

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.07.028

富水软土地区综合管廊运行初期结构变形规律 与安全评价

杨杰¹,周开红²,邱金鹏¹,蒋杰³

(1. 连云港徐圩港口物流有限公司,江苏 连云港 222047;2. 江苏方洋集团有限公司,江苏 连云港 222047;
3. 苏交科集团股份有限公司,江苏 南京 210019)

摘要:地下综合管廊是城市的生命线工程。管廊处于特殊的地质环境中,经过较长的运营期,极易产生不均匀沉降、接缝变形和断面扭转等结构病害,影响管廊的正常运营使用。因此,对地下构筑物进行结构健康监测在结构病害形成破坏前发现问题并采取工程手段去解决,以保障地下构筑物运营安全非常必要。以连云港市徐圩新区地下综合管廊为依托,开展管廊结构变形监测和病害调研,对结构健康监测数据进行分析,评价综合管廊的安全状态,并提出相应的养护措施,为国内相似工程提供一定借鉴及参考。

关键词:综合管廊;健康监测;结构病害;安全评价;养护措施

中图分类号: TU992.24

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)07-0115-06

0 引言

随着城市发展进程加快,各类管线改变了原本的城市面貌,出现了诸如“空中蜘蛛网”和“马路拉链”等城市顽疾。地下综合管廊的出现,便是缓解这类现象的一剂良药^[1]。目前全国已有485个城市编制了综合管廊建设规划,279个城市、104个县开工建设综合管廊约6 000 km,形成廊体约4 000 km^[2]。管廊建设的热潮也是我国地下空间开发技术进步的体现,但由于地下环境的特殊性,可能存在软土、岩溶、液化砂土等不良地质条件,极易对管廊结构安全形成威胁。从地下综合管廊建设的全生命周期来看,其建设完成进入运营的初期,由于工后沉降,会集中出现较多的病害,如结构变形、断面扭转、不均匀沉降等,严重影响管廊的运营安全^[3]。因此,针对地下综合管廊开展结构健康监测非常必要。本文以徐圩新区地下综合管廊为例,采用自动化监测手段获取了管廊运营初期的结构变形规律,通过分析监测数据对管廊安全状态进行评价,并针对管廊病害现状提出了管养建议。

目前我国地下结构健康监测系统多用于城市隧

道工程,主要由监测、诊断、评价三大模块组成。既要能够在较长时间维度内实时监测地下构筑物的结构关键参数和所处环境的参数,又要保证监测设备的可靠性。结合监测数据,要建立起结构物与所处地质环境的关系模型,以此分析结构物在不同环境条件下的变化特征,通过提取参数特征变化规律进行数据分析,判断结构安全及健康状况^[4]。目前国内学者对结构健康监测开展的研究较多,采用的数据处理方法各不相同,但进行安全评价的思路是相通的。相关研究如下:

傅道兴等^[5]采用压力计、振弦式渗压计、光纤应变计、位移计作为监测设备,针对南京长江隧道设计了结构健康监测系统,监测内容包括管片结构受力、螺栓受力、接缝位移量和混凝土结构侵蚀监测,为隧道运营安全提供了保障。在该监测系统服役10 a后,南京长江隧道成为全国首个开展结构健康监测系统升级改造工程的盾构隧道。潘红兵等^[6]在隧道的关键节点及隧道结构薄弱处补充了测点,增加接缝伸缩量监测、纵向不均匀沉降监测、错台监测、管片倾斜与偏转监测、结构应力监测和振动响应的监测,采用安全度综合评价法,为监测系统设计提供了参考。

杨建平等^[7]以武汉长江隧道为依托布设结构健康监测系统,采用应变计和测缝计作为监测设备,通过对7 a运营期的监测数据进行分析,构建了分布滞后模型,提升了监测系统对结构异常响应的灵敏度。陈

收稿日期: 2023-08-15

作者简介: 杨杰(1989—),男,本科,工程师,从事地下管廊运营工作。

通信作者: 蒋杰(1995—),男,硕士,助理工程师,从事隧道设计工作。电子信箱: jiangjie95@foxmail.com

卫忠等^[8]研究了隧道结构响应随外载环境变化的规律,提出了基于实时监测数据的隧道结构安全模糊综合评价模型,并将其应用在南京扬子江隧道结构健康监测系统中,实现了隧道结构健康状况的实时评价和预警。

《水下隧道结构健康监测技术规程》针对水下隧道提出一套完整的结构健康监测设计方法,明确提出了结构健康监测风险源与监测项目,同时详细阐述了监测预警方法,采用层次分析法对监测数据进行分析,评估隧道结构安全度,为隧道结构健康监测系统的设计提供了参考^[9]。

结构健康监测方面的研究目前已经有较为成熟的一套模式,但研究对象以隧道为主,对地下综合管廊的研究较少。管廊相对于隧道,具有同样复杂的地质环境条件,管廊内各类管道、线缆的荷载压力及复杂的结构形式,同样需要开展各类研究探讨各类监测项目的适用性,通过数据分析方法对监测数据进行处理,以此评价管廊的结构安全度,并提出针对性的管养措施,为隧道的运营安全提供保障。

1 工程概况

1.1 管廊概况

徐圩新区地下综合管廊位于江苏省连云港市徐圩新区节能环保科技园,是国内管廊建设规模较大的工程之一。该管廊建设工程规划总长 24.80 km,目前一期建设完成管廊长度 15.30 km,包括江苏大道、西安路、环保二路、方洋路 4 条管廊,位置信息如图 1 所示,标准横断面如图 2 至图 5 所示。管廊采用“三纵三横”的布置形式,管线设计容量较大,涉及水、电、热、气、通信等管线入廊,且设有应急疏散通道,属大断面综合管廊,兼顾多重功能与使命。管廊的断面尺寸见表 1。



图 1 徐圩新区地下综合管廊平面分布位置

管廊位于沿海地区,属海积平原区,管廊路线范围内下穿多条道路、河流,且在路径上存在多种不良

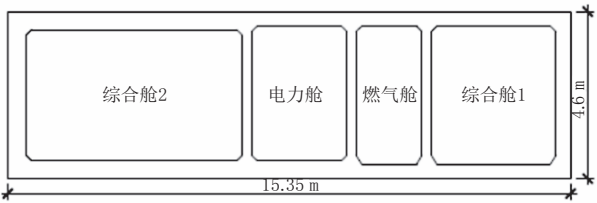


图 2 江苏大道管廊标准横断面

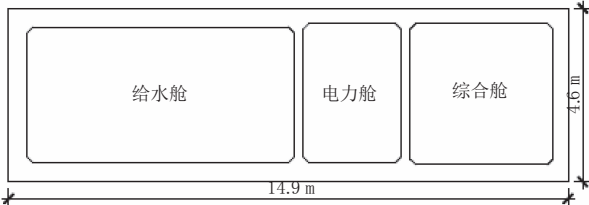


图 3 方洋路管廊标准横断面

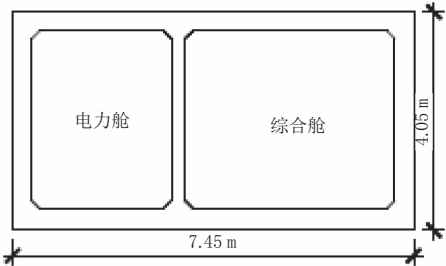


图 4 西安路管廊标准横断面

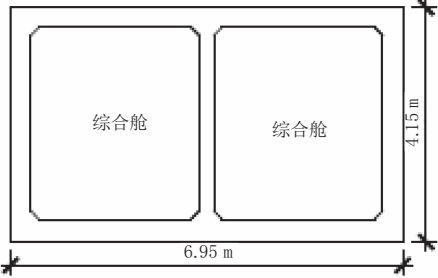


图 5 环保二路管廊标准横断面

表 1 管廊断面尺寸

管廊位置	区段位置	断面尺寸 /m
江苏大道	A0+000 ~ A0+800	13.30
	A0+800 ~ A1+640	10.40
	A1+640 ~ A5+800	15.35
	A5+800 ~ A8+420	13.85
西安路	B0+060 ~ B2+320	7.45
	B2+320 ~ B3+060	6.55
环保二路	C0+000 ~ C1+310	6.95
方洋路	D0+000 ~ D1+371	14.90
	D1+371 ~ D2+600	13.80

地质条件,均会对管廊的正常运营造成威胁。通过对管廊所处环境条件进行分析,可能产生的结构病害风险为:

(1)下穿河流位置,存在较厚层的淤泥质粉质黏土地层,具有高含水量、高压缩性、低承载力的特点,

可能导致管廊主体结构沿走向整体产生差异沉降、局部形成结构变形裂缝。

(2)管廊与道路距离较近,且存在多条道路下穿节点,荷载分布不均匀可能导致断面扭转。

(3)管廊临海建设,且存在多处穿河交叉节点,地层含水量较高,且海水中的盐分会腐蚀管廊结构,形成结构损伤,长期累积可能会导致较为严重的结构变形损坏及不均匀沉降^[10]。

1.2 结构健康监测系统

由于徐圩新区综合管廊规模较大,所以目前的结构健康监测系统选取了 150 个断面进行监测,包括穿河穿路、地质条件变化处、结构断面变化处等重要节点,选取影响程度最大的差异沉降作为权限监测项目。

在既有的 150 个断面中,又选取了 30 个重点监测断面,如管廊下穿河道最低点、下穿主干道处、结构断面突变处、上覆荷载突变处等存在风险的位置,补充伸缩缝张开量监测和断面扭转监测,作为对全线监测的补充。监测断面情况统计见表 2。

表 2 监测断面统计

综合管廊	监测断面 / 个	重点断面 / 个	位移计 / 支	水准仪 / 个
江苏大道	85	16	202	16
西安路	18	6	48	6
环保二路	13	4	34	4
方洋路	34	4	76	4

不均匀沉降监测通过布设两支叠放的位移计组合测量。两支位移计分别横向、斜向放置,横向的位移计同时可以监测断面接缝张开量。对两支位移计的度数进行二次计算处理,可以得出断面的不均匀沉降量。

断面伸缩缝张开量由位移计直接测量读数得出。断面扭转通过水准仪进行监测,水准仪的测量值需结合不同断面宽度参数进行修正。

2 隧道结构变形规律及病害分析

本工程包括江苏大道、西安路、环保二路和方洋路 4 条综合管廊,取 2022 年 6 月的监测数据作为初始值,调取监测系统近一年的监测数据,按季度开展四期监测数据分析工作。

2.1 差异沉降

差异沉降监测以 2022 年 6 月监测数据作为基准值,在此基础上的沉降量变化值即为管廊结构实际

的变化量。监测数据显示,江苏大道综合管廊差异沉降平均变化量为 0.23 mm,最大沉降量为 1.31 mm;西安路综合管廊差异沉降平均变化量为 0.27 mm,最大沉降量为 1.12 mm;环保二路综合管廊差异沉降平均变化量为 0.19 mm,最大沉降量为 0.62 mm;方洋路综合管廊差异沉降平均变化量为 0.15 mm,最大沉降量为 0.66 mm。管廊重点断面沉降量监测曲线如图 6 至图 9 所示,沉降量均处于安全范围内,结构处于健康状态,沉降较大的区域主要集中在下穿河流处。此处地质情况变化较大,局部存在软土,且管廊断面尺寸发生变化,后期应针对薄弱点加强监测。

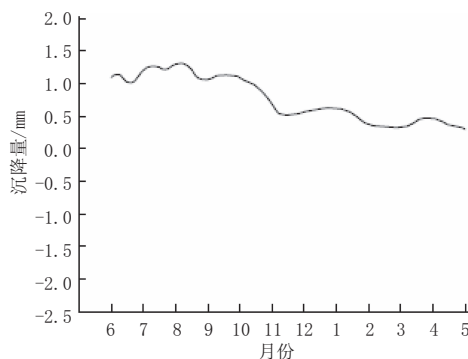


图 6 江苏大道差异沉降曲线

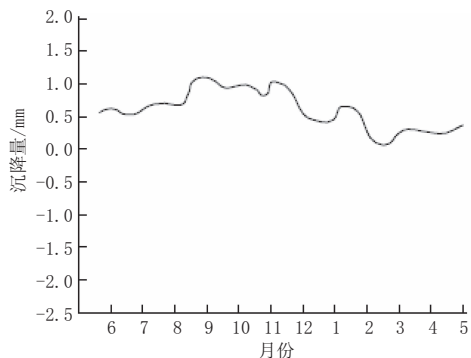


图 7 西安路差异沉降曲线

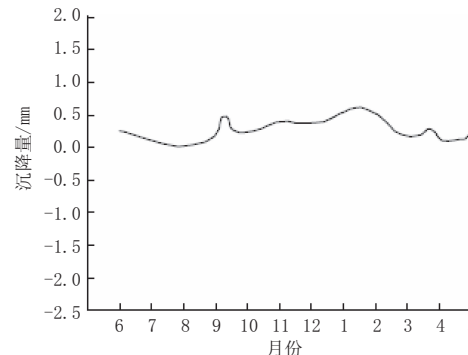


图 8 环保二路差异沉降曲线

2.2 断面扭转

综合管廊通常自身刚度较大,但由于管廊局部跨度较大,且上部存在多条道路交叉,重型车上跨情况频发,管廊下卧软土固结沉降,跨度较大断面沉降量差异导致断面扭转。断面扭转以 2022 年 6 月监测

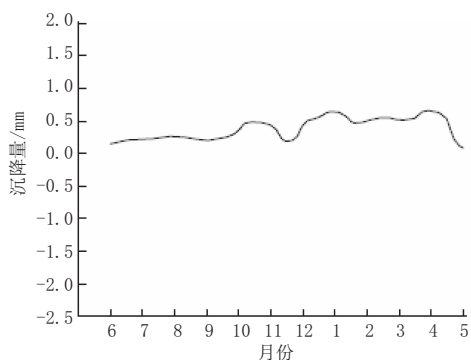


图9 方洋路差异沉降曲线

数据作为基准值,监测数据显示,江苏大道断面扭转平均值为 0.18%,最大扭转值为 0.29%;西安路断面扭转平均值为 0.15%,最大扭转值为 0.25%;环保二路断面扭转平均值为 0.07%,最大扭转值为 0.15%;方洋路断面扭转平均值为 0.09%,最大扭转值为 0.19%。管廊重点断面扭转监测曲线如图 10 至图 13 所示,断面扭转监测值均小于 0.3%,结构处于健康状态。监测数据显示,管廊下穿道路处因动荷载分布不均匀问题,断面扭转监测值偏高。

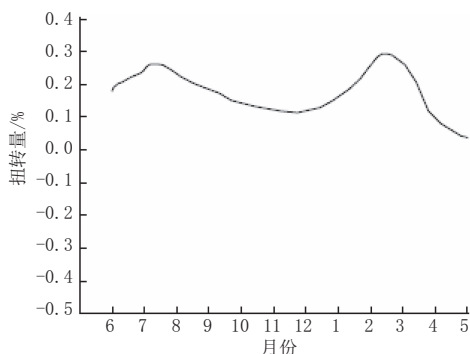


图10 江苏大道断面扭转曲线

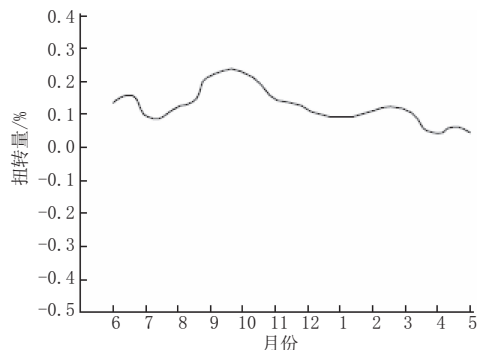


图11 西安路断面扭转曲线

2.3 伸缩缝变形量

综合管廊伸缩缝变形量全线监测采用差异沉降监测设备中水平放置的测缝计直接测量。对于重点监测区域,增加 2 支测缝计进行补充。监测数据显示,江苏大道伸缩缝变形量平均值为 2.77 mm,局部变形量最大值超过 5 mm,管廊内出现裂缝和错台等现象;西安路伸缩缝变形量平均值为 2.93 mm,最大

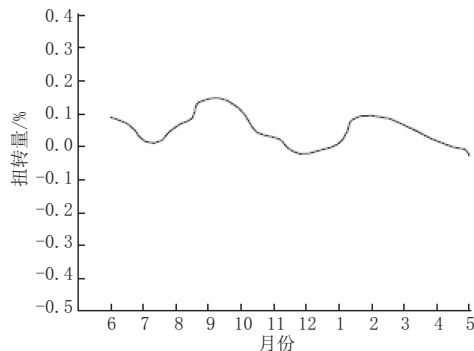


图12 环保二路断面扭转曲线

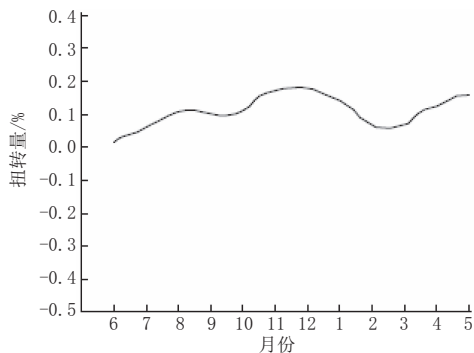


图13 方洋路断面扭转曲线

值为 9.36 mm;环保二路伸缩缝变形量平均值为 0.95 mm,最大值为 1.7 mm;方洋路伸缩缝变形量平均值为 1.14 mm,最大值为 2.05 mm。管廊伸缩缝变形量监测曲线如图 14 至图 17 所示,变形量均在安全范围内波动,结构处于健康状态,少量病害集中存在于下穿河流、下穿道路,以及地质情况突变、断面形式改变的关键节点处。

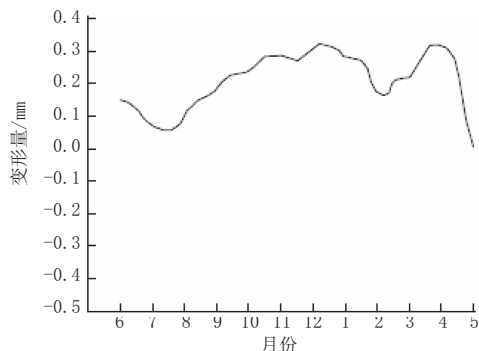


图14 江苏大道差异沉降曲线

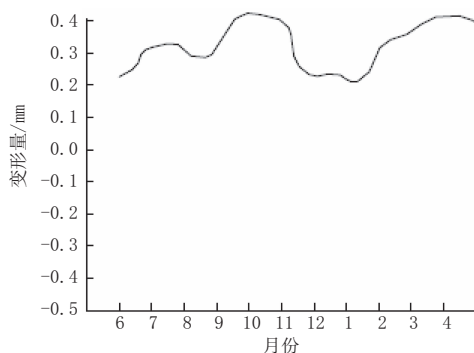


图15 西安路差异沉降曲线

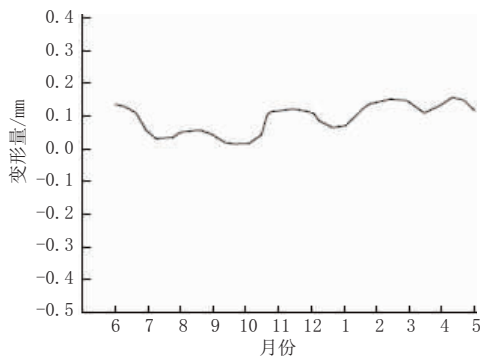


图 16 环保二路差异沉降曲线

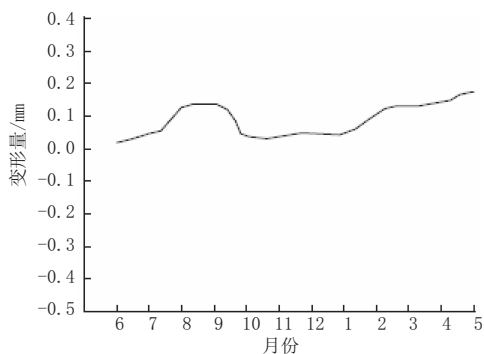


图 17 方洋路差异沉降曲线

通过对管廊内部伸缩缝变形量监测数据分析发现,多数变形量监测曲线大体呈倒V形。图 18 为江苏大道下穿环保二路节点断面伸缩缝变形量曲线图,与当地年平均气温曲线(见图 19)进行对比,呈现出较明显的线性关系。建筑材料的体积受环境温度变化的影响,会发生体积胀缩变化。该变化相较于温度变化速度,具有一定滞后性。环境温度的改变导致混凝土内部应力发生改变,致使伸缩缝变形量随温度变化呈现季节性波动。该规律已通过温度补偿器进行优化,保证监测的准确性。

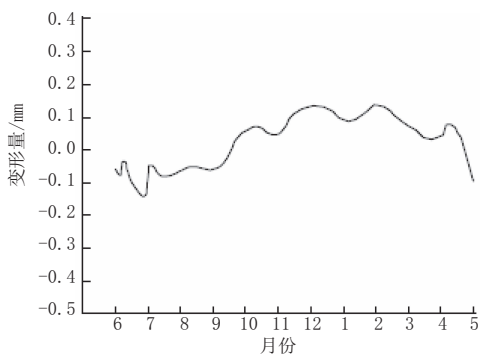


图 18 伸缩缝变形量监测曲线

3 管廊结构安全评价

根据结构健康监测数据分析结果,对管廊结构综合健康状态进行评价,采用德尔菲法建立安全评价的层次结构模型,通过 AHP 法将监测项目及监测断面两两对比其相对重要程度,确定各层级指标的

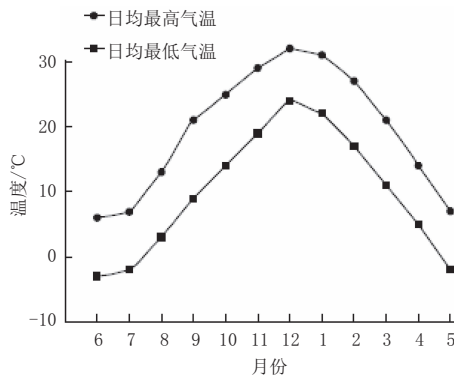


图 19 年平均气温变化曲线

权重,根据规范确定监测值预警区间划分,通过专家讨论确认评价指标量化标准,最后进行综合评价^[11]。

以江苏大道 2023 年 1~3 月监测数据为例,取监测项目作为二级指标。由于管廊规模较大,监测断面设置较多,故采用断面组对各断面进行二次分层,防止方案层指标过多导致分项权重稀释,影响评价结果准确度。取一天中 0:00、6:00、12:00、18:00 4 个时刻的监测值进行量化计算,得到管廊当日的健康度,3 个月的健康度取加权平均值即为管廊该季度的综合安全度。

评价指标量化分级标准参照行业规范标准划分预警阈值,采用五标度法进行量化,具体分级情况见表 3,二级指标权重确定判断矩阵及一致性检验见表 4。最终通过计算得出,1 月份管廊平均安全度为 4.734,2 月份管廊平均安全度为 4.870,3 月份管廊平均安全度为 4.877。综合评价得出,管廊季度综合安全度为 4.827,判定管廊总体处于健康状态。

表 3 评价指标量化分级

评价指标		评价指标分级标准			
一级指标	二级指标	健康度优	健康度良	健康度中等	健康度差
不均匀沉降	断面组	(0,5]	(5,6.6]	(6.6,10]	(10,+∞)
接缝变形量	断面组	(0,5]	(5,6.6]	(6.6,10]	(10,+∞)
伸缩缝变形量 1	断面组	(0,5]	(5,6.6]	(6.6,10]	(10,+∞)
伸缩缝变形量 2	断面组	(0,5]	(5,6.6]	(6.6,10]	(10,+∞)
断面扭转	断面组	(0,0.3]	(0.3,0.4]	(0.4,0.6]	(0.6,+∞)
量化分值		5	[4.5,5)	[3,4.5)	(0,3)

4 管廊病害现状及养护建议

结合健康监测数据对管廊进行病害巡检,多处监测值异常的断面均发现了裂缝、错台、渗漏水等现象(见图 20 至图 22),与监测情况基本一致。针对管廊中存在的问题,提出如下养护建议:

(1)在管廊中发现多处渗水析白现象,多为差异

表 4 判断矩阵 R-U_i 及一致性检验

R-U _i	不均匀沉降	断面扭转	伸缩缝变形量 1	伸缩缝变形量 2	接缝变形量	权重 W _i
不均匀沉降	1	3	2	2	2	0.344 7
断面扭转	1/3	1	1/2	1/2	1/2	0.096 7
伸缩缝变形量 1	1/2	2	1	1	1/2	0.158 9
伸缩缝变形量 2	1/2	2	1	1	1/2	0.158 9
接缝变形量	1/2	2	2	2	1	0.240 9
一致性检验	$\lambda_{\max} = 5.087\ 3, RI = 1.12, CI = 0.021\ 8, CR = 0.0195 < 0.1$					

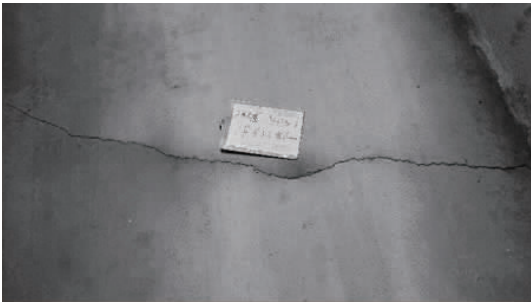


图 20 江苏大道综合管廊墙体裂缝

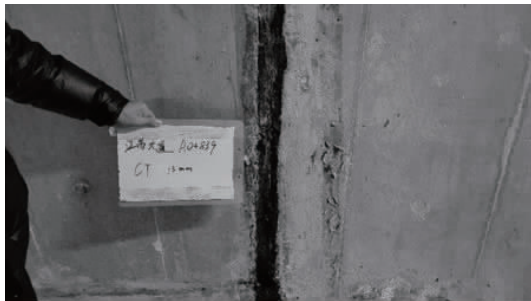


图 21 江苏大道综合管廊错台



图 22 江苏大道综合管廊渗漏水

沉降导致,建议采用堵排结合的方式,通过设置排水管、泄水孔、封闭裂缝、堵渗漏点等方式进行治理,疏通排水系统。

(2)对于管廊墙体上的裂缝,应加强巡检,如有扩大趋势,可采用环氧树脂低压注射修补。

(3)管廊内的监测仪器应定期检修,及时排查检修,确保监测系统正常运行。

(4)对于不良地质段及下穿工程等关键节点位置,建议加强监测频率,同时定期进行人工巡检,坚持预防为主,早发现,早维护。

5 结 论

本文以徐圩新区地下综合管廊结构健康监测系统为依托,对监测数据进行分析,得到如下主要结论:

(1)管廊结构总体处于健康状态,各项监测数值均在规范允许范围内波动。其中,江苏大道管廊综合安全度为 4.827,西安路管廊综合安全度为 4.807,环保二路管廊综合安全度为 4.919,方洋路管廊综合安全度为 4.939。

(2)结合监测数据分析情况,开展管廊病害普查及调研后发现,管廊运营初期,由于工后沉降不彻底,病害多发于下穿道路、下穿河流、地质情况较差、断面形式变化位置等节点位置。病害分布情况与监测数据异常值分布情况基本一致,仅部分设备受施工干扰出现较大幅度波动。出现测量偏差,可通过算法进行波形过滤减小监测误差。

(3)结构健康监测系统可以提高管廊管理维护效率,但仍需定期对监测设备进行人工巡检,及时发现问题。管廊中多处渗水点所在位置均布设有监测设备,长期处于潮湿环境可能会影响仪器测量精度,须及时进行维护。

(4)隧道、综合管廊等地下构筑物所处工程环境较为复杂,运营初期病害易发,建议在施工完成后及时搭建结构健康监测系统。智能化监测手段能够有效提升管养效率,保障管廊结构安全稳定,具有较高的工程意义和经济价值。

参考文献:

[1] 蒋杰,葛伟亚,马青山,等.南昌市中心城区地下空间开发地质适宜性评价[J].地质通报,2021,40(5):734-744.
[2] 唐兰.新时期城市地下综合管廊建设规划编制技术优化研究——基于《城市地下综合管廊建设规划技术导则》修订的思考[J].城乡建设,2023(14):72-77.
[3] 钱七虎.建设城市地下综合管廊,转变城市发展方式[J].隧道建设,2017,37(6):647-654.

(下转第 127 页)



图 5 沥青桥面铺装排水性能

发挥了其降温、排水的功能,并且其完全适应行人荷载。今后空中连廊或人行天桥沥青铺装应用前景广阔。

5 结 语

(1)空中连廊等大型人行天桥排水低吸热沥青桥面铺装结构从上到下分别为遮热层、排水沥青层、找平沥青层、防水层、粘结层和桥面结构。积极采用热反射材料、OGFC 等新型材料,充分发挥了各类沥青材料的优点,使得桥面铺装具有排水、降温、提升景观等功能,整体提升了行人出行舒适度。

(2)机械小型化、温拌剂等技术大幅改善了沥青混合料的施工性能和精进沥青摊铺施工工艺。应用这些技术成功实现了空中连廊等大型人行天桥沥青铺装施工,且铺装质量完全满足人行荷载的要求。

(3)沥青材料价格低廉,用于空中连廊等大型人行天桥铺装可充分发挥沥青道面平整度高的优点,同时其为柔性路面,触感柔和,具有良好的行走舒适度。结合降温设计、排水设计等新型功能设计,体现了人性化设计理念,提升了行人出行的舒适感,可缓解现代社会行人快节奏出行的紧张感觉,未来推广应用大有可期。

参考文献:

- [1] 唐晓辉,吕麦霞,易磊,等.城市商务区空中连廊规划设计[J].市政技术,2019,37(4):17-19,25.
- [2] 薛玉明.上海三门路空中连廊工程设计探索[J].隧道与轨道交通,2019(2):38-41,61.
- [3] 高艳秋.论天桥桥面铺装类型对结构受力的影响分析[J].工程建设与设计,2020(23):139-141.
- [4] 吴延辉.浅谈城市人行天桥桥面铺装材料[J].城市道桥与防洪,2019(7):143-144,163.
- [5] 郭海鹏.新型温拌剂在水工沥青混凝土中的应用研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [6] 张鑫晨.混掺再生骨料与钢渣骨料 OGFC 沥青混合料的性能研究[D].南昌:南昌大学,2022.

(上接第 120 页)

- [4] 黄俊.水底大直径盾构隧道健康监测系统研究与应用[D].北京:北京交通大学,2013.
- [5] 傅道兴,王涛.南京长江隧道结构健康监测系统研究与应用[J].南京工程学院学报(自然科学版),2016,14(4):22-27.
- [6] 潘红兵,王燕平,张忠宇.城市下穿通道结构健康监测及安全评价[J].城市道桥与防洪,2021(10):165-171.
- [7] 杨建平,陈卫忠,李明,等.水下盾构隧道运营期结构健康监测及响应规律分析[J].岩石力学与工程学报,2021,40(5):902-915.
- [8] 陈卫忠,李长俊,曾灿军,等.大型水下盾构隧道结构健康监测系统的构建与应用[J].岩石力学与工程学报,2018,37(1):1-13.
- [9] 丁鸿志,邹鸿浩,赵光,等.城市地下道路隧道结构健康监测研究[J].城市道桥与防洪,2023(1):197-201,209.
- [10] 张忠宇,黄俊,陈喜坤,等.临海富水软土地区综合管廊结构健康监测系统设计[J].城市道桥与防洪,2017(12):208-213.
- [11] 蒋杰.杭州市钱塘新区地下空间开发地质适宜性评价[D].北京:中国地质科学院,2021.