

废旧轮胎格栅环向约束散体桩承载特性

徐润¹, 刘志鲲², 孙建秀¹, 于洋³, 张常勇¹, 刘亚珍^{2*}, 岳红亚¹, 张宏博²

(1.山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250100; 2.山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250002; 3.济南大学土木建筑学院, 山东 济南 250024)

摘要:为解决碎石类散体桩加固软土地基时土体侧向约束能力不足,发生扩径、桩顶鼓胀破坏等工程问题,提出废旧轮胎格栅环向约束桩复合地基技术。通过考虑加筋类型、桩径及垫层形式的变化,开展单桩及复合地基承载试验,测试得到荷载-位移曲线;基于不同的破坏模式,提出散体桩单桩承载力计算方法,并进行准确性验证。结果表明:相较于普通散体桩在较小位移条件下即达到极限破坏状态,环向约束桩极限承载力明显提高;对比土工格栅环向约束桩,轮胎格栅约束桩荷载-位移曲线未出现明显的破坏点,表明其径向约束能力更强;对比不同桩径条件下的环向约束桩荷载-位移曲线,可知适当增大桩径对于提高桩体承载力效果显著,而设置碎石垫层可提升桩体承载力。研究成果对于该类型桩基的推广应用、提高固废资源循环利用具有重要的工程应用价值。

关键词:废旧轮胎格栅;环向约束散体桩;复合地基加固;荷载-位移曲线;极限承载

中图分类号:TU472 **文献标志码:**A

引用格式:徐润,刘志鲲,孙建秀,等.废旧轮胎格栅环向约束散体桩承载特性[J].山东大学学报(工学版),2025,55(6):142-150.

XU Run, LIU Zhikun, SUN Jianxiu, et al. Bearing characteristics of dispersed piles with radial constraints from waste tire grids[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(6):142-150.

Bearing characteristics of dispersed piles with radial constraints from waste tire grids

XU Run¹, LIU Zhikun², SUN Jianxiu¹, YU Yang³, ZHANG Changyong¹, LIU Yazhen^{2*}, YUE Hongya¹, ZHANG Hongbo²

(1. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250100, Shandong, China; 2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Jinan University, Jinan 250024, Shandong, China)

Abstract: In order to solve the engineering problems such as insufficient lateral restraining capacity of the soil body and the susceptibility to spreading and bulging damage at the top of the pile when the rubble type bulk piles were reinforcing the soft ground foundation, the composite foundation technology of waste tyre grillage ring-restrained piles was proposed. By considering the changes of reinforcement type, pile diameter and bedding form, single-pile and composite foundation bearing tests were carried out, and the load-displacement curves were tested; based on different damage modes, the calculation method of single-pile bearing capacity of bulk piles was proposed and verified for accuracy. The results showed that: compared with ordinary bulk piles that reach the ultimate damage state under small displacement conditions, the ultimate bearing capacity of ring-restrained piles was obviously improved; compared with the geogrid ring-restrained piles, the load-displacement curves of tyre grid-restrained piles did not show any obvious damage points, which indicated that their radial restraining capacity was stronger; comparing with the load-displacement curves of ring-restrained piles under different pile radius conditions, it indicated that increasing the pile diameter was very effective in improving the bearing capacity of the piles. Comparing the load-displacement curves of piles with different pile diameters, it was indicated that increasing the pile diameter appropriately had a significant effect on increasing the pile bearing capacity, and the setting of gravel bedding further improved the pile bearing capacity. The study results had important engineering application value for the promotion of this type of pile foundation and the improvement of recycling of solid waste resources.

收稿日期:2024-07-22

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2022QE064)

第一作者简介:徐润(1979—),男,山东济宁人,研究员,主要研究方向为大宗固废再生资源化利用。E-mail:xurunl@163.com

*通信作者简介:刘亚珍(1998—),女,山东济宁人,工程师,硕士,主要研究方向为固废再生利用。E-mail:liuyazhen@sdu.edu.cn

Keywords: waste tire grids; circular constraint loose pile; composite foundation reinforcement; load-displacement curve; ultimate bearing capacity

0 引言

碎石桩法作为一种常用的地基处理手段,具有价格低廉、施工简单、适用范围广、施工周期短等优势,在软基处治工程中应用广泛。然而,由于构成碎石桩的散体材料间无胶结作用,桩体特别是桩顶附近的桩体极易在桩顶荷载作用下发生鼓胀或剪切破坏,因此碎石桩的承载能力很大程度上依赖于桩周围土壤的侧向围压约束效应。

近年来,土工合成材料的发展及应用为解决碎石桩技术问题提供了新思路。该类技术通过在碎石桩外部包裹高强土工合成材料,限制碎石桩的侧向变形,从而提高其承载力。文献[1]中首次提出采用土工合成材料在碎石桩外侧形成包裹结构,并成功运用到地基加固处治工程中;文献[2]通过室内模型试验探讨了加筋碎石桩复合地基应力和变形特征,结果表明,其破坏模式与桩周土体、筋材、桩体的相互协调变形密切相关;文献[3-8]通过大量的试验结果表明,得益于外部土工合成材料的约束效应,加筋碎石桩承载力显著提高,其复合地基承载力甚至高于传统碎石桩复合地基的3~5倍。然而,工程应用表明,由于环向约束桩属于柔性结构,且土工合成材料极限拉伸应变较低,在承受较大竖向荷载时,可能出现桩身上部弯曲破坏或格栅抗拉不足开裂破坏等问题,严重降低其承载能力。因此,亟待寻求强度高、容许变形大且耐久性好的加筋替代材料。

相比较,废旧轮胎作为一种固体废弃物,具有抗拉强度高、密度低、韧性强、取材容易等特征,在公路工程中有广泛的应用前景^[9-10]。据调查,2020年我国废旧轮胎产生量达到1 390万t,废旧轮胎难降解、综合利用率低,大量堆放易引发火灾^[11-13]。根据前期研究,将废旧轮胎切割加工成为条带状或格栅状,用来替代土工合成材料作为加筋材料具有更优良的加筋性能,更好地提高工程结构物的强度和稳定性^[14-16]。因此,本研究提出废旧轮胎格栅环向约束散体桩地基处治技术,即通过将废旧轮胎切割形成轮胎加筋笼,联合土工布形成桩基包裹材料,腔内填充碎石、废弃料等粗粒材料,分层压实填筑。

该类桩属于新桩型,为揭示其工作特性及承载

机理,本研究拟通过开展废旧轮胎格栅环向约束桩承载特性模型试验,揭示废旧轮胎格栅环向约束散体桩的承载特性及关键影响因素,构建单桩承载力计算模型。研究成果对于丰富软土地基处理技术,促进废弃物资源化利用,具有重要的经济价值和环保意义。

1 室内模型试验

1.1 试验材料

试验土取自黄泛区粉土,根据文献[17],通过颗粒筛分试验得到粉土的级配曲线,如图1所示。

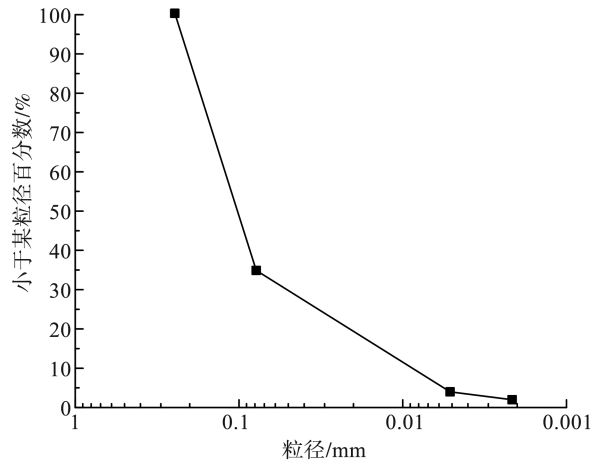


图1 粉土级配曲线

Fig.1 Grading curve of silt

通过击实试验测得粉土的最优含水率为15.8%,最大干密度为1.58 g/cm³。试验结果见图2。

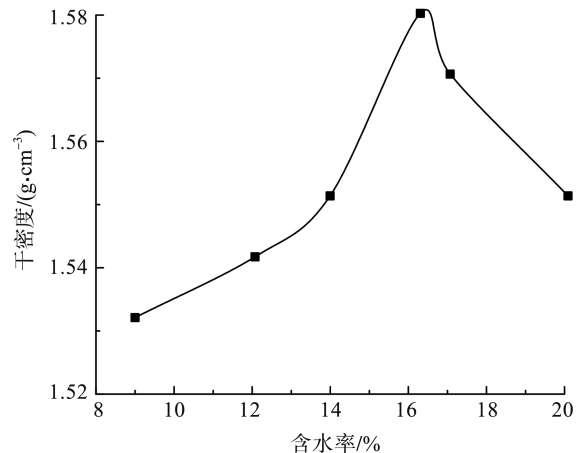


图2 粉土击实曲线

Fig.2 Compaction curve of silt

基于不固结、不排水试验条件下粉土三轴压缩试

验,汇总不同含水率条件下粉土抗剪强度参数如表1所示。表1中 ω 为粉土含水率, ω_{opt} 为最优含水率, ω_{sat} 为饱和含水率, c 为黏聚力, φ 为土体内摩擦角。

表1 粉土的抗剪强度参数
Table 1 Shear strength parameters of silt

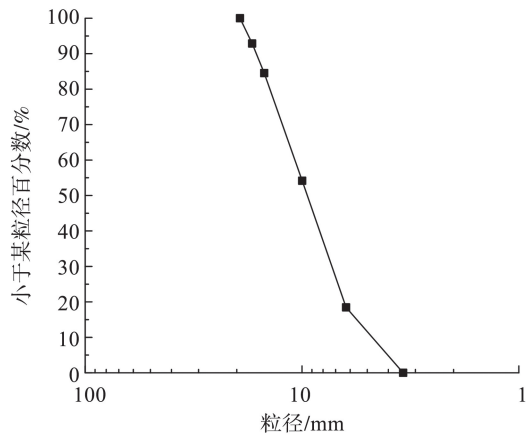
压实度/%	$\omega = 12\%$		$\omega = \omega_{opt}$		$\omega = 18\%$		$\omega = \omega_{sat}$	
	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
94	48.0	25.2	62.0	28.8	55.0	24.2	45.0	16.7
96	51.3	36.2	65.0	29.7	54.7	26.6	50.0	22.8

根据文献[18],碎石桩填料应采用含泥量不超过5%的硬质散体材料,填料粒径应为20~150 mm。

本研究钢渣及其级配曲线如图3所示。



(a) 小于20 mm粒径的钢渣



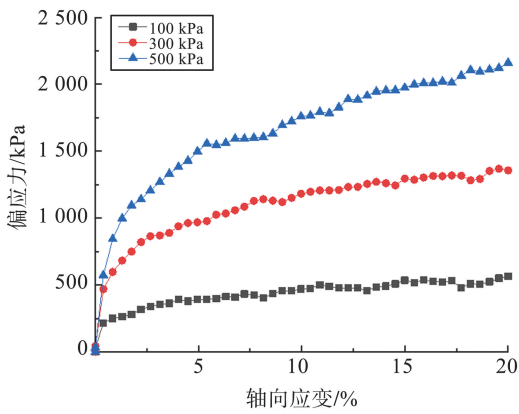
(b) 钢渣填料级配曲线

图3 钢渣及其级配曲线

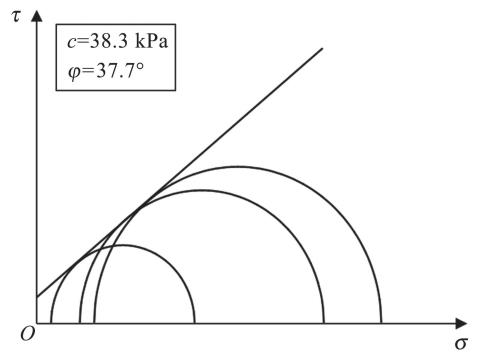
Fig.3 Steel slag and its grading curve

本研究选用最大粒径不超过20 mm的钢渣作为桩体填料,经过破碎筛分后得到所需的钢渣,如图3(a)所示,钢渣填料级配曲线如图3(b)所示。钢渣最大干密度为 2.12 g/cm^3 ,最小干密度为 1.76 g/cm^3 。

由粗粒土大三轴试验可知,不固结、不排水剪切试验(unconsolidated undrained, UU)条件下,钢渣内摩擦角 φ' 为 37.7° ,似黏聚力 c' 为 38.3 kPa ,钢渣散体桩剪切曲线及莫尔圆如图4所示。



(a) 剪切曲线



(b) 莫尔圆

图4 钢渣散体桩剪切曲线及莫尔圆

Fig.4 Shear curve and Mohr circle of steel slag loose pile

试验通过轮胎切割机裁剪所需尺寸的轮胎条带,为保证桩径尺寸,试验选用长度1000 mm、宽度 $(20 \pm 3) \text{ mm}$ 的轮胎条带通过弯曲定型和断面搭接制成网格尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱形套筒,内侧布置径向轮胎,外侧布置竖向轮胎,格栅套筒

节点处采用螺栓预紧连接。轮胎格栅套筒的直径分别为150、200、250 mm,高度为1000 mm。

基于粗粒土大三轴试验,可得UU试验条件下轮胎格栅环向约束钢渣材料的内摩擦角 φ' 为 38.1° ,似黏聚力 c' 为 38.7 kPa ,如图5所示。

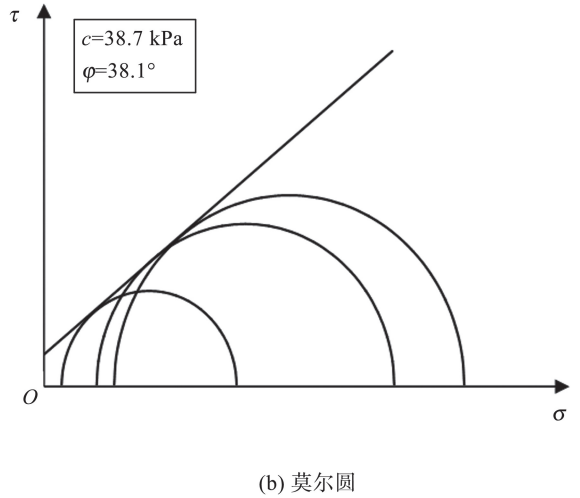
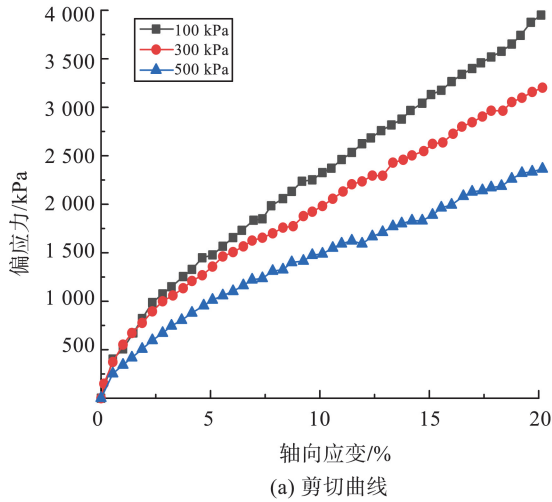


图5 轮胎格栅环向散体桩剪切曲线及莫尔圆
Fig.5 Shear curve and Mohr circle of tire grille circumferential loose pile

1.2 试验装置

试验模型箱长、宽、高分别为 200、200、100 cm,箱体周边设置 40 cm×20 cm×20 cm 的矩形钢块用于预防试验过程中的变形。试验材料均采用实际工程中的原状材料,弹性模量和材料密度相似比均为 1,模型几何相似比为 4;根据文献[18],设计碎石桩复合地基时,桩径一般为 30~120 cm,本研究桩径均小于 30 cm;为消除边界效应影响,桩体与箱壁的距离与桩径之比大于 3。模型试验的加载系统主要由荷载板、传感器、加载反力架、加载控制系统等组成,最大可以施加 500 kN 的轴向力,精度可达 0.01 kN,加载系统上的传感器与计算机直接相连,可以实时监测承载板上的轴向力及位移变化。

1.3 试验工况

试验包括不同加筋类型单桩载荷试验及不同垫层类型的复合地基载荷试验,试验过程中实时监测钢渣桩在受荷载作用时桩体的鼓胀变化规律,两组试验方案如表 2 所示,试验剖面简图如图 6 所示。

表2 模型试验加载方案
Table 2 Model test loading plan

试验编号	载荷试验类型	桩径/cm	加筋类型	垫层类型
1		20		
2	单桩 载荷 试验	20	土工格栅	
3		20	轮胎格栅	
4		15	轮胎格栅	
5		25	轮胎格栅	
6		20	轮胎格栅	
7	复合 地基 载荷 试验	20	轮胎格栅	碎石垫层
8		20	轮胎格栅	碎石轮胎垫层

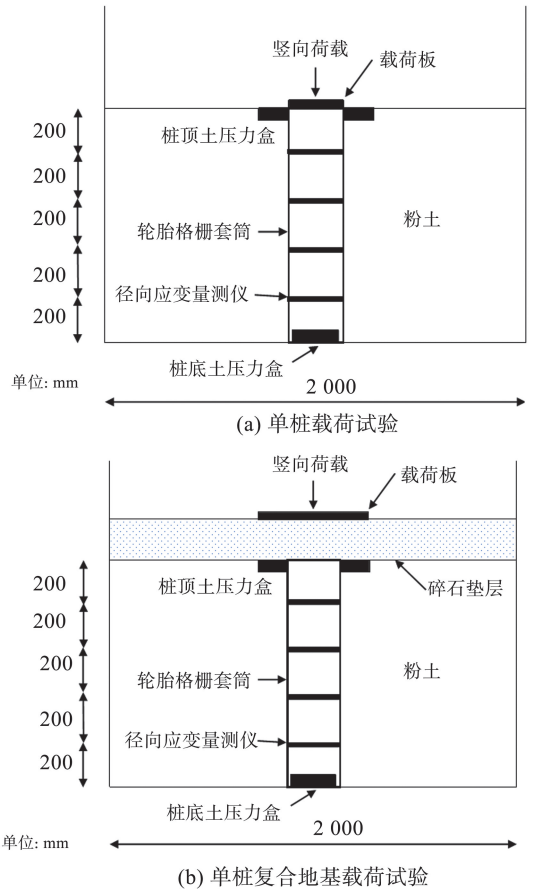


图6 试验剖面简图

Fig.6 Experimental section diagram

地基与桩体内部设置土压力盒与鼓胀量测试仪器监测土体与桩体应变变化规律,试验通过东华 DH3816N 静态应力应变采集仪采集数据。

1.4 试验步骤

1.4.1 地基填筑

称量所需土体,加水至最优含水率并搅拌均匀。地基模型分 5 层填筑,每层高度为 200 mm,填

筑过程中,各层使用夯板压实至预定高度,用环刀法检验每层地基表面的含水率。

1.4.2 废旧轮胎环向约束散体桩施工

废渣桩采用预埋钢管的施工方式,在软基填筑的过程中逐步投料、拔管成桩。在预定的桩位埋设空心铁管,地基填筑至 400 mm,加入钢渣并夯击密实,将铁管缓慢垂直上拔 200 mm,适度振捣后,继续填筑 200 mm 粉土,再投料拔管,直至废渣桩施工完成。对于碎石轮胎垫层,在碎石垫层铺设完成后,在上方放置 2 m×2 m 的轮胎格栅,并且进行适当压实使轮胎与碎石之间充分接触。

1.4.3 测量设备埋设

在每根废渣桩桩底埋设 1 个土压力盒,在复合地基桩顶沿废渣桩对称布置 4 个土压力盒。每组废旧轮胎-废渣桩分别在距桩顶 200、400、600、800 mm 处埋设 4 套散体材料桩鼓胀量测仪。

1.4.4 试验加载

参照文献[18],选择直径为 150、200、250 mm 的承载板进行单桩加载试验,选择直径为 600 mm 的承载板进行单桩复合地基荷载试验。采用分级加载方式,当 2 h 沉降量小于 0.1 mm 时进行下一级加载。对于单桩试验,每级荷载为 80 kPa;对于复合地基试验,由于其承载能力较小,每级荷载为 30 kPa。当某级荷载下桩顶的沉降量显著大于前一级或沉降值持续数小时仍不能稳定时,则认为此时地基发生破坏,停止加载,地基破坏时的上一级荷载称为极限承载力。

2 模型试验结果分析

2.1 废旧轮胎环向约束散体桩承载特性分析

2.1.1 加筋类型的影响

为研究不同加筋类型对废渣桩承载特性的影响,试验对比分析了土工格栅加筋、轮胎格栅加筋和普通废渣单桩的承载能力变化规律,绘制不同加筋类型荷载-位移关系曲线,如图 7 所示。

由图 7 可知,相比于无加筋废渣单桩,土工格栅加筋单桩和轮胎格栅加筋单桩的承载能力显著提高。具体表现为:废渣单桩的极限承载力为 200 kPa,土工格栅加筋单桩和废旧轮胎加筋单桩的极限承载力分别为 480、800 kPa,二者的极限承载力相比于无加筋条件下分别提高了 140% 和 300%。这表明加筋材料的加入有效提高了地基的极限承载力,并且轮胎格栅加筋后对地基承载能力的提升作用明显优于土工格栅。分析原因为:轮胎格栅内部存在高强钢丝结构,其自身刚度高于土工格栅,

对桩内钢渣提供更高的环箍力,限制桩内填料的水平位移;轮胎表面具有花纹、凹槽结构,具有高摩擦阻特性,轮胎格栅表面与填料之间的摩擦力明显高于土工格栅与填料间的摩擦力,格栅对填料具有更好的抵抗性,一定程度上提高了地基承载力。

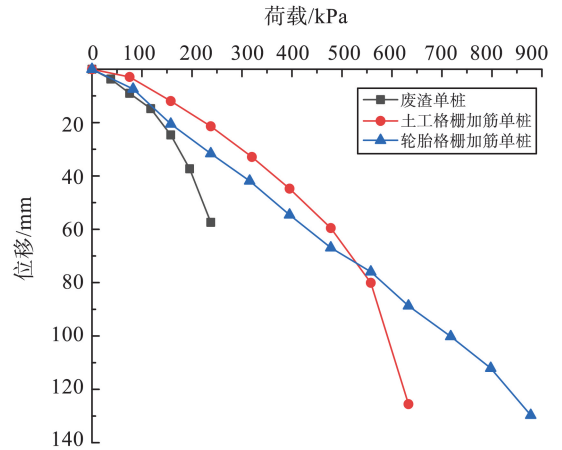


图 7 不同加筋类型的单桩试验荷载-位移关系图
Fig.7 Load-displacement curve of single pile tests with different reinforcement types

2.1.2 桩径的影响

为研究不同桩径对废渣桩承载特性的影响,试验对比分析了 15、20、25 cm 桩径的废渣桩承载能力变化规律,绘制了不同桩径轮胎格栅加筋单桩的荷载-位移关系曲线,如图 8 所示。

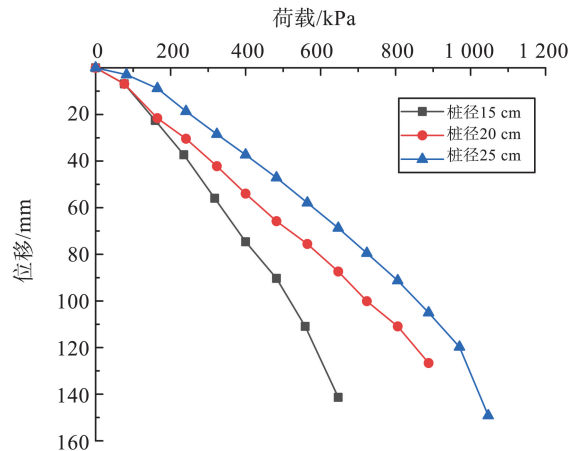


图 8 不同桩径下的轮胎格栅加筋单桩的荷载-位移关系图

Fig.8 Load-displacement curve of single pile tests with different pile diameters

由图 8 可知,轮胎格栅加筋单桩承载能力随桩径的增加而增大。桩径为 15 cm 时,单桩极限承载力为 560 kPa;桩径增加到 20 cm 时,单桩极限承载力为 800 kPa,相比于 15 cm 桩径时提高了 42.8%;桩径增加到 25 cm 时,单桩极限承载力为 960 kPa,相比于 15 cm 桩径时提高了 71.4%。分析原因为:随桩体直径扩大,桩体表面与土颗粒间

的接触面积增大,桩体与周围土颗粒之间的摩擦阻力随之增大,从而提高了轮胎格栅加筋单桩地基的承载能力。

2.1.3 垫层类型的影响

为研究不同垫层类型对单桩复合地基承载特性的影响,试验对比分析了无垫层、20 cm 碎石垫层与 20 cm 碎石轮胎垫层条件下加筋单桩的承载能力变化特点,绘制不同垫层类型单桩的荷载-位移关系曲线,如图 9 所示。

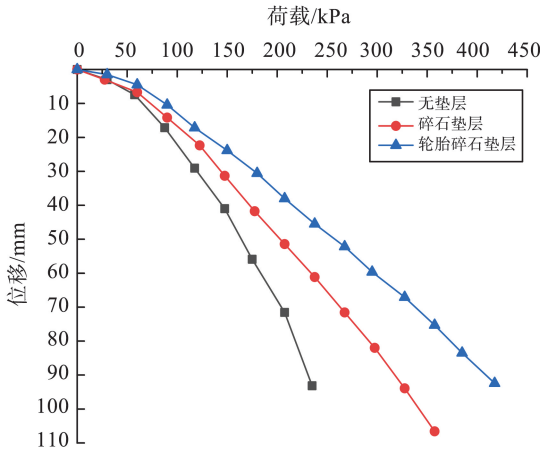


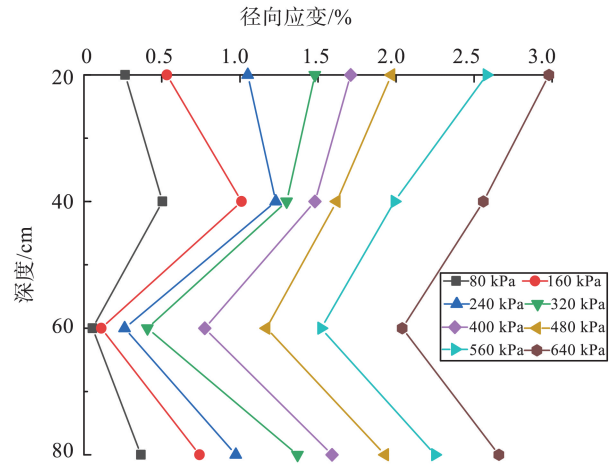
图9 铺设不同垫层的单桩复合地基荷载-位移关系图
Fig.9 Load-displacement curve of single pile composite foundation with different cushion layers

由图9可知,有垫层单桩复合地基比无垫层单桩复合地基的承载能力高,且轮胎碎石垫层单桩比碎石垫层单桩承载能力更优。其中,无垫层单桩复合地基的极限承载力为 187 kPa;碎石垫层单桩复合地基的极限承载力为 236 kPa,比无垫层单桩复合地基的极限承载力提高了 26.2%;轮胎碎石垫层单桩复合地基的极限承载力为 300 kPa,比无垫层单桩复合地基的极限承载力提高了60.4%。分析原因为:碎石垫层通过碎石的流动调整桩和土的受力分配,调节复合地基的变形,使垫层-复合地基共同有效地提高复合地基的承载力^[19];进一步加入轮胎后,轮胎表面花纹可增加土体与加筋材料之间的摩擦力与机械咬合力,通过与碎石垫层互相作用,充分调动了周围土体强度,提高了土体整体刚度,从而在一定程度上提高了地基承载力。

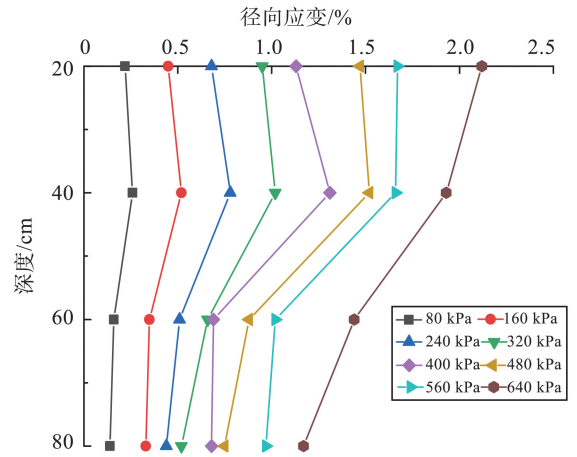
2.2 废旧轮胎环向约束散体桩鼓胀变形

2.2.1 加筋类型的影响

为研究不同加筋类型对桩体径向应变的影响,绘制不同加筋类型径向应变沿深度的关系曲线,如图 10 所示。



(a) 土工格栅加筋



(b) 轮胎格栅加筋

图10 不同加筋类型径向应变沿深度变化曲线
Fig.10 Variation of radial strain along depth for different reinforcement types

由图10可知,两种筋材加筋下桩体径向应变均随上覆荷载的增加而增大,轮胎格栅加筋下比土工格栅加筋的散体桩整体径向应变更小,并且桩体变形更加均匀。以 640 kPa 上覆荷载为例,土工格栅加筋的散体桩最大径向应变为 2.97%,而轮胎格栅加筋的散体桩最大径向应变为 2.12%。这是由于轮胎条带自身特性使得其抗拉性能优于土工格栅,并且在一定程度上提升了土体抗剪强度。

2.2.2 桩径对桩体径向应变的影响

为研究桩径变化对桩体径向应变的影响,绘制了不同桩径径向应变沿深度的变化曲线,如图 11 所示。

由图11可知,不同桩径下散体桩径向变形规律基本一致,散体桩最大应变随桩径的增大而逐渐减小。以 640 kPa 上覆荷载为例,桩径为 15 cm 时,轮胎格栅加筋的散体桩最大径向应变为 4.07%;桩径

为 20 cm 时,轮胎格栅加筋的散体桩最大径向应变为 2.12%;桩径增大至 25 cm 时,轮胎格栅加筋的散体桩最大径向应变为 1.75%。这是由于在相同上覆荷载作用下,桩径越大,桩体上部单位面积所承受的应力就越小,废渣桩整体刚度较高,抵抗变形和承载能力较强。

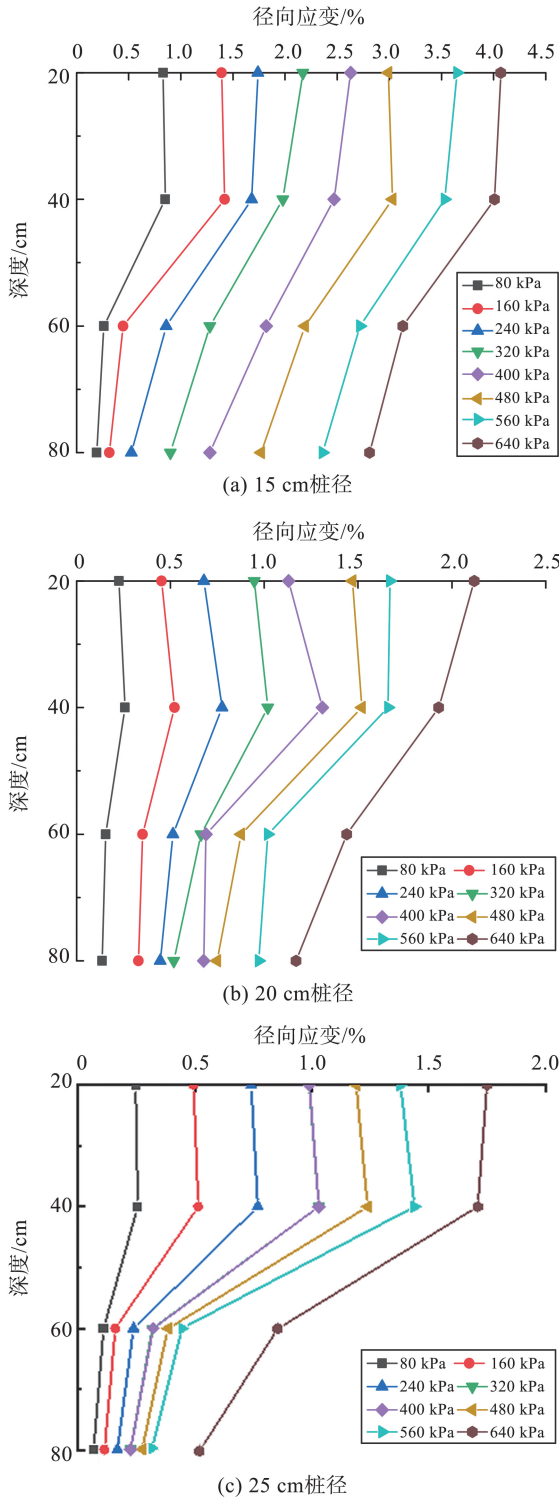


图 11 不同桩径径向应变沿深度的变化曲线
Fig.11 Variation of radial strain along depth for different pile diameters

2.2.3 垫层类型对桩体径向应变的影响

为研究不同垫层类型对桩体径向应变的影响,绘制了不同垫层类型径向应变沿深度的变化曲线,如图 12 所示。

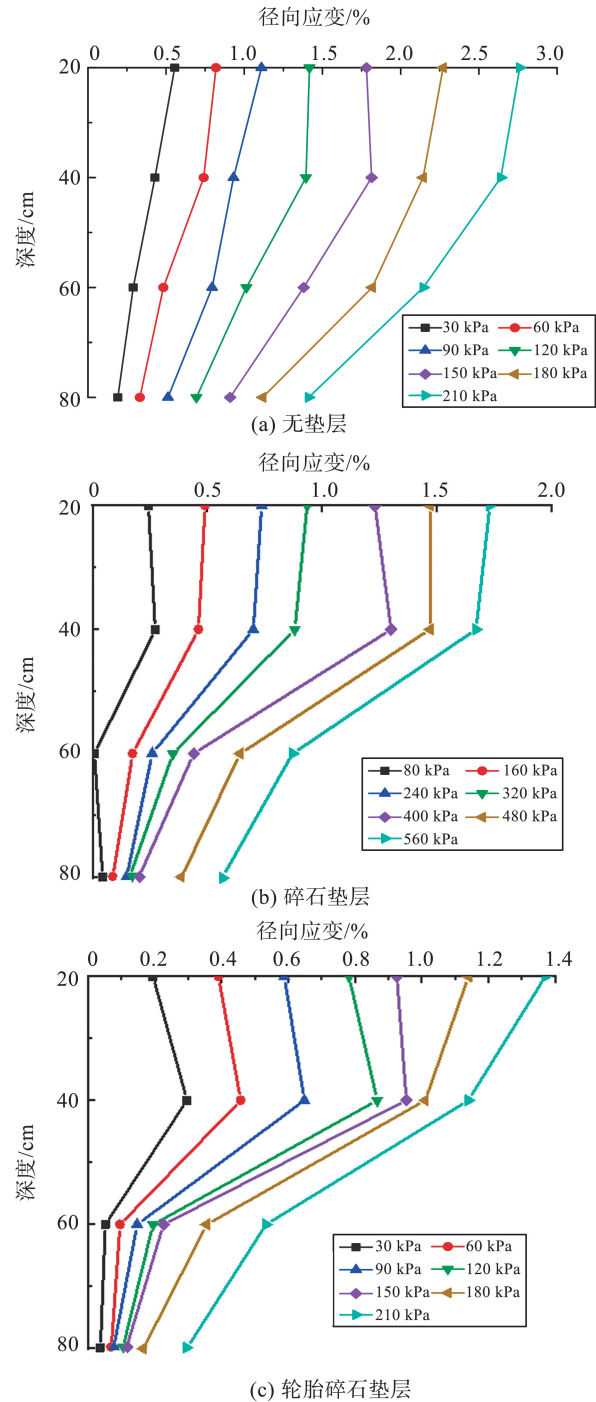


图 12 不同垫层类型径向应变沿深度的变化曲线
Fig.12 Variation of radial strain along depth for different types of cushion layers

由图 12 可知,不同垫层类型下散体桩径向变形规律基本一致,有垫层散体桩比无垫层散体桩的最大径向应变小,且轮胎碎石垫层的散体桩比碎石垫层散体桩抗变形能力强。以 210 kPa 上覆荷载为

例,无垫层散体桩的最大径向应变为 2.73%,碎石垫层散体桩的最大径向应变为 1.75%,轮胎碎石垫层散体桩的最大径向应变为 1.46%。这是由于轮胎格栅具有较高的抗拉性能,轮胎格栅与碎石、填土之间有较强的界面摩擦力,复合土体整体刚度增加,从而提高了复合地基的承载能力^[20]。

3 废旧轮胎格栅环向约束散体桩极限承载力计算模型

相比于传统加筋碎石桩,试验桩体的抗剪强度大且桩体全长设置轮胎格栅套筒,桩端为模型箱底部,废旧轮胎-废渣桩破坏模式为轮胎格栅套筒被拉断。根据试验桩体破坏形式,探究轮胎格栅套筒被拉断破坏模式下废旧轮胎-废渣桩的极限承载力。

3.1 单桩承载力计算模型构建

在废渣桩的外侧包裹一层轮胎格栅套筒,由于轮胎格栅套筒的包裹作用对桩体施加侧向约束力,限制桩体的鼓胀变形。取废旧轮胎-废渣桩的一半进行受力分析,其总体受力如图 13 所示。图 13 中 T 为轮胎格栅的抗拉力, R 为桩体的半径, θ 为拉力与坐标位置的夹角。

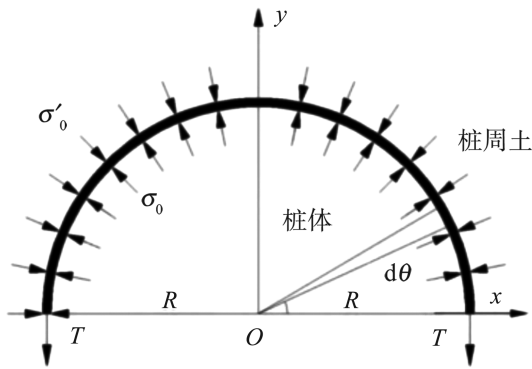


图 13 轮胎格栅套筒的受力图

Fig.13 Force diagram of tire grid sleeve

垂直于桩体的应力 σ_0 沿 y 轴方向上的合力 F_R 为

$$F_R = \int_0^\pi \sigma_0 R \sin \theta d\theta = 2R\sigma_0. \quad (1)$$

当达到极限平衡状态时,单桩径向轮胎格栅套筒所提供的极限抗拉力计算公式为

$$T = NF, \quad (2)$$

式中: N 为单位高度轮胎条带数量; F 为单根轮胎条带达到 10% 伸长率对应的平均拉伸力, kN。

当计算径向力小于该值时,可按废旧轮胎桩

进行承载力设计;当计算径向力超过该值时,则约束失效,承载力迅速降低至无约束散体桩承载水平。

3.2 无约束散体桩单桩承载力模型

假设未加轮胎格栅套筒时废渣桩的单桩极限承载力为 P_0 ,通过试验结果分析可得,无箍筋情况下废渣桩的单桩极限承载力与 R 、桩体的破坏长度 h 、桩体填充材料的内摩擦角 ψ_p 、桩体填料的黏聚力 c_p 、桩周土的内摩擦角 ψ_s 、桩周土重度 γ 有关,计算公式为

$$P_0 = -\frac{2}{R^2 A^2} \cot \varphi_p (1 + AR - e^{AR}) + 2K_p c_p \sqrt{K_s} + \frac{K_p K_s \gamma h}{2} + D_0. \quad (3)$$

3.3 有环向约束条件下散体桩单桩承载力模型

在上述模型的基础上,进一步考虑废旧轮胎格栅与土的界面摩阻效应计算公式为

$$P_{RB} = \left(\frac{L_r}{S} \right) \alpha_b \sigma_b B, \quad (4)$$

式中: S 为端阻结构的间距; α_b 为总面积中用以承受端阻部分的面积比例; σ_b 为由端阻结构提供的阻力; B 为横肋厚度,取 15 mm。

综合式(3)、(4)可得废旧轮胎格栅环向约束散体桩单桩承载力 P 计算公式为

$$P = P_0 + P_{RB}. \quad (5)$$

根据上述公式(4)、(5),计算得到不同桩径条件下的单桩承载力理论值,并与试验值比较,如表 3 所示。

表 3 废旧轮胎-废渣桩单桩极限承载计算结果

Table 3 Calculation results of ultimate bearing capacity

桩径/cm	试验值/kN	理论值/kN	误差/%
15	9.9	11.8	16.1
20	25.1	29.6	15.2
25	47.1	57.2	17.6

由表 3 可知,本研究计算的废旧轮胎-废渣桩单桩极限承载力的理论计算值比试验值略偏高,误差 < 20%。分析原因为试验中废渣填料压实度不足造成理论计算数据与试验数据有所偏差。

4 结论

为揭示废旧轮胎环向约束散体桩的承载特性,基于缩尺理论开展室内模型试验,研究不同加筋类型、桩径和垫层形式等因素对废旧轮胎散体桩承载特性及径向膨胀变形规律的影响,并提出不同破坏

模式下废旧轮胎环向约束散体桩极限承载力计算模型,得出以下结论。

(1)相比于无环向约束单桩,土工格栅加筋单桩与轮胎格栅加筋单桩的极限承载力分别提高140%和300%,轮胎格栅由于自身抗拉性能较好其径向应变也明显小于土工格栅。

(2)随桩径的增大,桩体与周围土颗粒之间的摩擦阻力随之增大,桩体抵抗变形的能力增强,从而提高了地基承载力并且减小了桩体的径向变形。

(3)有垫层单桩复合地基比无垫层单桩复合地基的承载能力更高。由于轮胎表面的高摩擦阻性,相比于碎石垫层,轮胎碎石垫层可以提高复合地基的整体受力能力,对地基承载能力的提高更明显,并且可以限制桩体的径向应变。

(4)基于不同的破坏模式,分别提出单桩承载力计算模型、无约束散体桩单桩承载力模型以及有环向约束条件下散体桩单桩承载力模型,并验证了其准确性。

参考文献:

- [1] GHAZAVI M, AFSHAR J N. Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, 38(38): 26-36.
- [2] OUYANG F, ZHANG J J, LIAOW M, et al. Characteristics of the stress and deformation of geosynthetic-encased stone column composite ground based on large-scale model tests[J]. *Geosynthetics International*, 2017, 24(3): 242-254.
- [3] 莫海钊. 悬浮筋箍碎石桩复合地基承载变形机理研究[D]. 广州: 广州大学, 2020: 56.
MO Haizhao. Study on bearing deformation mechanism of composite foundation with floating geosynthetic encased stone columns[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020: 56.
- [4] ALKHORSHID N R, ARAUJO G L S, PALMEIRA E M, et al. Large-scale load capacity tests on a geosynthetic encased column[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2019, 47(5): 632-641.
- [5] 闫力伟, 张建经, 王志佳, 等. 包裹碎石桩在粉质黏土地基中的承载特性研究[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(18): 7924-7934.
YAN Liwei, ZHANG Jianjing, WANG Zhijia, et al. Model test and numerical simulation study of silty clay ground reinforced by geosynthetic encased stone columns[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(18): 7924-7934.
- [6] THAKUR A, RAWAT S, GUPTA A K. Experimental and numerical modelling of group of geosynthetic-encased stone columns[J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2020, 6(1): 12.
- [7] HOSSEINPOUR I. Three-dimensional numerical analysis of embankment overlying geotextile-encased columns with granular platform[J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2024, 48(3): 1641-1653.
- [8] NAYAK S, BALAJI M, PREETHAM H K. A study on the behaviour of stone columns in a layered soil system[J]. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2020, 7(1): 85-102.
- [9] 李丽华, 崔飞龙, 肖衡林, 等. 轮胎与格室加筋路堤性能及承载力研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(1): 81-88.
LI Lihua, CUI Feilong, XIAO Henglin, et al. Performance and bearing capacity of embankments reinforced with waste tires and geocells[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(1): 81-88.
- [10] 袁雪峰. 基于TDA复合土的废旧轮胎条带加筋路堤承载特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2021: 1.
YUAN Xuefeng. Study on the bearing characteristics of reinforced embankment with scrap tire strips embedded in TDA composite soil[D]. Jinan: Shandong University, 2021: 1.
- [11] YADAV J S, TIWARI S K. Effect of waste rubber fibres on the geotechnical properties of clay stabilized with cement[J]. *Applied Clay Science*, 2017, 149: 97-110.
- [12] YADAV J S, TIWARI S K. The impact of end-of-life tires on the mechanical properties of fine-grained soil: a review[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2019, 21(2): 485-568.
- [13] 张林. 黑色污染绿处理[J]. *中国公路*, 2022(4): 34-35.
ZHANG Lin. Black pollution green treatment[J]. *China Highway*, 2022(4): 34-35.
- [14] 江健宏, 舒晓锐, 刘志鲲, 等. 废旧轮胎碎片(TDA)复合填料中竖向锚定板承载特性[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2023, 53(6): 92-99.
JIANG Jianhong, SHU Xiaorui, LIU Zhikun, et al. Bearing characteristics of vertical plate anchor in TDA-soil mixtures[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2023, 53(6): 92-99.