

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.05.020

# 刚性桩复合地基在垃圾土路基治理中的应用研究

张贺,程宗亮,王磊,高点

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司,湖北武汉430014)

**摘要:**为研究刚性桩复合地基对垃圾土路基的加固处理效果,以实际工程为背景,采用钻探取样、载荷板试验方法获取垃圾土参数,分析垃圾土特性,采用数值分析的方式计算刚性桩复合地基的沉降量、分析地表沉降分布特征以及荷载传递的特征。研究表明:本区域垃圾土应力应变特征符合邓肯-张模型,刚性桩复合地基方式处理垃圾土,桩基可以有效的将路基荷载传导至桩底持力层,可以有效减小路基沉降量、沉降差。

**关键词:**刚性桩复合地基;垃圾土;应变硬化;沉降

中图分类号: TU997

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)05-0144-07

## Application of Rigid Pile Composite Foundation in Municipal Solid Waste Roadbed Treatment

ZHANG He, CHENG Zongliang, WANG Lei, GAO Dian

(Central and Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430014, China)

**Abstract:** This work aims to analyze the reinforcement effect of rigid pile composite foundation on municipal solid waste subgrade. Based on practical engineering, drilling sampling and in-situ testing methods are used to obtain garbage soil parameters and analyze garbage soil characteristics. This work adopted numerical analysis to calculate the settlement, surface settlement distribution characteristics, and load transfer characteristics of rigid pile composite foundation. The results showed that the stress-strain characteristics of municipal solid waste in this region conform to the Duncan-Chang constitutive model. The rigid pile composite foundation method is used to treat municipal solid waste, and the pile foundation can effectively transmit the roadbed load to the bearing layer at the bottom of the pile, which can effectively reduce the settlement and settlement difference of the solid waste roadbed.

**Keywords:** rigid pile composite foundation; municipal solid waste; strain hardening; settlement

生产生活过程中产生的各种固体废弃物日益增加,填埋仍然是当前及今后相当长时期内处理生活垃圾的主要方式。随着城市规模不断增大,越来越多的城市道路建设在生活垃圾填埋场之上,由此带来的工程问题日益尖锐。垃圾土是由类土材料以及纺织品、塑料、废纸和木屑等纤维材料组成的复合体,其高压缩性、可降解性、加筋特性等给垃圾土的治理提出了新的挑战<sup>[1-4]</sup>。

目前,城市内部施工强夯等对环境影响较大的处理方式应用受限。除换填外常用的垃圾土的治理

方式以复合地基为主。冯彬等<sup>[5]</sup>针对北京地区深厚杂填土项目提出采用柱锤冲扩桩+CFG桩的复合地基处理方案,成功处理了深厚杂填土路基沉降控制问题。张林涛等<sup>[6]</sup>结合工程实际研究分析了柱锤冲扩桩复合地基对于填土路基的处理效果,并成功在实践中得以应用。张昕等<sup>[7]</sup>采用灰土挤密桩复合地基成功处理了填土路基,取得了良好的经济效益和工程治理效果。陈建峰等<sup>[8]</sup>采用数值分析的方式,对加筋碎石桩复合地基的填土处理进行了研究,分析了加筋碎石桩复合地基处理填土的优

收稿日期:2025-05-17

修稿日期:2025-06-30

基金项目:中国市政工程中南设计研究总院有限公司科研项目(KY-N-L-2022-006)

作者简介:张贺(1994—),男,硕士,工程师,主要从事岩土工程研究工作。E-mail:1215207676@qq.com

通讯作者:程宗亮(1990—),男,高级工程师,主要从事岩土工程研究工作。E-mail:1016209594@qq.com

势在于可以有效约束桩身的变形,治理效果更好。此外,大量工程实践采用了散体桩、非刚性桩复合地基处理深厚杂填土都取得了不错的治理效果,但是,也暴露了复合地基施工复杂,工期长等缺点。对于刚性桩复合地基、特别是预制桩具有工期短,施工影响小等优点,目前研究应用较少。

结合实际工程,本文拟通过现场试验与数值计算方法,分析刚性桩治理后的复合地基沉降特征以及治理效果,以期为后续相似工程提供参考。

## 1 工程概况

工程场地位于武汉市东西湖国营三店砖厂内部,砖厂经营期间在砖厂内部空地取土制砖形成了多处深大土坑,于2011年开始陆续对取土坑进行回填,回填土中包含大量碎砖、陶瓷片、玻璃等硬质垃圾,同时有大量塑料袋、橡胶、木屑等软质垃圾混合其中而形成垃圾土,至2015年土坑基本填完整平。拟建道路K0+370—K0+470段位于回填垃圾土上方,道路红线宽度20m。选取里程K0+370—K0+470段试验段为研究对象。

通过勘探揭露,拟建场地地层自上而下可分为3个大单元层:①单元为填土层,其中①-3层为垃圾土层,上覆①-1层杂填土和①-2层素填土,下部为①-4和①-5层素填土,状态均以松散为主;②单元为全新统黏性土层,状态以软塑~可塑为主;③单元为上更新统黏性土层,状态为硬塑~坚硬。①-3层垃圾土主要分布于径西七路和径西八路上。试验段工程地质剖面图如图1所示。

## 2 现场原位测试与室内试验

试验段区域根据工程勘察要求进行了岩土工程勘察,通过钻探、原位测试、土工试验等手段获取场地内岩土的物理力学参数。在此基础上,开展刚性桩复合地基研究时,在场地内进行了针对垃圾土的载荷板试验及取样,通过取样对垃圾土成分进行详细分析,明确垃圾土组成。通过载荷板试验实测垃圾土极限承载力。

### 2.1 垃圾土取样及成分分析

①-3层垃圾土中存在大量硬质垃圾和软质垃圾,成分不均,平面分布杂乱无序,在紧邻选定载荷板位置处选择XY-200型钻机钻取土样,取土器优先选择自由活塞薄壁取土器,考虑到①-3层垃圾土中硬杂质较多,选用厚壁式取土器作为备选,取样方式优先采用静压取样。共取样12组,编号1~12。

为使所取样品各物质组成具有代表性,每个取样孔在垃圾土表层以下0~1m和1m~3m内各采取垃圾土样1件,共取得试样12件,土样规格为长200mm,直径90mm圆柱体。垃圾土现场取样照片如图2所示。



图2 垃圾土现场取样

垃圾土室内成分分析试验参照《生活垃圾土土工试验技术规程》(CJJ/T 204—2013),现场采样后立即进行室内成分分析试验,垃圾物理成分的测定采用人工分选、称重方法进行分析。垃圾土室内试验样品分析如图3所示。分析成果见表1。



图3 垃圾土室内试验样品分析

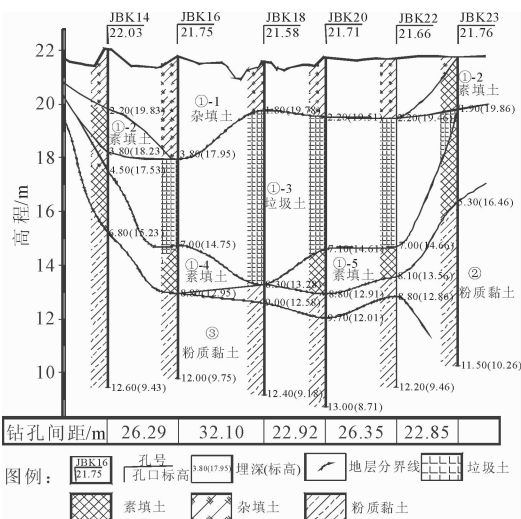


图1 试验段工程地质剖面图

表 1 垃圾土中各物质成分百分比

单位: %

物质	编号											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
碎砖	16.0	26.2	19.1	17.0	11.1	4.2	1.8	20.1	10.7	3.8	14.1	10.4
陶瓷片	7.8	14.8	20.1	13.9	14.9	10.0	2.3	12.3	17.0	8.3	12.9	17.3
玻璃	6.1	5.7	2.0	6.9	2.9	5.4	2.4	6.0	6.2	3.9	5.2	6.4
金属	0.8	1.4	1.2	0.5	1.3	0.9	0.7	1.4	2.1	1.2	1.7	1.1
塑料袋	7.4	7.0	5.3	5.8	10.2	15.5	15.7	2.3	5.4	12.1	11.6	7.8
橡胶	13.5	12.0	5.7	10.3	17.0	16.4	16.7	6.6	14.1	17.4	13.2	10.3
木屑	2.5	3.5	2.1	2.9	1.1	1.8	1.0	2.8	2.6	5.4	0.8	2.7
土	44.2	28.3	42.1	40.0	39.7	44.2	56.8	46.4	40.4	45.9	38.3	43.0
其他	1.6	1.1	2.3	2.6	1.8	1.7	2.5	2.2	1.4	1.9	2.1	1.0

根据成分分析可知,场地内垃圾土成分主要为碎砖块、瓷片、玻璃、金属、塑料袋、橡胶制品、木屑以及土颗粒,成分复杂,除土颗粒外其他垃圾成分占比在 43%~72%。此外,土体内含有塑料袋、橡胶以及木屑等“加筋体”,使得垃圾土性质更加复杂。

## 2.2 载荷试验

由于垃圾土性质的特殊性,常规取样然后进行室内试验的方法,难以准确测得垃圾土的物理力学性质指标,原位测试在获取垃圾土性能指标具有天然优势,在避免扰动垃圾土原有结构的情况下可以测得垃圾土承载力以及变形计算参数。在研究区域选择进行浅层载荷板试验,浅层平板载荷试验适用于确定浅部地基土层承压板下压力主要影响范围内的承载力和变形参数。

(1) 位置和数量:根据勘察资料,试验区内垃圾土厚度在 4 m~7 m,在试验区域选择垃圾土分布较均匀的区域进行载荷板试验。本次共进行 3 组浅层载荷板试验(Z01、Z02、Z03),载荷板试验分布如图 4、图 5 所示。

(2) 尺寸:选择 1 m×1 m 方形载荷板。

(3) 加载量:最大荷载设置为 300 kPa,土体沉降稳定或发生破坏后停止加载。根据实际需要进行加载。

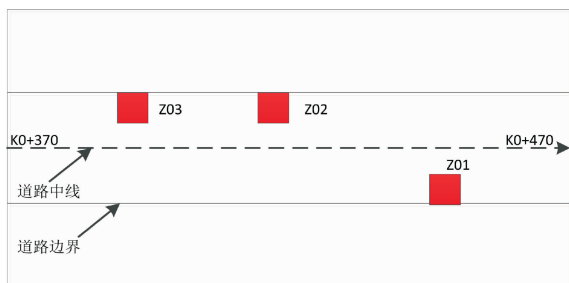
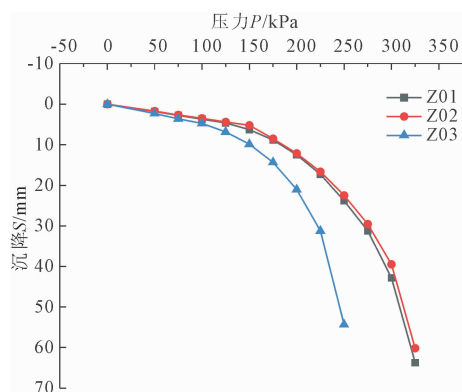


图 4 载荷板试验分布示意图



图 5 现场载荷板试验照片

根据载荷板试验数据绘制压力  $P$  - 沉降  $S$  曲线如图 6 所示, $P$  -  $S$  曲线上有明显的直线段,采用直线段的终点对应的荷载值为比例界限,取该比例界限所对应的荷载值为承载力特征值。

图 6 载荷板试验  $P$  -  $S$  曲线

浅层平板载荷试验的变形模量  $E_0$ ,可按下式计算:

$$E_0 = I_0(1 - \mu^2) \frac{pd}{s} \quad (1)$$

式中: $I_0$  为刚性承压板的形状系数,方形承压板取 0.886; $d$  为承压板边长,取 1.0 m; $p$  为  $P$  -  $S$  曲线线性段的压力,kPa; $\mu$  为泊松比; $s$  为载荷板沉降观测值,mm。

表 2 载荷板试验参数统计表

试验编号	承载力特征值 $f_{ak}/\text{kPa}$	变形模量 $E_0/\text{MPa}$
Z01	130	21.0
Z02	120	19.0
Z03	100	16.0

### 3 刚性桩复合地基沉降分析

#### 3.1 路基处理方案

本工程周边存在已建成居民小区、轻轨等建筑物,工期要求较短,采用刚性桩复合地基可有效减小施工对周边环境的影响,极大缩短工期。本工程拟建采用预制桩复合地基,桩径 40 cm,桩间距 2.2 m,桩端深入 3 层粉质黏土 2 m,桩顶配置桩帽,桩帽尺寸 1.1 m × 1.1 m × 0.3 m,桩帽之间采用碎石填充,上部铺设毛渣约 80 cm,并设置格栅。毛渣上部铺设路基及路面层。路面结构如图 7、图 8 所示。

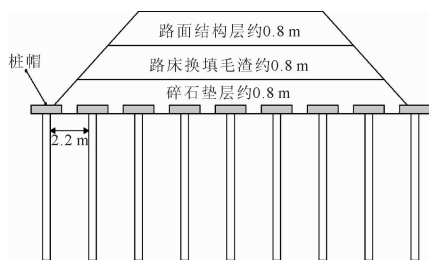


图 7 路基结构示意图

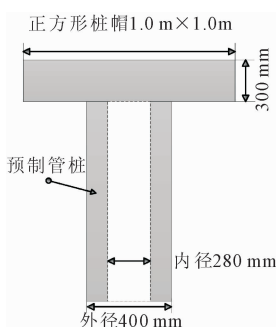


图 8 管桩、桩帽示意图

#### 3.2 地表沉降监测

为分析刚性桩复合地基对垃圾土处理效果,在完成桩基、桩帽及碎石垫层铺设后,在地表布置了沉降监测点。本次在长度约 100 m 的试验段上布置 2 个检测断面,纵向监测断面 1-1 位于道路中线,监测点间距 5 m,该断面共布置 13 个检测点;横向监测断面 2-2 位于里程 K0 + 420 处,监测点间距 5 m,共布置 5 个检测点。监测平面图如图 9 所示。

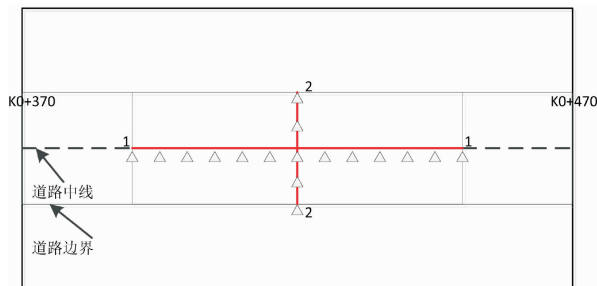


图 9 试验段地表监测点布置示意图

#### 3.3 载荷板模拟分析

常用的数值分析模型可靠性验证,往往仅依靠最终沉降量来验证,分析方式单一,忽略应力路径,模型可信度较低,本文拟采用数值分析的方式在原状土工况下对载荷板试验进行复现,通过分析实测  $P-S$  曲线与数值分析得来的  $P-S$  曲线进行对比分析,验证模型的可靠性。

通过三维有限元软件 midas GTS NX 结合实际地层构建分析模型,本次模型建立拟采用本次勘察查明实际地层,横向上假设地层水平分布。为减小边界效应影响,模型左右距道路边界距离大于 3 倍影响深度,模型底边界距底部大于桩长。模型尺寸: 100 m × 50 m × 25 m (长 × 宽 × 高)。模型边界条件:模型表面为自由表面,模型侧面及底面施加法向约束,模型网格采用系统自动随机划分,重点关注部位(如桩、桩帽、换填地层、垃圾土地层)自动加密,其他部分适当放大网格密度,具有一定的随机性,模型结果受网格划分影响较小。模型概况如图 10 所示。

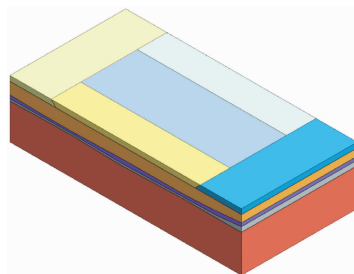


图 10 模型概况

本构模型的选取,垃圾土的组成、成因、固结历程与普通黏性土存在较大差异,因此,在本构模型的选取上不应一概而论。Jones 等<sup>[9]</sup>将垃圾土看作是理想弹塑性材料,采用摩尔-库仑模型去描述,该模型在预测大应变时与垃圾土应力-应变关系之间的误差较大。

张振营等<sup>[10]</sup>利用直径为 61.8 mm 的三轴试验

研究了不固结不排水、固结不排水和固结排水等 3 种状态下垃圾土的力学特性,分析了不同试验条件下垃圾土剪切强度参数与轴向应变的关系,认为垃圾土的应力-应变关系符合邓肯-张模型,具有应变硬化的性质。李修磊等<sup>[11-13]</sup>采用三轴试验从试样尺寸、固结方式和应力路径等 3 个方面系统研究了垃圾土的变形和强度特性,试验结果表明,偏应力随着轴向应变的增加逐渐增大,表现为应变硬化。李俊超等<sup>[14]</sup>、柯瀚等<sup>[15]</sup>基于邓肯-张模型,建立考虑垃圾土降解作用的非线性本构模型。综上所述,综合现有对于垃圾土的应力应变特征一致认为具有非线性、应变硬化的特性。本文采用邓肯-张模型对垃圾土进行计算分析。

除垃圾土外,其余地层均采用摩尔-库仑本构模型,预制桩及桩帽采用弹性模型,分别采用相应的结构单元来模拟实现。各材料参数见表 3。垃圾土破坏比  $R_f$  取 0.9,初始加载模量系数  $k$  取 100。

表 3 地层材料参数表

地层	重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
碎石垫层	23.0	45	0.20	5	40
杂填土	19.4	15	0.25	8	18
垃圾土	17.5	12	0.30	12	21
素填土	18.0	12	0.35	10	6
粉质黏土	19.2	15	0.30	30	13
老黏土	19.7	42	0.27	55	16
换填土(毛渣)	19.0	45	0.30	15	18
管桩/桩帽	25.0	35000	0.25	—	—

载荷板试验竖向位移云图如图 11 所示,由图 11 可知,载荷板试验影响范围远远未达到模型边界。

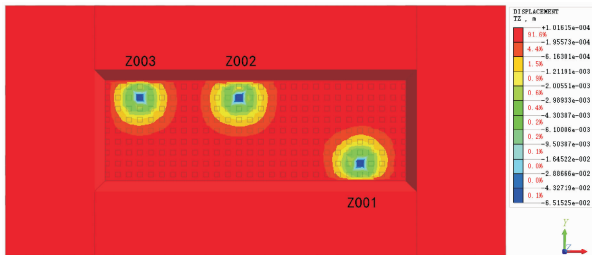
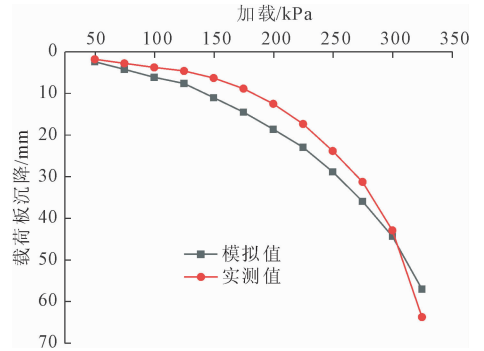


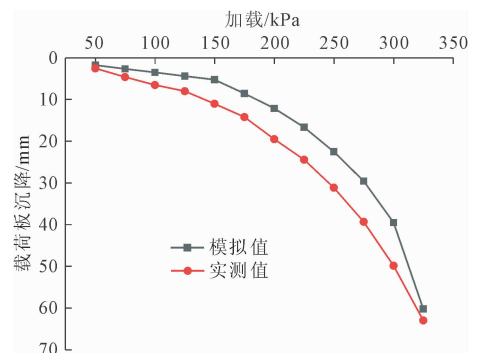
图 11 载荷板试验竖向位移云图

图 12 为压力沉降实测值与模拟值关系曲线。由图 12 可知,实测  $P-S$  曲线与数值模拟  $P-S$  曲线具有相同的变化规律,在线性段及破坏点具有相似的结果,且总沉降量具有相似的结果,表明试验模型在相同的应力路径下与垃圾土实际变形特性具有

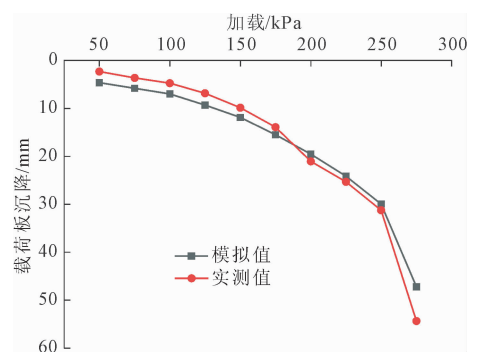
较高的相似度,验证了数值分析垃圾土所采用的本构模型的适用性,同时也反映了载荷板试验获取参数的准确性。



(a) Z001 载荷板



(b) Z002 载荷板



(c) Z003 载荷板

图 12 压力与沉降实测值与模拟值关系( $P-S$ )曲线

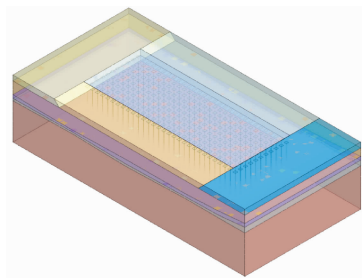
### 3.4 沉降分析

在上述完成验证的模型基础上,结合本次工程地基处理方案建立有限元模型,既采用刚性桩复合地基方案(工况一)对垃圾土地进行处理,同时建立换填处理模型(工况二),换填材料为毛渣,通过分析工后地表沉降量,对比分析刚性桩复合地基处理效果。考虑极限工况下地表车辆荷载设置为 60 kPa,具体工况见表 4。有限元模型如图 13 所示。

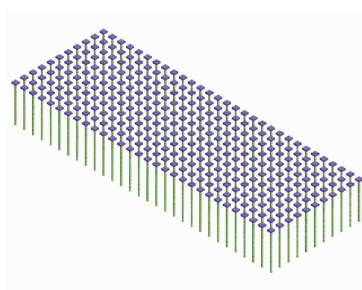
建立模型分别对两种工况进行计算分析,两种工况计算结果详见图 14—图 16。

表 4 各工况信息一览表

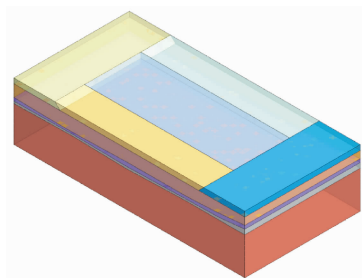
工况	处理方式	换填厚度/m	桩间距/m	桩长/m
工况一	刚性桩复合地基	2.0	2.2	8
工况二	换填(毛渣)	2.0	—	—



(a) 工况一有限元模型

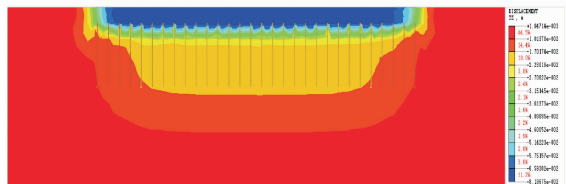


(b) 工况一管桩及桩帽布置

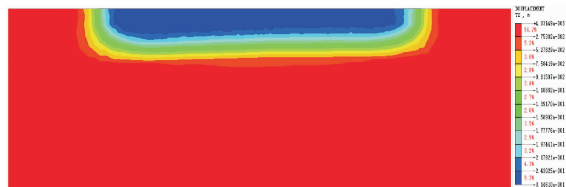


(c) 工况二模型

图 13 有限元模型

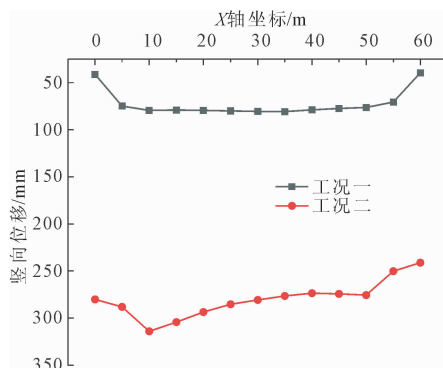


(a) 工况一

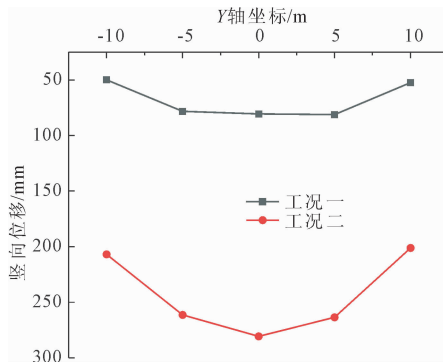


(b) 工况二

图 15 纵断面竖向位移云图



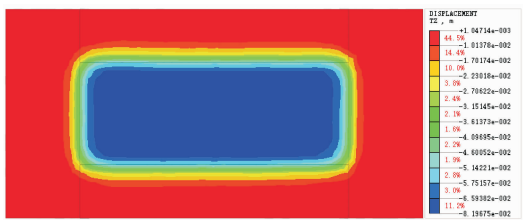
(a) 1-1 纵断面



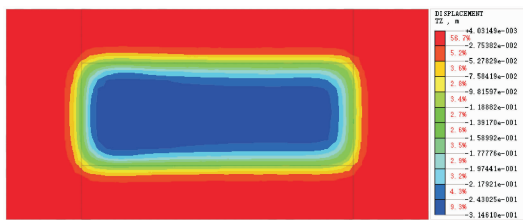
(b) 2-2 横断面

图 16 竖向位移曲线

由图 14—图 16 可知,从最大沉降量角度分析,工况二最大沉降量为 314.6mm,超过规范《武汉市深厚软土区域市政与建筑工程地面沉降防控技术导则》6.1 条要求的工后沉降小于 30 cm 的要求,不满足设计规范要求。工况一工后最大沉降量仅为 81.97 mm。最大沉降量远小于规范要求值,约为换填处理最大沉降的 24%,对于垃圾土地基的处理具有良好的效果。对比可知,刚性桩复合地基处理过后,地表沉降分布更加均匀,可有效控制地基不均匀



(a) 工况一



(b) 工况二

图 14 地表竖向位移云图

沉降,减少道路病害的产生。

分析纵断面竖向位移云图 15 可知,工况一发生沉降的主要地层为上部换填地层,刚性桩及桩帽有效传递了上部荷载到桩底地层,减小了因垃圾土的压缩固结产生的沉降;工况二纵断面竖向云图可知,沉降主要发生地层在垃圾土地层,在上部荷载的作用下,垃圾土地层加速固结,产生大幅度沉降。

## 4 结 论

本文采用载荷板试验获取垃圾土参数,根据垃圾土高压缩性、加筋特性等特点,选择邓肯-张模型进行了有限元模型的计算验证,主要结论如下:

(1) 采用原位测试获取的垃圾土参数可信度较高,同时也一定程度说明,此类“加筋垃圾土”具有应变硬化的性质。

(2) 采用载荷板试验结果对比验证了有限元模型的可信度,可以有效提升模型的准确性和可信度。

(3) 对比换填处理,刚性桩复合地基改变传统路基荷载分布,有效通过桩体降地面荷载传导至桩底持力层,降低了垃圾土的固结沉降量,可有效控制极限工况下道路工后沉降,最大沉降量仅为换填处理最大沉降的 24%。

(4) 刚性桩复合地基可有效减小道路不均匀沉降的发生,降低因不均匀沉降发生的病害,延长道路使用寿命。

### 参考文献:

- [1] 王增运,凌忠诚,吴博文. 预应力管桩处理深厚垃圾填埋地基设计与研究[J]. 城市道桥与防洪,2022(11): 56-59.
- [2] 张振营,杨云芳,陈云敏. 城市生活垃圾的应力压缩曲线及压缩参数[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版),

2008,25(1):119-122.

- [3] 张振营,严立俊,吴大志. 城市新鲜垃圾抗剪强度参数模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(9): 1938-1944.
- [4] 高腾飞. 生活垃圾腐殖土的固结特性试验研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2023.
- [5] 冯 彬,班海涛,迟铃泉,等. 深厚杂填土场地地基处理实例分析[J]. 地基处理,2022,4(1):64-72.
- [6] 张林涛. 柱锤冲扩桩法在杂填土路基处理中的应用[J]. 城市道桥与防洪,2021(6):303-305.
- [7] 张 昕,易 磊. 城市道路杂填土路基处理方法研究与应用[J]. 城市道桥与防洪,2018(11):57-60.
- [8] 陈建峰,王 波,魏 静,等. 加筋碎石桩复合地基路堤模型试验[J]. 中国公路学报,2015,28(9):1-8.
- [9] Dixon N, Jones D R V. Stress states in, and stiffness of, landfill waste [J]. Geotechnical Engineering of Landfills, Thomas Telford, London, 1998:19-34.
- [10] 张振营,郭文强,张宇翔,等. MBT 垃圾的三轴试验结果[J]. 岩土工程学报,2019,41(4):2170-2179.
- [11] 李修磊,施建勇,李玉萍. 三轴试验条件下城市生活垃圾土的变形强度特性[J]. 应用基础与工程科学学报,2022(6):1429-1439.
- [12] 李修磊,李金凤,施建勇. 考虑纤维加筋作用的城市生活垃圾土弹塑性本构模型[J]. 岩土力学,2019,40(5):1920-1940.
- [13] 李修磊,施建勇,李玉萍. 考虑应力路径影响的垃圾土应力-应变特性[J]. 哈尔滨工业大学学报,2023,55(2):134-142.
- [14] 李俊超,朱 斌,连宝琴,等. 城市固体废弃物应变硬化机制与强度参数确定方法[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(4):826-837.
- [15] 柯 瀚,郭 城,陈云敏,等. 考虑降解效应的城市固体废弃物非线性本构模型[J]. 岩土力学,2014,35(5):1217-1223.