

文章编号:1007-9629(2024)05-0471-08

聚丙烯纤维增强橡胶砂固结不排水剪切试验

张季¹, 汪顺敏¹, 庄海洋^{1,*}, 陈佳², 蓝锦明¹

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西南昌 330013;

2. 南京工业大学 岩土工程研究所, 江苏南京 210037)

摘要: 鉴于橡胶砂作为回填材料时承载力低和变形量大的问题, 采用加入聚丙烯纤维(PPF)的方法提高橡胶砂的力学性能, 提出了聚丙烯纤维增强橡胶砂的半干拌式制备方法, 通过 48 组聚丙烯纤维增强橡胶砂、普通橡胶砂和纯砂试样的固结不排水剪切试验, 探究了聚丙烯纤维掺量和橡胶掺量等参数对聚丙烯纤维增强橡胶砂主要力学变形特征参数的影响。结果表明: 聚丙烯纤维对橡胶砂弹性模量的影响较小; 聚丙烯纤维增强橡胶砂具有先剪缩后剪胀破坏的特征, 其偏应力与轴向应变关系为应变硬化型; 聚丙烯纤维可有效提高橡胶砂的内摩擦角和黏聚力; 聚丙烯纤维增强橡胶砂破坏偏应力的提升效果十分显著, 最高可提高 3 倍。

关键词: 橡胶砂; 聚丙烯纤维; 固结不排水剪切试验; 破坏模式; 抗剪强度

中图分类号: TU411.7

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.05.012

Consolidated Undrained Shear Test of Polypropylene Fiber Reinforced Rubber Sand

ZHANG Ji¹, WANG Shunmin¹, ZHUANG Haiyang^{1,*}, CHEN Jia², LAN Jinming¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Considering the low bearing capacity and large deformation of rubber sand as backfill material, a method involving the addition of polypropylene fibers (PPF) to rubber sand was employed to enhance its mechanical performance. A semi-dry mixing method for preparing polypropylene PPF reinforced rubber sand was proposed. Through 48 sets of consolidated undrained shear tests on PPF reinforced rubber sand, ordinary rubber sand, and pure sand samples, the influence of parameters such as PPF content and rubber content on the main mechanical deformation characteristics of PPF reinforced rubber sand was investigated. The results indicate that PPF fibers have a relatively small impact on the elastic modulus of rubber sand. PPF reinforced rubber sand exhibits a characteristic failure pattern of initial shear contraction followed by shear dilation, with a strain-hardening relationship between shear stress and axial strain. PPF fibers effectively enhance the internal friction angle and cohesion of rubber sand. The improvement in the failure shear stress of PPF reinforced rubber sand is significant with a maximum increase of up to three times.

Key words: rubber sand; polypropylene fiber; consolidated undrained shear test; failure mode; shear strength

为促进废旧轮胎的回收再利用, 将其粉碎成橡胶颗粒, 并与砂土混合制成橡胶砂, 可应用于土木工程领域中。Edil 等^[1]通过大型直剪试验论证了橡胶砂应用于公路路堤等回填工程的可行性。随后, 一些学

收稿日期: 2023-02-28; 修订日期: 2023-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978333); 江苏省重点研发计划项目(BE2020711)

第一作者: 张季(1985—), 男, 江西丰城人, 华东交通大学副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: jizhang@ecjtu.edu.cn

通讯作者: 庄海洋(1978—), 男, 江苏宿迁人, 华东交通大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zhuang7802@163.com

者对橡胶砂作为轻质回填材料和减隔震材料等进行了可行性论述^[2-3]。庄海洋等^[4]和周恩全等^[5]对橡胶砂的动力学特性进行了研究,为橡胶砂的工程应用提供了参考。由于橡胶砂竖向压缩模量较小,在上部结构静力荷载作用下,会产生较大的压缩变形,若仅仅将橡胶颗粒和砂土简单混合往往难以满足工程需要。为解决该问题,一些学者探究了加筋技术在橡胶砂中的应用方法和效果。加筋方法主要有土工格室加筋^[6-7]、土工格栅加筋^[8-9]、土工袋加筋^[10-11]、土工网及土工织物加筋^[12]等。值得注意的是,上述方法虽然在一定程度上提高了橡胶砂的力学性能,但仍然存在某些潜在缺点,如筋体材料多按照一定方向和间隔进行布设,其与土之间可能存在软弱面,当土体被迫沿着筋土界面发生位移时,加筋土将可能产生较大变形甚至破坏。

为提高橡胶砂的力学性能,本文采用聚丙烯纤维(PPF)随机分布的加筋技术对散粒橡胶砂进行加固。采用半干拌式法制备了聚丙烯纤维增强橡胶砂,并基于固结不排水剪切试验,分析了橡胶掺量 w_R (质量分数,文中涉及的掺量等除特殊说明外均为质量分数)、聚丙烯纤维掺量 w_F 及有效围压 σ_3 对聚丙烯纤维增强橡胶砂主要力学变形特征参数的影响,揭示了聚丙烯纤维对橡胶砂力学特征的影响

规律。

1 试验

1.1 原材料

采用福建ISO标准砂,根据GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,采用筛析法对其进行颗粒分析,得到标准砂的粒径范围为75 μm ~2 mm,不均匀系数为5.86,曲率系数为0.55;采用比重瓶法对标准砂进行比重试验,得到砂颗粒比重为2.65。橡胶颗粒由废旧橡胶轮胎分解所得,其粒径范围为2~3 mm,比重为1.73。标准砂与橡胶颗粒的级配见表1。聚丙烯纤维的物理力学参数见表2。

表1 标准砂与橡胶颗粒的级配
Table 1 Gradations of standard sand and rubber particle

Sand		Rubber	
Sieve size/mm	Passing ratio (by mass)/%	Sieve size/mm	Passing ratio (by mass)/%
2	100	3	100
1	64	2.5	62
0.5	30	2	0
0.25	26		
0.1	9		
0.075	0		

表2 聚丙烯纤维的物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of PPF

Shape	Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Monofilament diameter/ μm	Average length/mm	Tensile strength/MPa	Elasticity modulus/GPa	Rupture elongation/%	Acid and alkali resistance
Bunch monofilament	0.91	33	12	469	4.24	28.4	High

1.2 半干拌式法制备试样

聚丙烯纤维增强橡胶砂试样由标准砂、橡胶颗粒以及聚丙烯纤维混合拌制而成。3种材料之间较大的比重差异使其很难在干燥状态下进行混合,为解决不同组分之间混合不均匀的问题,本文提出了一种纤维增强橡胶砂半干拌式法制备方法。

尺寸为 $\phi 50\times 100$ mm的实心圆柱形试样,其制备过程如下:(1)将标准砂在105 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温烘箱内烘24 h,聚丙烯纤维在60 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温烘箱内烘12 h;(2)称量所需标准砂、橡胶颗粒、聚丙烯纤维;(3)将称量好的标准砂和橡胶颗粒按试样初始含水率5%加水拌和均匀;(4)整平基材表面并均匀撒入聚丙烯纤维,用调匙将其戳入混合料中直至混合均匀;(5)在饱和器底部放置浸湿的滤纸和透水石,在内壁涂抹1层凡士林,将保鲜膜均匀贴于三瓣模具内壁;(6)将贴好保鲜膜的三瓣模具置于饱和器底座,称取1/4拌和均

匀的聚丙烯纤维增强橡胶砂,用小勺装入三瓣模具内;(7)用击实锤振捣压实至指定高度,分4层装满三瓣模具,整平试样顶部,盖上顶盖并旋紧螺母,放入养护箱备用;(8)养护完成后取出试样,静力缓慢推出,脱模。试样制备完成后根据GB/T 50123—2019标准进行饱和。

1.3 试验工况

采用英国GDS公司DYNTTS型循环三轴仪开展固结不排水剪切试验,试样的相对密实度为70%。相关研究表明^[13-15],随着橡胶掺量的增加,橡胶砂的可压缩性增大,抗剪强度明显降低。考虑到实际应用中沉降及承载力的要求,以橡胶颗粒和标准砂的总质量计,设置橡胶掺量 w_R 为0%、10%、20%、30%。考虑制样难度及试样均匀性,设置聚丙烯纤维掺量 w_F 为0%、0.6%、0.9%、1.2%、1.5%。 w_R 、 w_F 均为0%的试样为纯砂; $w_R\neq 0\%$ 、 $w_F=0\%$ 的试样为普通橡

胶砂.考虑纤维增强橡胶砂的应用场景(挡墙回填、地基处理和地下结构隔震等),设置有效围压 σ_3 为50、100、200 kPa,探究其对聚丙烯纤维增强橡胶砂力学特性的影响.

2 结果与讨论

2.1 弹性模量

聚丙烯纤维增强橡胶砂的弹性模量 E_0 见图1.由图1可见:聚丙烯纤维掺量在小应变条件下对橡

胶砂力学性能的影响不大;橡胶掺量是影响弹性模量的主要因素,弹性模量随着橡胶掺量的增大而减小.究其原因:弹性模量的测定处于小应变状态,在小应变条件下,低掺量聚丙烯纤维对于橡胶砂力学性能的影响很小;随着橡胶掺量的增加,聚丙烯纤维增强橡胶砂颗粒接触形式由以砂-砂颗粒之间的刚性接触为主过渡到以橡胶-橡胶颗粒之间的柔性接触为主,由此导致聚丙烯纤维增强橡胶砂弹性模量减小.

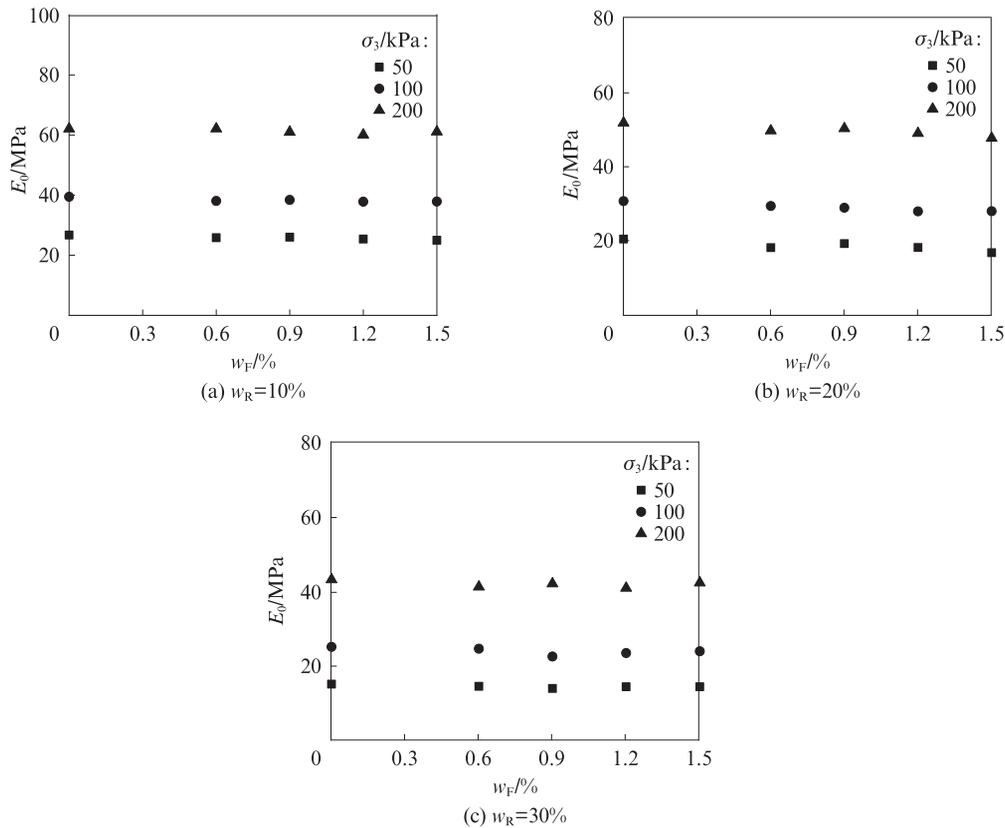


图1 聚丙烯纤维增强橡胶砂的弹性模量
Fig. 1 E_0 of PPF reinforced rubber sand

1963年,Janbu^[16]提出土的弹性模量 E_0 与围压 σ_3 有关,并给出经验公式:

$$E_0 = KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

式中: K 、 n 为经验常数; P_a 为标准大气压强,取101 kPa.

采用式(1)对不同工况下的聚丙烯纤维增强橡胶砂弹性模量试验结果进行并置拟合,拟合度 $R^2 \geq 0.98$,因此可认为以该经验公式计算纤维增强橡胶砂弹性模量合理可靠.聚丙烯纤维增强橡胶砂不同工况拟合参数建议值见表3.

2.2 剪胀(缩)特性

试样的剪胀(缩)特性与孔压系数 A 密切相关.

纯砂和聚丙烯纤维增强橡胶砂孔压系数 A 见图2(图中 ϵ_a 为轴向应变).由图2可知:(1)纯砂试样 $A < 1/3$,呈完全剪胀趋势;而剪胀初期聚丙烯纤维增强橡胶砂试样 $A > 1/3$,随着轴向应变的增大,孔压系数逐渐降低,直至 $A < 1/3$,剪切过程中表现出先剪缩后剪胀的特征.(2)随着橡胶掺量的增加,孔压系数曲线下降段下降速率降低,试样剪缩特征更加明显,尤其对于 $w_R < 30\%$ 的聚丙烯纤维增强橡胶砂试样,其已具有完全剪缩的趋势.(3)对于聚丙烯纤维增强橡胶砂的剪胀区段,当橡胶掺量较低($w_R = 10\%$)时,聚丙烯纤维会减弱试样的剪胀特性;当橡胶掺量较高($w_R \geq 20\%$)时,聚丙烯纤维会增强试样的剪胀特性.

这主要是因为:(1)与标准砂颗粒相比,橡胶颗

表3 聚丙烯纤维增强橡胶砂不同工况拟合参数建议值
Table 3 Suggested values of fitted parameters for PPF reinforced rubber sand under different conditions

$w_R/\%$	$w_F/\%$	E_0/MPa			K	n
		$\sigma_3=50\text{ kPa}$	$\sigma_3=100\text{ kPa}$	$\sigma_3=200\text{ kPa}$		
0	0	50.94	83.46	119.77	802.74	0.59
10	0	26.71	39.46	62.06	391.47	0.64
	0.6	25.85	38.06	62.11		
	0.9	26.01	38.41	61.00		
	1.2	25.40	37.81	60.06		
	1.5	24.98	37.86	61.07		
20	0	20.51	30.72	51.78	298.05	0.73
	0.6	18.20	29.42	49.68		
	0.9	19.30	28.94	50.26		
	1.2	18.26	27.96	48.98		
	1.5	16.85	28.00	47.69		
30	0	15.27	25.23	43.21	245.06	0.77
	0.6	14.68	24.73	41.25		
	0.9	14.11	22.65	42.11		
	1.2	14.57	23.57	40.93		
	1.5	14.55	24.04	42.35		

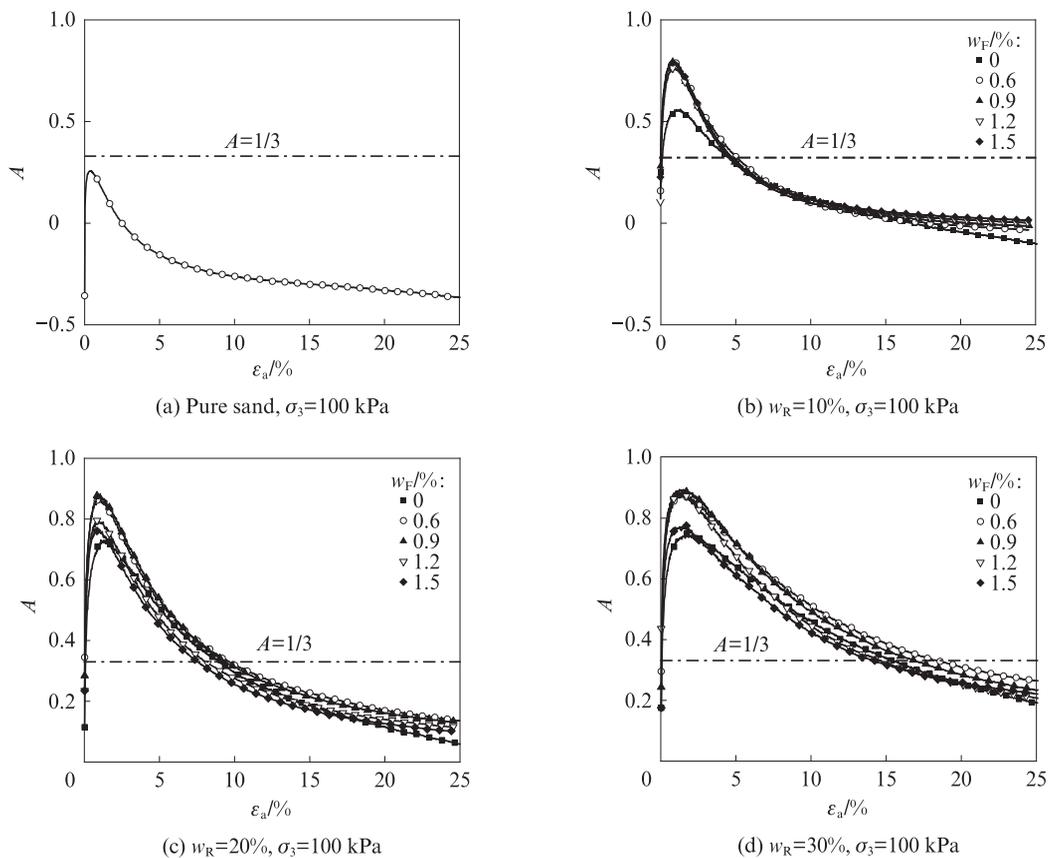


图2 纯砂和纤维增强橡胶砂的孔压系数
Fig. 2 A of pure sand and PPF reinforced rubber sand

粒有明显的可压缩性,使聚丙烯纤维增强橡胶砂试样在剪切初期因橡胶颗粒的体积压缩而表现出剪缩特性,且当橡胶掺量增大时,试样的剪缩趋势也将更

加显著。(2)在大应变剪胀区域,当橡胶掺量较低时,试样仍以聚丙烯纤维与标准砂颗粒之间的接触为主,聚丙烯纤维形成的空间网状结构可有效减小颗

粒的移动,聚丙烯纤维掺量越高,对剪胀趋势的削弱作用越显著;而当橡胶掺量较高时,聚丙烯纤维与橡胶的接触面积增多,橡胶颗粒的压缩受到聚丙烯纤维的限制,低聚丙烯纤维掺量试样的可压缩性更大,进入剪胀状态也就更晚,反之,聚丙烯纤维掺量越高则越早进入剪胀状态.

2.3 偏应力-轴向应变曲线

纯砂和聚丙烯纤维增强橡胶砂的偏压力-轴向应变($q-\epsilon_a$)曲线见图3.由图3可知:对于纯砂试样, $q-\epsilon_a$ 曲线呈现应变软化^[17]现象,且围压越大,这种应变软化现象越明显;对于聚丙烯纤维增强橡胶砂, $q-\epsilon_a$ 曲线呈现应变硬化^[17]现象,同时相同橡胶掺量

下,聚丙烯纤维掺量越大,聚丙烯纤维增强橡胶砂的偏应力幅值越高,应变硬化现象越明显.造成上述两类试样 $q-\epsilon_a$ 曲线显著差异的原因为:(1)橡胶颗粒的表面相较于标准砂颗粒更粗糙,它的加入增大了颗粒之间的咬合摩擦,提高了试样的承载力,且试样在剪切过程中,橡胶颗粒体积不断压缩,使得试样内部孔隙减小,密实程度增大,内部结构更加稳定,抑制了剪切面的形成;(2)聚丙烯纤维在试样中随机分布,使试样内部形成空间网状结构,纤维之间的搭接使颗粒间的滑移错动需同时克服纤维-砂土界面的摩擦阻力和纤维拉力,有利于提高试样的整体性和抗剪强度.

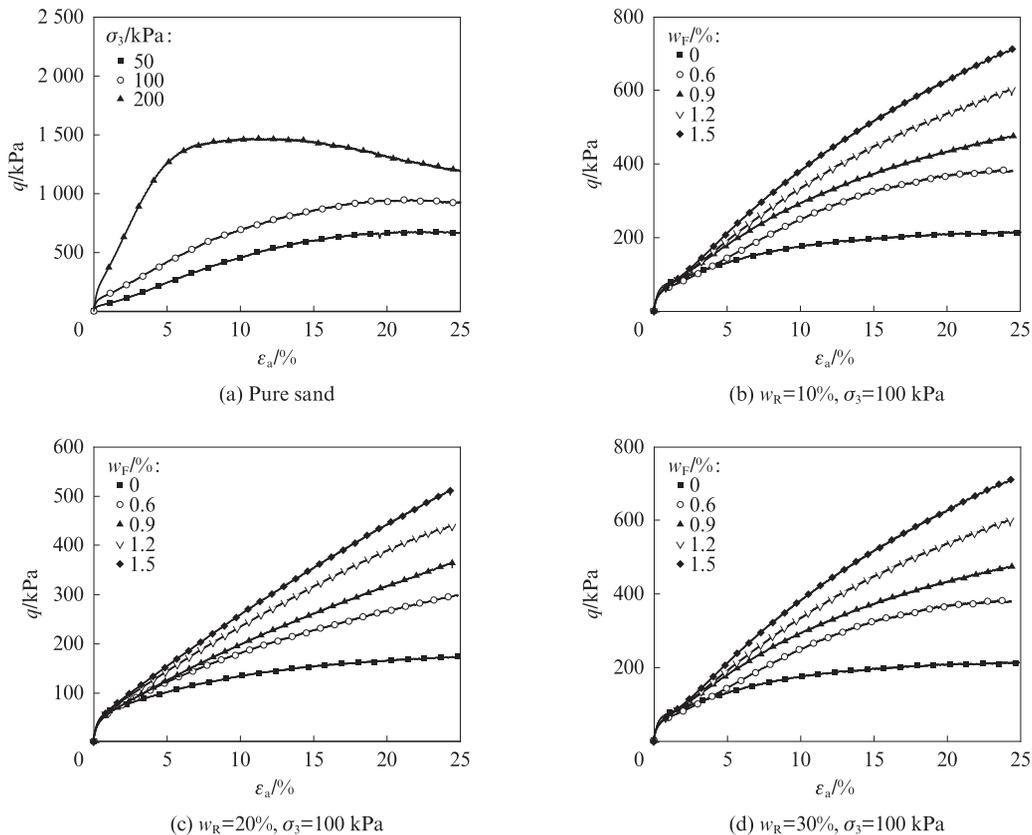


图3 纯砂和聚丙烯纤维增强橡胶砂的 $q-\epsilon_a$ 曲线

Fig. 3 $q-\epsilon_a$ curves of pure sand and PPF reinforced rubber sand

2.4 破坏偏应力分析

聚丙烯纤维增强橡胶砂的偏应力-轴向应变关系表现为应变硬化,考虑到聚丙烯纤维的掺入使聚丙烯纤维增强橡胶砂在大应变下仍表现出极强的抗剪切能力,设定聚丙烯纤维增强橡胶砂的破坏应变 $\epsilon_{a,t}=20\%$,破坏偏应力 q_t 取 $\epsilon_{a,t}$ 所对应的偏应力值.聚丙烯纤维增强橡胶砂的破坏偏应力见图4.由图4可见:聚丙烯纤维掺量对聚丙烯纤维增强橡胶砂破坏偏应力的提升效果十分显著,聚丙烯纤维增强橡胶砂的破坏偏应力从围压50 kPa到200 kPa提高幅度

最高分别为183%、214%和171%,从橡胶掺量10%到30%提高幅度最高分别为300%、270%和195%,且 w_F 在0%~1.5%范围内,聚丙烯纤维增强橡胶砂的破坏偏应力最高提高幅度可达3倍;相同围压及橡胶掺量下的 q_t-w_F 拟合曲线均为直线,二者为线性递增关系,在本试验聚丙烯纤维掺量范围内,试样的破坏偏应力随着聚丙烯纤维掺量的增大而线性增长.

q_t-w_F 拟合直线的斜率反映了聚丙烯纤维对试样破坏偏应力的增加效果.聚丙烯纤维增强橡胶砂 q_t-w_F 拟合直线的斜率见图5.由图5可见,在相同橡

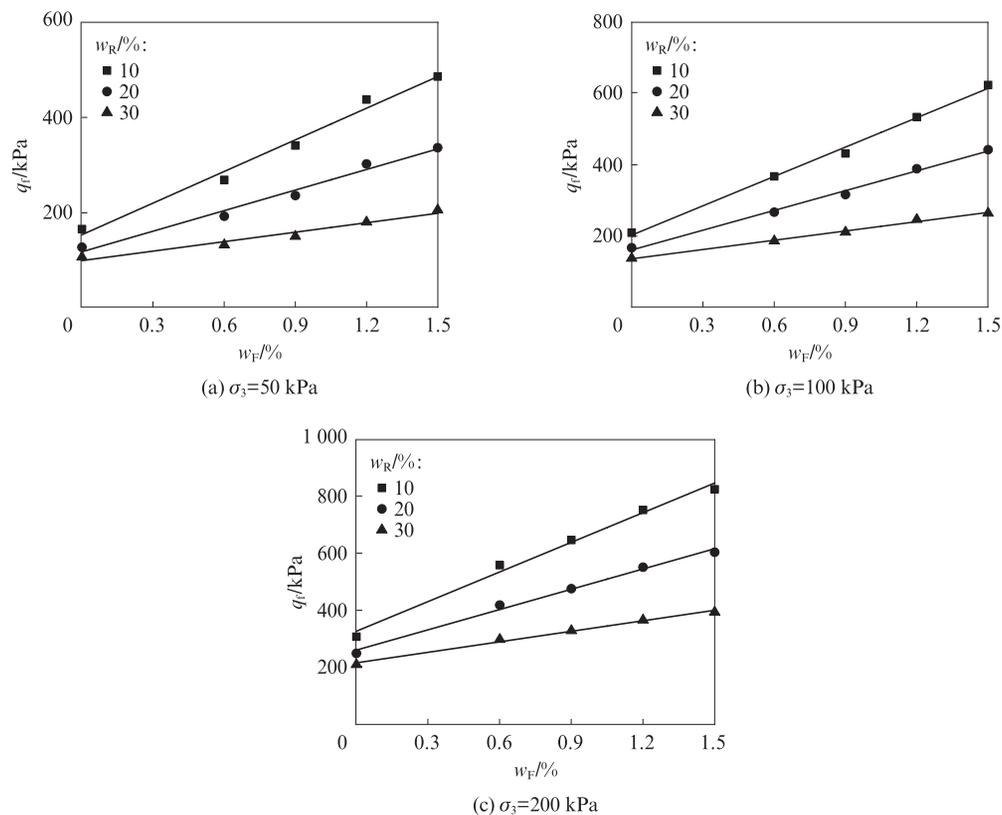


图4 聚丙烯纤维增强橡胶砂的破坏偏应力
Fig. 4 q_i of PPF reinforced rubber sand

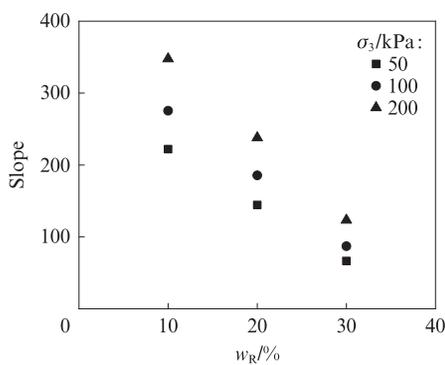


图5 q_i-w_F 拟合直线的斜率
Fig. 5 Slope of linearly fitted line of q_i-w_F

胶含量下,围压对聚丙烯纤维增强橡胶砂 q_i-w_F 拟合直线的斜率具有增大作用,即高围压下聚丙烯纤维的加筋效果更强。

纤维之所以能提高破坏偏应力,主要是因为纤维的加筋效果取决于纤维-砂土界面间的相互作用,该相互作用主要为黏结力与摩擦力.对于本文无黏性砂土而言,主要表现为摩擦力,其主要由界面法向应力和粗糙程度控制,围压越大,法向力越大,纤维加筋效果越强。

2.5 内摩擦角

聚丙烯纤维增强橡胶砂的总内摩擦角和有效内

摩擦角见图6.由图6可见:在相同橡胶掺量下,聚丙烯纤维的掺入能有效提高橡胶砂的总内摩擦角和有效内摩擦角,这是因为聚丙烯纤维约束了颗粒间的相对滑动,有利于提高颗粒间的滑动摩擦,且硬质砂颗粒与纤维间的互锁在一定程度上也提高了咬合摩擦;在相同聚丙烯纤维掺量下,橡胶掺量越高,总内摩擦角和有效内摩擦角越小,且橡胶掺量对于总内摩擦角的影响高于有效内摩擦角,这主要是因为橡胶颗粒的高变形能力利于橡胶与砂颗粒间的错动翻滚,显著降低了颗粒间的咬合摩擦。

2.6 黏聚力

聚丙烯纤维增强橡胶砂的总黏聚力和有效黏聚力见图7.由图7可见,聚丙烯纤维增强橡胶砂的总黏聚力和有效黏聚力总体上随着聚丙烯纤维掺量的增大呈指数型增长.这是因为当试样中加入聚丙烯纤维后,聚丙烯纤维与颗粒间的摩擦阻力将限制土体的侧向变形,这相当于在试样两侧增加了侧向压力.此时试样处于弹性平衡状态,但却未达到极限平衡状态.要使得试样达到极限平衡状态,需要继续增大轴向压力,由此便产生了黏聚力.普通橡胶砂也存在一定的总黏聚力,且随着橡胶含量的增大而有所减小.然而普通橡胶砂中的有效黏聚力比总黏聚力小得多,且几乎不受橡胶含量的影响.这是因为橡胶颗

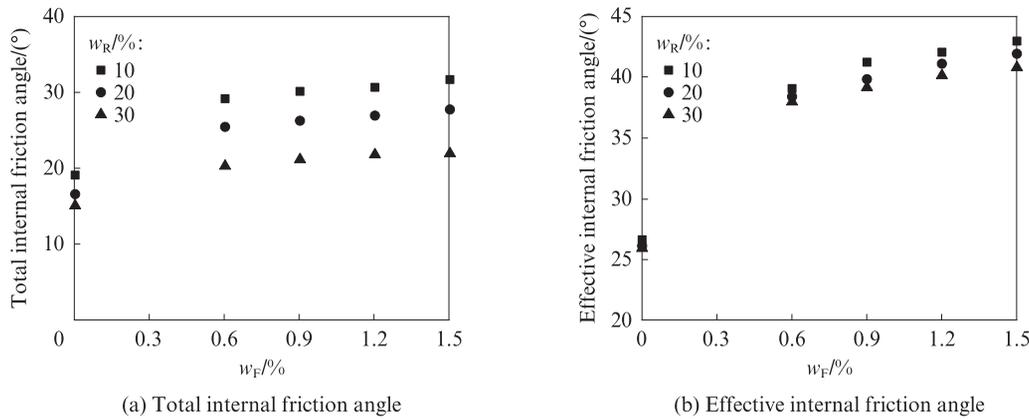


图6 聚丙烯纤维增强橡胶砂的总内摩擦角和有效内摩擦角

Fig. 6 Total internal friction angle and effective internal friction angle of PPF reinforced rubber sand

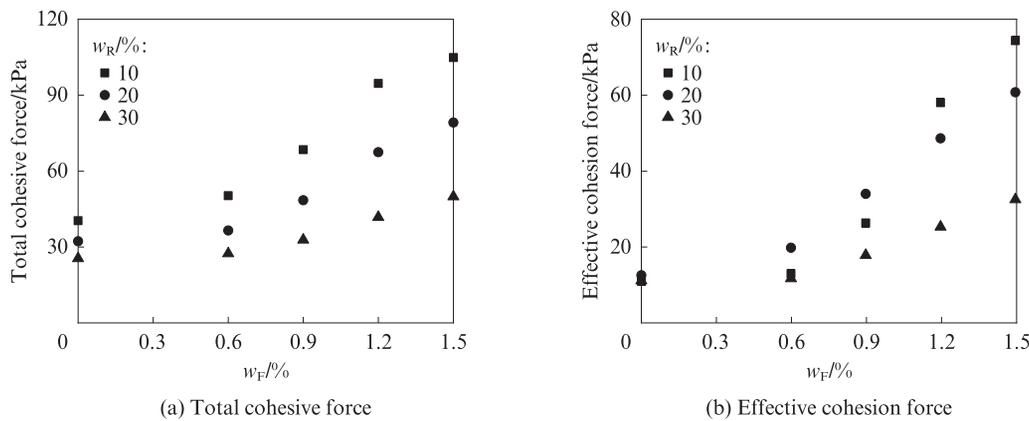


图7 聚丙烯纤维增强橡胶砂的总黏聚力和有效黏聚力

Fig. 7 Total cohesive force and effective cohesion force of of PPF reinforced rubber sand

粒的高变形能力可能会使较高密实度下的砂土出现一定的“假黏聚力”,且随着橡胶掺量的增大,“假黏聚力”将减小.

3 结论

(1)聚丙烯纤维掺量对橡胶砂弹性模量的影响较小;聚丙烯纤维增强橡胶砂的弹性模量随橡胶掺量的增大而减小.根据Janbu经验公式对弹性模量进行拟合,并给出了不同工况下经验常数 K 和 n 的建议值.

(2)当橡胶掺量较少时,聚丙烯纤维增强橡胶砂具有先剪缩后剪胀的变形特征;而高橡胶掺量的聚丙烯纤维增强橡胶砂具有完全剪缩的趋势.

(3)聚丙烯纤维增强橡胶砂的偏应力-轴向应变关系为应变硬化型,在橡胶掺量相同的条件下,聚丙烯纤维掺量越多,应变硬化现象越明显.聚丙烯纤维掺量对橡胶砂破坏偏应力的提升效果十分显著,二者为线性递增关系,聚丙烯纤维在 $0\% \sim 1.5\%$ 范围内,聚丙烯纤维增强橡胶砂的破坏偏应力最高提高幅度可达3倍.

(4)聚丙烯纤维可有效提高橡胶砂的内摩擦角,聚丙烯纤维掺量与橡胶砂黏聚力的关系呈指数型增长趋势.

参考文献:

[1] EDIL T B, BOSSCHER P J. Engineering properties of tire chips and soil mixtures[J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17(4): 453-464.

[2] ZHOU E Q, ZONG Z X. Applicability of waste rubber particles as buried pipe backfill material [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(5):1609-1620.

[3] 温学钧, 杨群. 粗废轮胎橡胶粒 SMA 混合料减振降噪路面研究[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(2):230-234.
WEN Xuejun, YANG Qun. Research on vibration and noise reduction pavement with coarse waste tire rubber granule SMA mixture[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(2): 230-234. (in Chinese)

[4] 庄海洋, 刘启菲, 吴琪, 等. 饱和橡胶颗粒-砂混合料的动力学特性[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3):597-605.
ZHUANG Haiyang, LIU Qifei, WU Qi, et al. Kinetic properties of saturated rubber particle-sand mixtures[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3):597-605. (in Chinese)

- [5] 周恩全, 张蒋浩, 崔磊, 等. 橡胶-粉土轻质混合土击实及动变形特性研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1242-1247.
ZHOU Enquan, ZHANG Jianghao, CUI Lei, et al. Compaction and dynamic deformation characteristics of rubber-powdered lightweight hybrid soil[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1242-1247. (in Chinese)
- [6] MEHRJARDI G T, TAFRESHI S N M, DAWSON A R. Combined use of geocell reinforcement and rubber-soil mixtures to improve performance of buried pipes [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2012, 34:116-130.
- [7] 刘方成, 吴孟桃, 陈巨龙, 等. 土工格室加筋对橡胶砂动力特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9):1616-1625.
LIU Fangcheng, WU Mengtao, CHEN Julong, et al. Experimental study on the effect of geocell reinforcement on the dynamic properties of rubber sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9):1616-1625. (in Chinese)
- [8] DHANYA J S, BOOMINATHAN A, BANERJEE S. Performance of geo-base isolation system with geogrid reinforcement[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(7):1-13.
- [9] 刘方成, 吴孟桃, 景立平. 加筋橡胶砂复合垫层隔震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(22):184-189.
LIU Fangcheng, WU Mengtao, JING Liping. Experimental study on the seismic isolation performance of reinforced rubber sand composite bedding [J]. Vibration and Shock, 2019, 38(22):184-189. (in Chinese)
- [10] 陈巨龙. 土工袋加筋橡胶砂动力特性的大型循环单剪试验研究[D]. 株洲:湖南工业大学, 2017.
CHEN Julong. Large-scale cyclic single-shear experimental study on the dynamic properties of geobag reinforced rubber sand[D]. Zhuzhou:Hunan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [11] 郑玉凤, 刘方成, 张友良. 土工袋加筋橡胶砂垫层隔震效应试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(3):73-83.
ZHENG Yufeng, LIU Fangcheng, ZHANG Youliang. Experimental study on seismic isolation effect of geotechnical bag reinforced rubber sand bedding[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 39(3):73-83. (in Chinese)
- [12] MANOHAR D R, ANBAZHAGAN P. Shear strength characteristics of geosynthetic reinforced rubber-sand mixtures[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(4):910-920.
- [13] NOORZAD R, RAVESHI M. Mechanical behavior of waste tire crumbs-sand mixtures determined by triaxial tests [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35:1793-1802.
- [14] 刘启菲, 庄海洋, 陈佳, 等. 废旧轮胎橡胶颗粒-砂混合料抗剪强度与破坏模式试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(10):1887-1895.
LIU Qifei, ZHUANG Haiyang, CHEN Jia, et al. Experimental study on shear strength and damage mode of waste tire rubber granule-sand mixture[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(10):1887-1895. (in Chinese)
- [15] LEE J S, DODDS J, SANTAMARINA J C. Behavior of rigid-soft particle mixtures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(2):179-184.
- [16] JANBU N. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests[C]// Proceedings of the 3rd European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Wiesbaden:[s. n.], 1963, 1:19-25.
- [17] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004:114-174.
LI Guangxin. Advanced geomechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004:114-174. (in Chinese)