

## 激光与光电子学进展

基于光纤光栅传感与视频位移计技术的  
运营期铁路隧道结构安全监测

李俊\*, 张鼎博, 张新炜, 张家瑞, 姚瑞煦, 范斌斌

西安科技大学安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054

**摘要** 铁路已成为我国交通运输的大动脉,地理条件的多样性使得铁路隧道分布较多。针对铁路隧道的结构安全监测方式诸多,然而传统的监测方式均存在一定的局限性。基于当前研究热点——光学传感,将精度优良、经济可行性较高的光学视频位移计和光纤布拉格光栅传感技术有机结合,应用于运营期铁路隧道的安全监测。通过分析静态、通车等情况下的监测数据,结合仿真模型,初步探讨光学传感应用于运营期铁路隧道监测的可行性,旨在为相关工程技术研究提供参考和借鉴。

**关键词** 光学传感; 光学视频位移; 光纤光栅传感; 隧道监测; 仿真模型

中图分类号 [U25] 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223211

Safety Monitoring of Railway Tunnel Structure During Operation Period  
Based on Fiber Grating Sensing and Video Displacement Meter Technology

Li Jun\*, Zhang Dingbo, Zhang Xinwei, Zhang Jiarui, Yao Ruixu, Fan Binbin

College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology,  
Xi'an 710054, Shaanxi, China

**Abstract** Railways have become the main transportation artery in our country, and many railway tunnels are distributed because of the diversity of geographical conditions. There are many structural safety monitoring methods for railway tunnels. However, traditional monitoring methods have certain limitations. Based on the current research which focuses on optical sensing, the optical video replacement technology with excellent accuracy and high economic feasibility is organically combined with fiber grating sensing technology, and the optical sensing is applied to the safety monitoring of railway tunnels during operation. Through the analysis of monitoring data in static and traffic conditions, combined with the simulation model, the application of optical sensing in railway tunnel monitoring during operation is preliminarily discussed to provide a reference for related engineering technologies.

**Key words** optical sensing; optical video replacement; fiber grating sensing; tunnel monitoring; simulation model

## 1 引言

随着社会经济的发展,铁路交通建设的需求日益增长,有关数据表明,截至2020年末,中国铁路运营里程预计达到 $14.4 \times 10^4$  km,其中高铁运营里程 $3.7 \times 10^4$  km。中国地域条件差异大,山地和丘陵占据了国土面积的75%左右,截至2020年末,铁路隧道达16798座,总长约 $1.963 \times 10^4$  km<sup>[1]</sup>。铁路隧道带来了显著效益,但施工环境、地质环境的多重影响容易给隧

道结构带来灾害,稍有疏忽便会影响人民的生产生活和财产安全,因此保障铁路隧道的安全运营是亟待关注的<sup>[2]</sup>。

当前铁路运营期隧道的监测方式种类繁多,主要分为两种:接触式和非接触式。接触式通过人工在监测面埋设或安装相应传感器,利用接触式测量获得隧道表面或内部基础数据,测量过程中可能会损坏结构本身的状态,主要方式为人工巡检、电子类传感器监测、光纤光栅(FBG)类传感器监测。非接触式通过设

收稿日期: 2022-11-30; 修回日期: 2023-02-13; 录用日期: 2023-03-15; 网络首发日期: 2023-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51904231)、国家重点研发计划(2021YFE0105000)

通信作者: \*ljsiom@126.com

定监测断面或监测区域,利用光学或结构性能间接性获得隧道监测区域的数据,同时满足高精度、对结构无损的优异性能,主要方式为全站仪监测、三维激光扫描(TLS)技术监测等。

人工巡检一定程度上可以确保隧道的裂缝、位移在可控范围内,应用最为广泛,但存在工作效率低、记录偏差较大、数据滞后等缺陷且无法做到 24 h 不间断监测<sup>[3-4]</sup>。电子化振弦传感器<sup>[5-6]</sup>虽然可以做到自动化监测但是其稳定性较差,且无法做到动态监测。光纤传感技术<sup>[7-8]</sup>因其本质无源、抗电磁干扰等优势被广泛应用于工程建设中,且其测量精度高、传输距离远,在隧道监测中适用性较强。全站仪监测<sup>[9-10]</sup>利用棱镜与光的反射性监测,施工期可得到精度约 mm 级别的位移变化值,但其监测距离有限且无法全自动化监测。近些年 TLS 技术的出现为隧道监测提供了一个有效的立体化截面监测方案,其无损非接触式监测精度在 10 m 内最高可达 1 mm,但由于其价格昂贵,适用性严重不足<sup>[11-13]</sup>。

FBG 传感技术自 1989 年首次应用于混凝土结构中的检测后,先后在日本、英国等多国研究人员的推动下取得了较快的进展。其中:2010 年捷克的 Urban 等<sup>[14]</sup>提出可在重工业环境中使用的 FBG 微型压力传感器,利用增敏膜片和 FBG 集成,使其增敏效果明显;2012 年马豪豪等<sup>[15]</sup>在地铁隧道模型中利用自行封装的 FBG 传感器中的锚杆结构,为不同应力下的应变监测模型试验提供了可靠途径;杨建国等<sup>[16]</sup>利用波分复用技术并采用串联方式构成线性 FBG 传感器阵列对隧道端面的二次衬砌进行连续监测,得到二次衬砌混凝土早期应变及结构内力变化规律;吴静红等<sup>[17]</sup>在 2020 年基于 FBG 监测技术在京雄高铁隧道中成功实现断面的结构健康监测,涉及应力应变、错缝位移、沉降等基础数据,并成功实现自动化运行。

光学视频位移技术起源于 20 世纪 70 年代,它充分将现代光电技术、计算机技术、图像处理与识别技术有

机结合。高精度、非接触式的数字图像技术作为一种新兴测量手段被迅速推广应用于工业、医疗等行业<sup>[18-19]</sup>。该技术近些年具体的研究有:2018 年朱金龙等<sup>[20]</sup>利用消费级数码相机(Nikon P900S)在相距 8 m 的位置测得振幅为 1 mm 的结构振动并使得其绝对误差保持在 7.08%;同年 Vicente 等<sup>[21]</sup>基于视频位移系统对桥梁的静态垂直偏转进行了测量,保证准确性的同时也做到了成本低廉;2019 年 Wu 等<sup>[22]</sup>提出了一种非接触、无标记的机器视觉测量方法用于测量起重垂直绳索的横向振动位移,结果表明所提出的方法可以比较合理、准确地测量矿井提升机竖向绳索的横向振动位移;2021 年周云等<sup>[23]</sup>使用 Panasonic Lumix GH5 相机实时测量距离为 200 m 的大桥,其测量精度可成功替代探测范围为 280 mm、精度为 0.7 mm 的激光位移计。

上述各类监测手段均存在一定的局限性,给铁路运维人员的工作带来不可避免的挑战,且无法形成长期高效精确的监测。为此,本文结合当前的技术发展,对高精度的光学传感技术调研分析后,将光学视频位移技术应用于隧道安全监测中,同时结合 FBG 传感技术在隧道监测中的成熟应用,充分拓展光学传感在隧道结构安全监测的应用。

## 2 隧道结构监测原理

### 2.1 隧道监测系统原理

运营期的铁路隧道由于长期处于通车或重力荷载的情况,容易发生形变,而隧道的形变主要体现于应力应变和沉降位移两类基础数据,故隧道结构安全监测系统主要由 FBG 应变传感器、光学视频位移计进行数据监测<sup>[24-25]</sup>。在隧道内关键点位安装传感器,实时监测隧道的基础数据,并通过采集设备和传输终端汇集至服务器。当隧道结构发生临时性或长期缓增的形变时,超过监测系统设定的安全阈值,系统会自动预警,为隧道的管养维护和事故追溯提供依据,以此进行隧道的结构安全监测。图 1 为隧道安全监测系统原理图。

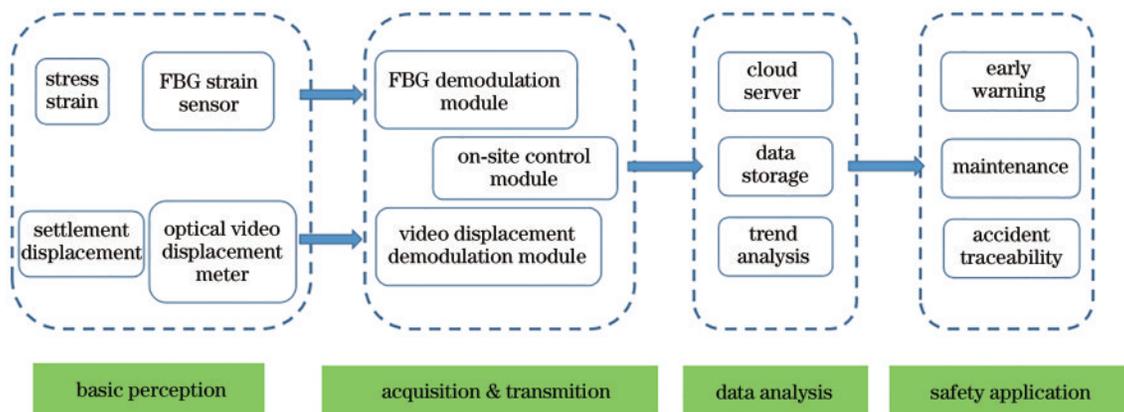


图 1 隧道安全监测系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of tunnel safety monitoring system

当前铁路隧道监测的问题主要集中于:隧道测点颗粒度不足、大多应变传感器未剔除温度导致的误差、断面应力监测角度单一、位移监测难等。该系统架构通过增加测点、传感器温补光栅、布设水平/环向应变计等解决上述部分问题,同时光学视频位移计的布设方式简单,可以满足运营期隧道多点位移快速监测的需求,避免传统位移计或沉降仪布设难度挑战较大的问题。此外,监测系统远程自动化运行可实现无人值守的隧道结构监测,提升巡检人员工作效率。

### 2.2 FBG 传感原理

在长期的光通信应用中,科研人员发现定量调节温度、应力等环境参量时,会引起光纤传播中的光波强度、相位、频率、偏振态等规律性变化,根据该原理即可制备出相应的光纤传感器<sup>[26]</sup>。光纤传感中的一大旁支叫作 FBG 传感器,图 2 为 FBG 结构原理图。

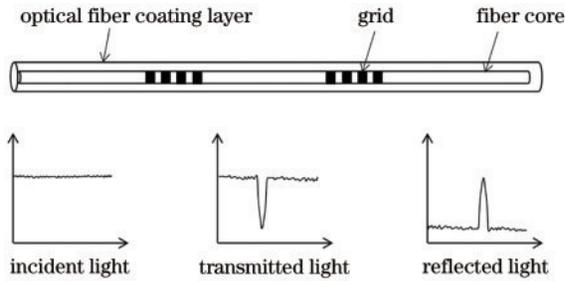


图 2 FBG 的结构原理图

Fig. 2 Schematic diagram of FBG structure

通常通过的可见光全部穿过 FBG 而不受影响,只有特定波长的光在布拉格光栅处反射后会再返回到原来的方向。根据耦合理论<sup>[27]</sup>,

$$\lambda_B = 2n\Lambda, \quad (1)$$

式中: $\lambda_B$  为 FBG 的中心波长; $\Lambda$  为光栅的周期; $n$  为光纤纤芯的有效折射率。由式(1)可知反射的中心波长 $\lambda_B$  与光栅周期 $\Lambda$  和纤芯折射率 $n$  有关,当被测参量能够引起光栅间隔或折射率发生变化时,被光栅反射的光的中心波长也会发生变化。因此,通过采集 FBG 中心波长的变化量可转换得到所需参量的测量<sup>[28]</sup>,其中应变测量精度可达 $\mu\epsilon$  级别。工程应用研究表明,在常规的应用环境中,单一物理量极易受到多参量的影响,导致数据监测精度不足,这是造成结构监测局部失真的主要原因,因此在工程应用中增加温补光栅以及完善的安装工艺也是进一步提升隧道监测精度的关键。

### 2.3 光学视频位移原理

光学视频位移技术是利用特定镜头的摄像机对被测物体进行拍照识别,同时利用数字技术将拍摄得到的图片进行解析,对信息进行一系列整合和运算,获取关键参数信息后得到被测物体的大小或位置的变化<sup>[29]</sup>,当前使用的光学视频位移计精度可达亚 mm 级别。

光学视频位移技术的基本原理是图像模板匹配技术<sup>[30-32]</sup>,图 3 为系统中算法执行的基本流程。总体思路为运用模板匹配算法对摄像机采集到的结构振动的视频进行计算处理,经过转化得到物理坐标系下的位移。这一功能的实现主要基于两大先进的图像处理技术:归一化算法和亚像素技术<sup>[33-34]</sup>。

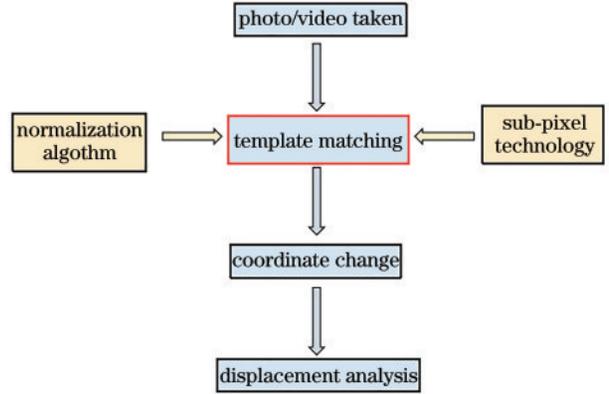


图 3 光学视频位移技术原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the optical video replacement technology

首先,采集的图片或视频流被读取切割为一系列灰度图像,然后在图像中选取需要监测的特定区域,将其设定为模板,通过模板匹配技术对第一帧图像或指定帧图像中选定的区域图像连续定位,得到像素坐标系下的位移曲线,再利用转化因子,将其转化为物理坐标,从而得到其位移时程曲线。为减少计算时间,搜索区域可被限制在靠近图像中模板位置的预定义区域 (ROI)<sup>[35]</sup>。图 4 为具体的执行流程。

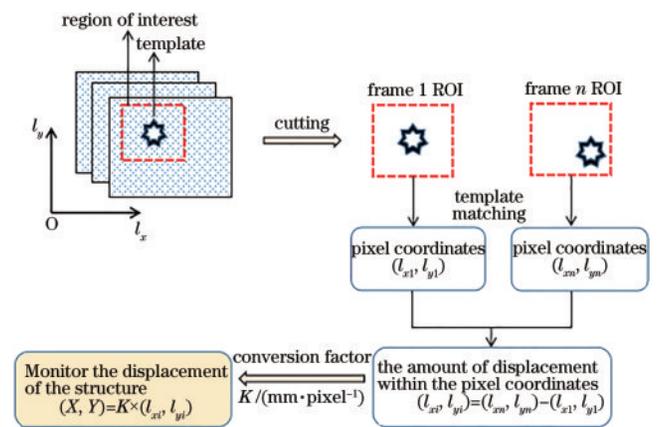


图 4 模板匹配技术原理图

Fig. 4 Schematic diagram of template matching technology

## 3 项目案例

隧道(图 5)位于西北某省某江左岸中山区,作为兰渝铁路的第 5 标段,地形较为陡峻,相对高差为 400 m、最大埋深为 346 m、起讫里程为 K366+584~K371+597、全长 4933.346 m。隧道基础地质环



图 5 隧道现场工况图

Fig. 5 Tunnel site working condition

境较差,洞身经过志留系地层,多为 V 级围岩,占隧道总长的 76.9%。隧道受高地及地质挤压导致应力较大,加之岩质较软,高地应力及偏压严重<sup>[36-37]</sup>。该隧道

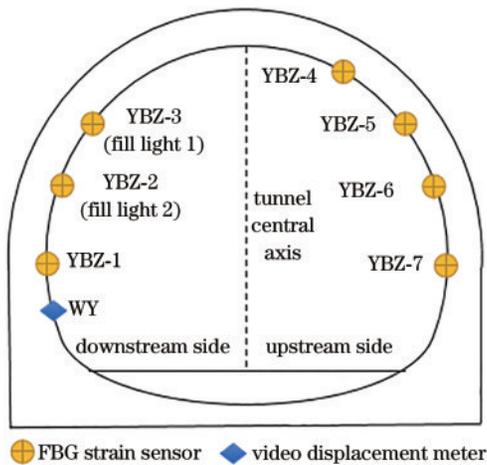


图 6 传感器安装信息综合图

Fig. 6 Comprehensive drawing of sensor installation information

为保障隧道结构的安全,利用复合型传感数据解调设备、5G 通信技术建立隧道结构安全实时监测系统,其中光学视频位移计的采集频率为 10 Hz,光纤传感的采集频率为 3 Hz,整体系统采样率可实现对隧道结构状况的实时感知,图 7 为该系统拓扑图。

#### 4 监测数据与分析

历经数月,光学视频位移计和 FBG 设备在隧道内成功安装,解调设备及传输设备调试正常。完成调试工作待系统稳定采集一段时间后,收集整理阶段性的完整监测数据,结合仿真对数据进一步分析研究。

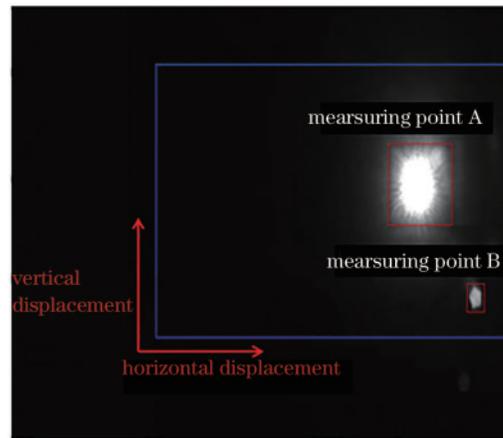
##### 4.1 隧道模型仿真分析

为进一步研究分析,根据施工信息及现场实际工况利用迈达斯(Midas GTS NX 2019 版本)软件在 Windows 10 系统上构造隧道仿真模型(图 8)。

该模型为双层隧道衬砌结构,主要分为内衬和外衬两个部分,内衬材质为 C25 混凝土,外衬材质为 C30

开通运营至今已有若干年,目前整体结构状况良好,但是由于隧道所处环境为高地应力环境,部分地段存在衬砌脱落或变形量较大等现象。

为保障隧道的结构安全,结合实际情况,利用光学传感技术为该隧道搭建一套隧道安全监测系统的方案,用于监测应力应变、结构沉降等结构损伤。该监测系统由 7 组 FBG 应变传感器、1 组视频位移计组成,如图 6 所示。一个监测截面共计 7 个测点,其中 FBG 应变传感器主要布设在隧道断面衬砌弯矩最大处,对隧道衬砌应变进行  $\mu\epsilon$  级别监测,其中:1、7 号测点距地高度为 2 m;2、6 号测点距地高度为 4 m;3、5 号测点距地高度为 6 m;4 号测点距地高度为 8 m。将视频位移计设置在距测点 20 m、距地高度为 1 m 的位置,并设置两个补光灯,以补光灯 1 边缘作为测点 A、补光灯 2 边缘作为测点 B,分别对应 FBG 应变传感器 3、2 号测点,对隧道沉降位移进行亚 mm 级别的监测。



混凝土。内衬与外衬之间填充水泥,即荷载情况下,内外衬的连接性可视为弹簧件。底部左右两侧均有横向荷载,横向荷载分布比较密集集中,故底部左右两侧的横向荷载后的受力单元分布比较集中,隧道顶部受到的荷载多为均匀分布的竖向荷载。

对该模型施加等效荷载力,模型仿真结果如图 9 所示。

受到整体荷载力后,隧道 Y 方向(竖向)产生的最大位移约为 5.48 mm,且占比仅为 3.1%,集中于隧道顶部;左右两侧竖向位移基本变化为 2.7~3.1 mm,占比 62.5%;由于隧道存在偏压和高地应力,故隧道 X 方向(横向)产生的位移主要集中于底部左右两侧,其中横向位移基本维持在 1.47 mm,位移占比大于 40%;隧道顶部 X 方向(横向)位移基本无变化。

##### 4.2 隧道测点应变数据分析

###### 4.2.1 列车通行时刻隧道应变数据分析

随机选取某日 12:00—15:00 为期 3 h 的下行侧

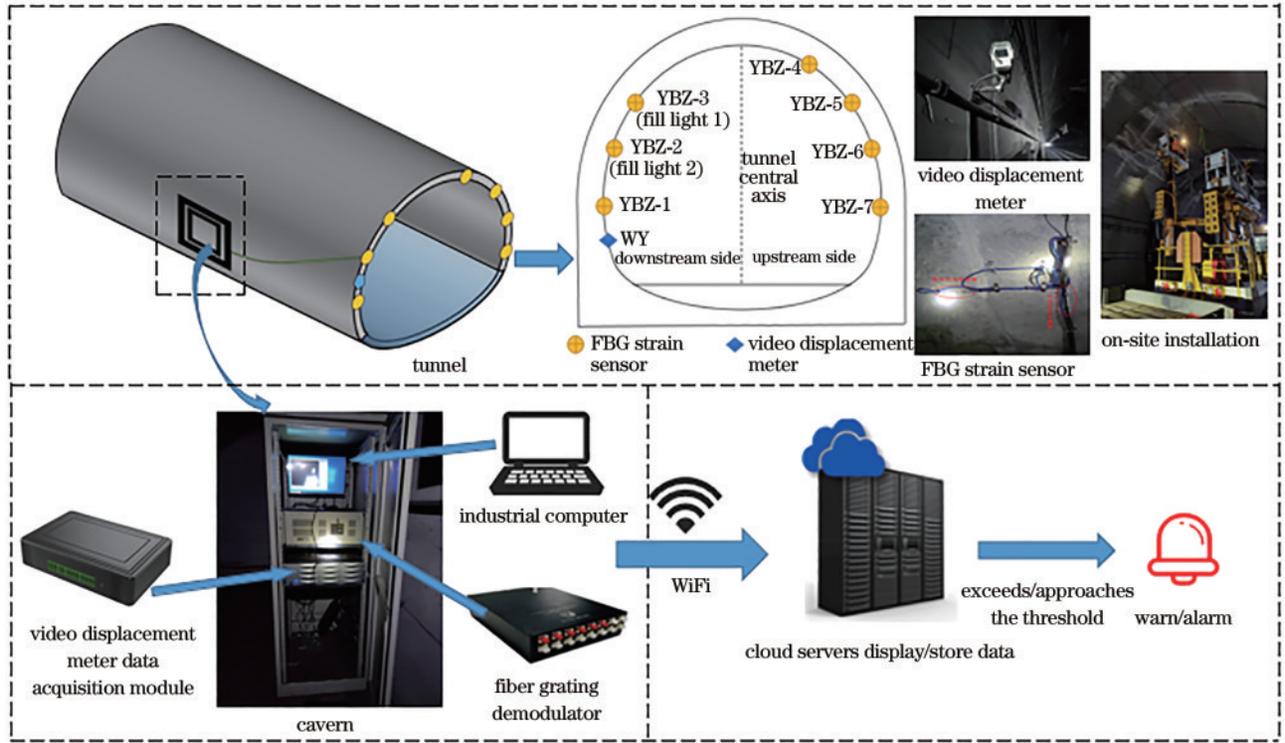


图 7 隧道结构安全监测系统拓扑图

Fig. 7 Topological diagram of tunnel structure safety monitoring system

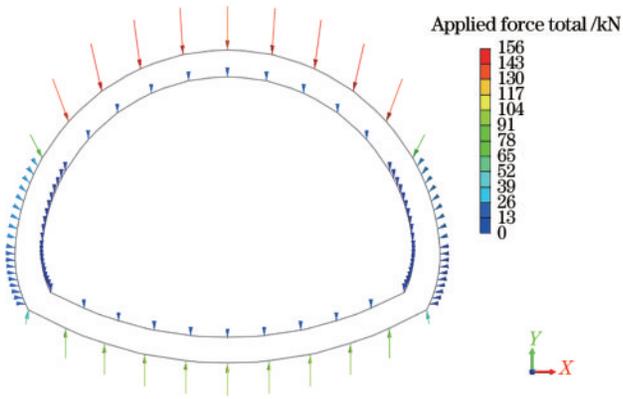


图 8 双层衬砌隧道模型图

Fig. 8 Double-layer lined tunnel model

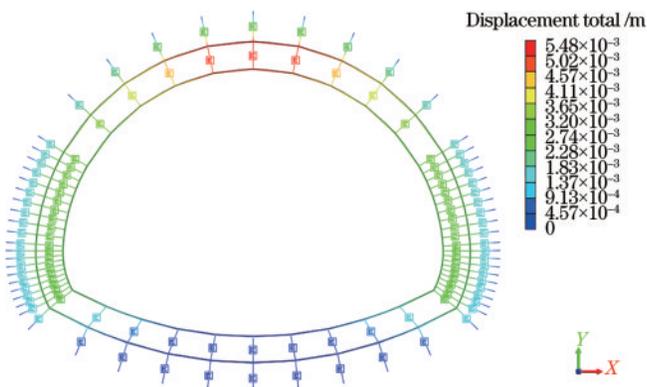
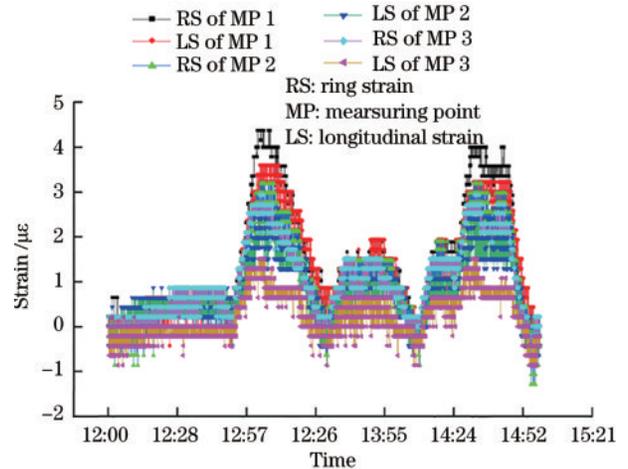


图 9 隧道模型等效荷载图

Fig. 9 Tunnel model static load

FBG 应变传感器实时数据,整理发现 12:51 陆续开始有列车通过,且 13:32、14:09、14:23 均有列车通过测点截面。由于该铁路隧道运营的铁路专列覆盖面较广,有动车、普快、货车等多个车型,列车车速与载重荷载对隧道结构影响较大,故每趟过车截面测点的应力应变存在差异,整理绘制其下行侧 6 个 FBG 应变传感器实时数据图,如图 10 所示。



Note: Ring strain is the strain perpendicular to the track laying direction, that is, parallel to the tunnel ring section. Longitudinal strain is the strain parallel to the track laying direction, that is, perpendicular to the tunnel ring section.

图 10 列车通行时刻隧道应变图

Fig. 10 Tunnel strain map at train passing time

分析图 10 数据可知,无瞬时极端荷载的情况(地震、泥石流等)下,当无列车通行时隧道结构变化较小,FBG 应变传感器数值维持在零点波动,且各个测点的应变波动趋势基本保持一致,无明显差异性变化。当有列车通过时,通行列车因载重车速等因素会给隧道结构带来额外的动态荷载,隧道结构会产生相应的变化,应力应变逐渐产生并传递至 FBG 应变传感器。分析图 10 可知单次列车通行对隧道内壁的应力最大单次变化维持在 5 个  $\mu\epsilon$  以内。

进一步研究发现,列车通行时,1、2、3 号测点的应变数据呈现递减趋势,表明距地高度越低的测点受到的应力应变越大;同时,1、2、3 号测点的环向应变均大于同测点的纵向应变,表明列车通行带来的环向剪力大于纵向剪应力。

#### 4.2.2 隧道应变长期稳定性数据分析

待系统稳定运行后,结合当地水文、地质等情况,选取累计 3 个月时长的 FBG 应变测量数据(每日固定时间取一次数据),进行 FBG 应变传感器的长期稳定性分析,具体数据趋势如图 11 所示。

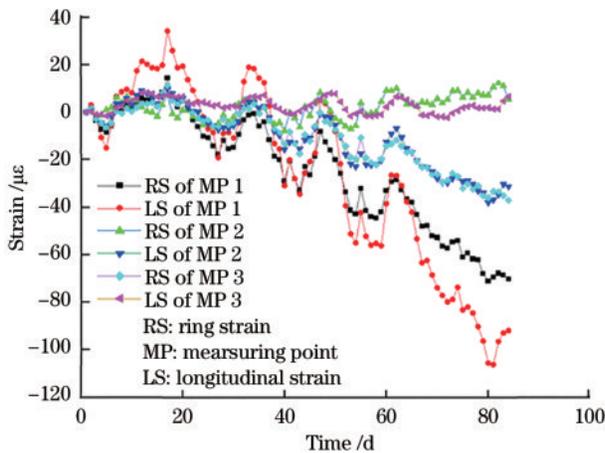


图 11 隧道应变长期稳定性趋势图

Fig. 11 Long-term trend chart of tunnel strain stability

结合图 11 数据可知,在隧道常规运行 3 个月的时间内,隧道各测点的应变变化趋势基本保持一致,即隧道的应力结构状态未出现差异性变化。进一步分析可知,受隧道结构重力荷载影响,隧道距地面较低的测点

产生的应力应变较大,且环向应变大于纵向应变,同时也与短期过车时的测点应变趋势吻合。

从图 11 中清晰可知,在 3 个月的时间内隧道监测截面整体应变数值无明显突变,隧道结构运行安全可靠,也表明光纤监测系统及传感器在隧道潮湿阴暗的环境下均可稳定工作。

#### 4.3 隧道测点沉降数据分析

##### 4.3.1 列车通行时刻隧道沉降数据分析

随机选取某日 10:00—10:30 的下行侧光学视频位移计实时数据,分析发现 10:10 陆续开始有列车通过,且 10:19、10:26 均有列车通过测点截面,如图 12 所示。

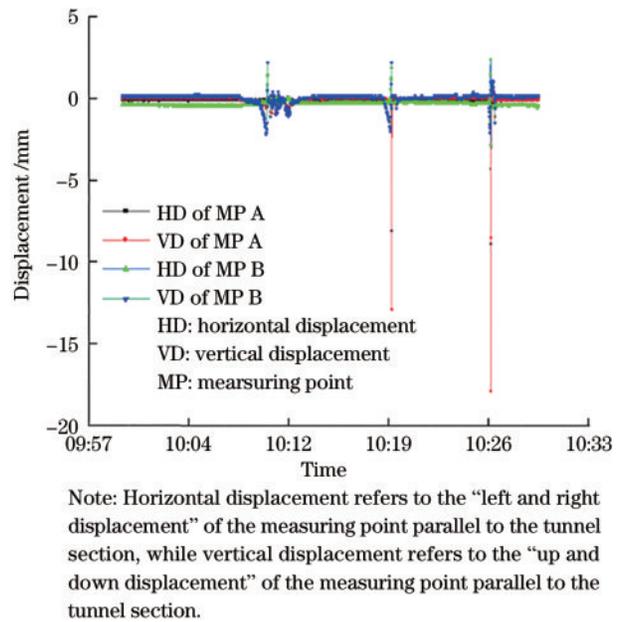


图 12 列车通行时刻隧道沉降图

Fig. 12 Tunnel settlement map at train passing time

分析图 12 可知:当监测面无列车通过时,隧道测点数据基本维持在零点附近,且波动较小;当有列车通过监测截面时测试位移发生明显变化,列车通过后位移迅速回落,符合等效荷载施加前后隧道横纵位移变化的理论趋势。

经过进一步分析,不同车速或车型对隧道的位移扰动也存在差异,其位移数据存在一定波动(表 1),并最终回归原始状态,其位移波形数据满足理论即短期

表 1 列车通行前后数据波动统计表

Table 1 Data fluctuation before and after the train passes

Information of measuring points	Measuring point A		Measuring point B	
	Horizontal displacement /mm	Vertical displacement /mm	Horizontal displacement /mm	Vertical displacement /mm
Before the traffic	-0.10	0.00	-0.40	0.10
The first train a	0.00	-0.50	1.50	2.20
The second train b	-8.10	-12.90	-0.60	-0.60
The third train c	-4.30	-17.90	-2.80	-0.50
After the traffic	-0.10	0.00	-0.50	0.20

来车时造成隧道结构出现微小波动变化,当列车通过后隧道结构又重新回归波动前的初始状态。

#### 4.3.2 隧道沉降长期稳定性数据分析

待系统稳定运行后,结合当地水文、地质等情况,选取累计 3 个月时长的光纤视频位移计测量数据(每日固定时间取一次数据),进行光学视频位移计的长期稳定性分析,具体数据趋势如图 13、表 2 所示。

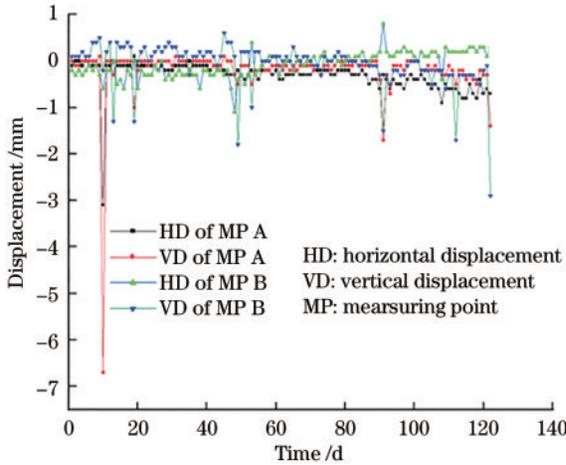


图 13 隧道沉降长期稳定性趋势图

Fig. 13 Long-term trend chart of tunnel settlement stability

分析图 13 可知:当监测面无列车通过时,隧道测点数据基本维持在零点附近,且波动较小;当有列车通

过监测截面时测试位移发生明显变化,列车通过后位移迅速回落,符合动荷载施加前后隧道的理论状态。

结合为期 3 个月的光学视频位移计长期稳定性数据可知,在运行期间隧道各监测测点在通车时动荷载会导致测点相应位移发生变化,测点位移变化趋势保持一致,即测点位移均保持在零值波动且未产生累加性的位移变化,即高地应力和荷载应力未对隧道结构产生累加的沉降位移,表明隧道结构正常。

进一步地,结合实际监测数据和仿真模型可知,通行列车的种类和频次会给隧道的瞬时应力应变和位移带来变化,通车会在隧道内表面短期产生瞬时微弱位移,但列车通过后隧道又基本回归原始零值状态。同样情况下,列车通行会导致隧道内产生应力应变,应力应变释放较为缓慢,存在一定的滞后性,但当应力释放完毕后,应变也能回归初始状态。本次仿真数据和实际的隧道监测数据趋势基本一致,但数据上存在一定差异,推测原因为实际铁路隧道本身为运营状态,隧道会受到频繁通车且通行列车车型、车速、载重偏差较大等影响,而模拟分析的隧道荷载为等效静态荷载。两者的光学传感监测方式得到的预期结果基本保持一致,初步表明常规行驶列车不会影响隧道稳定运行的结构状态。高地应力下的隧道应力应变主要受重力荷载和结构偏压影响较大,考虑到当前各测点应力应变在合理范围内且目前数据样本有限,待后续持续跟踪该隧道的监测数据以对偏压应力进行持续分析研究。

表 2 隧道测点长期数据统计表

Table 2 Long-term data of tunnel measuring points

Information of measuring points	Measuring point A		Measuring point B	
	Horizontal displacement /mm	Vertical displacement /mm	Horizontal displacement /mm	Vertical displacement /mm
Initial displacement	-0.10	0.00	-0.20	0.10
Displacement of 30 d	-0.20	-0.10	-0.40	0.30
Displacement of 60 d	-0.20	-0.20	-0.10	0.00
Displacement of 90 d	-0.40	-0.30	0.20	-0.30
Displacement of 120 d	-0.70	-1.40	0.30	-2.90

## 5 结 论

基于 FBG 传感与光学视频位移计技术监测运营期隧道结构安全具有重要的意义,其中光学视频位移计监测位移沉降是新技术在该方向的创新应用。本次研究利用 FBG 应力应变传感器对隧道进行  $\mu\epsilon$  级别监测,通行列车中的隧道截面应变在距地高度最低的位置最大,基本维持在  $5 \mu\epsilon$  以内,同时同一测点的环向应变较纵向应变大  $1\sim 2 \mu\epsilon$ 。本次工程项目中光学视频位移计的位移监测精度可达到亚 mm 级别,其中通行列车中的隧道截面位移沉降主要体现在竖向,距地高

度最高的位置受到位移影响最大,多车次运行中测点瞬时位移最大变化在 17.90 mm 以内,轴向位移仅变化 8.10 mm。3 个月时长数据表明铁路隧道运营状况下,隧道内测点位移并不会累计单向增加,使用光学传感技术可满足运营期隧道的安全监测。同时利用 FBG 传感与视频位移计技术的高精度、快速、多点自动化监测可以为隧道的结构评估提供真实有效的数据,对于相关隧道等建筑结构的健康监测与维护有参考与借鉴的意义。后续研究将持续关注光学传感在隧道结构上的现场应用,同时进一步提高系统的可靠性,以全面提升隧道安全监测的性能指标。

## 参 考 文 献

- [1] 田四明, 王伟, 巩江峰. 中国铁路隧道发展与展望(含截至 2020 年底中国铁路隧道统计数据)[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 308-325.  
Tian S M, Wang W, Gong J F. Development and prospect of railway tunnels in China (including statistics of railway tunnels in China by the end of 2020)[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 308-325.
- [2] 李隆. 基于计算机视觉的高速铁路隧道监测系统研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2020.  
Li L. Research on high-speed railway tunnel monitoring system based on computer vision[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2020.
- [3] 路耀邦, 刘永胜, 樊晓东. 地铁隧道结构表面病害快速检测方法与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(S2): 655-663.  
Lu Y B, Liu Y S, Fan X D. Rapid detection method for surface defect for metro tunnel structure and its application[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 655-663.
- [4] 李庆桐, 黄宏伟, 薛亚东, 等. 隧道衬砌图像清晰度影响因素的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2): 3915-3926.  
Li Q T, Huang H W, Xue Y D, et al. Model test study on factors affecting image sharpness of tunnel lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2): 3915-3926.
- [5] 韩涛. 基于振弦传感器的桥梁应力监测系统设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.  
Han T. The design of bridge strain monitoring system based on vibrating wire sensor[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [6] 陈妮, 何华光, 谢开仲. 多路振弦传感器同步测频系统设计[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 105-110.  
Chen N, He H G, Xie K Z. Design of multi-channel synchronous frequency measurement system for vibrating wire sensor[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 105-110.
- [7] 朱铁栓. 光纤光栅传感器的铁路隧道围岩变形实时识别[J]. 激光杂志, 2020, 41(4): 47-51.  
Zhu T S. Monitoring system of surrounding rock deformation of railway tunnel based on fiber Bragg grating[J]. Laser Journal, 2020, 41(4): 47-51.
- [8] 周萌. 大量程高灵敏度的光纤 Bragg 光栅低频振动传感器研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.  
Zhou M. Research on large range and high sensitivity fiber Bragg grating low frequency vibration sensor[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [9] Zhou J G, Xiao H L, Jiang W W, et al. Automatic subway tunnel displacement monitoring using robotic total station[J]. Measurement, 2020, 151: 107251.
- [10] Luo Y B, Chen J X, Xi W Z, et al. Analysis of tunnel displacement accuracy with total station[J]. Measurement, 2016, 83: 29-37.
- [11] 潘东峰, 杨超, 吴一同, 等. 利用 TLS 技术进行地铁隧道断面提取及变形监测分析[J]. 测绘通报, 2022(4): 130-133.  
Pan D F, Yang C, Wu Y T, et al. Section extraction and deformation monitoring analysis of metro tunnel using TLS technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(4): 130-133.
- [12] 刘界鹏, 崔娜, 周绪红, 等. 基于三维激光扫描的房屋尺寸质量智能化检测方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(4): 71-80, 3.  
Liu J P, Cui N, Zhou X H, et al. Intelligent inspection method for dimensional quality of houses based on 3D laser scanning[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(4): 71-80, 3.
- [13] Qiu W G, Cheng Y J. High-resolution DEM generation of railway tunnel surface using terrestrial laser scanning data for clearance inspection[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(1): 1-13.
- [14] Urban F, Kadlec J, Vlach R, et al. Design of a pressure sensor based on optical fiber Bragg grating lateral deformation[J]. Sensors, 2010, 10(12): 11212-11225.
- [15] 马豪豪, 刘保健, 翁效林, 等. 光纤 Bragg 光栅传感技术在隧道模型试验中应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(S2): 185-190.  
Ma H H, Liu B J, Weng X L, et al. Application of optical fiber Bragg grating sensing technology to tunnel model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S2): 185-190.
- [16] 杨建国, 马巍, 褚建峰, 等. 基于光纤布拉格光栅传感器的衬砌结构内力监测与分析[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(4): 122-127.  
Yang J G, Ma W, Chu J F, et al. Monitoring and analysis of the internal force of the lining structure by FBG sensors[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(4): 122-127.
- [17] 吴静红, 叶少敏, 张继清, 等. 基于光纤光栅监测技术的京雄高铁大断面隧道结构健康监测[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 210603.  
Wu J H, Ye S M, Zhang J Q, et al. Structural health monitoring of large-section tunnel of jingxiong high-speed railway based on fiber Bragg grating monitoring technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 210603.
- [18] 周易非, 原媛, 刘文白, 等. 基于数字图像相关技术的隐框玻璃幕墙抗风压性能评估[J]. 应用光学, 2020, 41(6): 1197-1206.  
Zhou Y F, Yuan Y, Liu W B, et al. Evaluation of wind resistance performance for hidden frame glass curtain walls based on digital image correlation technique[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(6): 1197-1206.
- [19] 吴凡, 吴思进, 李伟仙, 等. 应用数字散斑投影测量纸页厚度[J]. 应用光学, 2019, 40(5): 847-852.  
Wu F, Wu S J, Li W X, et al. Apply of digital speckle projection in measurement of paper sheet thickness[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(5): 847-852.
- [20] 朱金龙, 曾伟明, 鲁书浓, 等. 基于非接触视频位移测量系统的结构低频振动位移监测[J]. 现代科学仪器, 2018(1): 129-132.  
Zhu J L, Zeng W M, Lu S N, et al. Displacement monitoring on structural low frequency vibration based on

- non-contact video displacement measurement system[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2018(1): 129-132.
- [21] Vicente M A, Gonzalez D C, Minguez J, et al. A novel laser and video-based displacement transducer to monitor bridge deflections[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 970.
- [22] Wu G G, Xiao X M, Yao J N, et al. Machine vision-based measurement approach for transverse vibrations of moving hoisting vertical ropes in mine hoists using edge location[J]. *Measurement and Control*, 2019, 52(5/6): 554-566.
- [23] 周云, 程依婷. 基于数字图像相关理论的非接触式结构位移测量方法[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(5): 1-9.  
Zhou Y, Cheng Y T. Non-contact structural displacement measurement based on digital image correlation method[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(5): 1-9.
- [24] 张莎莎, 苏焰花, 樊林, 等. 基坑开挖对邻近既有盾构隧道的影响分析[J]. *建筑科学与工程学报*, 2022, 39(1): 134-142.  
Zhang S S, Su Y H, Fan L, et al. Analysis on influence of foundation pit excavation on adjacent shield tunnel[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2022, 39(1): 134-142.
- [25] 芮瑞, 王磊, 涂树杰, 等. 基于DEM的双线隧道地表沉降规律[J]. *建筑科学与工程学报*, 2019, 36(4): 112-119.  
Rui R, Wang L, Tu S J, et al. Surface settlement law of double-line tunnel based on DEM[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2019, 36(4): 112-119.
- [26] 李宏男, 任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 17, 77.  
Li H N, Ren L. Fiber Bragg grating sensing technology for structural health monitoring[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 17, 77.
- [27] 孙蜜雪. 光纤布拉格光栅结构设计、刻制及性能研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.  
Sun M X. Study on structural design, fabrication and characteristics of fiber Bragg grating[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [28] 师琪. 基于DFB激光器的FBG加速度传感器解调系统[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.  
Shi Q. Demodulation system of FBG acceleration sensor based on DFB laser[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [29] 朱飞鹏, 龚琰, 白鹏翔, 等. 基于数字图像相关的光学引伸计应变测量精度研究[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5): 1061-1069.  
Zhu F P, Gong Y, Bai P X, et al. Study on strain measurement accuracy of optical extensometers based on digital image correlation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1061-1069.
- [30] 单琳子. 基于模板匹配技术的物品图像高效快速识别算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.  
Shan L Z. The study of articles' fast and efficient image recognition algorithms based on template matching technique[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [31] Wang Z J, Zhao T Y, Hao H W, et al. High-speed image reconstruction for optically sectioned, super-resolution structured illumination microscopy[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(2): 026003.
- [32] Park J, Brady D J, Zheng G A, et al. Review of bio-optical imaging systems with a high space-bandwidth product[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(4): 044001.
- [33] del Rocio Camacho-Morales M, Rocco D, Xu L, et al. Infrared upconversion imaging in nonlinear metasurfaces[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(3): 036002.
- [34] 王志军, 于之靖, 马凯, 等. 数字散斑亚像素小角位移测量的曲面拟合法[J]. *应用光学*, 2017, 38(2): 256-263.  
Wang Z J, Yu Z J, Ma K, et al. Curved surface fitting method of sub-pixel small angle measurement[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(2): 256-263.
- [35] 陈森路, 刘育梁, 徐团伟. 基于自适应感兴趣区域的视频心率测量[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(7): 1740-1749.  
Chen S L, Liu Y L, Xu T W. Video heart rate measurements based on adaptive region of interest[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(7): 1740-1749.
- [36] 余云燕, 李国良, 赵德安, 等. 两水隧道地应力测量及三维地应力场多元回归分析[J]. *现代隧道技术*, 2016, 53(4): 29-36.  
Yu Y Y, Li G L, Zhao D A, et al. Geostress measurement and 3D multivariate regression analysis of the geostress field of the Liangshui tunnel[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2016, 53(4): 29-36.
- [37] 姚正源. 软岩隧道中双层初期支护变形分析[J]. *建筑结构*, 2018, 48(S2): 991-993.  
Yao Z Y. Deformation analysis for double-layer preliminary support in soft-rock tunnel[J]. *Building Structure*, 2018, 48(S2): 991-993.