

引用本文:王海英,王喜川,张英治,等.建筑垃圾再生材料灰土挤密桩成桩应用试验[J].建筑科学与工程学报,2022,39(5):232-240.
WANG Hai-ying, WANG Xi-chuan, ZHANG Ying-zhi, et al. Application Experiment of Construction Waste Recycled Lime Soil Compaction Pile[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(5): 232-240.

DOI:10.19815/j.jace.2022.04093

建筑垃圾再生材料灰土挤密桩成桩应用试验

王海英¹, 王喜川¹, 张英治², 何佳²

(1. 长安大学 工程机械学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西交通控股集团有限公司, 陕西 西安 710036)

摘要:为了掌握建筑垃圾再生材料在灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基中的应用性能,首先通过材料力学性能试验确定了粒径为 0~30 mm、建筑垃圾与灰土比例为 72:28 的建筑垃圾灰土挤密桩填料。然后完成了 4 组不同距径比的试桩应用试验,得到了不同距径比下的桩间土湿陷系数、桩间土挤密系数、桩间土静力触探曲线、复合地基荷载-沉降曲线等应用性能参数及特点。结果表明:桩间距越大,桩间土湿陷性系数越小;距径比越小,桩间土挤密系数越大,桩间土的比贯入阻力越大;在试验路段采用距径比 2.25 的建筑垃圾灰土挤密桩方案时,桩身容许承载力为 175 kPa,复合地基承载力特征值为 260 kPa,挤密效果良好;成桩 7 d 浸水试验后复合地基承载力和桩身承载力平均下降 14.3%,但仍满足桩设计要求;研究结果验证了建筑垃圾再生材料灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基的可行性,为工程应用提供性能参数参考,可进一步扩大建筑垃圾的使用范围。

关键词:建筑垃圾再生材料;湿陷性黄土地基;挤密桩;成桩试验;承载力

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2022)05-0232-09

Application Experiment of Construction Waste Recycled Lime Soil Compaction Pile

WANG Hai-ying¹, WANG Xi-chuan¹, ZHANG Ying-zhi², He Jia²

(1. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Transportation Holding Group Co., Ltd., Xi'an 710036, Shaanxi, China)

Abstract: In order to master the application performance of construction waste recycled materials in the treatment of collapsible loess foundation with lime soil compaction piles, through the material mechanical performance test, the filling material of the lime soil compaction pile with the particle size of 0-30 mm and the ratio of construction waste to lime soil of 72:28 was determined firstly. Then, four groups of application tests of test piles with different distance to diameter ratios were completed, and the application performance parameters and characteristics such as the collapsibility coefficient of soil between piles, the compaction coefficient of soil between piles, the static penetration test curve of soil between piles, and the load-settlement curve of composite foundation under different distance to diameter ratios were obtained. The results show that the larger the pile spacing, the smaller the soil collapsibility coefficient between the piles. The smaller the distance to diameter ratio, the larger the soil compaction coefficient between the

收稿日期:2022-04-27

基金项目:陕西省交通运输厅科技项目(21-04X)

作者简介:王海英(1971-),女,河北故城人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:whyang@chd.edu.cn。

piles, and the greater the specific penetration resistance of the soil between the piles. When the construction waste lime soil compaction pile scheme with a distance to diameter ratio of 2.25 is adopted in the test section, the allowable bearing capacity of the pile body is 175 kpa, and the characteristic value of the bearing capacity of composite foundation is 260 kpa, and the compaction effect is good. After the 7 d immersion test of the pile, the bearing capacity of the composite foundation and the bearing capacity of the pile body decreased by 14.3% on average, which still met the design requirements of the pile. The research results verify the feasibility of treating collapsible loess foundation with lime soil compaction pile, which can provide performance parameter reference for engineering application and further expand the use scope of construction waste.

Key words: construction waste recycled material; collapsible loess ground; compaction pile; pile experiment; bearing capacity

0 引言

中国西北地区地表多被深厚黄土层覆盖,地表主要分布全新世(Q_4)、晚更新世(Q_3)黄土,结构性特征明显,大多具有湿陷性。因此,很多公路工程的路基都位于湿陷性黄土地基环境中。由于黄土的湿陷性,若路基暴露在水中,会导致显著的地面变形。公路工程在进行路基施工之前,采取措施减轻或消除黄土的湿陷性尤为重要。公路工程中的黄土湿陷性地基一般采用灰土挤密桩处理,形成灰土桩加强体与桩间土组合的复合地基,提高其承载力^[1];强文伟^[2]对灰土挤密桩处理湿陷性黄土工艺原理进行分析,结果表明灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基是可行的。张瑞光^[3]研究了在湿陷性黄土地区用灰土挤密桩处理涵洞基础的试桩方案。李育强^[4]分析了湿陷性黄土地基中灰土挤密桩的应用特点。

公路建设的快速发展使得工程原材料日益匮乏。城市建筑垃圾具有良好的强度、硬度、耐磨等特性,其性能优于黏土、粉性土,经过强化处理之后是公路工程难得的再生材料^[5-6]。如果将建筑垃圾应用在处理湿陷性地基的挤密桩中,可有效减小建筑垃圾对生活环境的污染,也是减弱黄土地基湿陷性的一个有效途径^[7-8]。近年来,许多学者在混凝土中添加建筑垃圾再生材料代替天然骨料,用于路基加固并取得了成功^[9-12]。文献[13]对建筑垃圾再生材料的试验结果表明,再生材料在拉伸强度、抗压强度等方面,与天然骨料的性质非常接近,无显著差异。文献[14]除再次试验证明建筑垃圾再生材料与传统分级基材性能相似外,又通过承载比试验证明其各项指标满足工程使用要求。肖杰等^[15-18]研究了在水泥混合料中掺入建筑垃圾再生材料后应用于道路路

基填筑的可行性。

综上所述,目前研究主要集中于灰土挤密桩处理湿陷性地基以及建筑垃圾再生材料代替天然骨料方面,肯定了建筑垃圾再生材料处理地基的可行性,缺乏利用建筑垃圾再生材料作为挤密桩填料来消除黄土地基湿陷性的可行性及应用效果方面的研究。本文在研究建筑垃圾再生材料灰土挤密桩填料配比的基础上,根据现场土质及承载力情况设计了成桩试验方案,对不同桩径、桩间距的挤密桩进行桩身的密实度、最大干密度、静力触探、承载力、浸水荷载等试验检测,得到成桩应用性能参数,为扩大建筑垃圾在公路工程中的应用提供数据支撑。

1 试验设计

现场试验位于中国西部地区某高速公路 K80+700~K80+805 路段,勘察报告资料显示,该试验场地为Ⅱ级非自重湿陷性黄土地基,原状土地基承载力为140 kPa,静力触探试验的比贯入阻力在0.46~4.66 MPa 之间,地基承载力无法满足设计要求(>220 kPa),因此设计使用建筑垃圾再生材料灰土挤密桩进行地基加固处理。

1.1 建筑垃圾再生材料特性

按照来源不同,《欧洲废物目录》(EWC)^[19]将建筑垃圾混合料分为8类:①混凝土、砖、瓦和陶瓷;②木材、玻璃和塑料;③沥青混合物、煤焦油和焦油产品;④金属(包括它们的合金);⑤土壤、石头和挖掘的废料;⑥保温材料和含石棉建筑材料;⑦石膏基建筑材料;⑧其他建筑和拆除废物。本次试验选择使用第1类建筑垃圾加工成建筑垃圾再生材料,材料中混凝土块、砖块和瓷片3种物料的质量占比分别为54%、41%和5%,材料粒径为0~30 mm。对建

筑垃圾再生材料进行吸水率、堆积密度、压碎值、最大干密度以及最佳含水率等材料力学性能试验。吸水率按照《粗集料密度及吸水率试验(网篮法)》(T0304—2005)的相关规定进行 24 h 吸水试验;压碎值通过集料压碎试验仪和 DYE2000 压力试验机进行集料压碎试验获得;堆积密度采用 DMP-II 型普通磨料堆积密度测定仪测定;最大干密度采用重型击实试验得到;进行不同含水率下的击实试验,选择击实试验最优的含水率作为最佳含水率。对于材料的力学性能试验,每种性能指标试验取 6 组,试验结果取 6 组试验结果的平均值,得到建筑垃圾再生材料的力学性能参数,如表 1 所示。

表 1 0~30 mm 粒径建筑垃圾再生材料力学性能参数

Table 1 Mechanical Performance Parameters of 0-30 mm Particle Size Construction Waste Recycled Materials

吸水率/%	堆积密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	压碎值/%	最大干密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	最佳含水 率/%
17.76	1368	28.79	1.67	12

1.2 建筑垃圾再生材料挤密桩填料特性

传统设计挤密桩填料以灰土、黄土、水泥土等细粒料为主,灰土的最大干密度为 $1.51 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最优含水率为 18.2%,黄土的最大干密度为 $1.62 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最优含水率为 15.6%^[20]。由表 1 可知,0~30 mm 粒径建筑垃圾再生材料的最大干密度为 $1.67 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最优含水率为 12%,可见建筑垃圾再生料在较小的含水率下,就能获得较好的压实效果。文献[21]指出,混凝土骨料 24 h 吸水基本达到饱和,吸水率为 6.2%,而建筑垃圾再生料的吸水率为 17.76%,远高于混凝土骨料,其主要原因是建筑垃圾再生材料中砖块的含量(质量分数)高达 41%,且表面附着部分水泥砂浆,孔隙率大,并且吸水率随粒径的降低和表面积增大而增大。建筑垃圾再生材料的高吸水率通常被认为是其相对于混凝土骨料最重要的特征,在处理某些高含水率的不良土体时会有较好的效果。0~30 mm 粒径建筑垃圾再生材料的堆积密度为 $1368 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,集料压碎值为 28.79%,而废旧混凝土骨料平均压碎值指标为 17.06%^[22],表明建筑垃圾再生材料强度较低,这主要是由于建筑垃圾再生材料中的砖强度较低,材料表面水泥砂浆含量较高且黏结较弱,导致建筑垃圾再生骨料较天然骨料易破碎^[23]。根据以往地基处理的经验,在建筑垃圾再生材料中添加素土、灰土、二灰或水泥等细粒料可以提高再生材料的强度^[24]。因此,本文将建筑垃圾再生材料分别与素土和灰土

进行不同配比开展挤密桩填料性能试验,确定合适的建筑垃圾再生材料挤密桩填料。

在建筑垃圾再生材料中加入不同含量的素土(土的含水率控制在 15%)进行击实试验,当含土量(质量分数)在 40%左右时可获得最大干密度,击实效果最佳。进一步在固定素土含量为 40%的情况下改变含水率,得到的最佳含水率为 14%。在建筑垃圾再生材料中加入不同含量的灰土(灰土含水率为 13%)进行击实试验,当添加细粒料灰土含量在 28%左右时可获得最大干密度,有最优的击实效果。在固定灰土含量为 28%的情况下再次改变含水率,得到的最佳含水率为 12%。根据击实试验结果,对 2 种类型混合料进行无侧限抗压强度试验,得到建筑垃圾与素土比例为 60:40,含水率为 14%时,7 d 无侧限抗压强度为 0.6 MPa;建筑垃圾与灰土比例为 72:28,含水率为 12%时,7 d 无侧限抗压强度为 1.39 MPa。因此,本文提出的湿陷性地基处理挤密桩填充材料采用 0~30 mm 粒径建筑垃圾灰土材料,建筑垃圾与灰土的比例为 72:28。

承载比(CBR)为试料贯入量达到 2.5 mm 时的单位压力对标准碎石压入相同贯入量时标准荷载强度的比值,是评定路基土或路面材料的强度指标,CBR 值越大,黄土路基强度越高。对建筑垃圾灰土挤密桩填料进行地基承载比试验,得到浸水和未浸水条件下、不同压实度时的承载比试验数据,如表 2 所示。可以看出浸水前后的 CBR 变化规律不明显,CBR 值在 12.49~27.14 之间,均大于 6,满足地基填料标准要求。

表 2 建筑垃圾灰土填料承载比试验数据

Table 2 Test Data of Bearing Ratio of Construction Waste Lime-soil Material

压实度/%	97	95	93	90
未浸水承载比/%	16.53	24.49	27.14	12.49
浸水承载比/%	25.51	15.30	16.73	13.37

1.3 成桩试验方案设计

成桩试验采用挤密桩法^[25],挤密桩法即利用沉管、冲击等在土中挤压成孔,接着在孔内分层填加素土或灰土等材料夯实,形成稳定的桩体,常用于处理 5~25 m 深度范围内的地基。在挤密桩桩长范围内,随土层深度的增加,桩间土挤密效果整体呈增强趋势;随着挤密桩桩长的增加,桩间土挤密效果呈增强趋势^[26]。在地基土均为Ⅲ级(严重)自重湿陷性黄土时,采用灰土挤密桩处理 6.0 m 深度范围内土

体,地基土体的湿陷性均被消除^[27]。本文建筑垃圾再生材料应用地基为Ⅱ级(不严重)非自重湿陷性黄土地基,挤密桩处理设计桩长为 5.0 m,设计填料为灰土。为了验证建筑垃圾灰土挤密桩填料的实际应用效果,设计灰土挤密桩和建筑垃圾灰土挤密桩成桩试验方案,对两种方案进行挤密效果和地基处理效果对比分析。

选取建筑垃圾大规模应用试点工程某高速公路 K80+700~K80+805 路段进行灰土挤密桩与建筑垃圾灰土挤密桩成桩试验。成桩试验方案中,根据设计要求,设置桩径为 400 mm,桩长 5 m,桩间距 900 mm,每一层填料的夯击次数为 6 击。将建筑垃圾灰土挤密桩和原灰土挤密桩设计进行对比,施工时填料最佳含水率按 12%±3% 进行控制。试桩试验时试桩桩径、桩长和每层夯击次数遵循原设计参数,根据现场土质及承载力情况设置桩间距为 800、900、1 000、1 200 mm 四种,距径比分别为 2、2.25、2.5、3。桩孔布置按等边三角形排列,平面布置见图 1。成桩试验采用将建筑垃圾再生材料和灰土(72:28)填料挤密桩与原灰土挤密桩分别设计 800、900、1 000、1 200 mm 桩间距的试桩方案,每组 37 根桩。

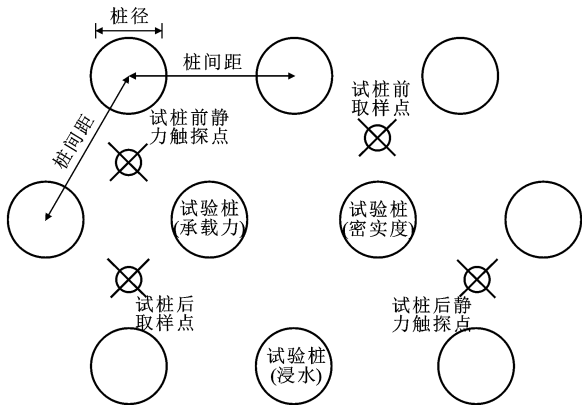


图 1 试验桩基平面布置
Fig. 1 Test Pile Plane Layout

1.4 试验过程与试验方法

试桩试验采用锤击沉管法成孔,用打桩机将与桩孔同直径的钢管打入土中,使土向孔的周围挤密,然后缓慢拔管成孔。成孔后采用锤重 1.5 t 卷扬提升式夯实机夯实。卷扬提升式夯实机夯锤形状选用锤底面呈抛物线锤体形的梨形锤(适应于桩孔分层压实)或倒锥形长细锤(适应于桩孔夯扩后压实),夯锤直径 300 mm。

本次试桩试验于 2019 年 3 月 13 日开始,6 月 12 日结束,历时 92 d,完成了 148 根原设计方案灰土挤密桩和 148 根建筑垃圾灰土挤密土桩的 4 种方

案试桩施工。为研究建筑垃圾再生料处理湿陷性黄土地基的效果,成桩 7 d 后进行桩间土的湿陷系数检测,成桩 21 d 后进行桩间土挤密系数试验、桩间土静力触探试验、桩身承载力试验和浸水荷载等检测。

1.4.1 湿陷系数检测试验

湿陷系数是指在一定压力下,土样浸水前后高度之差与土样原始高度之比,是评价黄土湿陷性的一个重要力学参数指标。中国湿陷性黄土地区建筑规范规定,10 m 内的土层测定湿陷系数时的压力值取 200 kPa。试桩结束后 7 d 对桩间土进行人工探井取样,每组试桩方案取样个数为 30 个,利用三联固结仪进行桩间土湿陷系数试验。试验时按照时间控制分级加载,加载级别分别为 50、100、150、200 kPa。每级加载初期间隔 10 min 读沉降数值,30 min 后间隔 1 h 读沉降数值,直到沉降读数稳定为止,接着进行下一级加载,标记出最后一级荷载下达到沉降稳定后的读数,按照《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025—2004)的规定进行黄土湿陷等级系数判定。试验结束后,拆除仪器部件,取下土样,进一步测定其含水率和最大干密度。

1.4.2 桩间土挤密系数检测试验

成桩 21 d 后进行桩间土挤密系数试验。桩间土的挤密系数为桩间土干密度与桩间土最大干密度的比值,桩间土干密度由人工探井取样后在实验室测出。为了对湿陷性黄土地基挤密桩处理后桩间土不同位置的挤密效果进行对比,在两根桩之间,从桩边到桩间的中心位置进行 3 等分,即桩边(离桩 1/6 桩边距)、桩边(离桩 1/3 桩边距)和桩间(离桩 1/2 桩边距),采用环刀法测量桩间土的干密度。每组试桩方案桩间土挤密系数试验取样个数分别为 30 个,试验结果取各组平均值进行分析。

1.4.3 桩间土静力触探检测试验

静力触探试验(CPT)是指利用静力以一恒定的贯入速率将圆锥探头通过触探杆压入试验土层中,通过测量系统测土的贯入阻力,确定土的变形模量和容许承载力等基本物理力学特性。成桩 21 d 后,在每组试桩方案的试桩场地随机均匀选择 6 处进行桩间土地基静力触探试验,通过静力触探所得的比贯入阻力确定地基承载力。本次试验分别对不同桩间距的灰土挤密桩处理后的地基和建筑垃圾灰土挤密桩处理后的地基进行静力触探,取 6 组试验数据的平均值绘制曲线。

1.4.4 复合地基承载力及桩身承载力试验

成桩 21 d 后对建筑垃圾灰土挤密桩 4 种不同桩间距方案分别做单桩复合地基承载力试验和桩身承载力试验,每组试桩方案均取 6 根桩基进行试验,试验结果取 6 组平均值进行讨论。承载力试验采用单桩静荷载试验方法,承压板直径为 0.4 m,采用慢速维持荷载法,荷载等级为 8~12 级,每级 50 kPa,最大加载量不低于 450 kPa(大于地基承载力规定值的 2 倍)。每级加载后,首先分别间隔 10、10、10、15、15 min 读取沉降量数值,然后每隔 30 min 读取沉降量数值,直到连续两个每小时沉降量小于 0.10 mm 时加下一级荷载。每级加载时间不得少于 2.5 h。现场试验如图 2 所示。



图 2 承载力试验
Fig. 2 Bearing Capacity Test

完成承载力试验后,为进一步得到建筑垃圾灰土挤密桩桩体的透水性、渗透速率和渗水后单桩承载力的衰减幅度,进行试桩浸水荷载试验。

2 试验结果分析

2.1 桩间土湿陷系数

建筑垃圾灰土挤密桩和灰土挤密桩 4 种桩间距方案的桩间土湿陷性检测数据如表 3 所示。可以看出,建筑垃圾灰土挤密桩和灰土挤密桩桩间土湿陷性消除规律一致,即桩间距越大,桩间土湿陷消除百

分率逐渐减小,对桩间土湿陷性的消除效果逐渐变差。建筑垃圾灰土挤密桩当距径比大于等于 2.5 后,没有消除湿陷性的土样个数分别达到 3 个和 5 个,占全部土样的 10%和 16.7%,湿陷性黄土地基处理效果不理想。因此,使用建筑垃圾灰土挤密桩处理湿陷性地基时,优先选择桩间距较小的挤密桩,桩间距较小时,建筑垃圾灰土挤密桩消除黄土地基湿陷性效果与传统的灰土挤密桩相似,均能有效消除黄土地基的湿陷性。

2.2 桩间土挤密系数

建筑垃圾灰土挤密桩和灰土挤密桩 4 种桩间距方案的桩间土挤密系数检测数据如表 4 所示。可以看出,建筑垃圾灰土挤密桩和灰土挤密桩两种不同桩间距的桩间土挤密系数基本相当,挤密系数均在 0.84~0.89 之间,挤密系数呈现随桩间距的增大而减小的趋势。表明建筑垃圾灰土挤密桩与传统的灰土挤密桩处理黄土地基湿陷性的挤密效果相似,建筑垃圾灰土挤密桩可以代替灰土挤密桩处理黄土地基的湿陷性。对于建筑垃圾灰土挤密桩,距径比从 3 变到 2.5 时,桩间土挤密系数变化也较为明显,小于 2.5 之后不再明显,说明该类型湿陷地基挤密桩选择距径比小于 2.5 较为合适。

2.3 桩间土静力触探数据

建筑垃圾灰土挤密桩和灰土挤密桩 4 种桩间距方案静力触探试验得到的比贯入阻力曲线如图 3 所示。可以看出,多数情况下建筑垃圾灰土挤密桩和灰土挤密桩随着处理深度的增加,比贯入阻力由大变小,桩间距越小这种现象越明显。这与普通地基测试所得到的比贯入阻力上小下大的特点有所不同,其主要原因有两个:①土体的含水率在上部接近于最优含水率,容易挤密;②施工夯实桩孔填料时,随孔深的增加,能量在侧壁上的消耗越大,挤密桩深部夯击能没有浅部大,导致对桩侧土体的挤压上大下小。建筑垃圾灰土挤密桩在桩间距为 800、900

表 3 桩间土湿陷性检测数据

Table 3 Collapsibility Detection Data of Soil Between Piles

挤密桩填料	建筑垃圾和灰土(72：28)				灰土			
桩间距/mm	800	900	1 000	1 200	800	900	1 000	1 200
距径比	2.00	2.25	2.50	3.00	2.00	2.25	2.50	3.00
取土样个数	30	30	30	30	30	30	30	30
未消除湿陷性土样个数	0	1	3	5	0	0	1	2
湿陷性消除百分率/%	100.0	96.7	90.0	83.3	100.0	100.0	96.7	93.3
湿陷性消除评价	好	好	较好	较差	好	好	好	较好

注:湿陷性消除百分率大于 95%为好,85%~95%为较好,75%~85%为较差,小于 75%为差。

表 4 桩间土挤密系数试验数据

Table 4 Test Data of Compaction Coefficient of Soil Between Piles

挤密桩填料		建筑垃圾和灰土(72:28)				灰土			
桩间距/mm		800	900	1 000	1 200	800	900	1 000	1 200
距径比		2.00	2.25	2.50	3.00	2.00	2.25	2.50	3.00
挤密系数/%	桩边(离桩 1/6 桩边距)	89	88	87	85	87	87	87	86
	桩边(离桩 1/3 桩边距)	88	87	86	85	86	87	86	85
	桩间(离桩 1/2 桩边距)	88	85	85	83	84	84	83	82

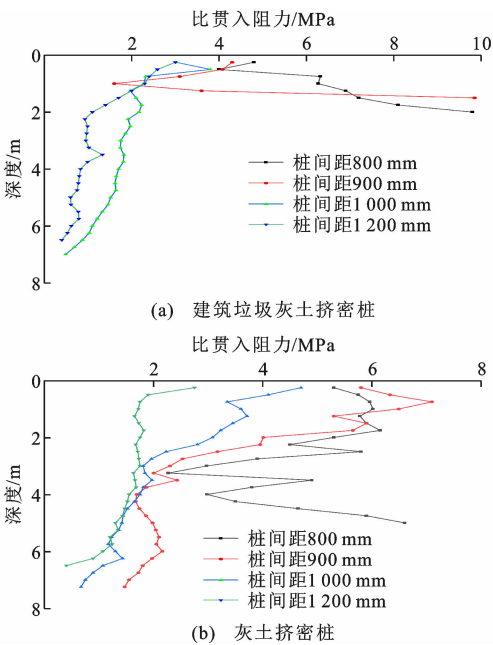


图 3 静力触探试验结果

Fig. 3 Results of Static Cone Penetration Test

mm 时试验测得的挤压结果是上小下大,这可能与该工况下距径比小、挤密效果更明显有关。

桩间土的比贯入阻力随桩间距的增大而减小,说明桩间距越小,桩间土的挤密效果越好。建筑垃圾灰土挤密桩在桩间距小于 900 mm 时,深度 2 m 以内的桩间土比贯入阻力已经接近于 10 MPa,人工已经无法再进行深部的贯入,地基处理的效果变化比较明显。在桩间距较小、挤密桩处理深度为 2 m 时,建筑垃圾灰土挤密桩的比贯入阻力明显高于灰土挤密桩,对湿陷性黄土地基的挤密效果要优于灰土挤密桩。

2.4 复合地基承载力

成桩 21 d 后现场进行了 4 种不同桩间距的建筑垃圾灰土挤密桩承载力试验,得到单桩复合地基承载力的荷载-沉降(P - S)曲线,如图 4 所示。

可以看出,当桩间距为 900 mm(距径比为 2.25)时,地基 P - S 曲线以缓变型为主,没有明显的拐点,承载性能最好。按照《建筑地基处理技术规

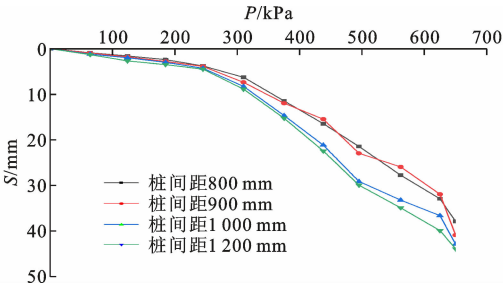


图 4 建筑垃圾灰土挤密桩复合地基承载力

Fig. 4 Composite Foundation Bearing Capacity of Construction Waste Lime Soil Compaction Piles

范》将该曲线归为平缓光滑曲线,承载力特征值应按相对变形值确定,取 $S/d=0.01$ (d 为荷载板直径)对应的荷载作为承载力特征值,得到复合地基承载力的特征值为 260 kPa,因此,采用桩间距为 900 mm(距径比为 2.25)的建筑垃圾灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基,符合设计地基承载力(>220 kPa)的要求。

2.5 桩身承载力

对桩间距为 900 mm(距径比为 2.25)的建筑垃圾灰土挤密桩进行桩体荷载试验,得到桩身的 P - S 曲线,见图 5。

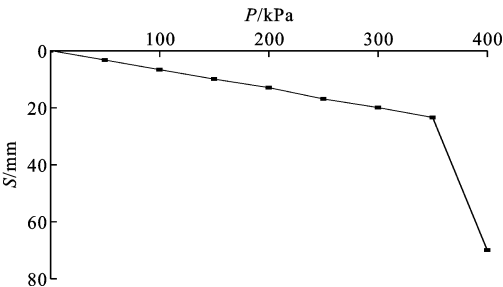


图 5 建筑垃圾灰土挤密桩桩身 P - S 曲线

Fig. 5 P - S Curve of Construction Waste Lime Soil Compaction Pile

可以看出,建筑垃圾灰土挤密桩的荷载-沉降曲线在桩体破坏之前呈线性变化,在荷载大于 350 kPa 后,桩体沉降突然快速增大,桩体遭到破坏。由于本次试验承压板面积较小,桩体为散体材料,周围土体对其约束也较小,承载板破坏前一直是标准的

线性变化。桩的极限承载力指单桩在竖向荷载作用下达到破坏状态前或出现不适合继续承载的变形时所对应的最大荷载。按照《湿陷性黄土地区建筑规范》建筑垃圾灰土挤密桩桩身 P - S 曲线为陡降型曲线,取其发生明显陡降的起始点对应的荷载值作为单桩竖向极限承载力,因此建筑垃圾灰土挤密桩桩身极限承载力为 350 kPa。单桩承载力特征值等于桩身极限承载力除以安全系数,根据规范取安全系数为 2,则建筑垃圾灰土挤密桩单桩承载力特征值为 175 kPa,满足单桩承载力大于 135 kPa 的设计要求。

2.6 试桩浸水承载力

7 d 浸水后桩体含水率由上至下先增大后减小,浸水前后承载力试验结果如表 5 所示。可以看出,7 d 浸水后桩身极限承载力由 350 kPa 下降到 300 kPa,下降 14.3%,复合地基承载力由原来的 260 kPa 下降到 223 kPa,下降 14.2%。下降后的桩身极限承载力和复合地基承载力仍满足设计要求。

表 5 试桩浸水前后承载力变化

Table 5 Changes in Bearing Capacity of Test Piles Before and After Immersion

检测项目	浸水前	浸水后	变化率/%
桩身极限承载力/kPa	350	300	-14.3
复合地基承载力/kPa	260	223	-14.2

2.7 试验结果讨论

由建筑垃圾灰土挤密桩成桩试验结果可以得出:建筑垃圾灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基可以消除挤密桩桩长深度范围(本次试桩桩长 5.0 m)内黄土的湿陷性。桩间土挤密系数试验、静力触探试验结果表明:选取桩间距为 900 mm(距径比为 2.25)的建筑垃圾灰土挤密桩处理黄土地基的湿陷性是可行的,比原灰土挤密桩加固处理方案(桩间距 800 mm)经济性好,且挤密效果也优于原设计方案。复合地基承载力、桩身承载力及试桩浸水承载力试验结果表明:采用桩间距 900 mm(距径比为 2.25)的建筑垃圾灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基,其承载力符合设计要求。

本文得到的材料特性参数和施工应用参数可以为建筑垃圾灰土挤密桩(桩长 5.0 m)在Ⅱ级非自重湿陷性黄土地基大规模应用提供参考。虽然文献[25]、[26]均得出了挤密桩桩长增加桩间土挤密效果趋势增强的结论,文献[27]也对灰土挤密桩应用于Ⅲ级(严重)自重湿陷性黄土地基处理进行了讨论,但后续推广建筑垃圾灰土挤密桩时,应进一步针

对不同的应用场景进行成桩应用试验,得到各应用场景的最佳参数。

3 结 语

(1)建筑垃圾再生材料中添加灰土能显著提升再生材料的强度,可作为挤密桩填料应用于湿陷性黄土地基处理。粒径为 0~30 mm、建筑垃圾与灰土比例为 72:28、含水率为 12%时,建筑垃圾灰土挤密桩填料可达到最大干密度、最优击实效果,7 d 无侧限抗压强度为 1.39 MPa。在浸水和未浸水条件下,不同压实度下的 CBR 值均大于 6,满足填料标准要求。

(2)建筑垃圾灰土挤密桩和灰土挤密桩成桩应用对比表明:两种桩桩间土湿陷性消除效果随着桩间距的增加逐渐变差;两种桩在不同桩边的条件下,桩间土挤密系数基本相当,挤密系数均在 0.84~0.89 之间,挤密系数随桩间距增大而减小;两种桩桩间土的比贯入阻力随桩间距的增大而减小,桩间距越小,桩间土的挤密效果越好。因此,建筑垃圾灰土挤密桩宜选择桩间距为 900 mm(距径比为 2.25),比原灰土挤密桩设计桩间距 800 mm 经济性好,且挤密效果也优于原设计方案。

(3)建筑垃圾灰土挤密桩桩间距为 900 mm(距径比为 2.25)时,地基 P - S 曲线以缓变型为主,复合地基承载力的特征值为 260 kPa,桩体极限承载力为 350 kPa,桩身承载力特征值为 175 kPa,符合设计要求。桩体在 7 d 浸水后复合地基承载力和桩身承载力分别下降 14.2%和 14.3%,下降后的复合地基承载力和桩身承载力仍满足设计要求。

参考文献:

References:

[1] 李本挺,白雁飞,张豫川,等.黄土填方地基灰土挤密桩处理效果研究[J]. 建筑结构,2021,51(增 1):2102-2107.
LI Ben-ting, BAI Yan-fei, ZHANG Yu-chuan, et al. Study on Treatment Effect of Lime Soil Compaction Pile in Loess Fill Foundation[J]. Building Structure, 2021,51(S1):2102-2107.

[2] 强文伟.灰土挤密桩在湿陷性黄土路基处理中的应用[J]. 科技传播,2011,3(4):200,197.
QIANG Wen-wei. Application of Lime-soil Compaction Pile in the Treatment of Collapsible Loess Roadbed[J]. Public Communication of Science & Technology, 2011,3(4):200,197.

- [3] 张瑞光. 湿陷性黄土地区灰土挤密桩处理涵洞地基效果研究[J]. 山西建筑, 2016, 42(34): 72-73.
ZHANG Rui-guang. On Treatment Effect of Culvert Foundation with Lime-soil Compaction Pile in Collapsible Loess Areas[J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(34): 72-73.
- [4] 李育强. 灰土挤密桩在湿陷性黄土地区公路工程软基处理中的应用[J]. 河南科技, 2018(10): 118-119.
LI Yu-qiang. Application of Lime Soil Compaction Pile in Soft Foundation Treatment of Highway Engineering in Collapsible Loess Area[J]. Henan Science and Technology, 2018(10): 118-119.
- [5] SILVA R V, DE BRITO J, DHIR R K. Properties and Composition of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste Suitable for Concrete Production [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 201-217.
- [6] 马士宾, 牛宗岳, 刘月钊, 等. 建筑垃圾再生骨料性能强化研究进展[J/OL]. 建筑科学与工程学报: 1-13 [2022-08-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1442.tu.20211130.0902.004.html>.
MA Shi-bin, NIU Zong-yue, LIU Yue-zhao, et al. Research Progress on Performance Enhancement of Recycled Aggregates from Construction Waste[J/OL]. Journal of Architecture and Civil Engineering: 1-13 [2022-08-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1442.tu.20211130.0902.004.html>.
- [7] 王莲伟, 魏志清. 西安市建筑垃圾现状分析及再利用措施[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(3): 91-94.
WANG Lian-wei, WEI Zhi-qing. Present Condition Analysis and Reutilization Measures on Construction Waste of Xi'an[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(3): 91-94.
- [8] SAPUAY S E. Construction Waste-potentials and Constraints [J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 35: 714-722.
- [9] SHAHIDAN S, AZMI M A M, KUPUSAMY K, et al. Utilizing Construction and Demolition (C&D) Waste as Recycled Aggregates (RA) in Concrete[J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 1028-1035.
- [10] JIMENEZ J R, AYUSO J, GALVIN A P, et al. Use of Mixed Recycled Aggregates with a Low Embodied Energy from Non-selected CDW in Unpaved Rural Roads[J]. Construction and Building Materials, 2012, 34: 34-43.
- [11] HAIDER I, CETIN B, KAYA Z, et al. Evaluation of the Mechanical Performance of Recycled Concrete Aggregates Used in Highway Base Layers[C]//ASCE. Geo-congress 2014. Reston: ASCE, 2014: 3686-3694.
- [12] KOLAY P K, AKENTUNA M. Characterization and Utilization of Recycled Concrete Aggregate from Illinois as a Construction Material[C]//ASCE. Geo-congress 2014. Reston: ASCE, 2014: 3561-3570.
- [13] QASRAWI H, ASI I. Effect of Bitumen Grade on Hot Asphalt Mixes Properties Prepared Using Recycled Coarse Concrete Aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 18-24.
- [14] 黄开正, 肖 宏. 建筑再生材料用作路基填料的 CBR 试验研究[J]. 建设科技, 2012(9): 70-71.
HUANG Kai-zheng, XIAO Hong. CBR Experimental Research on the Use of Construction Recycled Materials as Roadbed Filler[J]. Construction Science and Technology, 2012(9): 70-71.
- [15] 肖 杰, 吴超凡, 湛哲宏, 等. 水泥稳定砖与混凝土再生集料基层的性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 25-32.
XIAO Jie, WU Chao-fan, ZHAN Zhe-hong, et al. Research on Performances of Cement Stabilized Brick and Concrete Recycled Aggregate Base [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 25-32.
- [16] 周新锋, 徐希娟, 李晓娟. 水泥稳定建筑垃圾再生材料用于道路基层的性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(8): 48-51.
ZHOU Xin-feng, XU Xi-juan, LI Xiao-juan. Research on Performance of Cement Stabilized Aggregate Base Mixed with Recycled Construction Waste [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(8): 48-51.
- [17] HERRADOR R, PEREZ P, GARACH L, et al. Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(2): 182-190.
- [18] DEL REY I, AYUSO J, BARBUDO A, et al. Feasibility Study of Cement-treated 0-8 mm Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste as Road Base Layer[J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 17(3): 678-692.
- [19] LU W S, YUAN H P, LI J R, et al. An Empirical Investigation of Construction and Demolition Waste Generation Rates in Shenzhen City, South China[J]. Waste Management, 2011, 31(4): 680-687.
- [20] 朱景汕, 王 旭, 蒋代军, 等. 湿陷性黄土地基侧向防渗结构模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 330-335.
ZHU Jing-shan, WANG Xu, JIANG Dai-jun, et al.

- Model Experimental Research on Structure of Lateral Seepage Control in Collapsible Loess Foundation[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25 (2): 330-335.
- [21] 陶航宇,陈 萍,龚亦凡,等. 基于砖含量的再生砖混粗骨料分类研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (3): 957-963.
- TAO Hang-yu, CHEN Ping, GONG Yi-fan, et al. Classification of Recycled Brick and Concrete Coarse Aggregate Based on Brick Content[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40 (3): 957-963.
- [22] 杨 帆,董晓强,苗晨曦,等. 废旧混凝土再生细骨料抗剪强度的水敏性研究[J]. 混凝土, 2022 (3): 57-59, 68.
- YANG Fan, DONG Xiao-qiang, MIAO Chen-xi, et al. Study on Water Sensitivity of Shear Strength of Recycled Fine Aggregate of Waste Concrete[J]. Concrete, 2022 (3): 57-59, 68.
- [23] LI T, XIAO J Z, ZHU C M, et al. Experimental Study on Mechanical Behaviors of Concrete with Large-size Recycled Coarse Aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2016, 120: 321-328.
- [24] 李清海,王菲菲,周胜男,等. 成型压力对再生细集料水泥基材料性能影响的研究[J]. 混凝土, 2013 (11): 22-24.
- LI Qing-hai, WANG Fei-fei, ZHOU Sheng-nan, et al. Investigation on Behavior of Molding Pressure to Recycled Fine Aggregate Cement-base Material[J]. Concrete, 2013 (11): 22-24.
- [25] 杨晓华,张建伟,张莎莎,等. 黄土地区高速公路地基处理技术研究进展[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42 (1): 16-32.
- YANG Xiao-hua, ZHANG Jian-wei, ZHANG Sha-sha, et al. Research Progress on Foundation Treatment Techniques of Expressway in Loess Area[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2022, 42 (1): 16-32.
- [26] 朱彦鹏,杜晓启,杨校辉,等. 挤密桩处理大厚度自重湿陷性黄土地区综合管廊地基及其工后浸水试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40 (8): 2914-2924.
- ZHU Yan-peng, DU Xiao-qi, YANG Xiao-hui, et al. Research on Utility Tunnel Foundation Treated by Compaction Piles and Post-work Immersion Test in Self-weight Collapsible Loess Area with Large Thickness[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (8): 2914-2924.
- [27] 荣 露,熊治文,孙润东,等. 湿陷性黄土地区公路涵洞地基变形特性研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34 (6): 138-142, 154.
- RONG Lu, XIONG Zhi-wen, SUN Run-dong, et al. Deformation Characteristics of Highway Culvert Foundation in Collapsible Loess Area Treated by Different Methods[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34 (6): 138-142, 154.