

新建综合管廊上方泡沫轻质土路基工后沉降特性的数值模拟研究

邓琰荣

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 为探究软土地区新建综合管廊上方泡沫轻质土路基的工后沉降特性, 依托广东省某市政道路工程, 建立有限元模型, 模拟分析不同工后时刻、不同管廊埋深及不同泡沫轻质土密度条件下路基路面的沉降规律。结果表明: 泡沫轻质土路基工后沉降主要发生在前5年, 20年后趋于稳定, 沉降分布呈U形特征; 随着管廊埋深减小, 路面总沉降量降低, 沉降形态由U形向W形转变; 轻质土密度对沉降影响显著, 密度从400 kg/m³增至1 000 kg/m³, 工后20年沉降增幅达43.4%; 通过工后20 d现场监测数据验证, 路面中心点沉降模拟值与实测值误差为2.1%, 表明数值模型具有良好的预测精度。建议工程中优先选用密度600 kg/m³左右的泡沫轻质土, 以兼顾沉降控制与材料经济性。研究成果可为软土地区管廊工程上方泡沫轻质土路基的设计与施工提供理论参考。

关键词: 综合管廊; 泡沫轻质土路基; 软土地基; 工后沉降; 埋深影响

中图分类号: U416.1+1; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0064-06

Numerical Simulation Study on Post-construction Settlement Characteristics of Foamed Lightweight Soil Subgrade above Newly-built Utility Tunnel

DENG Yanrong

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: To explore the post-construction settlement characteristics of foamed lightweight soil subgrade above a newly-built utility tunnel in soft soil area, relying on a municipal road project in Guangdong Province, a finite element model is established to simulate and analyze the settlement patterns of the subgrade and pavement under different post-construction periods, various tunnel burial depths, and different foamed lightweight soil densities. The results show that the post-construction settlement of the foamed lightweight soil subgrade mainly occurs within the first five years and stabilizes after 20 years, with the settlement distribution exhibiting a U-shaped pattern. As the burial depth of the utility tunnel decreases, the total pavement settlement reduces, and the settlement pattern transitions from a U shape to a W shape. The density of the lightweight soil significantly influences the settlement. When the density increases from 400 kg/m³ to 1 000 kg/m³, the post-construction settlement over 20 years increases by 43.4%. It is verified that the error between the simulated value and the measured value of the settlement at the center point of the pavement is 2.1% based on the field monitoring data of the post-construction 20 d, indicating that the numerical model has good prediction accuracy. It is recommended that the foamed lightweight soil with a density of about 600 kg/m³ be given priority in the project to balance the settlement control and material economy. The research findings can provide a theoretical reference for the design and construction of foamed lightweight soil subgrade above utility tunnel projects in soft soil regions.

Keywords: utility tunnel; foamed lightweight soil; soft soil foundation; post-construction settlement; burial depth influence

0 引言

地下综合管廊作为整合电力、通信、给排水等市政管线的核心基础设施,能够有效解决传统直埋方式导致的道路反复开挖、管线维护困难等问题,对于

收稿日期: 2026-03-13

作者简介: 邓琰荣(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路交通设计工作。

保障城市生命线工程的稳定运行具有不可替代的作用^[1-3]。特别值得注意,当管廊位于填方路基下方时,管廊结构(混凝土)与周围土体(填土、软土)之间存在巨大的刚度差异,其刚度突变在行车荷载长期循环作用下,极易在结构与土体的交界面附近产生显著差异沉降,进而导致路面结构开裂、平整度下降,甚至影响行车安全与舒适性^[4-8]。

针对上述问题,国内外学者开展了些研究工作。黎浩等^[9]以某工程软土路基段地下综合管廊为背景,基于有限元模型研究了下伏含地下综合管廊在行车荷载作用下的路基不均匀沉降规律,其研究发现沉降突变集中在管廊混凝土结构与土体交界处;陈宗燕^[4]通过FLAC3D模拟发现,有管廊路基的变坡率是无管廊路基的3倍左右,且管廊位于不同位置对差异沉降影响显著,位于坡脚时会产生约3%的倾斜;王发玲等^[10]采用修正剑桥模型分析了深厚软土地区管廊标准段和附属构筑物处的差异沉降,指出覆土较浅的附属构筑物边缘易产生突变沉降,最大差异沉降可达19 cm;李鹏飞^[8]通过现场试验与数值模拟结合的方法,研究了不同埋深和不同舱室尺寸下管廊对城市道路力学性能的影响,指出管廊埋深超过3.5 m后,对道路的影响才开始减弱。王大勃等^[11]探讨了复合地基面积置换率及管廊覆土深度对路基沉降差的影响,发现提高地基处理置换率可显著减小沉降差。

泡沫轻质土具有容重低、自立性好、施工便捷等特点,理论上可有效减小管廊上覆荷载,从而控制工后沉降。而现有泡沫轻质土路基沉降研究多集中于一般软土路基或路桥过渡段,缺少以管廊的类似刚性地下结构物为下伏对象的专门分析;其次,既有管廊路基沉降研究多采用常规填土填料,对泡沫轻质土的减载效应与变形协调机制关注不足。

为此,本文依托广东省某软土地区市政道路工程,基于ABAQUS有限元软件,重点围绕以下方面展开研究:(1)揭示管廊不同埋深条件下泡沫轻质土路基沉降分布形态的演化规律;(2)量化泡沫轻质土密度对工后沉降的影响效应;(3)提出兼顾沉降控制与材料经济性的密度参数建议。研究成果可为软土地区管廊工程上方泡沫轻质土路基的设计与施工提供理论参考,为该工程的设计与分析提供依据。

1 工程概况

本文依托广东省某市在建管廊工程,该工程位

于珠江三角洲冲积平原,地势平坦,地下水位埋深较浅,地质条件复杂。根据勘察资料,场地地层自上而下依次为:(1)填土层,厚度约为1.5~2.5 m,主要由黏性土夹少量碎石组成,松散不均;(2)淤泥质土层,厚度较大,最大揭露厚度达14 m,呈流塑状态,天然含水率较高、压缩性高、强度低,属典型的高压缩性软土;(3)粉质黏土层,可塑状态,力学性能相对较好。该区域软土层分布广泛且厚度不均,具有显著的非均匀沉降风险。

本文工程综合管廊为三舱型式,舱内布置给水、再生水、电力、通信等市政管线。管廊与道路同建,且位于道路中心线下方,全长约1.5 km,采用现浇钢筋混凝土结构,采用L形侧墙叠合式预制拼装,标准横断面宽10.1 m,高3.6 m,侧墙宽4.5 m,标准段上层覆土厚度约2.6 m,管廊横断面布置如图1所示。

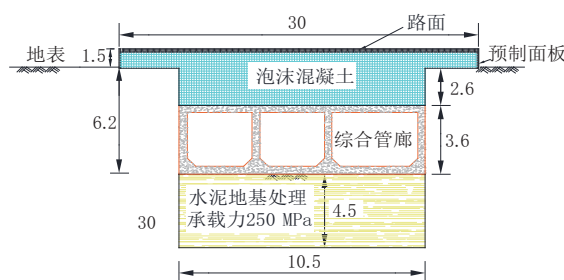


图1 综合管廊与泡沫轻质土路基横断面图(单位:m)

地基处理随道路处理方式,采用水泥注浆加固方式进行处理,使得地基承载力达到250 kPa,以抑制工后沉降。路基填筑采用泡沫轻质土,该材料具有容重低、自立性好、施工便捷等特点,可有效减小管廊上覆荷载,从而控制工后沉降,改善管廊与路基的变形协调性。在软土地区,尽管采取了地基处理措施,管廊与周围土体之间仍存在显著的刚度差异,易引发路基路面工后不均匀沉降,路面产生开裂现象。因此,在软土地区管廊工程中,如何有效控制工后差异沉降,成为工程设计中的关键问题。

2 有限元模型建立

2.1 模型建立与计算参数

依托工程背景,采用ABAQUS有限元软件建立二维数值模型,分析新建综合管廊上方填筑泡沫轻质土路基工后沉降特性。考虑边界效应与计算效率,结合圣维南原理,模型几何尺寸确定为110 m×50 m,即自地表向下延伸至50 m;模型宽度约为管廊结构宽度的10倍,宽度为110m,有效消除了边界效应对计算结果的影响。有限元模型中,路面结构层

厚度 0.8 m,路基填筑材料为泡沫轻质土,填筑高度依据道路设计标高确定。另外,根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[12]中规定的公路—I 级车道荷载均布荷载标准值为 10.5 kN/m,考虑车辆轮载在路面上的分布宽度及多车道叠加效应后,折算为作用于路基顶面的等效均布荷载为 20 kPa。整体计算有限元模型见图 2 所示。

数值模拟中,各层土体及泡沫轻质土填料均采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型,该模型能够较好地描述岩土材料的屈服特性和破坏行为;综合管廊混凝土结构采用线弹性模型,视为各向同性均质材料。根据工程地质勘察报告与力学试验结果,各材料的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 材料物理力学参数

材料名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	渗透系数 $k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
填土层	18.5	22	0.30	12	10	5.0×10^{-6}
淤泥质土层	16.8	8	0.35	8	5	1.0×10^{-8}
粉质黏土层	19.2	32	0.28	25	18	1.0×10^{-6}
水泥注浆加固层	20.0	80	0.25	50	25	1.0×10^{-7}
泡沫轻质土	6.0	252.5	0.20	340	30	1.0×10^{-6}
管廊混凝土	25.0	3.0×10^4	0.18	—	—	—

2.2 网格划分与边界条件

模型采用四节点双线性平面应变孔压单元 (CPE4P)模拟土体和泡沫轻质土层,该单元类型可同时计算位移和孔隙水压力,适用于软土固结分析;管廊结构采用平面应变实体单元(CPE4)模拟。网格划分时,对管廊周围及泡沫轻质土路基等重点关注区域进行局部加密,以提高计算精度,模型共划分 12 000 个单元,节点 12 500 个。

模型底部限制水平和竖向位移;两侧设置水平向约束,仅允许竖向位移。地表面为自由边界。孔压边界条件:地下水位位于地表以下 1.5 m,水位以下土体初始孔压按静水压力分布,模型底部及两侧设为不透水边界,地表为排水边界。

2.3 数值模拟工况设计

数值模拟工况按照实际施工设置,其工况步骤大致为:(1)地应力平衡,模拟基坑开挖前的初始地应力场;(2)基坑开挖与设置基坑支护结构,同时激活综合管廊结构单位;(3)分层填筑泡沫轻质土路基,每层填筑厚度按 0.5 m 控制,模拟路基施工过程;(4)施加路面荷载及行车荷载,并设置 20 年固结时间,分析工后沉降规律。

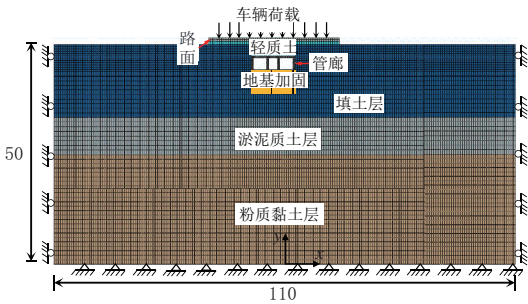


图 2 整体有限元计算模型(单位:m)

淤泥质土层属典型高压缩性软土,天然含水率高、强度低,其蠕变特性对工后沉降影响显著。为模拟土体随时间发展的固结沉降过程,计算中采用 Biot 固结理论,并考虑土体渗透系数随孔隙比变化的非线性特征。

3 工后沉降特性分析

3.1 管廊不同埋深下路基工后沉降分析

图 3 所示为管廊埋深 2.6 m 时的泡沫轻质土路基施工完成时刻对应的沉降云图。图中显示,路基沉降呈现对称分布特征,路面沉降最大,最大值达到约 -35.42 mm;其次,管廊正上方泡沫轻质土路基的沉降相对较小,沉降值约为 -14.33~-20.36 mm,表明管廊结构对上部路基起到了明显的支撑作用,同时管廊正下方地基沉降小于两侧沉降,说明管廊下方地基加固起到了抑制沉降作用。

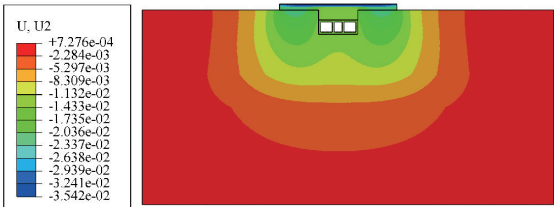


图 3 竣工时路基沉降云图(管廊埋深 2.6 m)

为探究管廊埋置深度对泡沫轻质土路基工后沉降的影响规律,以管廊位于路中为例,本文设置 3 种典型埋深工况进行对比分析:埋深 2.6 m(基准工况)、埋深 1.6 m(浅埋工况)和埋深 0 m(管廊顶与路基底部齐平工况)。基于有限元模型计算,提取工后 0、1、5、10、15、20 年共 6 个典型时刻的路面沉降曲线

值,见图4所示。图4(a)显示,当管廊埋深2.6 m时,路面沉降呈现出U字形分布,道路中心线处沉降最大,工后20年最大沉降量为-40.7 mm;图4(b)显示,当管廊埋深减小至1.6 m时,路面沉降分布形态开始发生变化,中心线附近沉降相对减小,呈现出“中间小、两侧大”的W形分布特征,工后20年最大沉降量为-39.1 mm;图4(c)显示,当管廊埋深为0 m时,路面沉降呈现W形特征更加显著,管廊正上方路面沉降明显小于两侧,工后20年最大沉降量为-36.9 mm。总体而言,随着管廊埋深减小,路面工后总沉降量呈减小趋势:与管廊埋深2.6 m工况相比,管廊埋深1.6 m工况下20年的总沉降减少约3.9%,管廊埋深0 m工况下20年的总沉降减少约9.3%。这一现象主要归因于两方面:其一,管廊作为刚性结构,埋深变浅后对上部荷载的承担作用更加直接,有效减少了传递至下卧软土层的附加应力;其二,浅埋条件下管廊对周围土体的约束作用增强,限制了管廊两侧土体的侧向变形,从而减小了总沉降量。

从时间发展规律来看,路面工程的沉降主要发生在工后前5年。以图4(a)所示的管廊埋深2.6 m工况为例,工后初期(0—1年),路面最大沉降由-35.2 mm增长至-36.9 mm,增幅相对较小;工后1—5年期间,沉降发展较快,5年时最大沉降达到-39.9 mm;工后5—10年,沉降进入缓慢增长阶段,10年时最大沉降为-40.6 mm;工后10—20年,沉降趋于稳定,20年时最大沉降为-40.7 mm,年沉降增量不足1 mm。上述结果表明,泡沫轻质土路基的工后沉降主要发生在工后前5年,其中第1年沉降占比最大,后期沉降逐渐收敛。

3.2 不同泡沫轻质土密度下路基工后沉降分析

为探究泡沫轻质土密度对路基工后沉降的影响规律,为工程设计中密度参数选取提供依据,以管廊埋深2.6 m、管廊位于道路中心线下方为基准工况,设置4种典型轻质土密度工况进行对比分析:400、600(基准工况)、800~1 000 kg/m³。需要说明的是,泡沫轻质土密度变化时,其力学参数(弹性模量和黏聚力)也会相应改变。根据《气泡混合轻质土填筑工程

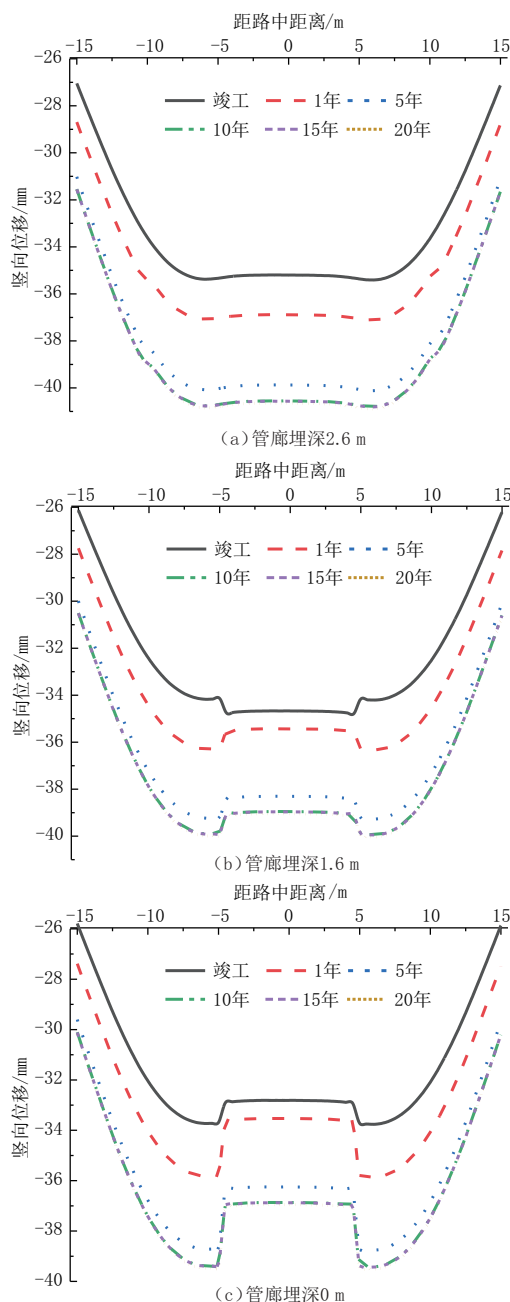


图4 不同管廊埋深工况下路面沉降随时间发展曲线

技术规程》(CJJ/T 177—2012)^[13]建议的经验公式

$$E_c = 250q_u$$

式中: q_u 为无侧限抗压强度,MPa。

采用文献[14]的试验数据进行拟合,不同密度对应的抗压强度及弹性模量等参数取值如表2所示。本文以此作为不同密度工况下的材料参数输入有限元模型进行数值计算。

表2 不同密度泡沫轻质土力学参数

密度/(kg·m ⁻³)	重度/(kN·m ⁻³)	无侧限抗压强度 q_u /MPa	弹性模量 E /MPa	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)
400	4.0	0.51	127.5	173.4	25
600(基准)	6.0	1.01	252.5	340	30
800	8.0	2.94	697.5	1 000	33
1 000	10.0	3.9	975	1326	40

采用表2的泡沫轻质土参数输入ABAQUS模型,其余参数不变,计算得到工后5年和20年的路面横向沉降值,其计算结果如图5所示。

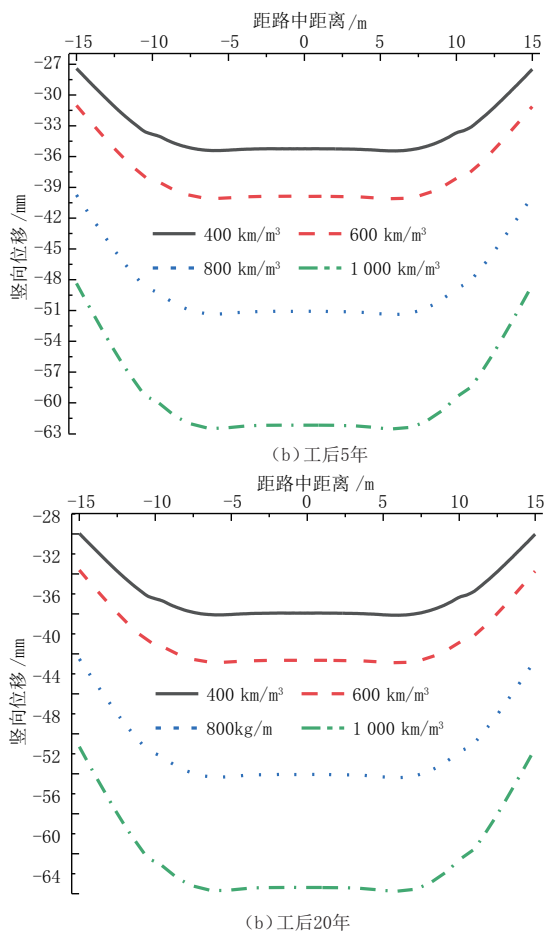


图5 不同轻质土密度下路面工后沉降

从图5可以看出,泡沫轻质土密度对路基工后沉降具有显著影响。随着轻质土密度增大,路面工后沉降量呈增大趋势。工后5年时,密度400、600、800、1 000 kg/m^3 对应的路面最大沉降分别为-35.2、-39.9、-51.1、-62.2 mm;工后20年时,对应沉降量分别为-35.9、-40.7、-52.1、-63.4 mm。密度从400 kg/m^3 增至1 000 kg/m^3 ,工后20年沉降增幅达43.4%,表明轻质土密度是控制工后沉降的关键因素之一。分析其机理,泡沫轻质土密度增大使得作用于下卧软土层上的附加应力增大,从而加剧软土层的固结压缩变形。因此,在满足强度要求的前提下,宜优先选用较低密度的泡沫轻质土,以充分发挥其减载效应。

综合考虑沉降控制与材料经济性,参考既有工程经验,泡沫轻质土密度宜控制在600 kg/m^3 左右。该密度下既能有效控制工后沉降,又可避免因密度过低导致强度不足或施工流值不满足要求等问题。实际工程中,可结合具体管廊埋深、地基条件等因素,通过配合比设计优化确定最佳密度。

3.3 现场监测与模型对比分析

结合数值计算,依托工程确定最终方案。综合管廊采用现浇钢筋混凝土结构,管廊埋深2.6 m,上方分层填筑密度为600 kg/m^3 的泡沫轻质土路基,每层填筑厚度控制0.5 m。为监测路基路面工后沉降,以及验证数值模型可靠性,在K0+350典型断面沿路面横向布设沉降观测点,测点间距3 m,共布设11个测点,采用精密水准仪(DS05级)进行观测。监测频率为在路面完成施工后,路面施工完成后连续监测20 d,监测频率为1次/d,其监测方案如图1所示。

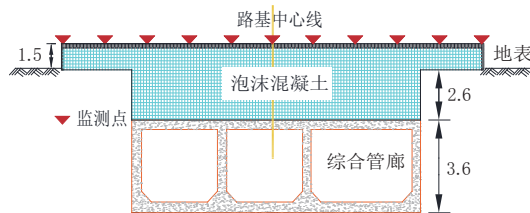


图6 路面沉降监测点平面布置示意图

利用工后20 d时刻的路面实测沉降数据,对本文所建有限元模型(材料参数见表1,工况为管廊埋深2.6 m、轻质土密度600 kg/m^3)进行验证。对比结果如图7所示。

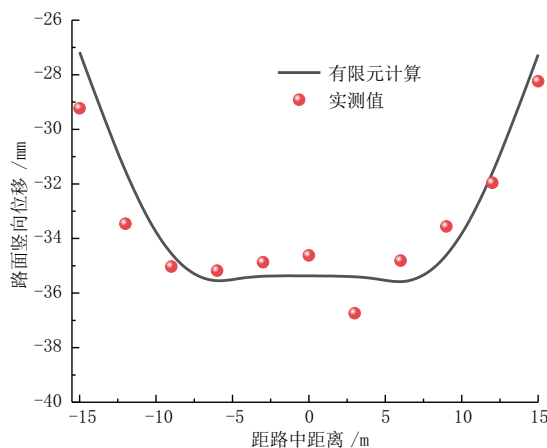


图7 工后20 d路面沉降数值模拟与现场监测结果对比
(轻质土密度为600 kg/m^3)

由图7可知,数值模拟预测的路面沉降曲线与现场实测值在形态和量值上吻合良好。两者均呈现以道路中心线为对称轴的U形分布,最大沉降位于中心线附近,向两侧逐渐减小。在路面中心线关键位置,模拟值与实测值分别为-35.37 mm和-34.62 mm,其相对误差约为2.1%,表明本文建立的有限元模型及选取的Biot固结理论、Mohr-Coulomb本构参数能够合理反映工后路基路面的沉降行为。因此,基于该模型对长期(1—20年)工后沉降的预测分析具有可信的参考价值。

4 结 语

本文依托广东省某软土地地区市政道路工程,采用ABAQUS有限元软件建立数值模型,分析了新建综合管廊上方泡沫轻质土路基的工后沉降特性,重点探讨了不同工后时刻、不同管廊埋深及不同泡沫轻质土密度对路面沉降的影响规律,得出以下主要结论。

(1)泡沫轻质土路基的工后沉降主要发生在工后前5年,其中第1年沉降占比最大,工后10—20年沉降趋于稳定,20年总沉降约为-40.7 mm(基准工况)。沉降分布呈以道路中心线为对称轴的U形特征,管廊与土体交界处存在明显的沉降梯度变化,是差异沉降控制的重点部位。

(2)管廊埋深对路基沉降具有显著影响。随着埋深减小,路面工后总沉降呈减小趋势,同时沉降分布形态由U形向W形转变。浅埋条件下管廊的刚性支撑作用更加突出,可有效减少传递至下卧软土层的附加应力。

(3)泡沫轻质土密度是控制工后沉降的关键因素之一。密度从 400 kg/m^3 增至 $1\,000\text{ kg/m}^3$,工后20年的沉降由-35.9 mm增至-63.4 mm,增幅达43.4%。密度增大直接导致上覆荷载增加,加剧软土层固结压缩。在满足强度要求的前提下,宜优先选用较低密度的泡沫轻质土以发挥减载效应。

(4)结合数值计算,确定了依托工程的施工参

数,并通过工后20 d路面沉降实测数据与数值模拟结果的对比,两者在沉降形态(U形分布)和量值上吻合良好。路面中心线的数值计算与实测值相对误差约为2.1%,验证了本文所建有限元模型的合理性与预测精度。

参考文献:

- [1] GB 50838—2015 城市综合管廊工程技术规范[S].
- [2] 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.
- [3] 李磊. 车辆荷载下综合管廊与土体的力学性状分析[D]. 杭州: 浙江科技学院, 2018.
- [4] 陈宗燕. 滨海软基段公路管廊路基工后沉降特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(4): 131-137.
- [5] 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.
- [6] 马小燕. 城市道路设置地下综合管廊的路基沉降处理方法[J]. 工程技术研究, 2023, 8(18): 21-23.
- [7] 赵福元, 卢长炯, 曹开彬, 等. 填筑方法对综合管廊高填方路基沉降的影响[J]. 广州建筑, 2022, 50(6): 25-28.
- [8] 李鹏飞. 下穿综合管廊的城市道路力学性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [9] 黎浩, 黄伟. 软土地区地下综合管廊路基不均匀沉降研究[J]. 路基工程, 2025(4): 227-231.
- [10] 王发玲, 郭运, 龙晓东, 等. 深厚软土地区地下综合管廊边缘路基差异沉降研究[J]. 路基工程, 2021(3): 139-142.
- [11] 王大勃, 江晓峰. 软土地基综合管廊对路基沉降差影响与分析[J]. 城市道桥与防洪, 2019(10): 204-206.
- [12] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].
- [13] T/TJ 1—2021 公路工程气泡混合轻质土填筑应用技术规范[S].
- [14] 袁化强, 朱登元, 张宏庆, 等. 三轴应力条件下泡沫轻质土压缩特性[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3379-3385.