌内侧钢筋位置,共安装 5 根自感知 FRP 筋,每根自感知 FRP 筋包含 5 个光栅测点,光栅测点之间距离为

30 cm, 形成范围为 1.5 m 的准分布式光栅测点群, 实现了局部高精度监测。5 根自感知 FRP 筋的准分布式光栅测点群位于隧道衬砌的拱部位置, 准分布式光栅的中心分别位于隧道衬砌左起拱线、左拱肩、拱顶、右拱肩以及右起拱线位置, 如图 5 所示。

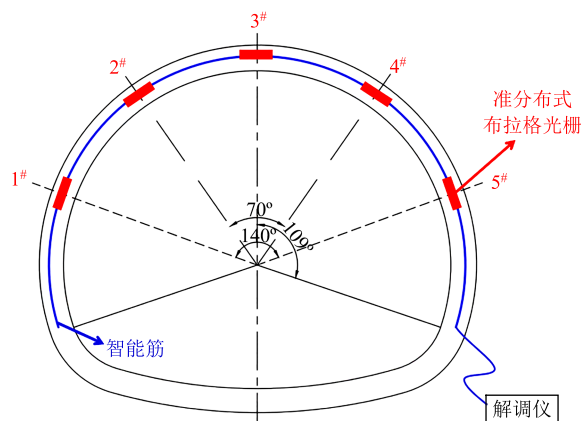


图 5 陈塘隧道自感知 FRP 筋监测位置

Fig.5 Monitoring location of Chentang tunnel

在布置好的钢筋网内安装自感知 FRP 筋时, 将自感知 FRP 筋安装在相邻的钢筋中间。本次试验的 5 根自感知 FRP 筋分别安装在相邻的 6 根钢筋中间, 衬砌中钢筋间距为 20 cm, 试验安装的 5 根自感知 FRP 筋沿隧道走向的分布范围为 80 cm。在自感知 FRP 筋安装完成后, 应将自感知 FRP 筋用钢丝与钢筋网中的箍筋绑扎固定, 防止在浇筑混凝土过程中自感知 FRP 筋脱落。自感知 FRP 筋安装见图 6。

为了在后续自感知 FRP 筋进行监测时剔除温度的影响, 在布置断面安装光纤光栅温度传感器(如图 7 所示)。在衬砌台车就位之前, 需在仰拱上弯部分开槽, 引出自感知 FRP 筋与温度传感器的光纤跳线, 避免衬砌台车混凝土模具贴紧仰拱上弯部分时压断光纤。

陈塘隧道监测断面数据无线传输与数据采集如图 8 所示。自感知 FRP 筋通过光缆与隧道外光纤光栅解调仪连接。光纤光栅解调仪通过数据传输单元 (data transfer unit, DTU) 将数据无线传输到服务器, 数据传输的频率以及时间可通过频率调控器进行设置。传输到服务器的数据可以远程实时调取, 进而及时分析隧道衬砌的受力状态与安全状况。

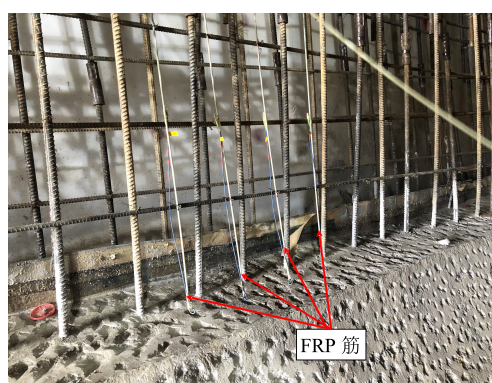
5 衬砌混凝土施工全过程受力机制分析

5.1 衬砌混凝土施工全过程受力机制分析

当隧道智能监测系统施工完成后, 可实时获取



(a) 安装自感知 FRP 筋



(b) 自感知 FRP 筋安装完成

图 6 自感知 FRP 筋安装

Fig.6 Installation of self-sensing FRP bar

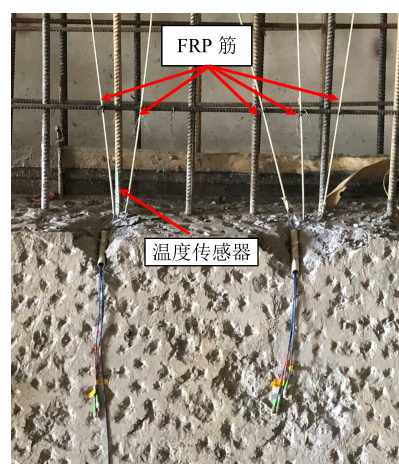


图 7 安装温度传感器

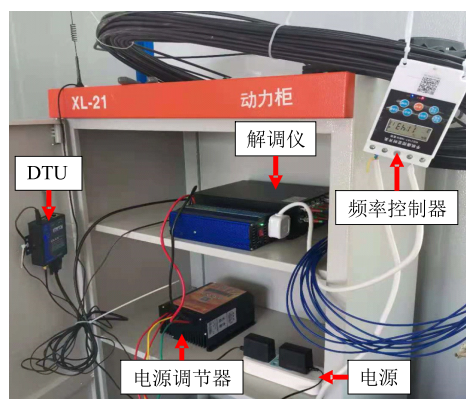
Fig.7 Installation of temperature sensor

隧道衬砌的受力状态, 对隧道衬砌安全状态进行分析。陈塘隧道智能监测安装的 5 根自感知 FRP 筋的准分布式光栅测点群有 5 个光栅, 将自感知 FRP 筋测量的 5 个数据的均值作为准分布式光栅中心位置处对应的应变, 进而得出隧道衬砌整个环向的受力状态。自感知 FRP 筋自安装在衬砌开始,

测量的应变变化过程如图 9 所示, 整个过程中自感知 FRP 筋受力共分为 5 个阶段。



(a) 监测断面



(b) 无线传输设备

图 8 无线传输与数据采集系统

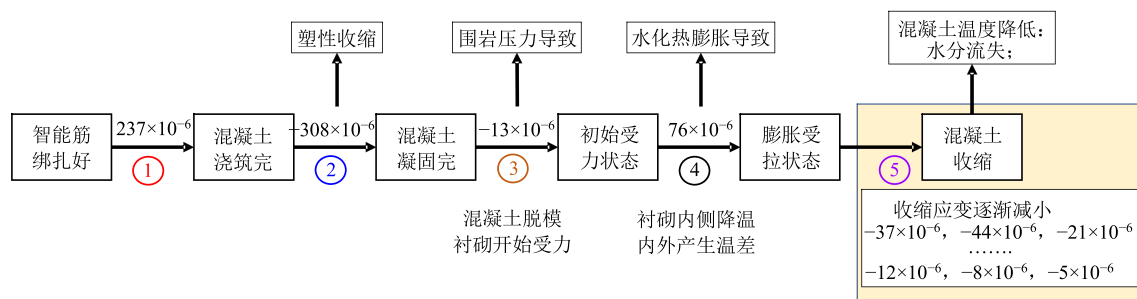
Fig.8 Wireless transmission and data acquisition system

第 1 阶段, 混凝土浇筑阶段。衬砌混凝土开始浇筑时以及浇筑过程中, 混凝土沿着衬砌台车模板自上而下浇筑, 自感知 FRP 筋受到拉应力, 产生一定的拉应变。因此, 在这一阶段隧道衬砌拱部的自感知 FRP 筋均表现为受拉状态, 环向应变如图 10 中①所示。

第 2 阶段, 混凝土凝固阶段。当衬砌混凝土浇筑完成后, 塑性状态的混凝土不断凝固的过程中, 内部水分不断蒸发, 混凝土发生体积收缩。塑性状态的混凝土在凝固过程中发生体积减小现象称为混凝土的塑性收缩。自感知 FRP 筋在这一阶段监测到衬砌混凝土发生的塑性收缩大约为 -300×10^{-6} , 隧道衬砌拱部不同监测位置的混凝土塑性收缩如图 10 中②所示。

第 3 阶段, 混凝土拆模阶段。衬砌混凝土未拆模时, 围岩压力由衬砌台车模具所承受; 当衬砌混凝土凝固后, 衬砌台车移走, 之前由衬砌台车所承受的围岩压力将全部直接作用于衬砌上。因此, 在衬砌混凝土拆模前后, FRP 筋监测到的数据变化为围岩压力所导致的衬砌应变变化。隧道衬砌拱部不同监测位置的混凝土应变变化如图 10 中③所示。在隧道围岩压力作用下, 衬砌拱顶和拱肩内侧受拉, 而在衬砌边墙以上起拱线位置, 衬砌内侧受压。

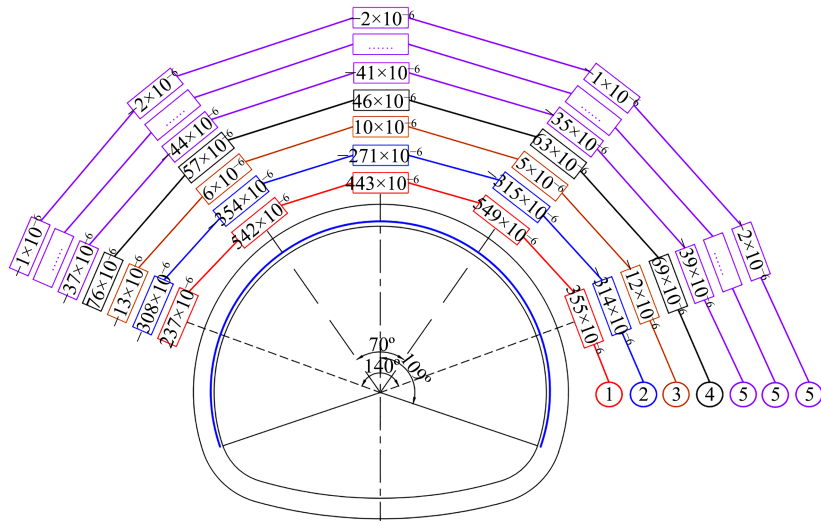
第 4 阶段, 混凝土热膨胀阶段。当混凝土浇筑后, 由于水化热影响, 衬砌混凝土内部温度不断升高, 温度传感器监测的衬砌内侧温度从 27°C 上升到 50°C (混凝土浇筑阶段); 衬砌温度在混凝土凝固阶段与拆模阶段并无明显变化。在混凝土热膨胀阶段, 衬砌内侧温度从 50°C 降低至 30°C , 衬砌混凝土拱部内侧呈现受拉状态。出现这一现象的原因当衬砌台车移走后, 该断面的通风条件变好, 衬砌内侧温度传感器监测的温度降低, 而衬砌外侧与围岩相邻的混凝土温度仍在升高。混凝土由于内部水化热的影响发生体积膨胀, 称为混凝土热膨胀。衬砌外侧温度较高混凝土发生热膨胀, 而衬砌内侧温度较低而不会发生膨胀现象, 此时衬砌内外两侧混凝土形成内部约束, 进而导致温差应力的产生, 由于外侧混凝土膨胀作用导致衬砌内侧呈现受拉状态。衬砌拱部不同监测位置的混凝土变形如图 10 中④所示。



注: 图中正值代表 FRP 筋受拉, 负值代表 FRP 筋受压。

图 9 自感知 FRP 筋监测应变变化过程

Fig.9 Self-sensing FRP bar monitoring strain change



注：图中数据为每根自感知 FRP 筋上 5 个光栅监测数据的平均值

图 10 自感知 FRP 筋监测应变在各阶段的变化值
Fig.10 Strain values at each stage monitored by the self-sensing FRP bar

第 5 阶段，混凝土收缩阶段。当混凝土水化热反应完成后，混凝土温度开始不断降低，混凝土体积也随着温度降低开始收缩。当衬砌处于干燥环境中时，混凝土内部的水分会不断向外界散失，进而导致衬砌的混凝土体积不断收缩，称为混凝土的干缩。在第 5 阶段的前期，混凝土温度降低导致的体积收缩与水分散失导致的干燥收缩共同作用下，衬砌混凝土体积收缩十分明显，平均每天收缩 $-40\times 10^{-6}\sim -50\times 10^{-6}$ 。随着衬砌混凝土温度与环境温度基本一致后，由于温度降低导致的体积收缩停止，此时衬砌混凝土仅由于水分散失而发生干缩，体积缩小减缓。在衬砌混凝土浇筑一个月后，平均每天收缩 $-1\times 10^{-6}\sim -2\times 10^{-6}$ 。隧道衬砌拱部不同监测位置的混凝土变形如图 10 中⑤所示。

5.2 衬砌混凝土施工全过程安全状况分析

完成数据采集后，可根据监测数据对隧道结构受力及安全状况进行分析。从上述可知，自感知 FRP 筋监测的数据分为混凝土浇筑导致的拉应变 ε_1 、混凝土塑性收缩导致的压应变 ε_2 、隧道围岩压力导致的衬砌变形 ε_3 、水化热温差应力导致的衬砌变形 ε_4 以及混凝土干缩导致的衬砌变形 ε_5 。其中，混凝土浇筑导致的拉应变和混凝土塑性收缩导致的压应变并不会影响凝固后的衬砌受力，对衬砌结构的安全状况没有影响。影响隧道衬砌安全状况的因素主要有隧道围岩压力、水化热导致的温差应力以及混凝土干缩导致的应力。

衬砌结构的初始应力为衬砌台车移走后围岩压力导致的衬砌应力状态，为永久荷载。衬砌结构受

围岩压力而产生初始应变，此时衬砌应变状态完全由围岩压力导致（ $\varepsilon = \varepsilon_3$ ），陈塘隧道衬砌从左起拱线至右起拱线分别为 -13×10^{-6} 、 6×10^{-6} 、 10×10^{-6} 、 5×10^{-6} 和 -12×10^{-6} 。此时衬砌结构受力较小，没有达到混凝土拉裂/压溃所需的应变（C35 混凝土极限拉应变 ε_t 为 100×10^{-6} ，极限压应变 ε_c 为 $-1\ 530\times 10^{-6}$ [32]）。隧道衬砌由于围岩压力导致的初始变形呈对称状态，说明衬砌未受到偏压。

对于混凝土水化热温差应力导致的衬砌内侧受到的拉应力，当混凝土内部温差消散，拉应力将同时消失。当衬砌内侧的拉应力超过混凝土极限拉应力时（ $\varepsilon = \varepsilon_3 + \varepsilon_4 > \varepsilon_t$ ），混凝土将会开裂。陈塘隧道衬砌受到温差应力影响时拱部位置的应变状态如表 1 所示，此时衬砌内侧受到的拉应变较大，局部测点的拉应变超过 70×10^{-6} ，但还没有达到混凝土极限拉应变。从监测数据可以看出，隧道衬砌为大体积混凝土结构，混凝土水化热温差应力导致的衬砌内侧的拉应力十分明显。因此，对于新建的隧道，应

表 1 衬砌受到温差应力影响时拱部应变
Table 1 Strains of arch shoulder and vault when lining is affected by temperature difference stress

测点	不同监测位置的应变/ 10^{-6}				
	左起拱线	左拱肩	拱顶	右拱肩	右起拱线
测点 1	58	69	53	72	52
测点 2	61	64	56	71	56
测点 3	68	65	57	69	61
测点 4	66	56	57	66	61
测点 5	58	59	57	62	59
均值	62	63	56	68	58

采用合理的施工措施来改善衬砌混凝土温度场,降低由于温差效应引起的衬砌应力,避免温差应力效应引起的拉应力超过极限拉应力而产生温度裂缝。

混凝土干燥收缩导致的衬砌拱部应变如图 11 所示。从图中可以看出,混凝土干燥收缩产生的应变速率与时间有关,在干缩前期,混凝土应变速率较快;随着混凝土内部水分不断蒸发消散,混凝土干缩速率逐渐减小。混凝土干燥收缩作用下,隧道衬砌拱部会产生一定程度的压应变,衬砌拱部混凝土干缩产生的压应变约为 250×10^{-6} ;混凝土干缩作用并不会使衬砌拱部内侧受拉,对于混凝土干缩导致的压应变并不会影响其强度,在后续分析衬砌受力情况时可不考虑。但是混凝土干燥收缩导致衬砌其他部分产生的拉应变叠加围岩压力引起的初始变形超过混凝土极限拉应力时,即 $\varepsilon = \varepsilon_3 + \varepsilon_5 + \varepsilon_1$ ($\varepsilon_5 > 0$),会引起混凝土表面龟裂,不利于混凝土的耐久性。

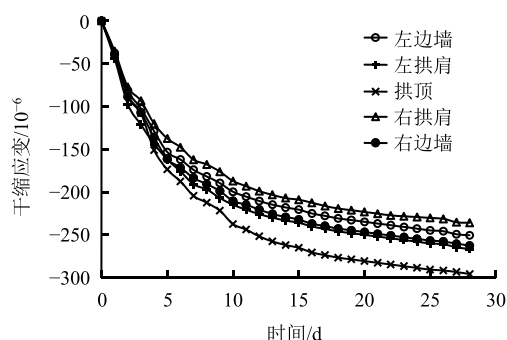


图 11 混凝土干燥收缩导致的衬砌拱部应变

Fig.11 Strains of arch shoulder, sidewall and vault when tunnel lining affected by concrete drying shrinkage

对于后续运营阶段的隧道衬砌,影响安全的因素主要有施工期的隧道初始围岩压力、混凝土干缩导致的拉应力以及运营期间荷载作用导致的应变 ε_6 。因此,当运营期间隧道衬砌的拉应变超过混凝土极限拉应力时,即 $\varepsilon = \varepsilon_3 + \varepsilon_5 + \varepsilon_6 > \varepsilon_t$ ($\varepsilon_5 > 0$),衬砌混凝土会开裂;当隧道衬砌的压应变超过混凝土极限压应力时,即 $\varepsilon = \varepsilon_3 + \varepsilon_5 + \varepsilon_6 < \varepsilon_c$ ($\varepsilon_5 > 0$),衬砌混凝土会被压溃。

6 结 论

本文提出了一种基于内嵌光纤自感知 FRP 筋监测现浇隧道衬砌的智能监测方法。将准分布式光纤光栅传感器与 FRP 材料构成的自感知 FRP 筋应用在隧道衬砌中,通过对隧道衬砌不同位置的实时、高精度监测,可以反映隧道衬砌全生命周期全天候的环向受力状态,通过局部范围的分布式监测结果,

实现了裂缝生成风险的实时自感知。采用该智能监测方法对广汕高铁陈塘隧道进行了监测,得到以下结论:

(1) 基于自感知智能筋的隧道衬砌智能监测系统能够实现衬砌应变应力状态的高精度自感知和全生命周期全天候实时监测。

(2) 实现了隧道衬砌混凝土施工全过程监测及机制分析,实时量化了混凝土浇筑导致的拉应变、混凝土塑性收缩导致的压应变、隧道围岩压力导致的衬砌变形、水化热温差应力导致的衬砌变形以及混凝土干缩导致的衬砌变形,其中隧道围岩压力、水化热导致的温差应力以及混凝土干缩导致的应力会影响隧道衬砌的应力-应变状态以及耐久性。

(3) 隧道衬砌为大体积混凝土结构,混凝土水化热产生的温差效应导致衬砌内侧受到较大拉应力。因此,对于新建隧道,应采用合理的施工措施改善衬砌混凝土温度场,降低由于温差效应引起的衬砌应力,避免温差应力效应引起的拉应力过大而产生温度裂缝。

(4) 基于内嵌光纤自感知 FRP 筋的隧道衬砌监测系统可以在隧道运营过程中持续、及时预测隧道衬砌开裂风险,为高速铁路列车的运行安全提供技术保障。

参 考 文 献

- [1] 刘昌,张顶立,张素磊,等.考虑围岩流变及衬砌劣化特性的隧道长期服役性能解析[J].岩土力学,2021,42(10): 2796-2807.
LIU Chang, ZHANG Ding-li, ZHANG Su-lei, et al. Analytical solution of the long-term service performance of tunnel considering surrounding rock rheology and lining deterioration characteristics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(10): 2796-2807.
- [2] 陈湘生,徐志豪,包小华,等.隧道病害监测检测技术研究现状概述[J].隧道于地下工程灾害防治,2020,2(3): 2-12.
CHEN Xiang-sheng, XU Zhi-hao, BAO Xiao-hua, et al. Overview of research on tunnel defects monitoring and detection technology[J]. **Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering**, 2020, 2(3): 2-12.
- [3] 李术才,薛翊国,张庆松,等.高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7): 1297-1307.
LI Shu-cai, XUE Yi-guo, ZHANG Qing-song, et al. Key technology study on comprehensive prediction and early-

- warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(7): 1297-1307.
- [4] ZHANG F S, XIE X Y, HUANG H W. Application of ground penetrating radar in grouting evaluation for shield tunnel construction[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2010, 25(2): 99-107.
- [5] KRAVITZ B, MOONEY M, KARLOVSEK K, et al. Void detection in two-component annulus grout behind a pre-cast segmental tunnel liner using ground penetrating radar[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2019, 83: 381-392.
- [6] 刘学增, 叶康. 隧道衬砌裂缝的远距离图像测量技术[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 829-836.
- LIU Xue-zeng, YE Kang. A long-distance image measuring technique for crack on tunnel lining[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2012, 40(6): 829-836.
- [7] 黄宏伟, 李庆桐. 基于深度学习的盾构隧道渗漏水病害图像识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 2861-2871.
- HUANG Hong-wei, LI Qing-tong. Image recognition for water leakage in shield tunnel based on deep learning[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(12): 2861-2871.
- [8] TTARD L, DEBONO C J, VALENTINO G, et al. Tunnel inspection using photogrammetric techniques and image processing: a review[J]. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 2018, 144: 180-188.
- [9] JIANG Y J, ZHANG X P, TANIGUCHI T. Quantitative condition inspection and assessment of tunnel lining[J]. **Automation in Construction**, 2019, 102: 258-269.
- [10] 张学朋, 蔡跃, 蒋宇静, 等. 隧道震害和地表变形相关性的实例分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 82-88.
- ZHANG Xue-peng, CAI Yue, JIANG Yu-jing, et al. A case study of correlation between seismic damages of mountain tunnel and ground deformation[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2020, 52(2): 82-88.
- [11] 毛方儒, 王磊. 三维激光扫描测量技术[J]. 宇航计测技术, 2005, 25(2): 1-6.
- MAO Fang-ru, WANG Lei. Measurement technology of 3D laser scanning[J]. **Journal of Astronautic Metrology and Measurement**, 2005, 25(2): 1-6.
- [12] 谢雄耀, 卢晓智, 田海洋, 等. 基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2214-2224.
- XIE Xiong-yao, LU Xiao-zhi, TIAN Hai-yang, et al. Development of a medeling method for monitoring tunnel deformation based on terrestrial 3D laser scanning[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(11): 2214-2224.
- [13] 王令文, 程效军, 万程辉. 基于三维激光扫描技术的隧道检测技术研究[J]. 工程勘察, 2013, 41(7): 53-57.
- WANG Ling-wei, CHENG Xiao-jun, WAN Cheng-hui. Study on the 3D laser scanning technology for tunnel inspection[J]. **Geotechnical Investigation and Surveying**, 2013, 41(7): 53-57.
- [14] 李宗平, 张永涛, 杨钊, 等. 三维激光扫描技术在隧道变形与断面检测中的应用研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(3): 336-341.
- LI Zong-ping, ZHANG Yong-tao, YANG Zhao, et al. Application of 3D laser scanning technology to tunnel deformation monitoring and cross-section detection[J]. **Tunnel Construction**, 2017, 37(3): 336-341.
- [15] FARAHANI B V, BARROS F, SOUSA P J, et al. A coupled 3D laser scanning and digital image correlation system for geometry acquisition and deformation monitoring of a railway tunnel[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2019, 91: 102995.
- [16] 欧进萍, 侯爽, 周智, 等. 多段分布式光纤裂缝监测系统及其应用[J]. 压电与声光, 2007, 29(2): 144-147.
- OU Jin-ping, HOU Shuang, ZHOU Zhi, et al. The multi-line distributed fiber optic crack detection system and its application[J]. **Piezoelectrics and Acoustooptics**, 2007, 29(2): 144-147.
- [17] 兰春光, 王天昊, 刘航, 等. 光纤光栅缓粘结智能钢绞线的研制及应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(6): 100-104.
- LAN Chun-guang, WANG Tian-hao, LIU Hang, et al. Development and application of FBG retard-bonded smart steel strands[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2014, 46(6): 100-104.
- [18] 兰春光, 周智, 欧进萍, 等. 内嵌钢丝 GFRP-FBG 智能复合筋的研制及其性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(1): 72-78.
- LAN Chun-guang, ZHOU Zhi, OU Jin-ping, et al. Novel embedded steel wire GFRP-FBG smart rebar and its properties[J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)**, 2012, 28(1): 72-78.

- [19] 李惠, 欧进萍. 斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现(I): 系统实现[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 39-44.
LI Hui, OU Jin-ping. Design and implementation of health monitoring systems for cable-stayed bridges (I): Design Methods[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2006, 39(4): 39-44.
- [20] 李惠, 欧进萍. 斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现(II): 系统实现[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 45-53.
LI Hui, OU Jin-ping. Design and implementation of health monitoring systems for cable-stayed bridges (II): design methods[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2006, 39(4): 45-53.
- [21] 朱鸿鹄, 施斌, 严珺凡, 等. 基于分布式光纤应变感测的边坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 821-828.
ZHU Hong-hu, SHI Bin, YAN Jun-fan, et al. Physical model testing of slope stability based on distributed fiber-optic strain sensing technology[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(4): 821-828.
- [22] 付华, 谢森, 徐耀松, 等. 光纤布拉格光栅传感技术在隧道火灾监测中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26(1): 133-137.
FU Hua, XIE Sen, XU Yao-song, et al. Application research of optical fiber bragg grating sensing technology in the tunnel fire monitoring[J]. **Chinese Journal of Sensors and Actuators**, 2013, 26(1): 133-137.
- [23] 施斌, 徐学军, 王镒, 等. 隧道健康诊断 BOTDR 分布式光纤应变监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2622-2628.
SHI Bin, XU Xue-jun, WANG Di, et al. Study on BOTDR-based distributed optical fiber strain measurement for tunnel health diagnosis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(15): 2662-2628.
- [24] BREMER K, MEINHARDT-WOLLWEBER A M, THIEL T, et al. Sewerage tunnel leakage detection using a fiber optic moisture-detecting sensor system[J]. **Sensors and Actuators A: Physical**, 2014, 220: 62-68.
- [25] CHENG W C, NI J C. Feasibility Study of applying SOFO optical fiber sensor to segment of shield tunnel[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2009, 24(3): 331-349.
- [26] 毛江鸿. 分布式光纤传感技术在结构应变及开裂监测中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
MAO Jiang-hong. Research on application of distributed optical fiber sensor in structural strain and cracking monitoring[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [27] 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): 3149-3158.
HOU Gong-yu, LI Zi-xiang, 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): 3149-3158.
- [28] 侯公羽, 韩育琛, 谢冰冰, 等. 定点式布设光纤在隧道结构健康监测中的预拉应变损失研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 4121-4128.
HOU Gong-yu, HAN Yu-chen, XIE Bing-bing, et al. Pretension strain loss of fixed-point optical fiber in tunnel structural health monitoring[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(10): 4121-4128.
- [29] 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 Gong-yu, XIE Bing-bing, HU Tao, et al. Fiber sheath effect in tunneling monitoring based on BOTDR technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(8): 2441-2447.
- [30] 侯公羽, 李子祥, 胡涛, 等. 植入式光纤传感器在隧道结构中的边界效应研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2839-2850.
HOU Gong-yu, LI Zi-xiang, HU Tao, et al. Study on boundary effect of embedded optical fiber sensor in tunnel structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(8): 2839-2850.
- [31] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. **Applied Physics Letters**, 1978, 32(10): 647-649.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.