

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230322003

# 橡胶砾石级配对筋土界面循环剪切特性的影响\*

刘文燕<sup>1</sup>, 钱振豪<sup>1</sup>, 刘飞禹<sup>1</sup>, 冯 恣<sup>2</sup>

(1. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444; 2. 上海浦东建筑设计研究院有限公司, 上海 201206)

**摘要:** 橡胶砾石作为基础填料, 具有低剪切刚度、高阻尼比的特性。为了研究土工格栅-橡胶砾石的循环剪切特性, 利用室内动态直剪仪进行了一系列直剪试验, 分析了4种橡胶砾石颗粒级配(级配不良GR1、GR4, 级配良好GR2、GR3)、3种橡胶配比(10%、30%、60%)、3种竖向应力(30、60、90 kPa)下土工格栅-橡胶砾石界面的剪应力-剪切位移关系和体变特性。试验结果表明: 在循环剪切过程中, 各橡胶砾石级配均表现出剪切硬化的特点, 但其抗剪强度与纯砾石相比均出现不同程度的降低; 橡胶砾石抗剪强度随着竖向应力的增加而增大, 4种级配土中GR2表现出最高的抗剪强度, 但相较于纯砾石其抗剪强度约下降9%; 界面最大竖向位移与竖向应力和橡胶含量成正相关, 2种连续级配土GR2和GR3的界面竖向位移较小; 在同一颗粒级配下, 剪切频率和剪切位移幅值越大, 混合土界面峰值剪应力越大; 筋土界面剪切刚度随着循环次数的增加而增大, 随着橡胶含量的增大而减小, 而阻尼比与剪切刚度呈相反的规律。

**关键词:** 筋土界面; 水平循环荷载; 橡胶砾石; 颗粒级配特征; 阻尼比

**中图分类号:** TU411.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1158-10

## Influence of Rubber Gravel Grade on the Cyclic Shear Properties of the Reinforced-Soil Interface

LIU Wenyan<sup>1</sup>, QIAN Zhenhao<sup>1</sup>, LIU Feiyu<sup>1</sup>, FENG Min<sup>2</sup>

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Shanghai Pudong Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

**Abstract:** Rubber gravel, used as base fill, exhibits low shear stiffness and a high damping ratio. To investigate the cyclic shear characteristics of geogrid-rubber gravel, a series of direct shear tests were conducted using a laboratory dynamic direct shear apparatus. The shear stress-shear displacement relationship and volumetric characteristics of the geogrid-rubber gravel interface were performed under four different rubber gravel particle grades (poorly graded GR1 and GR4, well graded GR2 and GR3), three rubber ratios (10%, 30% and 60%) and three vertical stresses (30 kPa, 60 kPa and 90 kPa). Results revealed that all rubber gravel grades exhibited shear hardening during cyclic shear, but their shear strength decreased to varying degrees compared to pure gravel. Additionally, the shear strength of the rubber gravel increased with increasing vertical stress. Among the four grades, GR2 showed the highest shear strength, though it was still approximately 9% lower than that of pure gravel. The maxi-

\* 收稿日期: 2023-03-22; 修回日期: 2023-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078285; 52378355)资助

作者简介: 刘文燕(1973—), 女, 讲师, 硕导, 博士。主要从事防灾减灾工程方面的研究。E-mail: gymdg@163.com

通信作者: 刘飞禹(1976—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事土动力学方面的研究。E-mail: lfyju@shu.edu.cn

mum vertical displacement at the interface was positively correlated with both vertical stress and the rubber content, while the continuously graded soils GR2 and GR3 exhibited smaller vertical displacements. Under the same particle grade, higher shear frequency and displacement amplitude led to greater peak shear stress at the mixed soil interface. Furthermore, while the shear stiffness of the reinforcement-soil interface increased with the number of cycles, it decreased as rubber content increased. In contrast, the damping ratio exhibited an inverse relationship with shear stiffness.

**Keywords:** reinforcement-soil interface; horizontal cyclic loading; rubber gravel; particle gradation characteristics; damping ratio

## 0 引言

我国社会经济快速发展的同时,汽车行业也在飞速发展,废旧轮胎是汽车行业产生的一大废弃物。我国较低的轮胎回收率造成大量的废弃橡胶轮胎不能得到有效的处理,不仅会造成资源的浪费,还会对生态系统造成不可逆转的损伤<sup>[1]</sup>。近年来,利用废旧轮胎制成的橡胶颗粒已经在岩土工程领域得到广泛的应用。橡胶颗粒与常见的岩土材料混合后形成的新型材料,具有质量轻、阻尼高、弹性大等特点,被广泛应用于公路路基、边坡加固、挡土墙等工程领域<sup>[2-4]</sup>。对于这种二元混合材料的物理机械性能的研究,是目前国内外关注的热点。

目前国内外的研究主要集中在橡胶颗粒与砂或砾石形成的橡胶砂(SRM)、橡胶砾石(GRM)混合土。在静力方面,国内外研究人员主要探究了橡胶含量、粒径比、颗粒级配、围压、试验排水条件等因素对橡胶混合土力学特性和剪切特性的影响。J.G.Zormerg等<sup>[5]</sup>、G.V.Rao等<sup>[6]</sup>通过三轴试验发现加入一定量的橡胶颗粒可以提高橡胶砂混合土的抗剪强度。李丽华等<sup>[7]</sup>开展了一系列橡胶砂抗剪性能试验,发现混合土的抗剪强度、内摩擦角随着橡胶碎片含量的增加而增加。刘方成等<sup>[8]</sup>分析了不同配比对橡胶砂应力-应变特性、体变特性的影响,发现随着橡胶颗粒含量的增加,橡胶砂模量降低。P.Ambarakond等<sup>[9]</sup>、M.Saberian等<sup>[10]</sup>研究了砾石土与橡胶颗粒混合后的物理力学特性,发现掺入橡胶颗粒后可以有效降低混合材料的密度,同时也能够满足基层骨料所需的抗剪强度。在动力方面,庄海洋等<sup>[11]</sup>对橡胶砂混合料进行了循环三轴试验,发现随着橡胶含量的增大,橡

胶砂混合料破坏振次呈先减小后增大的趋势。刘启菲等<sup>[12]</sup>通过固结不排水三轴试验,发现随橡胶含量的增加,混合料的破坏模式出由部分软化-剪胀向完全硬化-剪缩转变。M.Ghazavi等<sup>[13]</sup>从实际工程出发,研究了均匀混合和分层橡胶砂的动力特性,发现均匀混合后的橡胶砂更能够发挥橡胶颗粒轻质高弹的特性。对于颗粒粒径更大的橡胶砾石混合物,A.Tasalloti等<sup>[14]</sup>、K.Senetakis等<sup>[15]</sup>分别研究了橡胶含量和橡胶颗粒粒径对橡胶砾石混合物动力特性的影响,发现级配不良的砾石掺入橡胶颗粒后,混合物整体具有更加优异的能量耗散性能。

土工合成材料可以改善散体颗粒材料的抗剪强度,在土木工程领域应用广泛。路遥等<sup>[16]</sup>通过格栅-砂土的拉拔试验分析格栅形式对筋土界面的剪切特性。N.Madani等<sup>[17]</sup>对土工织物-橡胶砂进行了循环直剪试验,发现橡胶砂在循环过程中最大剪切应力降低了50%。F.M.Makkar等<sup>[18]</sup>通过大型直剪试验研究了砂土和三维立体网格的相互作用,发现立体网格在剪切过程中更能够发挥颗粒与土工格栅之间的咬合作用。刘飞禹等<sup>[19-20]</sup>、J.Wang等<sup>[21]</sup>研究了颗粒粒径、颗粒形状、等因素在循环剪切作用下筋-土界面的强度特征和体积变化。D.R.Manohar等<sup>[22]</sup>通过不固结不排水试验,研究了不同土工合成材料、不同材料布置层数和方式对橡胶砂抗剪强度的增强作用。F.Y.Liu等<sup>[23-24]</sup>通过大型直剪仪研究了橡胶砂筋土界面剪切特性,发现在橡胶含量相同的情况下,橡胶颗粒与砂粒越接近,混合料的抗剪强度越低。

综上所述,现研究主要侧重于静动力条件下橡胶砂相关的物理、机械性能,分析橡胶含量、粒径比、相对密度等因素对于其抗剪强度的影响,在橡胶砾石加筋界面循环抗剪强度特征研究较少,且少

有考虑橡胶混合土级配的影响。本文利用动态直剪仪,对土工格栅加筋的橡胶砾石混合土进行试验研究,分析剪切过程中筋土界面剪切应力、竖向位移等的变化规律,了解动态荷载下筋土界面相互作用机理。

## 1 试验材料及方案

### 1.1 试验材料

试验材料为橡胶砾石混合土,各参数见表1。砾石采用道路路基中常见的角状砾石,橡胶颗粒为废旧轮胎切割制作而成。为了研究颗粒级配对橡胶混合土体界面抗剪强度的影响,将橡胶颗粒分别通过孔径为0.5、1.0、2.0、4.75、6.0、8.0 mm的筛子,以此得到不同粒径范围的橡胶颗粒。将筛分过的颗粒以图1所示的级配曲线进行混合后得到一种砾石试样和四种橡胶试样,分别为G(6~8 mm)、R1(0.5~2 mm)、R2(0.5~6 mm)、R3(0.5~8 mm)、R4(6~8 mm)。砾石试样与橡胶试样混合形成不同的橡胶砾石混合土,编号分别为GR1、GR2、GR3、GR4。试验所需材料如图2所示,其中加筋材料为双向聚丙烯土工格栅,具体参数见表2。

表1 砾石和橡胶颗粒各项物理指标

Table 1 Physical properties of gravel and rubber granules

试验材料	相对密度 $G_s$	平均粒径 $D_{50}/\text{mm}$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$
G	2.64	7.0	1.16	0.98
R1	1.1	1.1	1.94	1.04
R2	1.1	3.1	5.27	1.06
R3	1.1	5.2	5.8	1.08
R4	1.1	7.0	1.16	0.98

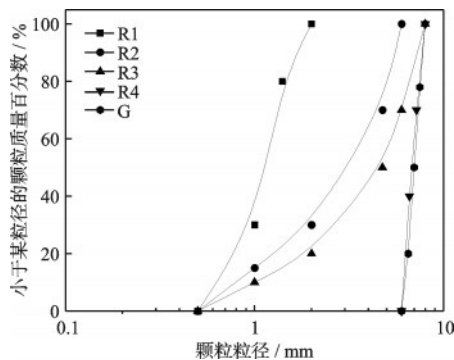


图1 砾石和橡胶颗粒级配曲线

Fig.1 Gradation curves of gravel and rubber particles

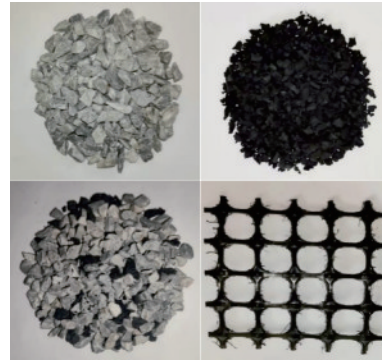


图2 试验材料

Fig.2 Test Materials

表2 土工格栅物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical properties of geogrid

格栅种类	单位面积质量/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	边长/mm	极限延伸率/%		极限抗拉强度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	
			纵向	横向	纵向	横向
聚丙烯土工格栅	330	35×35	9.8	9.9	45.8	46.3

### 1.2 试验仪器和方案

试验所用设备为电液伺服动态直剪仪,该设备主要由双向位移传感器、双向作动器以及上下剪切盒组成,上剪切盒的内部尺寸(长×宽×高)为305 mm×305 mm×150 mm,下剪切盒的内部尺寸(长×宽×高)为405 mm×305 mm×150 mm,设备水平作动器最大输出试验力为35 kN,垂直作动器最大输出试验力为60 kN,试验设备如图3(a)所示。在水平循环剪切过程中,仪器剪切路径如图3(b)所示,按照①-②-③-④的顺序为一个周期,循环次数为100次,加载波形为正弦波。

将筛分后的砾石和橡胶颗粒试样按体积比均匀混合,对不同橡胶砾石混合土根据相同相对密度来控制装填密度,限于文章篇幅,表3和图4分别给出了GR2试样在不同橡胶含量下的密度特性和混合后试样的颗粒级配。试验准备阶段采用分层压实法控制剪切盒所需的填料质量,将混合后的橡胶砾石混合土按照每层30 mm(共10层)装入剪切盒内铺平,用击实锤击实,同时将土工格栅布置在剪切盒下盒表面,并用螺栓和夹具固定住土工格栅。本试验主要考虑不同颗粒级配、橡胶含量、竖向应力对土工格栅界面剪切的影响,具体试验方案见表4。

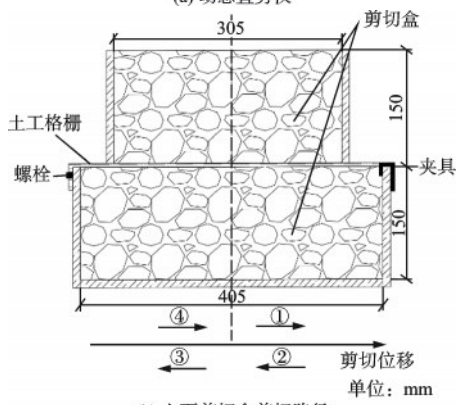
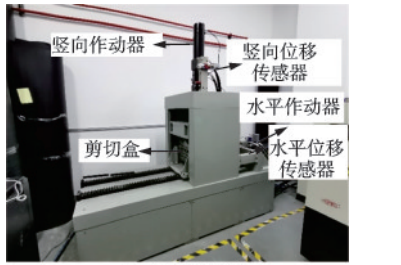


图3 动态直剪仪装置

Fig.3 Dynamic direct shear test apparatus

表3 不同橡胶含量下GR2试样的密度特性

Table 3 Density properties of GR2 specimens with different rubber contents

橡胶含量 $x/\%$	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	最小干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	相对密实度 $Dr$	装样密度 $/(g \cdot cm^{-3})$
0	1.75	1.57	0.7	1.69
10	1.61	1.41	0.7	1.56
30	1.46	1.27	0.7	1.39
60	1.17	0.90	0.7	1.08

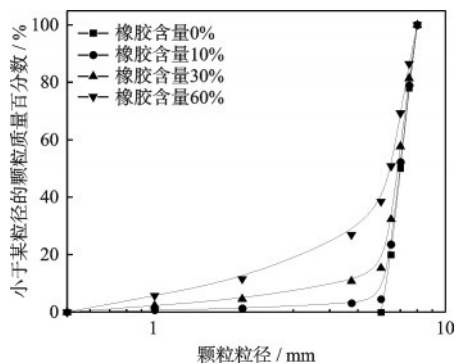


图4 橡胶砾石混合土颗粒级配曲线

Fig.4 Gradation curves of rubber gravel particles

表4 试验方案

Table 4 Testing program

级配类型	橡胶含量 $x/\%$	剪切频率 $f/Hz$	剪切位移幅值 $A_w/mm$	竖向应力 $\sigma/kPa$
G	—	0.05	3	30, 60, 90
GR1-GR4	10, 30, 60	0.05	3	30, 60, 90
GR1-GR4	10	0.05, 0.1, 0.5	3	60
GR1-GR4	10	0.05	1, 3, 6, 9	60

## 2 试验结果分析

### 2.1 颗粒级配对界面剪切特性的影响

图5为10%橡胶含量、60 kPa竖向应力时,土工格栅-橡胶砾石在不同颗粒级配界面下滞回曲线。定义一个滞回圈中界面处最大剪应力 and 最小剪应力绝对值的平均值为该滞回圈的界面平均剪应力峰值  $\tau$ 。由图可知,随着循环次数的增加,格栅-橡胶砾石界面的剪切应力-剪切位移呈现出相似的规律,各滞回圈较为重合,各个滞回圈中的平均剪应力峰值随循环次数的增加而增大,均表现出剪切硬化的特点。在第1~100个滞回圈中,4种不同颗粒级配下滞回圈最大剪应力峰值分别为58.98、63.86、61.81、58.80 kPa。这是因为在循环剪切过程中,颗粒之间相互运动重新排列,使得界面处颗粒排列更加紧密,颗粒之间摩擦增大,咬合作用更强;同时土工格栅的纵横肋增加了颗粒之间的摩擦,限制了散体材料的扩张变形,从而使筋土界面处剪切应力的提高,表现出土体循环剪切硬化的特点。

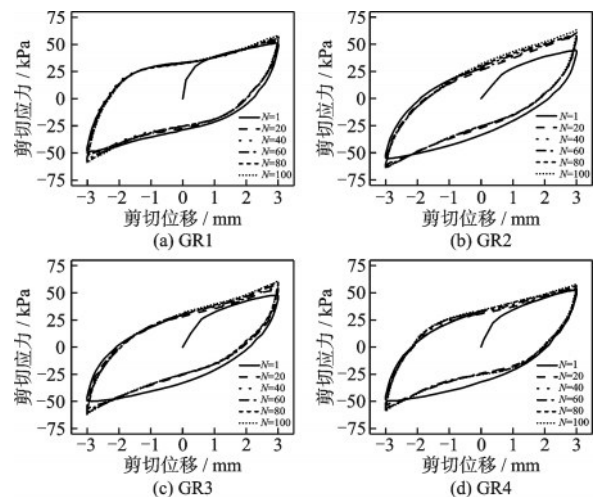


图5 不同颗粒级配下界面剪切应力-剪切位移关系曲线  
Fig.5 Interfacial shear stress-shear displacement relationship curves for different particle grades

图6为10%橡胶含量下不同颗粒级配和循环次数下界面竖向位移的变化曲线。由于在剪切过程中剪切面保持不变,因此竖向位移的变化即可表示界面体积变化,规定竖向位移为正值表示试样剪缩,负值表示试样剪胀。由图可知,在不同颗粒级配下,各试样界面总体呈剪缩现象。从图6(e)可以看出,在循环剪切初期,竖向位移增长速度较快,界

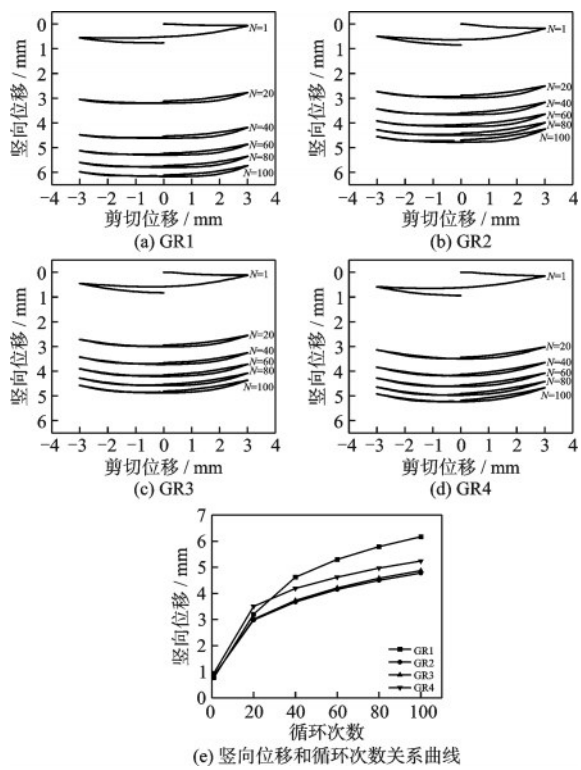


图6 不同颗粒级配下界面竖向位移-剪切位移关系曲线  
Fig.6 Interface vertical displacement-shear displacement relationship curves for different particle grades

面处杂乱的颗粒随着剪切方向定向排列, 体积收缩; 随着循环次数的增加, 竖向位移增加速率逐渐减小, 界面剪缩和剪胀现象交替出现, 竖向位移曲线在循环剪切后期趋于重叠, 混凝土整体竖向位移达到稳定状态。在4种级配混凝土中, GR1界面处剪缩量增加速度较快, 在界面经历100次循环后, 界面剪缩量明显大于其他三种级配混凝土。各个不同颗粒级配下的最终剪缩量,  $GR1 > GR4 > GR3 > GR2$ , 分别为6.17、5.24、4.87、4.78 mm。在循环剪切的过程中, 小颗粒经历来回振动分散在大颗粒间的孔隙中, 使得级配良好的GR2混凝土界面剪缩量最小。

## 2.2 橡胶含量对界面剪切特性的影响

图7为不同颗粒级配下界面峰值剪应力随着橡胶含量变化的关系曲线。由图可知, 4种颗粒级配的橡胶砾石界面剪切强度均低于纯砾石, 并且随着橡胶含量的增大而减小。在同一颗粒级配下, 界面平均峰值剪应力均随着竖向应力的增大而增大。在竖向应力为90 kPa、橡胶含量为60%的情况下, 相较于纯砾石, 两种级配良好的混凝土GR2、GR3界面峰值剪应力下降了41.82%、43.99%, 而级配不

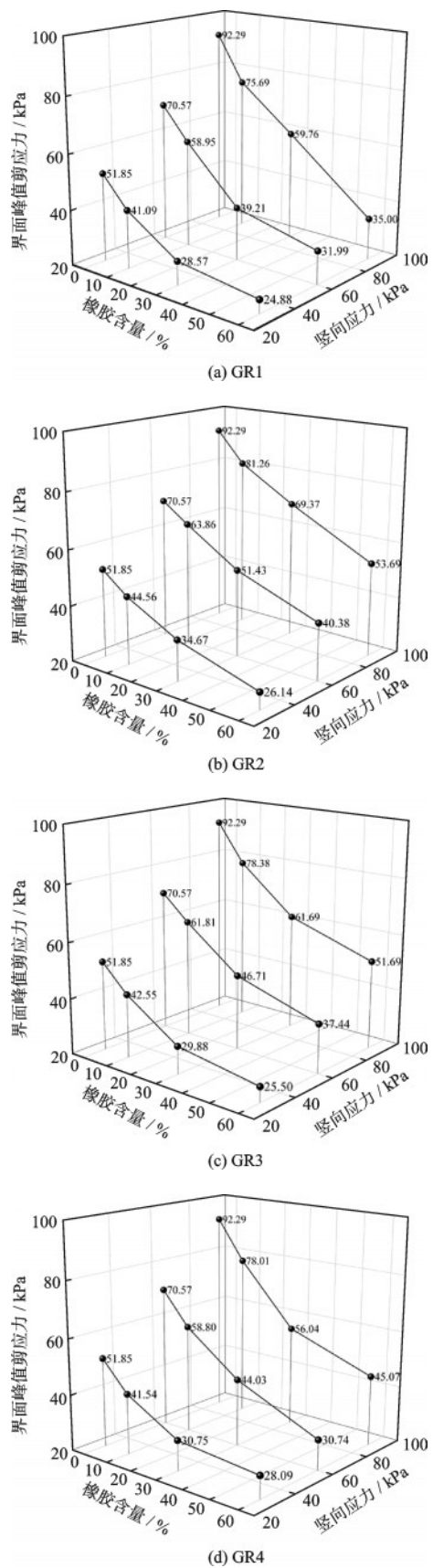


图7 不同颗粒级配下界面峰值剪应力-橡胶含量关系曲线  
Fig.7 Interfacial peak shear stress-rubber content relationship curves for different particle grades

良的混合土 GR1、GR4 则为 62.07%、51.16%。GR2 界面相较于其他三种颗粒级配界面,表现出最高的抗剪强度。

将土工格栅-橡胶砾石界面峰值剪应力进行线性拟合后,计算得到的界面摩擦角汇总于图 8。由图可知,4 种颗粒级配下橡胶砾石混合土的界面摩擦角均低于纯砾石的界面摩擦角,并且随着橡胶含量的增加而降低。这可能是因为混合土 GR2 中砾石颗粒与橡胶颗粒共同组成良好的连续级配,两种颗粒处于二元混合物中的非漂浮状态,在该状态下橡胶砾石混合物中的孔隙被小的橡胶颗粒填充但不能分离大的砾石颗粒,在此状态下获得了微粒的最佳百分比,二元混合物中的空隙最小,密实度最高<sup>[25]</sup>,颗粒之间的咬合作用最强,因而界面摩擦角最高。当橡胶颗粒粒径与砾石颗粒粒径越接近,橡胶颗粒对土体中原砾石-砾石接触的削弱作用越明显,表现出混合土的界面摩擦角随橡胶颗粒粒径的增大而衰减。随着橡胶含量的不断增加,原受力骨架由砾石骨架逐渐向橡胶骨架转变,砾石之间的接触面积减少,橡胶-橡胶、橡胶-砾石接触代替砾石-砾石接触,因此混合土界面摩擦角随着橡胶含量的增加快速下降。

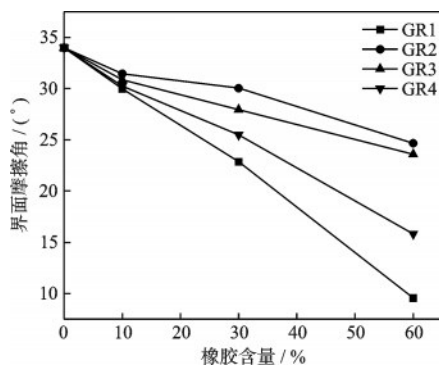


图 8 筋土界面摩擦角随橡胶含量的变化规律

Fig.8 Variation of friction angle with rubber content at reinforcement-soil interface

表 5 为不同颗粒级配下土工格栅-橡胶砾石的最终剪缩量。由表可知,混合土竖向位移随着竖向应力和橡胶含量的增加而增大。橡胶含量为 60% 时,混合土竖向位移的增长速率相较于低橡胶含量下有明显降低,因为高橡胶含量下,橡胶颗粒的数量明显大于砾石颗粒,而橡胶具有较大弹性以及不可压缩性,橡胶颗粒之间相互挤压变形产生一定量的弹塑性变形到一定程度而不再增加,使得其竖向

表 5 不同颗粒级配下混合土最终剪缩量

Table 5 Final shear displacement of the interface at different particle grades

级配类型	橡胶含量 / %	最终剪缩量 / mm		
		30 kPa	60 kPa	90 kPa
GR1	10	4.99	6.17	6.49
	30	5.88	6.22	6.87
	60	6.22	6.99	7.52
GR2	10	3.48	4.78	5.8
	30	5.39	5.74	6.6
	60	5.89	6.22	6.92
GR3	10	4.4	4.87	6.27
	30	5.56	6.19	6.4
	60	6.01	6.32	7.19
GR4	10	4.72	5.24	6.17
	30	5.98	6.2	6.72
	60	6.12	6.76	7.33

位移增长速率放缓。

### 2.3 剪切频率对界面剪切特性的影响

图 9 显示了 10% 橡胶含量、60 kPa 下不同颗粒级配的界面最大峰值剪应力和界面最终竖向位移随剪切频率的变化规律。在剪切频率分别为 0.05、0.1 和 0.5 Hz 时,所有试样在循环直剪试验中均表现出剪切硬化特性。从图中看出,各颗粒级配下试样的界面峰值剪切应力均随着剪切频率的增加而增大,各试样在 0.5 Hz 下的界面峰值剪应力相较于 0.05 Hz 分别增加了 7.23、8.95、10.62、9.66 kPa;界面最终竖向位移均随着剪切频率的增加而减少,对比 0.5 Hz 下的界面竖向位移,0.05 Hz 情况下各试样分别减少了 1.34、0.36、0.35、0.77 mm。

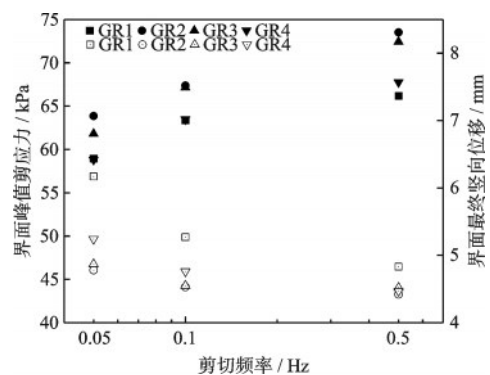


图 9 不同剪切频率下筋土界面剪切特性变化规律

Fig.9 Variation in shear properties of the soil-geosynthetic interface at different shear frequencies

## 2.4 剪切位移幅值对界面剪切特性的影响

图 10 为 10% 橡胶含量、60 kPa 作用下,土工格栅-橡胶砾石第 100 次循环的界面剪切应力与位移幅值滞回曲线。滞回圈随着位移幅值的增加,反 s 型特征越加明显。根据第 100 圈的骨架曲线发现,在同一级配下,试样的界面峰值剪切应力随着位移幅值的增加而增大,在位移幅值较小时,增加幅度大,随着位移幅值增加,增速放缓,逐渐趋于平稳。不同颗粒级配下试样的规律保持一致。

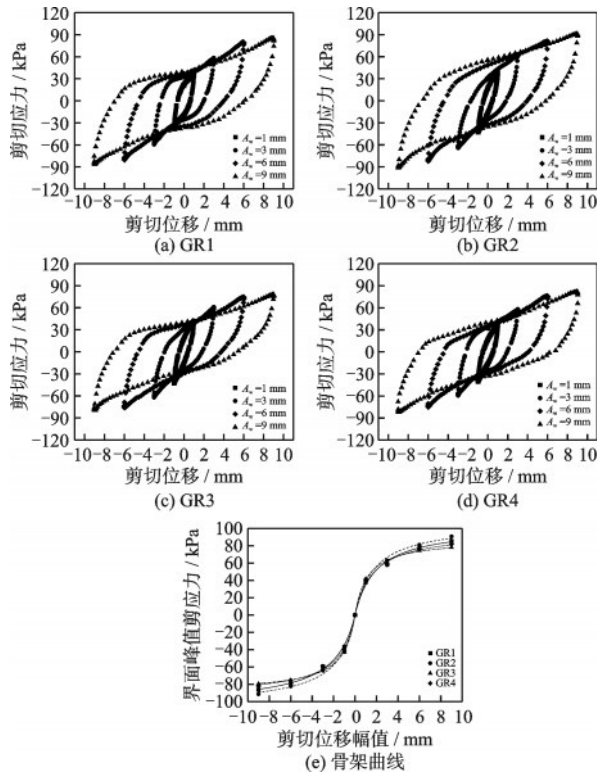


图 10 不同剪切位移幅值下筋土界面剪切特性变化曲线  
Fig.10 Variation curves of shear properties at the soil-geo-synthetic interface for different shear displacement amplitudes

## 2.5 剪切刚度和阻尼比

在筋土循环直剪研究中,剪切刚度( $K$ )和阻尼比( $D$ )两个指标通常被用来分析筋土界面的动力特征。单个滞回圈中的剪切刚度和阻尼比的定义如图 11 所示。表达式如下:

$$K = \frac{K_1 + K_2}{2} = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2A_w} \quad (1)$$

式中, $K_1$ 和 $K_2$ 为前半个循环内和后半个循环内的平均剪切刚度; $\tau_1$ 和 $\tau_2$ 为前半个循环内和后半个循

环内的最大剪应力; $A_w$ 为剪切位移幅值。

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{A}{4\pi A_w} \left( \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \quad (2)$$

式中, $D_1$ 和 $D_2$ 分别为前半个循环和后半个循环内的阻尼比; $A$ 为滞回圈封闭面积。

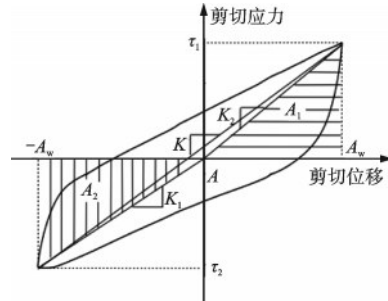


图 11 界面剪切刚度和阻尼比的定义

Fig.11 Definition of interface shear stiffness and damping ratio

图 12 为不同颗粒级配下界面剪切刚度和阻尼比与循环次数的关系曲线。由图 12(a)可知,4 种颗粒级配的混合土界面剪切刚度均随循环次数的增加而增大,与 GR1 和 GR4 相比,GR2 和 GR3 界面剪切刚度在循环剪切初期上升更快。循环 20 次之后,筋土界面剪切刚度随着循环次数增加而缓慢增加,GR1 到 GR4 最终界面最大剪切刚度分别为 19.60、21.12、20.48、19.77 kPa/mm。由图 12(b)可知,在循环剪切初期,界面阻尼比均随着循环次数的增加而迅速减小,但在循环后期界面阻尼比几乎不变。在同一循环次数下,GR1 界面阻尼比大于其他三种颗粒级配的混合土。界面最大阻尼比从 GR1 到 GR4 分别为 0.338、0.329、0.332、0.337。

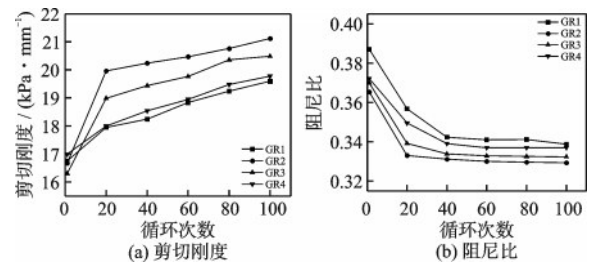


图 12 不同颗粒级配下界面剪切刚度和阻尼比

Fig.12 Interfacial shear stiffness and damping ratios at different particle grades

在循环剪切过程中,颗粒重排列后变得更加密实,颗粒间接触面积增大,摩擦咬合作用增加,使其剪切刚度随着循环次数的增加而增大。同时由

于体系中承担荷载的砾石颗粒发生去棱角化,柔性的橡胶颗粒变形完成,表现为阻尼比随着循环次数的增加而减小。对于级配良好的混合土 GR2 和 GR3,橡胶颗粒在砾石骨架中分布较为分散,能够充分填充骨架内的孔隙,基本不参与整体受力,因此在循环剪切过程中表现出较高的剪切刚度。当橡胶颗粒的尺寸增大时,越来越接近砾石颗粒的尺寸,开始代替一部分砾石颗粒,部分接触被橡胶-砾石接触取代,表现出剪切刚度下降。对于橡胶砾石的阻尼来说,主要通过颗粒之间的摩擦以及砾石颗粒的去棱角化等来耗散能量<sup>[26]</sup>。当橡胶颗粒的尺寸增加,橡胶颗粒与土工格栅纵横肋之间摩擦增大,大橡胶颗粒在剪切过程中变形吸能,导致阻尼比上升。

图 13 显示了位移幅值对土工格栅-橡胶砾石界面剪切刚度和阻尼比的影响。界面剪切刚度随着位移幅值的增加而减小,同时界面阻尼比随着位移幅值的增加而增大。对于混合土 GR2 而言,位移幅值从 1 mm 增加到 9 mm,试样界面剪切刚度下降了 31.89 kPa/mm,而界面阻尼比则增加了 0.03。

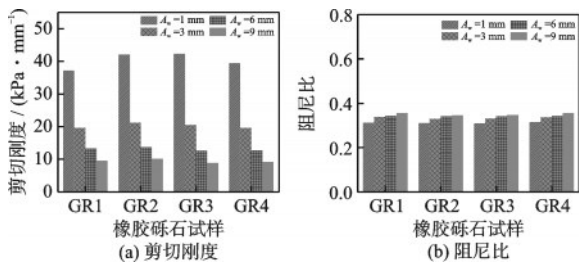


图 13 不同剪切位移幅值下界面剪切刚度和阻尼比  
Fig.13 Interface shear stiffness and damping ratio for different shear displacement amplitudes

图 14 为不同橡胶含量下土工格栅-橡胶砾石界面剪切刚度和阻尼比的关系变化曲线。由图 14(a)可知,4 种级配下的橡胶砾石界面剪切刚度随橡胶

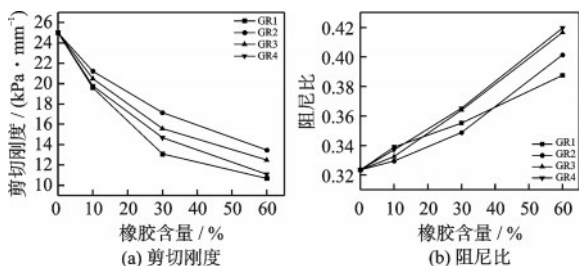


图 14 不同橡胶含量下界面剪切刚度和阻尼比  
Fig.14 Interfacial shear stiffness and damping ratios at different rubber contents

含量的增加而减小,界面阻尼比随着橡胶含量的增加而增大。

剪切过程中会引起砾石和橡胶颗粒的相对位置的移动,随着弹性变形能力良好的橡胶颗粒的加入,橡胶砾石混合土颗粒间发生相对位移更容易<sup>[27]</sup>,所以表现出剪切刚度随着橡胶含量增加而减小。随着橡胶含量的增多,混合土中大量的橡胶颗粒在剪切过程中消耗了大部分能量,使得橡胶砾石界面阻尼比表现出随着橡胶含量的增加而增大。

在图 14(b)中还可以看出,GR1 在低橡胶含量下表现出高的界面阻尼比,但随着橡胶含量的增加,其阻尼比逐渐低于其余三种颗粒级配的混合土,这主要是因为 GR1 橡胶砾石颗粒之间粒径相差较大,在低橡胶含量下,主要通过砾石的去棱角化来耗散能量,而在高橡胶含量下,细小的橡胶颗粒阻挡的砾石的破碎且颗粒之间的摩擦较低,使 GR1 的阻尼比在高橡胶含量下最小。

### 3 结 论

(1)土工格栅-橡胶砾石界面平均峰值抗剪强度随着循环次数的增加而增大,呈现出剪切硬化;界面峰值剪应力随着竖向应力的增加而增大;橡胶颗粒的掺入降低了砾石的抗剪强度,且降低的程度随着橡胶含量增加而增大;在 4 种颗粒级配下,GR2 抗剪强度最高。

(2)土工格栅-橡胶砾石界面均表现出剪缩的特点;界面剪缩量随着橡胶含量的增加而增大;在高橡胶含量下,随着竖向应力的增加,界面的剪缩量增长缓慢;连续级配 GR2 在 4 种颗粒级配下界面剪缩量最小。

(3)土工格栅-橡胶砾石界面峰值剪应力随剪切频率的增加而增大,界面竖向位移随剪切频率的增加而减小;剪切位移幅值对土工格栅-橡胶砾石的界面剪切刚度有显著影响,对界面阻尼比影响不大。

(4)土工格栅-橡胶砾石界面剪切刚度随着循环次数的增加而增大,且随着橡胶含量的增加而降低;界面阻尼比随着循环次数的增加而减小,且随着橡胶含量的增加而增大。

### 参考文献:

[1] 张正甫,刘松玉,蔡光华,等.废旧轮胎在道路工程中的研究进展[J].土木工程学报,2015,48(增2):

- 361-368.
- Zhang Z F, Liu S Y, Cai G H, et al. Research progress of scrap tires used in road engineering [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48 (Sup2) : 361-368. (in Chinese)
- [2] Pitilakis K, Karapetrou S, Tsagdi K. Numerical investigation of the seismic response of RC buildings on soil replaced with rubber - sand mixtures [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 79: 237-252.
- [3] Ding Y, Zhang J, Chen X, et al. Experimental investigation on static and dynamic characteristics of granulated rubber-sand mixtures as a new railway subgrade filler [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273: 121955.
- [4] Abdullah W, Ashkanani A, Eid W, et al. Evaluation of sand-tire crumb mixtures as lightweight fill materials [J]. *Geomechanics and Geoengineering*, 2022, 18(3) : 208-221.
- [5] Zornberg J G, Cabral A R, Viratjandr C. Behaviour of tire shred sand mixtures [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(2): 227-241.
- [6] Rao G V, Dutta R K. Compressibility and strength behaviour of sand - tyre chip mixtures [J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2006, 24(3): 711-724.
- [7] 李丽华,肖衡林,唐辉明,等. 轮胎碎片-砂混合土抗剪性能优化试验研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(4) : 1063-1067.
- Li L H, Xiao H L, Tang H M, et al. Shear performance optimizing of tire shred-sand mixture [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(4) : 1063-1067. (in Chinese)
- [8] 刘方成,张永富,任东滨. 橡胶砂应力-应变特性三轴-单剪联合试验研究 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(10) : 2769-2779.
- Liu F C, Zhang Y F, Ren D B. Stress-strain characteristics of rubber-sand mixtures in united triaxial shear and simple shear tests [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(10) : 2769-2779. (in Chinese)
- [9] Amarakonda P, Mohanty S, Shaik R. Utilization of quarry waste and granulated rubber mix as lightweight backfill material [J]. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 2019, 23(4): 06019001.
- [10] Saberian M, Li J, Perera S T A M, et al. Large-scale direct shear testing of waste crushed rock reinforced with waste rubber as pavement base/subbase materials [J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 28: 100546.
- [11] 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 H Y, Liu Q F, Wu Q, et al. Dynamic behavior of saturated rubber particle-sand mixture [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(3) : 597-605. (in Chinese)
- [12] 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 Q F, Zhuang H Y, Chen J, et al. The shear strength and failure mode of rubber particle-sand mixtures in the test [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(10) : 1887-1895. (in Chinese)
- [13] Ghazavi M, Kavandi M. Shear modulus and damping characteristics of uniform and layered sand-rubber grain mixtures [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 162: 107412.
- [14] Tasalloti A, Chiaro G, Banasiak L, et al. Experimental investigation of the mechanical behaviour of gravel-granulated tyre rubber mixtures [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273: 121749.
- [15] Senetakis K, Anastasiadis A. Effects of state of test sample, specimen geometry and sample preparation on dynamic properties of rubber-sand mixtures [J]. *Geosynthetics International*, 2015, 22(4) : 301-310.
- [16] 路遥,肖成志,罗亚楠,等. 格栅纵/横肋对筋-土界面拉拔特性的影响研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(5) : 1069-1075.
- Lu Y, Xiao C Z, Luo Y N, et al. Study of the effect of longitudinal and transversal ribs on pullout performance of interface between geogrids and sand [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(5) : 1069-1075. (in Chinese)
- [17] Madani N, Hosseinpour I, Payan M, et al. Cyclic and postcyclic interface characteristics of geotextile-embedded sand-rubber composites [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2023, 35(2) : 04022418.
- [18] Makkar F M, Chandrakaran S, Sankar N. Performance of 3-D geogrid-reinforced sand under direct shear mode [J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 13(3) : 227-235.
- [19] 刘飞禹,童艳光,汪歆,等. 筋-土界面刚度软化对加筋土挡墙动力特性的影响 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(1) : 75-84.
- Liu F Y, Tong Y G, Wang X, et al. Effect of stiffness softening of reinforcement-soil interface on dynamic characteristics of reinforced retaining wall [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(1) : 75-84. (in Chinese)
- [20] 刘飞禹,胡惠丽,王军,等. 孔隙比对筋-土界面循环剪切特性的影响 [J]. *中国公路学报*, 2019, 32(12) :

- 115-122, 131.
- Liu F Y, Hu H L, Wang J, et al. Influence of aperture ratio on cyclic shear behavior of geogrid-soil interface [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (12): 115-122, 131. (in Chinese)
- [21] Wang J, Ying M J, Liu F Y, et al. Experimental investigation on the stress-dilatancy response of aggregate-geogrid interface using parameterized shapes [J]. Construction and Building Materials, 2021, 289: 123170.
- [22] Manohar D R, Anbazhagan P. Shear strength characteristics of geosynthetic reinforced rubber-sand mixtures [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(4): 910-920.
- [23] Liu F Y, Fu J, Wang J, et al. Effect of the particle size ratio on macro-and mesoscopic shear characteristics of the geogrid-reinforced rubber and sand mixture interface [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2022, 50 (4) : 779-793.
- [24] 刘飞禹,符军,王军,等.橡胶掺量对格栅-橡胶砂界面宏细观剪切特性影响[J].岩土工程学报,2022,44(6):1006-1015.
- Liu F Y, Fu J, Wang J, et al. Effects of rubber content on macro- and meso-scope shear characteristics of geogrid-rubber sand interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1006-1015. (in Chinese)
- [25] Pasha S M K, Hazarika H, Yoshimoto N. Physical and mechanical properties of gravel-tire chips mixture (GTCM) [J]. Geosynthetics International, 2019, 26 (1): 92-110.
- [26] 刘方成,陈璐,王海东.橡胶砂动剪模量和阻尼比循环单剪试验研究[J].岩土力学,2016,37(7):1903-1913.
- Liu F C, Chen L, Wang H D, et al. Evaluation of dynamic shear modulus and damping ratio of rubber-sand mixture based on cyclic simple shear tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1903-1913. (in Chinese)
- [27] Wu M T, Tian W H, Liu F C, et al. Dynamic behavior of geocell-reinforced rubber sand mixtures under cyclic simple shear loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 164: 107595.

(本文编辑:赵霞)