

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202304172024061978

文章编号:1674-599X(2024)03-0082-09

引用格式:李奉庭,罗涛,孙占勇,等.地下管廊深基坑回填土层沉降特征研究[J].交通科学与工程,2024,40(3):82-90.

Citation: LI Fengting, LUO Tao, SUN Zhanyong, et al. Study on settlement characteristics of backfill soil layer in deep foundation pit of underground pipe gallery[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(3): 82-90.

地下管廊深基坑回填土层沉降特征研究

李奉庭¹, 罗涛², 孙占勇², 武科¹, 肖文斌¹, 常昊¹, 许文彬¹, 刘大鹏¹

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 中国电建市政建设集团有限公司, 天津 300384)

摘要:为研究城市地下综合管廊回填后路面的沉降规律,依托雄安新区某管廊工程,运用现场回填土层沉降变形物联网智能监测与数值模拟计算方法,建立了综合管廊基坑回填施工过程的力学计算模型,对不同工况下的路面沉降与管廊结构的应力、应变情况进行分析。研究结果表明:1) 回填土体的累积沉降量及各土层间的沉降差随着回填土层厚度的增大而增大。2) 在阶梯法回填施工中,施工回填段数越多,路面沉降量及不均匀沉降程度越小,管廊结构变形越大。3) 施工后的路面沉降量随着压实度的增大而显著减小。相关模拟方法与研究成果可为类似综合管廊回填工程的方案设计提供参考依据。

关键词:地下管廊;回填土;沉降变形;现场监测;数值模拟

中图分类号:TU990.3

文献标志码:A

Study on settlement characteristics of backfill soil layer in deep foundation pit of underground pipe gallery

LI Fengting¹, LUO Tao², SUN Zhanyong², WU Ke¹, XIAO Wenbin¹,
CHANG Hao¹, XU Wenbin¹, LIU Dapeng¹

(1. School of Civil Engineering and Water Conservancy, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. Power China Municipal Construction Group Co., Ltd., Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to study the law of pavement settlement after backfilling of urban underground utility tunnel, based on a pipe gallery project in the Xiong'an New Area, in this study, the mechanical calculation model of foundation pit backfilling construction in utility tunnel was established by using the intelligent monitoring and numerical simulation calculation method of on-site backfill soil settlement and deformation, followed by analyzing the pavement settlement and the stress and strain of pipe gallery structure under different working conditions. The main conclusions are as follows: 1) The cumulative settlement of backfill soil and the settlement difference between different soil layers increase with the increase of backfill soil thickness. 2) During the step-by-step backfill construction process, the more backfill sections, the smaller the pavement settlement and uneven settlement, and the greater the deformation of the pipe gallery structure. 3) After construction, the pavement settlement will decrease significantly with the increase of compaction degree. The relevant simulation method and research results can provide reference for the scheme design of similar backfill projects in utility tunnel.

Key words: underground pipe gallery; backfill soil; settlement deformation; field monitoring; numerical simulation

收稿日期:2023-04-17

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52179106)

通信作者:武科(1978—),男,教授,主要从事岩土工程和地下工程方面的研究工作。E-mail:wuke@sdu.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

随着我国城市建设的快速发展,城市地下综合管廊工程得到了越来越广泛的应用。但由于综合管廊结构一般设置于地下较深位置,当管廊结构完成验收并回填沟槽后,土体在上部荷载或回填工序的影响下极易发生不均匀沉降,造成后期路面塌陷,产生地裂缝,从而导致不可预估的经济损失及安全隐患。因此,有必要对管廊上方回填土的沉降规律及影响因素进行研究。

基于上述问题,国内外众多学者依据工程实例进行了大量研究,赵文娟等^[1]针对北京大兴国际机场综合管廊,通过数值模拟分别探讨了不同回填土材料对路面沉降的影响,并对施工方法与回填方案进行了优化。沈卓恒等^[2]针对软土地层的市政道路建设,通过ABAQUS软件建立数值模型进行计算,总结了典型路基的最终沉降量。周济龙等^[3]以某湖区综合管廊工程为例,提出了影响基地沉降的三要素:综合管廊埋深、沟底碎石垫层厚度及沟背回填土的密实度。黄俊文等^[4]通过长沙某综合管廊项目实例,使用ABAQUS建立数值模型,研究了管廊持力层土体的应力分布规律。陈宗燕^[5]基于滨海软土地区管廊工程进行了长时间监测与数值分析,探讨了管廊两侧的差异沉降率,提出了路基顶面“S”形沉降曲线理论。张树妹^[6]通过FLAC^{3D}有限差分法模拟,揭示了在长期路面荷载影响下管廊整体倾斜率的变化规律。郭飞等^[7]以北京市某综合管廊工程为例,通过FLAC^{3D}软件,研究了管廊单舱断面与双舱断面之间竖向应力与沉降的差异。黄剑等^[8]基于管廊及周边道路的长期监测数据,研究在软土地基条件下管廊基坑的沉降规律,并探讨了现有设计方案的合理性。杜孟翔等^[9]基于ABAQUS有限元软件模拟,发现当采用邓肯-张本构模型时,泥炭土沉降的数值计算结果与实际监测值吻合较好。陈宗燕^[10]依托福建滨海某单仓综合管廊工程,采用FLAC^{3D}软件对施工期3个阶段的沉降进行沉降模拟,提出了路基地面“钟”形竖向位移的分布规律。陈松柏等^[11]依托滨海软土地区某市政项目综合管廊工程,对软土性质进行分析,研究并使用软土处理技术,取得了较好的经济效益。薛国毛等^[12]运用数值积分方法结合分层总和法,提出了轻质土路堤堆载下地基沉降的理论计算模型。李志雷等^[13]依托甜永高速公路施工中使用的黄土路基综合处治技术,对工程断面的实测数据进行分析,并进行了断面的沉降预测。孔令宇等^[14]针对基坑大范围开

挖卸载及回填再加载的施工情况,基于Midas有限元分析,提出了极限使用状态下的安全控制指标。

基于上述学者的研究,本文针对综合管廊基坑回填土沉降控制技术难题,综合运用现场回填土层沉降变形物联网智能监测与数值计算分析方法,开展分层回填工序下土层差异沉降变形规律研究,研究成果可为类似工序的管廊回填工程提供一定的理论指导。

1 工程概况

本研究依托雄安新区启动区EA1综合管廊工程,其施工区域EA1段总长约1.77 km。该地区冻土标准深度0.6 m,属季节性冻土,管廊结构共有3个独立舱室,在布置后采用优质素土对基坑进行回填。回填层数按照现场工程进度分为3层,每层最大回填厚度从下往上分别为4.35、2.50、2.50 m,最大深度为9.35 m。在每层回填后对土体进行充分压实,压实系数 ≥ 0.93 。启动区某段管廊回填断面示意图如图1所示。

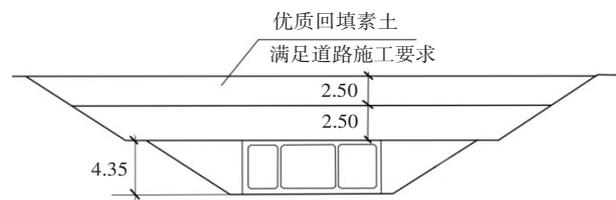


图1 启动区管廊回填断面示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of the backfill section of the pipe gallery in the start-up area (unit: m)

由于在本工程基坑中不同位置的回填土厚度与压实段数均不同,路面易发生较大变形,进而产生裂缝,这直接关系到道路工后的运营安全,必须给予足够重视。因此,为保证管廊回填后满足路面设计要求,探究回填土的沉降变形规律是管廊回填建设中一个不可缺少的环节。

2 基于物联网的智能监测分析

2.1 监测仪器与云端系统

为更好地对回填土层进行连续的沉降监测,本研究采用连通管型振弦式静力水准仪进行监测。其由多支高精度液位传感器定位基板和连通管组成,通过测量各液位计相对基准点的垂向变形来反映土层的沉降状况。水准仪基于物联网云端技术,

能够实现各点位全天候可自主控制的监测,能极大地提高监测效率及准确率,其最大量程为200 mm,分辨率大于0.07 mm。在应用时,水准仪监测时间与频率可根据施工时间进行调整。根据现场调研可知,土层在回填后14 d内沉降发展较快。针对该现象,利用云端系统将回填后14 d内的监测频率设定为每天一次,此后根据土层的实际沉降情况调整至每7天一次。

2.2 现场监测方法

为综合监测全路面的沉降信息,分别在基坑的不同位置布置监测点。监测平面分为2层,分别距地表2.45、4.85 m。1~3号监测点布置于底层断面,4~8号监测点布置于顶层断面。8号监测点作为基准点,埋置于回填区域外的土层中。监测点的布置如图2所示。

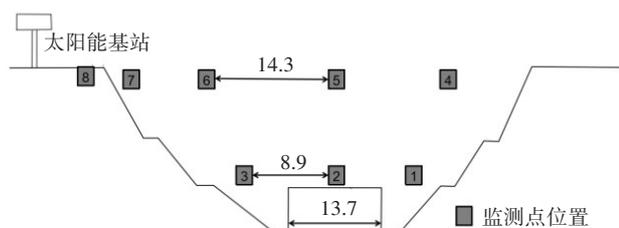


图2 监测点布置示意图(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of the layout of on-site monitoring points (unit: m)

2.3 结果分析

2.3.1 底层断面监测结果

图3为底层断面监测点沉降变形曲线。将2号测点数据作为基准点进行计算,可得到1号与3号测点相较于2号测点的沉降差。由图3可知,底层土体在回填后3 d内沉降差增加速度较快,随后沉降发展速度减小。1号测点与2号测点之间的沉降差于回填后的42 d达到最大值3.80 mm,随后这两测点之间的沉降差逐渐减小,至120 d减小为3.52 mm;3号测点与2号测点之间的沉降差在回填后的120 d达到了12.57 mm,3号测点的沉降速度明显比1号、2号测点的大。

2.3.2 顶层断面监测结果

图4为启动区回填段顶层4~7号监测点相较于位于基坑外侧8号基准点的沉降差。由图4可知,回填土的沉降阶段可分为快速沉降期和稳定期。回填施工后的7 d沉降发展迅速,为快速沉降期。以6号测点为例,前7 d的累积沉降量为10.46 mm,

沉降速率为1.49 mm/d;7 d后沉降发展速度降低,至120 d的累积沉降量为38.74 mm,沉降速率仅为0.25 mm/d。

从图3~4可以看出:1) 底层各点位的沉降差于回填结束的3 d内发展迅速,可见在施工后的3 d内土体沉降速度最大,此时最容易产生路面不均匀沉降,因此在回填后应合理利用0~3 d的时间段进行压实,以减小后续路面沉降差的发展。2) 回填结束后的7 d内为顶层各点位累积沉降量的快速发展期,此后各点位的沉降速度明显减缓,沉降进入稳定阶段。

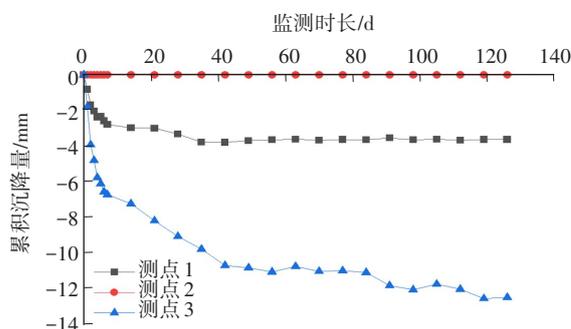


图3 底层断面监测点沉降变形曲线

Fig. 3 Settlement deformation curves of different monitoring points at the bottom section

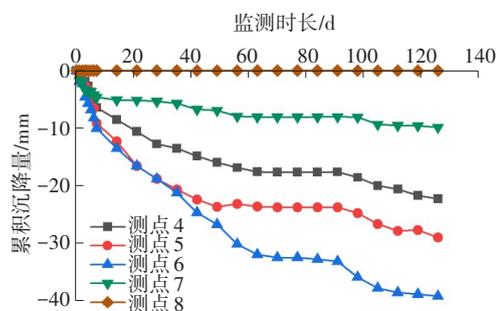


图4 顶层断面监测点沉降变形曲线

Fig. 4 Settlement deformation curves of different monitoring points at the top section

3 数值计算方法与沉降规律研究

3.1 有限元计算模型

以雄安新区启动区EA1段中有代表性的一段为例,利用ABAQUS有限元分析软件建立简化模型,如图5(a)所示。模型由自然土体、综合管廊、回填土体3部分组成,主要计算部件为回填土体。按照现场施工工序将回填土体分为高、中、低3层,模型长80.0 m,宽180.5 m,高28.5 m。为更好地模拟

管廊在回填土影响下的变形情况,依照施工图对混凝土管廊结构和钢筋分别建模,并通过设置内置区域对二者进行约束。管廊结构及钢筋模型如图5(b)所示。

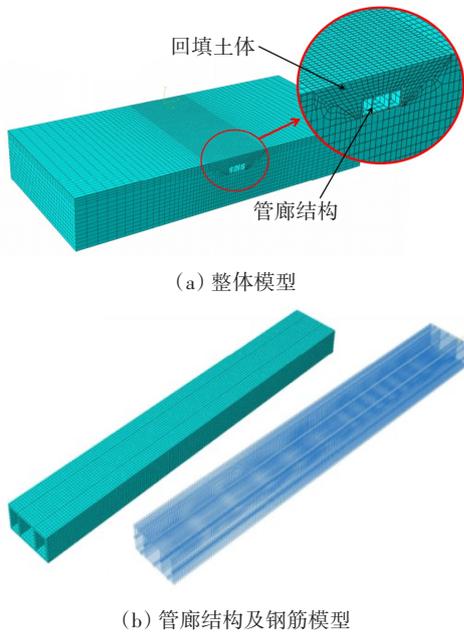


图5 基坑有限元模型

Fig. 5 Finite element model of foundation pit

为模拟现场回填工序,将计算过程分为8个分析步。第1步通过导入odb文件对自然土体进行地应力平衡,并在该分析步中将回填土设置为“失效”。在随后的7个分析步中通过“重激活”单元,模拟从前往后的阶梯状回填过程(图6)。

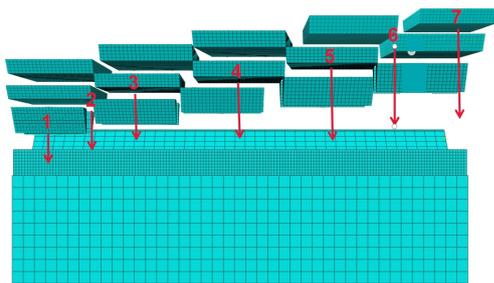


图6 回填过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of backfilling process

该模型不考虑地下水的影响,自然土体与回填土体均采用Mohr-Coulomb模型,管廊结构采用线弹性模型,强度参考C30混凝土。土体的主要参数见表1。

通过地下综合管廊回填土体三维力学模型的计算,得到回填土断面各点位的累积沉降量。由于图3中的底层断面数据仅显示了3个点位的沉降

差,因此假设2号测点回填后120 d的实测数据与模拟沉降量相同,计算图3中2号测点与1号、3号测点之间回填后120 d的沉降差,将监测沉降量与数值模拟沉降量进行对比,结果如图7所示。

表1 有限元模型计算参数

Table 1 Calculation parameters of the finite element model

材料	厚度/m	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)
杂填土	0.4	1 850	4.5	0.33	8.0	10
素填土	4.0	1 850	4.5	0.35	8.0	12
粉质黏土	5.1	1 910	12.8	0.30	31.3	18
粉细砂	13.0	1 950	33.0	0.33	2.0	32
优质回填素土		1 450	18.3	0.25	1.0	35
C30混凝土		2 360	3×10^4	0.15		
钢筋			2×10^6	0.30		

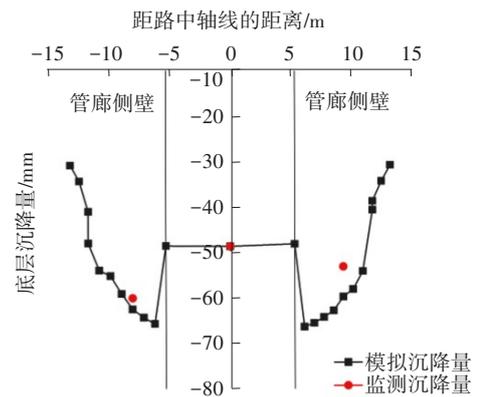


图7 底层断面监测、模拟沉降量对比

Fig. 7 Comparison between the simulation and monitoring results of settlement at the bottom section

从图7可以看出,现场3个点位回填后120 d的实测沉降量与模拟沉降量的平均误差小于15%,说明所建模型较好地模拟了现场实测数据。由此可见,本文所建数值分析模型在研究回填工程方面具有可行性。

3.2 管廊深基坑回填土层沉降特征分析

3.2.1 横断面沉降特征

在回填步骤中有5个施工段,现选取沉降幅度较大的第一个回填段的断面沉降云图进行分析,结果如图8所示。由图8可以看出,底层断面的沉降量最大,该土层平均沉降量为60 mm,中层平均沉降量为43 mm,顶层平均沉降量为26 mm。各回填土层的沉降规律不同,位于管廊两侧的底层土体整体沉降变形较大;中层土体的沉降变形主要发生在

路中管廊的上方,其次发生在底层土体的上方;顶层土体的沉降变形主要发生在底层土体的上方。中层土体在路中的沉降变形对顶层土体的影响较小。

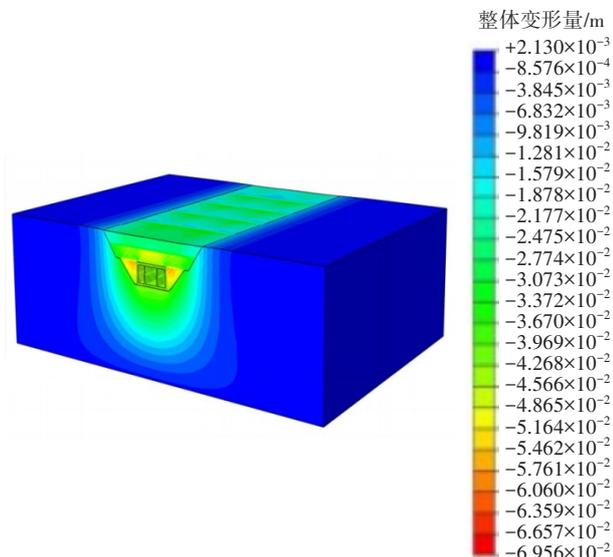


图8 基坑横断面沉降云图

Fig. 8 Simulated nephogram of foundation pit cross-section settlement

图9所示为顶层及中、底层两个土层上方1.0 m处土体的沉降曲线。从图9可以看出:1) 中部土层在路中区域出现了明显沉降,并呈现出“M”形沉降趋势,结合云图可知该现象是管廊上壁变形较大导致的。2) 相较于中、底层土体,顶层土体不同位置的沉降差较小。综合考虑管廊的结构可知,在管廊侧壁5~12 m的范围内,土体沉降随着土层厚度的增加而增加,在管廊上方及侧壁12 m范围外的边坡处,底层土体沉降显著减小。

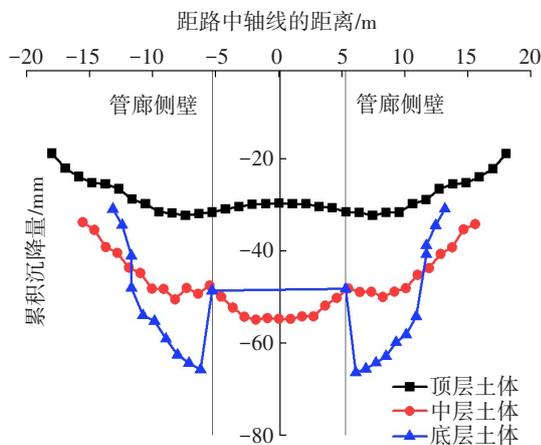


图9 横断面各土层沉降曲线

Fig. 9 Settlement curves of each soil layer in cross section

3.2.2 路面沉降特征

图10所示为回填后路面的纵向沉降云图。从图10可以看出:1) 在第一回填段,路面沉降最大,在第五回填段,路面沉降最小,在第二、三、四回填段,路面沉降规律相似,其沉降量比第一回填段的小,比第五回填段的大。2) 阶梯式回填会加大路面的不均匀沉降程度,在进行下一施工段的回填时,断面处的土层在新回填土的影响下会发生更大的沉降。

图11所示为路面沉降曲线。从图11(a)可以看出,在距路中轴线16.5 m的区域内,回填施工越早的土层沉降量越大,第一、三回填段的路中沉降差为6.2 mm,第三、五回填段的路中沉降差为5.0 mm,经分析可知在阶梯法回填施工中产生的阶梯状土层断面缺少水平土压力支撑,因此在断面处出现明显沉降。从图11(b)可以看出:1) 顶层土体的沉降均呈现出“W”形沉降趋势,“W”的形状与填土高度有关。2) 在距路中轴线16.5 m以外的区域,3个回填段的沉降量基本相同,这是由于该区域回填土层厚度较小,因此在该路段可以不考虑分段回填造成的不均匀沉降。

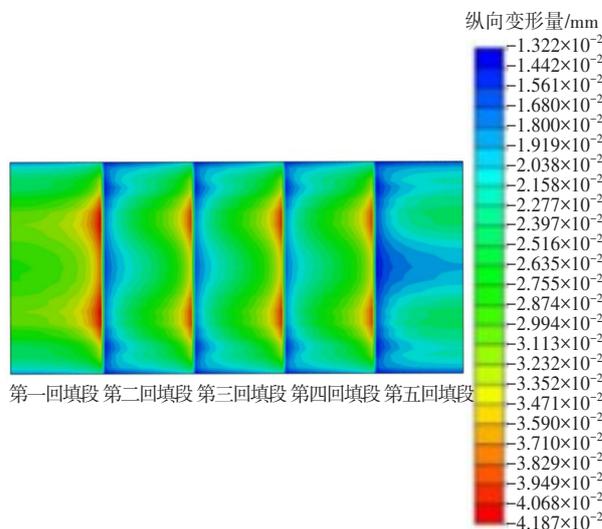
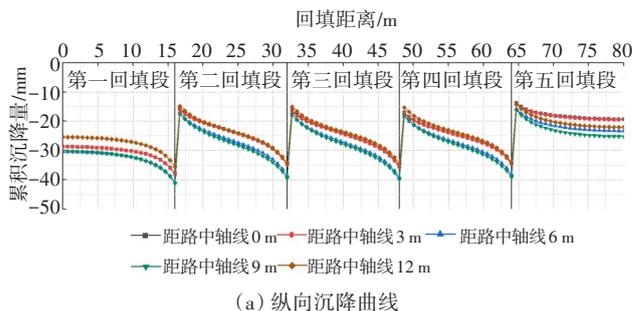
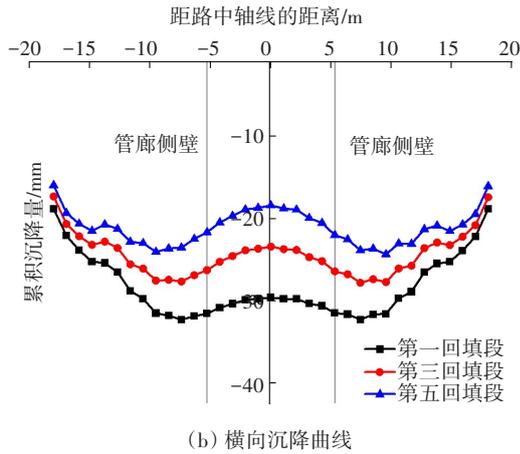


图10 路面纵向沉降云图

Fig. 10 Nephogram of longitudinal settlement of pavement



(a) 纵向沉降曲线



(b) 横向沉降曲线

图 11 路面沉降曲线

Fig. 11 Settlement curves of pavement

3.3 不同填筑层数的影响

3.3.1 模型设置

在基坑回填过程中,由于管道铺设或雨天等,通常对填筑土进行分层压实。为探究分层填筑对路面及管廊结构的影响,将填土模型均分为 1~5 层(图 12)。

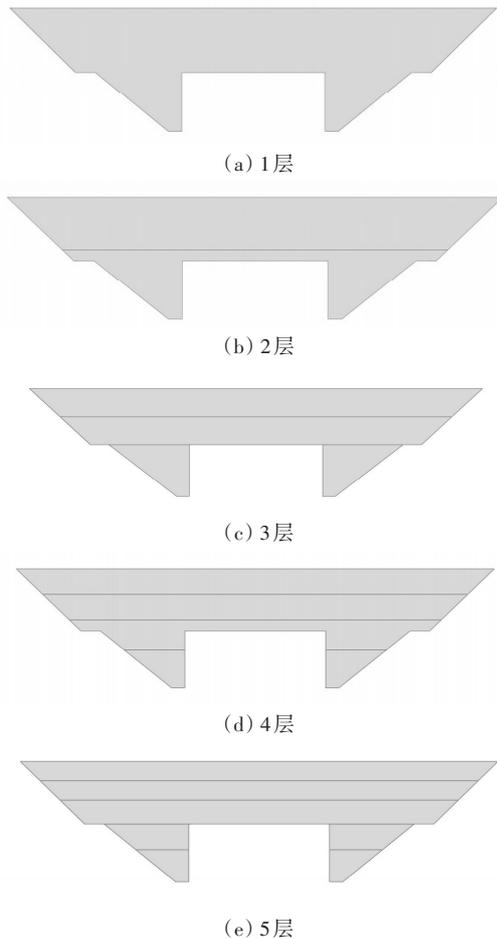


图 12 回填断面示意图

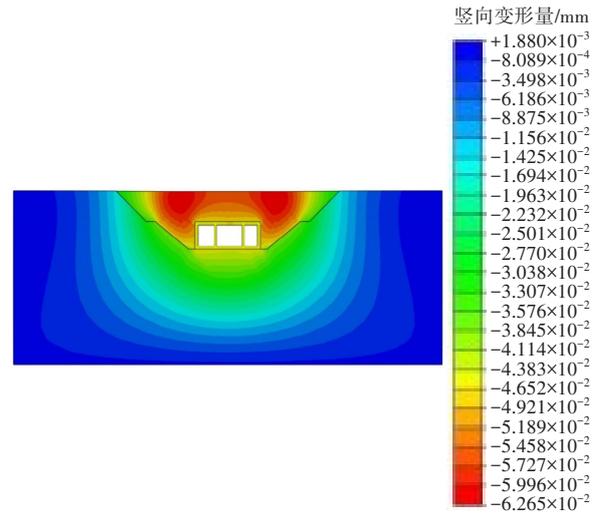
Fig. 12 Schematic diagrams of backfill sections

使用本研究建立的整体模型,取消阶梯式部件划分,通过设置分析步对分层填筑进行模拟,即在下层土体沉降变形完成后进行下一步填筑。整体模型见图 6,所用数据见表 1。

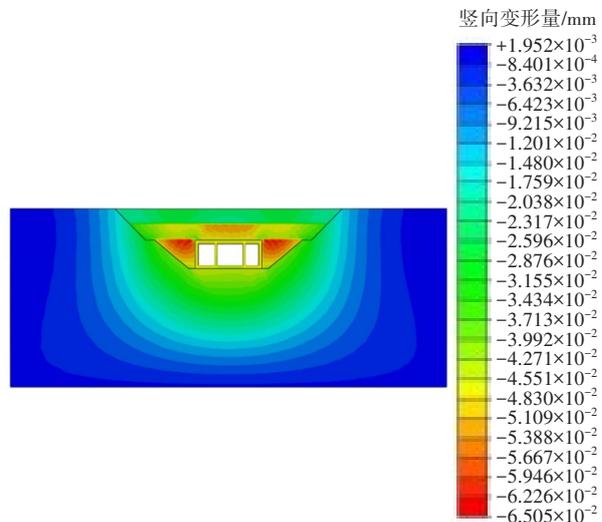
3.3.2 沉降特征

图 13 所示为填筑层数为 1、3、5 层时的断面沉降云图。由图 13 可以看出,相比于同时填筑,在下层土体充分沉降后再回填上层土,可使土层表面沉降与沉降差明显减小,并且回填土的层数越多,路面沉降及沉降差越小,但底层沉降变形增大。这是由于底层土体压实稳定后,上层填土压力会进一步促进底层土体的沉降变形,这种叠加效应造成底层土体压缩变形程度增大,即填筑压实层数越多,底层土体的压缩变形程度越大。

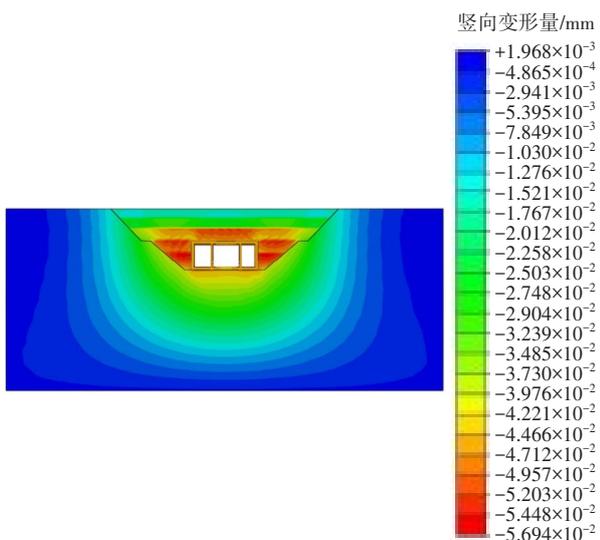
图 14 为不同回填层数下路面的沉降曲线。由图 14 可以看出,不同填筑层数下路面的沉降规律基



(a) 1层



(b) 3层



(c) 5层

图13 不同回填层数下断面沉降云图

Fig. 13 Settlement nephograms of sections under different backfill layers

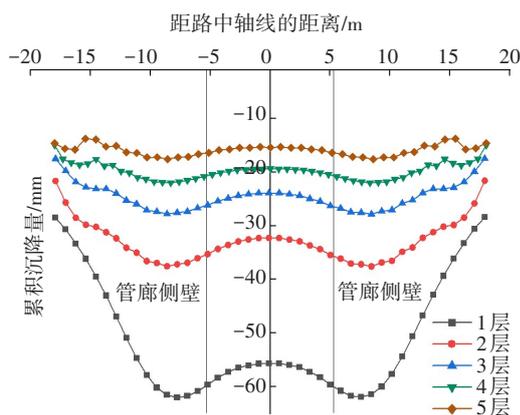


图14 不同回填层数下路面沉降曲线

Fig. 14 Pavement settlement curves under different backfill layers

本相似,填筑层数为1~5层的最大沉降量分别为17.3、21.9、27.8、37.5、62.1 mm,其路中与路边界最大沉降差分别为3.4、7.0、10.3、15.9、31.4 mm。这说明随着填筑层数的增加,土层的最大沉降量、路中与路边界之间的沉降差同时增加。

3.3.3 管廊变形特征

将三舱管廊右侧内墙处设为基准点,得到不同填筑层数下三舱管廊上壁变形曲线,如图15所示。由图15可知:1)管廊中间舱室上板出现较为明显的凹陷,且舱室中点在各工况下的变形都最大;管廊两侧舱室的变形较小,且距中心越远,变形越大;内墙支撑处的变形最小,变形量可以忽略不计。2)从中间舱室上板的凹陷程度可以看出,填筑压实层

数越多,管廊变形程度越大;随着压实层数的增加,变形的增加速度减小。

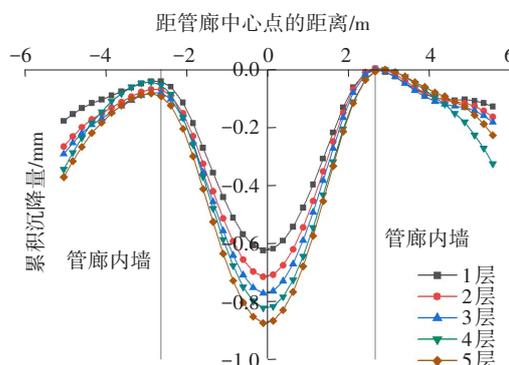


图15 不同回填层数下管廊上壁变形曲线

Fig. 15 Deformation curves of upper wall of pipe gallery under different backfill layers

3.4 不同压实度的影响

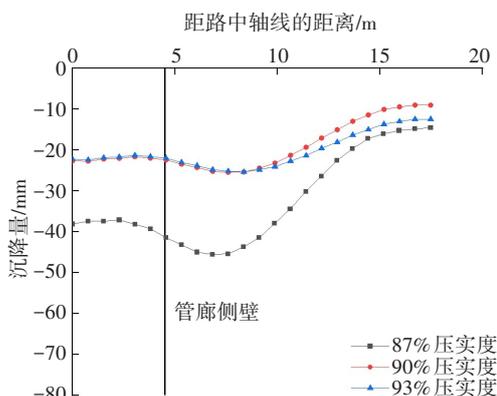
为探究不同压实度下各层土体的沉降规律,现选取实际施工中的3层回填模型进行分析。通过调整回填土体参数,模拟各压实度下填筑土体的沉降。不同压实度下的填土参数见表2。

表2 不同压实度下的填土参数

Table 2 Parameters of filling under different compaction degrees

压实度/%	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)
87	1 850	8.1	0.29	30.8	31.3
90	2 000	13.7	0.24	40.4	32.9
93	2 150	15.4	0.24	42.6	33.4

不同压实度下各土层的沉降曲线如图16所示。从图16可以看出,当填土压实度从87%增大到90%时,沉降曲线变化较大。由图16(a)可知,路面最大沉降位于管廊侧壁右上方,随着压实度的增大,沉降量由45.37 mm减小至25.42 mm。



(a) 路面

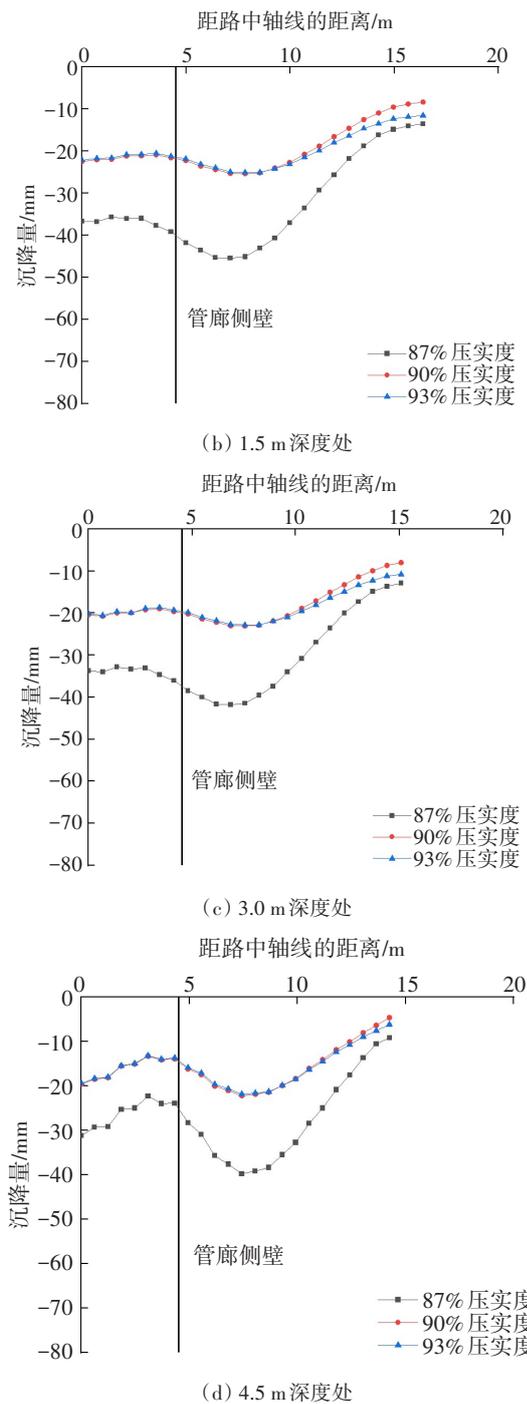


图16 不同压实度下各土层的沉降曲线

Fig. 16 Settlement curves of each soil layer under different compaction degrees

当填土压实度从90%增大到93%时,各沉降曲线整体变化不大。由图16(a)可知,路面最大沉降从25.42 mm减小至25.13 mm;路边界处的沉降呈现出随压实度的增加先减小后增大的趋势,经分析可知填土质量随压实度的增加而增加,进而使自然土体变形加剧,从而导致路边界处的沉降发生变化。

当填土压实度从87%增大到90%时,管廊侧壁

右上方最大沉降的减小幅度最大;当压实度大于90%时,继续增大压实度,管廊侧壁右上方最大沉降的减小幅度有所降低。说明增大填土压实度虽然能减小路面沉降,但当填土压实度大于90%后继续增加压实度对路面沉降的影响较小。

4 结论

随着各大城市建设的发展,地下综合管廊翻修过程中基坑回填导致的不均匀沉降成为了亟待研究的课题。本研究依托雄安新区启动区EA1综合管廊工程,通过物联网技术远程监测与数值分析,得到了管廊影响下基坑回填的沉降规律。主要结论如下:

1) 在管廊体积的影响下,不同区域的回填土厚度存在较大差异。土体自重造成了路面的不均匀沉降,该沉降曲线基本呈“W”形,即路中与路边界存在一定的沉降差,填方土体自身变形是导致回填后路面不均匀沉降的主要因素。

2) 管廊薄弱翼缘在土压力的影响下产生凹陷,管廊结构变形会增加中、底层土体部分区域的沉降量,但对顶层路面影响较小,管廊结构变形是导致不均匀沉降的次要因素。

3) 填筑层数对路面的不均匀沉降及管廊结构均有一定的影响,主要表现为层数越多,路面不均匀沉降越小,管廊上板凹陷越大。因此,在深基坑回填施工中,应合理安排施工,充分考虑填筑层数对路面沉降及管廊结构的影响,以减小后期的维护成本。

4) 随着压实度的增加,路面沉降量的减小幅度降低,这是由于填土质量的增加使自然土体沉降加剧,从而抵消了土体弹性模量增加所减小的填土沉降量。因此,在压实过程中应控制压实度,在最大限度减小路面不均匀沉降的情况下节约施工成本。合理的压实度为90%。

参考文献(References):

[1] 赵文娟,宋鹏飞,何华飞,等.基于沉降控制的管廊基坑肥槽回填土参数研究[J].市政技术,2021,39(3):120-123. DOI: 10.19922/j.1009-7767.2021.03.120.
ZHAO Wenjuan, SONG Pengfei, HE Huafei, et al. Study on parameters of trough backfill soil of foundation pit of utility tunnel based on settlement control [J]. Municipal Engineering Technology, 2021, 39(3): 120-

123. DOI: 10.19922/j.1009-7767.2021.03.120.
- [2] 沈卓恒, 阮世强. 软土地层路基工后沉降预测及控制研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(4): 17-21. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.003.
SHEN Zhuoheng, RUAN Shiqiang. Study on prediction and control of post-construction settlement of subgrade in the soft soil layer [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 17-21. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.003.
- [3] 周济龙, 文前程, 阿力普江·杰如拉, 等. 软土地基综合管廊基底沉降多因素影响分析[J]. 工程与试验, 2017, 57(3): 41-44, 56. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3407.2017.03.011.
ZHOU Jilong, WEN Qiancheng, ALIPUJIANG·Jierula, et al. Analysis of multi factors influence on basement settlement of soft soil foundation utility tunnel [J]. Engineering & Test, 2017, 57(3): 41-44, 56. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3407.2017.03.011.
- [4] 黄俊文, 皮远明, 刘笑含. 基于强度折减法分析管廊两侧回填土对市政道路的影响[J]. 路基工程, 2019(5): 160-164. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.2019.05.31.
HUANG Junwen, PI Yuanming, LIU Xiaohan. Influence of backfill of both sides of utility tunnel on municipal roads based on strength reduction analysis [J]. Subgrade Engineering, 2019(5): 160-164. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.2019.05.31.
- [5] 陈宗燕. 滨海软土地区管廊路基变形特性分析[J]. 路基工程, 2021(4): 163-168. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.202103028.
CHEN Zongyan. Analysis of deformation characteristics of pipe gallery roadbed in coastal soft soil area [J]. Subgrade Engineering, 2021(4): 163-168. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.202103028.
- [6] 张树妹. 软基段管廊路基施工期及工后变形特性分析[J]. 福建交通科技, 2021(6): 23-28.
ZHANG Shumei. Analysis of deformation characteristics of pipe gallery subgrade in soft foundation section during construction and after construction [J]. Fujian Traffic Science and Technology, 2021(6): 23-28.
- [7] 郭飞, 张咪, 王凯丽, 等. 砂卵石地层综合管廊浅埋暗挖断面优化[J]. 工程与建设, 2022, 36(1): 95-98. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5781.2022.01.036.
GUO Fei, ZHANG Mi, WANG Kaili, et al. Optimization of shallow and buried excavation section of comprehensive pipe gallery in sandy and pebble strata [J]. Engineering and Construction, 2022, 36(1): 95-98. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5781.2022.01.036.
- [8] 黄剑, 王恒栋, 王建. 软土地基综合管廊沉降控制、监测与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊2): 845-859.
HUANG Jian, WANG Hengdong, WANG Jian. Settlement control, monitoring and analysis of utility tunnel on soft soil foundation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(sup 2): 845-859.
- [9] 杜孟翔, 赵萌, 吴雅楠, 等. 泥炭土地基条件下地下综合管廊沉降分析[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(10): 66-70. DOI: 10.3969/j.issn.1001-425X.2021.10.016.
DU Mengxiang, ZHAO Meng, WU Ya'nan, et al. Settlement analysis of underground comprehensive pipe gallery based on peat soil foundation [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2021, 47(10): 66-70. DOI: 10.3969/j.issn.1001-425X.2021.10.016.
- [10] 陈宗燕. 基于FLAC3D的软基路段管廊路基施工期沉降数值模拟[J]. 福建建筑, 2021(3): 70-76.
CHEN Zongyan. FLAC3D-based numerical simulation of subgrade settlement during construction of pipe gallery and roadbed on soft ground [J]. Fujian Architecture & Construction, 2021(3): 70-76.
- [11] 陈松柏, 苏保湛. 滨海软土地区综合管廊施工技术研究[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(13): 81-84. DOI: 10.3969/j.issn.1001-523X.2022.13.026.
CHEN Songbai, SU Baozhan. Research on construction technology of comprehensive pipe gallery in coastal soft soil area [J]. Building Technology Development, 2022, 49(13): 81-84. DOI: 10.3969/j.issn.1001-523X.2022.13.026.
- [12] 薛国毛, 李金龙, 谢规球, 等. 泡沫轻质土换填路堤下地基沉降计算方法[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(4): 28-34. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.015.
XUE Guomao, LI Jinlong, XIE Guiqiu, et al. Calculation method of foundation settlement of embankment filled with foam light soil [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(4): 28-34. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.015.
- [13] 李志雷, 王伟, 蔡旺. 曲线拟合法在黄土路基沉降预测中的应用[J/OL]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023: 1-11. (2023-02-09). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.u.20230209.0918.004.html>.
LI Zhilei, WANG Wei, CAI Wang. Application of curve fitting method in settlement prediction of loess subgrade [J/OL]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2023: 1-11. (2023-02-09). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.u.20230209.0918.004.html>.
- [14] 孔令宇, 杨铮, 彭渤, 等. 多砂土质深基坑开挖对邻近地下综合管廊结构影响研究[J]. 城市住宅, 2021, 28(12): 231-234. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6659.2021.12.076.
KONG Lingyu, YANG Zheng, PENG Bo, et al. Study on the influence of sandy soil deep foundation pit excavation on adjacent underground utility tunnel structure [J]. City & House, 2021, 28(12): 231-234. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6659.2021.12.076.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:杜明瑞)