

城市地下道路隧道结构健康监测研究

丁鸿志¹, 邹鸿浩², 赵光², 李奥², 董飞²

(1.南京市公共工程建设中心, 江苏 南京 210019; 2.苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019)

摘 要:城市交通隧道的数量随着经济发展不断增多,隧道结构健康监测系统作为掌握隧道结构安全状态的有效措施也得到一定的发展。由于地下道路隧道投资规模、隧道长度较小等原因,致使结构健康系统较少应用在地下道路隧道中。依托园腾路地下道路隧道,采用“半智能化”结构健康监测的方式,在降低结构健康系统成本的前提下,对隧道结构健康状态进行必要的监测。同时,对比测缝计、静力水准仪及形状传感器的监测结果,验证形状传感器在接缝张开量、接缝两侧不均匀沉降的可行性。针对城市地下道路等短隧道,适当降低结构健康监测系统的智能化程度,提高结构健康监测系统在短隧道的使用率,对于提高管养质量、保障地下道路隧道结构安全具有重要意义。

关键词:地下道路隧道;结构健康监测;形状传感器;变形监测

中图分类号: U456

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)01-0197-05

0 引言

随着城镇化建设的不断进行和社会经济的持续发展,高度集中的城市人口及进一步提高的居民机动车保有量,给城市的交通系统带来一系列挑战。交通拥堵、马路拉链、环境恶化等成为城市发展过程中的常见问题,在城市核心区情况尤为突出^[1]。通过加大地下空间开发、市政设施的地下化,尤其是地下道路的建设,能够有效缓解城市的拥堵问题。各类地下道路隧道设计使用年限较长,在漫长的运营期中由于隧道自身的施工缺陷或养护不到位等问题,在外界环境作用下容易引发隧道结构变形、病害等,对隧道结构造成安全隐患^[2-3],进而影响地下道路的通行功能。因此,应在运营期对地下道路隧道展开监测,密切关注隧道结构的运行状况。

当前,国内对隧道结构的监测主要分为人工监测和结构健康自动化监测。人工监测是指监测人员进入施工现场,参照现行的相关测量规范^[4],使用传统测量工具进行人工操作测量,测量完成后对数据进行处理,并将测量结果反馈给工程相关部门。当前完全依靠人工测量来掌握隧道结构的受力及安全状态,具有测量直接、技术成熟等特点,广泛应用于各类工程中^[5-7]。结构健康自动化监测一般称为结构

健康监测(Structural Health Monitoring,简称 SHM)即利用现场的、无损的、实时的方式采集环境与结构信息,分析结构反应的各种特征,获取结构因环境因素、损伤或退化而造成的改变^[8]。依托南京长江隧道,刘胜春等^[9]研究了大型盾构隧道结构健康监测系统的设计方法,并根据隧道的工程特点和长期运营安全监测的需要,采用以光纤传感技术为主的监测技术实现了隧道的长期监测。以苏州地铁为例,孟志浩^[10]介绍了影响隧道施工和运营安全的主要因素和问题,并给出了隧道监测与评价的主要内容。杜荣武^[11]利用三维激光技术,获得了地铁隧道管片和轨道的三维点云数据,通过对点云数据的切片、去噪、曲线拟合处理后得到了隧道的断面变形值、净空收敛值、管片错台值和轨道的轨距变化值,进一步分析判断各指标参数的健康度。近年来,随着结构健康监测技术的发展,使得各类城市交通隧道的安全得到进一步保障。而城市下穿通道的长度短、投资规模小、分布离散等问题,给结构健康监测系统的实施带来困难。同时,城市下穿通道作为城市快速路的重要组成部分,为确保其使用安全采取的封道后人工监测对城市交通影响极大。

城市道路隧道如果采用封道监测对城市交通影响大,而全套健康监测系统成本高,因此本文针对园腾路隧道采用传感器监测采集,在设备用房内按需采集的办法,并检验“形状传感器”在短隧道、小变形下应用的可能性。对城市地下道路等短隧道,在降低成本、提高管养质量、保障地下通道安全上具有重要意义。

收稿日期: 2022-03-21

基金项目: 住房和城乡建设部研究开发项目(2019-K-110)

作者简介: 丁鸿志(1984—),男,学士,工程师,从事隧道与地下工程领域的规划、设计、咨询和科技管理工作。

1 监测方案设计

1.1 监测对象

园腾路隧道位于南京市江北新区横江大道与园腾路交叉口,自东向西下穿横江大道,全长 440 m,其中暗埋段 115 m,敞开段 325 m。通道结构总宽 21 m,双向四车道,设计时速 60 km/h。隧道平纵断面如图 1、图 2 所示。暗埋段隧道的地基土主要为淤泥质粉质黏土、粉砂夹粉土。

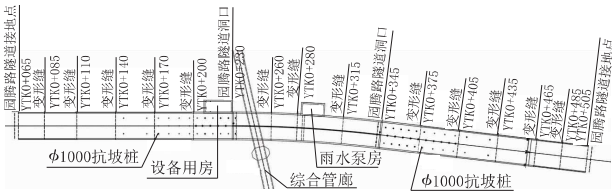


图 1 园腾路隧道平面图

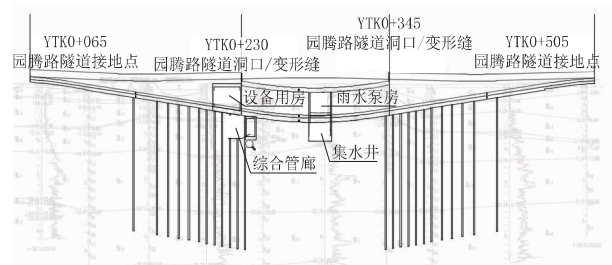


图 2 园腾路隧道纵断面图

1.2 监测项目与监测设备

对采用明挖法施工的地下道路隧道,现浇结构的变形缝通常为隧道病害的多发部位。例如,变形缝作为防水薄弱部位,在温度应力的作用下的张开而导致渗漏水;变形缝作为刚度不连续部位,由于不均匀沉降,无法整体变形导致的应力集中。根据园腾路隧道整体投资规模,监测项目和仪器数量有限,选定接缝间的张开量和接缝处的不均匀沉降作为监测项目。分别采用测缝计和静力水准仪对接缝张开量和不均匀沉降进行监测,如图 3 所示。

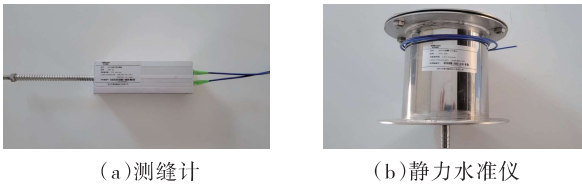


图 3 监测仪器选用

测缝计跨变形缝安装,仪器型号为深圳简测智能技术有限公司 JFDS-50,量程 0~50 mm,精度 ±0.1%FS,分辨率 0.02 mm。静力水准仪在变形缝左右各安装一个,用通液管相连;仪器型号为深圳简测智能技术有限公司 JFHL-100,量程 100 mm,精度 ±0.1%FS,分辨率 0.1 mm。

为控制监测成本,本项目不单独设置采集站和

解调仪,将光纤传感器接入设备用房中,采用便携式采集仪按需监测,如图 4 所示。



图 4 便携式采集仪

同时,监测中试验性采用形状传感器,通过与传统测缝计与静力水准仪的监测数据,检验形状传感器在隧道中的适用性。形状传感器结构示意图如图 5 所示。

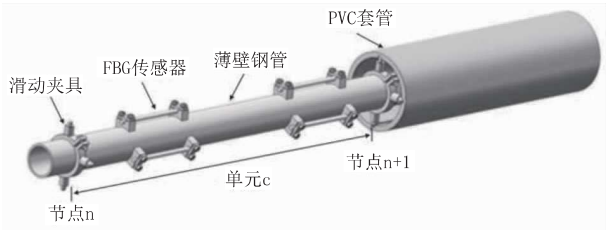


图 5 形状传感器结构示意图

形状传感器是指将多个应变传感器以一定间距分布在钢管上,通过监测钢管的变形来获取监测对象变形的数据^[12]。在隧道变形缝上使用形状传感器,可以实现接缝张开量、接缝两侧不均匀沉降两个方向的监测。

1.3 监测断面与仪器安装

(1)监测断面

监测重点部位,一般包括上部荷载突变处、上覆荷载最大处、软弱地基、结构断面突变处、各类交叉工程等^[13]。针对园腾路隧道,其存在的主要风险如下:

- a. 隧道洞口两侧,敞开段从 YTK0+140~YTK0+230(洞口处)施工抗拔桩,抗拔桩可兼做工程桩,暗埋段地基未做处理。
- b. 洞口明暗分界处结构形式差异大,临近设备用房,明挖段与暗埋段承受荷载差异大。
- c. YTK0+230~YTK0+260 区段,与管廊工程交叉。

针对以上风险,结合具体的变形缝设计位置,测断面选定见表 1。

表 1 监测断面选取表

位置桩号	断面选取依据
YTK0+230	隧道明暗分处,设备用房节段,抗拔桩布置分界
YTK0+260	包络交叉综合管廊
YTK0+345	隧道明暗分处,抗拔桩布置分界点

(2) 仪器安装

监测仪器在监测断面上的布设原则如下(如图 6 所示):

- a. 测缝计安装在侧墙中部,跨缝安装,在监测断面左、右洞隧道临土侧边墙上各一个。
- b. 静力水准仪安装在侧墙中部,变形缝两侧各一个。安装在左、右洞中带有设备用房,导致结构变化较大的一侧。
- c. 形状传感器跨缝安装在静力水准仪相同的位置,形成对比。

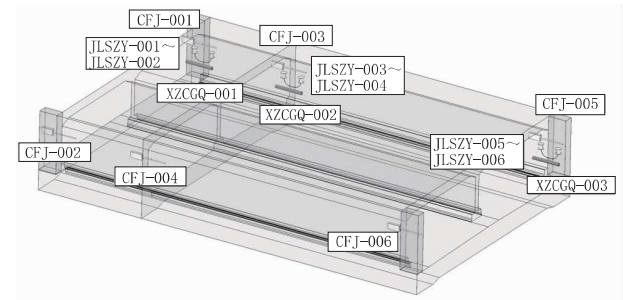


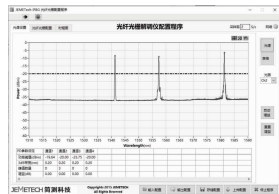
图 6 园腾路隧道传感器安装示意图

2 隧道监测实施与数据采集

2021 年 6 月,园腾路隧道施工完成后,及时入场实施健康监测系统并采集初值,随后展开了持续监测至 2022 年 2 月。根据监测数据和现场情况,对监测频率进行动态调整,如图 7 所示。



(a) 传感器安装



(b) 数据采集

图 7 现场安装及采集图

3 监测结果分析

从 2021 年 6 月 10 日至 2022 年 1 月 1 日,针对 YTK0+230、YTK0+260、YTK0+345 处的变形缝,共进行了 17 次监测。

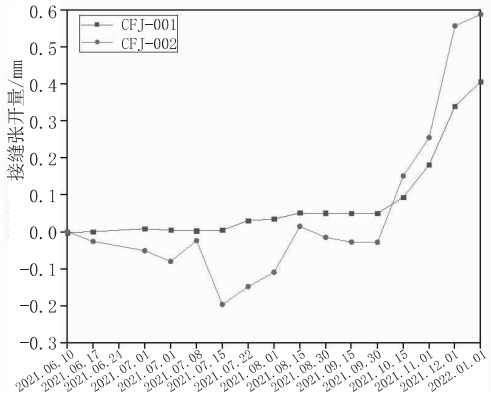
3.1 测缝计结果分析

根据接缝张开量监测结果(如图 8 所示),可知:
(1) 6 个监测点处的测缝计随时间变化的趋势整体一致。从 2021 年 6 月~2021 年 9 月,6 条变形缝张开量在一定范围内上下波动,无明显的变大趋势;2021 年 9 月~2022 年 1 月,变形缝张开量显著增加。

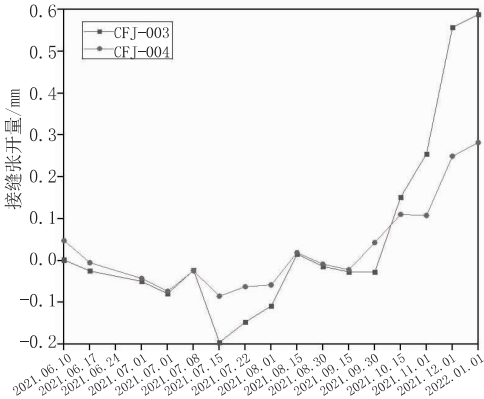
(2) 同一里程号上左、右线隧道的接缝张开量数值,无明显对应关系。分析认为,隧道张开量差距不明显时,波动原因主要由监测环境和仪器精度导致;

左右线张开量差值最大可达 0.269 mm,出现在 2022 年 1 月 1 日的 YTK0+260 处。

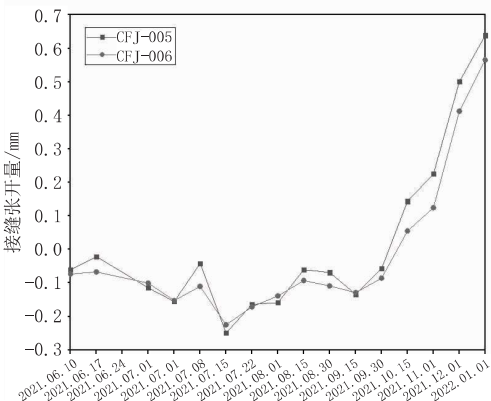
(3) 隧道张开量最大处出现在 CFJ-001,最大值达 0.639 mm。



(a) YTK0+230



(b) YTK0+260



(c) YTK0+345

图 8 接缝张开量监测

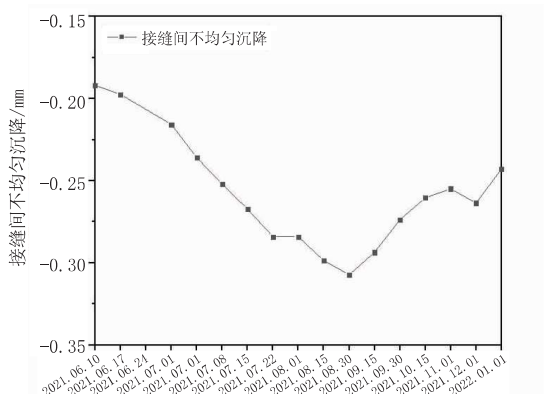
3.2 静力水准仪结果分析

根据接缝间不均匀沉降监测结果(如图 9 所示),可知:

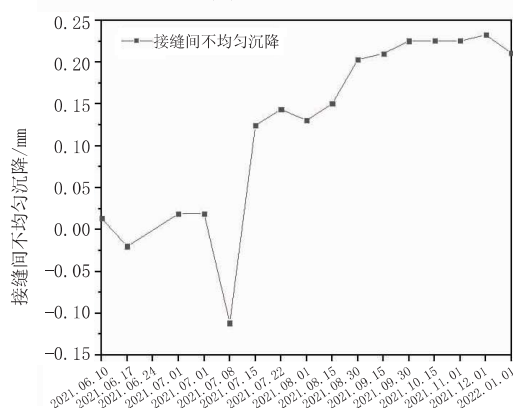
(1) 各处不均匀沉降值之间,随时间变化无明显规律。

(2) 接缝间不均匀沉降数值为负正,表示沿里程增加方向,沉降量增加。从图 9(a)及图 9(c)可知,隧道暗埋段的沉降量大于明挖段。

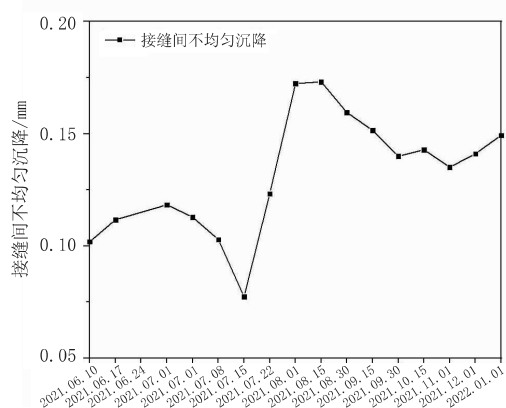
(3)接缝间不均匀沉降最大值为 -0.307 mm ,出现在 2021 年 8 月 30 日 YTK0+230 处。



(a) YTK0+230



(b) YTK0+260



(c) YTK0+345

图9 接缝间不均匀沉降监测

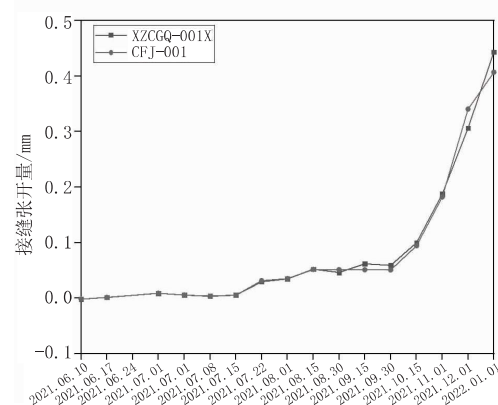
3.3 形状传感器结果分析

(1) 接缝张开量

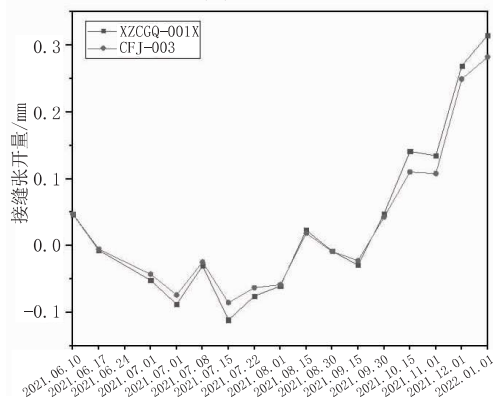
根据形状传感器测量原理,将形状传感器的位移沿水平与竖直方向进行分解,如 XZCGQ-001X,表示编号为 001 的形状传感器在沿隧道方向的伸长量,即接缝张开量。接缝张开量监测如图 10 所示。

形状传感器对于接缝张开量的监测数值,其变化规律与同位置的测缝计整体一致,数值上有一定差距,最大差距 0.04 mm ,出现在 YTK0+345 中。

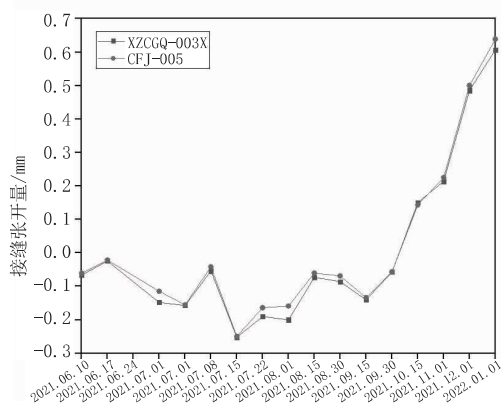
(2) 接缝间不均匀沉降



(a) YTK0+230



(b) YTK0+260



(c) YTK0+345

图10 接缝张开量监测

根据形状传感器测量原理,将形状传感器的位移沿水平与竖直方向进行分解,如 XZCGQ-001Y,表示编号为 001 的形状传感器两端在垂直于隧道方向上的变形量的差值,即变形缝两侧的不均匀沉降,如图 11 所示。

形状传感器对于变形缝处的不均匀沉降的监测数值,变化规律与同位置的静力水准仪接近,在数值上相互交叉,最大差距 0.05 mm ,出现在 2021 年 8 月 30 日 YTK0+230 中。

3.4 监测数据对比

以 YTK0+230 断面为例,将形状传感器接缝量结果与测缝计结果、形状传感器不均匀沉降监测结果与静力水准结果进行对比,分析接缝量和不均匀

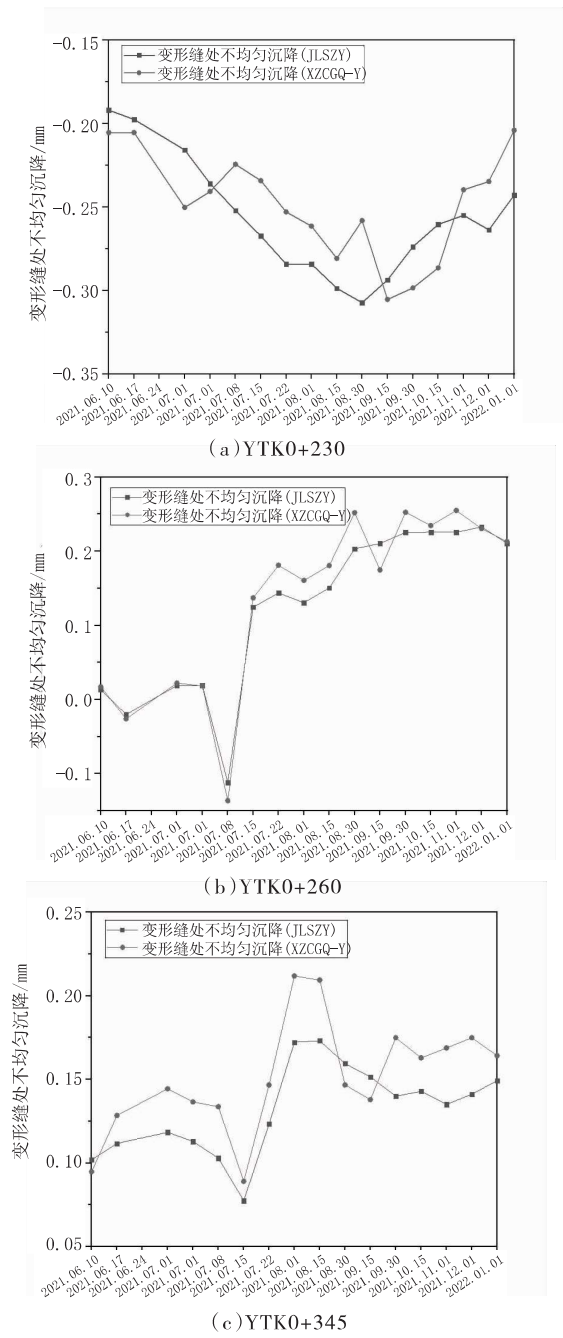


图 11 变形缝处不均匀沉降

沉降监测项目中两种不同监测方法所获得的结果关联度。利用 Origin 绘图软件进行数据拟合,并得到拟合优度值 R^2 , R^2 的值越接近 1,说明回归直线对观测值的拟合程度越好。接缝张开量对比结果如图 12 所示,线性拟合结果可以得到拟合度 R^2 为 0.98802。不均匀沉降对比结果如图 13 所示,线性拟合结果可以得到拟合度 R^2 为 0.957 59。拟合结果表明形状传感器应用于监测变形缝的张开量及变形缝两侧的不均匀沉降时,与测缝计及静力水准仪的结果吻合较好。

4 结 论

本文系统介绍了园腾路地下道路隧道结构健康

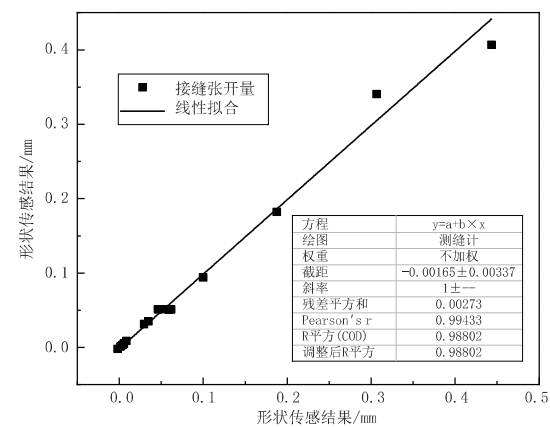


图 12 接缝张开量对比结果

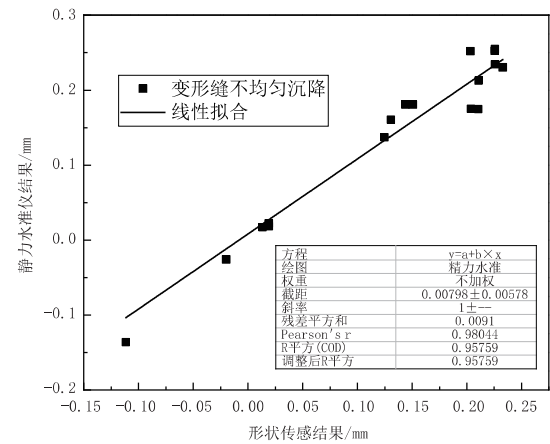


图 13 变形缝不均匀沉降对比结果

监测系统的设计及实施,并进行数据分析。同时,采用形状传感器对隧道变形缝的张开量及两侧的不均匀沉降进行监测,并将监测数据与缝计、静力水准仪进行对比。得到结论如下:

- (1)对于整体规模较小的,可根据成本要求,通过降低结构监测的自动化程度来实现结构健康监测。
- (2)变形缝张开量在 2021 年 9 月~2022 年 1 月时间内不断增大,分析认为由于气温导致,变形缝张开量最大值 0.639 mm,结构安全。
- (3)隧道暗埋段的沉降量大于明挖段,分析认为主要受回填土体的荷载影响,变形缝最大不均匀沉降为 -0.307 mm。
- (4)形状传感器应用于监测变形缝的张开量及变形缝两侧的不均匀沉降时,与测缝计及静力水准仪的吻合较好,监测指标的数值最大差异为 0.04 mm 和 0.05 mm,满足监测精度要求。

参考文献:

[1] 李少杰,俞明健,罗建晖,等.城市地下物流专用通道与综合管廊的共建模式研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(2):6.
[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].隧道与地下工程灾害防治,2020,2(3):1-12.
[3] 马伟斌,柴金飞.运营铁路隧道病害检测、监测、评估及整治技术发

果及图4,实例2原始方案的适应度为257.9,优化方案适应度为113.4。

(2)优化方案设计效率高。市场应用的道路软件人机交互拉坡设计需耗时0.5~2 d,本算法整体的优化过程耗时2.2 s,效率非常高。

(3)优化方案减少工程投资。实例1、实例2优化方案与原始方案结果进行比较,优化方案的调平层或新增加铺工程量为原始方案的50.1%~55.6%,节省了近一半的新增加铺量,纵断面优化设计线更精确,更接近实际道路中线高程,优化效果显著。

3 结 语

研究表明:该设计模型达到了改建道路纵断面自动适应贴合现状道路高程、路面改造工程量最小的目的。当粒子群算法迭代次数达到400多次时,粒子适应度函数趋于收敛。当迭代次数设为500次时,可以获得满意的方案。

实例验证表明,与传统的人工交互拉坡设计相比,基于粒子群算法的纵断面自动设计与现状路面贴合度更高,设计效率更高,自动设计过程仅需2~3s;拟合原地面线的效果更好,能节省近一半的路

面新增加铺量,优化设计效果显著。本算法为道路改造纵断面自动设计提供了有力的理论支撑,同时也极大地提升了设计效率、显著减少工程量,为设计决策提供重要参考。

参考文献:

- [1] 刘明.城市道路拓宽改建的研究[D].济南:山东建筑大学,2016.
- [2] 李懿.基于深度强化学习的公路路线生成方法[D].昆明:昆明理工大学,2020.
- [3] 张伟东.基于遗传算法与动态规划法混合算法的铁路纵断面优化设计[D].兰州:兰州交通大学,2015.
- [4] 田成祥,王怀晓,付成群,等.基于量子遗传算法的军用道路纵断面优化设计[J].四川兵工学报,2013,180(7):152-155.
- [5] 钟洲.城市道路改造工程纵断面设计方法[J].城市道桥与防洪,2016,206(6):41-42.
- [6] 陈亿琳,丁建明,陈素华.道路改造纵断面计算机自动设计[J].公路交通科技,2005(8):23-25.
- [7] Eberhart, R. C. and Kennedy, J. A new optimizer using particle swarm theory [C]. Proceedings of International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995, 39-43.
- [8] 高明瑶,石红国.基于改进PSO算法的轨道交通接运公交线路优化问题[J].交通运输工程与信息学报,2019,66(4):49-54.
- [9] 沈显君.自适应粒子群优化算法将其应用[M].北京:清华大学出版社,2015:48-69.

(上接第201页)

展现状[J].隧道建设(中英文),2019,39(10):1553-1562.

[4] GB 50026—2020,工程测量标准[S].

[5] 净少敏,冯峥嵘.大断面隧道施工监测分析及应用[J].铁道建筑技术,2010(2):35-39.

[6] 肖红渠.五龙岭大跨连拱隧道施工监测及变形特性分析[J].隧道建设,2001(1):1-6.

[7] 胥新伟,张乃受,刘思国.大型跨海沉管隧道施工监测新技术[J].中国港湾建设,2020,40(6):59-64.

[8] 黄俊,陈喜坤,李宏,等.结构智能健康监测系统在水下隧道中的应用[J].地下空间与工程学报,2017,13(S1):306-313.

[9] 刘胜春,张顶立,黄俊,等.大型盾构隧道结构健康监测系统设计研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(4):741-748.

[10] 孟志浩.盾构隧道BOFDA监测与稳定性评价[D].南京:南京大学,2017.

[11] 杜荣武,翁顺,曾铁梅,等.基于移动三维激光扫描的地铁隧道结构监测方法[J].土木工程与管理学报,2020,37(1):139-145.

[12] 任亮,尤润州.一种基于形状传感器的测斜装置及测斜方法:中国,CN110686612B[P].2020-08-25.

[13] 李讯,何川,汪波,吴成刚.营运期隧道结构健康监测与安全评价研究[J].现代隧道技术,2008,45(S1):289-294.