

DOI: 10.11779/CJGE201709009

# 土工格室加筋对橡胶砂动力特性影响的试验研究

刘方成, 吴孟桃, 陈巨龙, 张云飞, 郑玉凤

(湖南工业大学土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 橡胶砂作为轻质耗能填料在土木工程中应用越来越广泛, 土工格室加筋可提高橡胶砂的抗剪强度和整体稳定性。针对关于橡胶砂或加筋橡胶砂动力特性的认知缺乏的现状, 通过大尺寸循环单剪试验研究了橡胶砂分别在有无土工格室加筋情况下在水平循环荷载作用下的滞回特性。获得了加筋和非加筋橡胶砂的滞回曲线、动剪模量曲线和阻尼比曲线, 并应用 Stooke-Darendeli 模型对橡胶砂动力特性进行拟合, 得到了加筋和非加筋橡胶砂的动力特性参数。基于对比分析, 揭示了土工格室对橡胶砂动力特性影响的规律与机理。试验结果表明: ①土工格室加筋能限制橡胶砂中剪切带的发展, 使得橡胶砂在大应变下的滞回曲线反 S 形特征减弱、阻尼比增大; ②由于网兜效应引起颗粒接触法向应力增大, 土工格室加筋使橡胶砂动剪模量增大, 且随着橡胶含量的增高而增大愈明显; ③土工格室的加入降低了循环加载次数对橡胶砂动力特性的影响, 并使得橡胶砂最大动剪模量随橡胶含量和竖向压力变化的速率减小。给出的土工格室加筋对橡胶砂动力特性影响的定量分析结果, 可为后续研究和工程应用提供参考。

**关键词:** 橡胶砂; 土工格室加筋; 土动力特性; 循环单剪试验; 大尺寸土样

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)09-1616-10

作者简介: 刘方成(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构抗震和岩土动力学等方面的教学和科研。E-mail: fcliu@hut.edu.cn。

## Experimental study on influence of geo-cell reinforcement on dynamic properties of rubber-sand mixtures

LIU Fang-cheng, WU Meng-tao, CHEN Ju-long, ZHANG Yun-fei, ZHENG Yu-feng

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

**Abstract:** The rubber-sand mixtures (RSM) are more and more widely used in civil engineering as light filling and energy absorbing materials. The geo-cell can be used to reinforce RSM to improve its shear strength and stability. Little knowledge has been reported on the dynamic properties of RSM or geo-cell reinforced RSM (GCRSM). Based on this, the hysteretic properties of RSM with or without geo-cell reinforcing under cyclic horizontal loadings are investigated through large-size cyclic simple shear tests. The hysteretic curves, dynamic shear modulus curves and damping ratio curves of RSM and GCRSM are obtained by tests and fitted by the Stooke-Darendeli model to gain parameters of dynamic properties. The comparative analysis of dynamic properties between RSM and GCRSM is carried out, and the rules and mechanisms of how the geo-cell influences the dynamic properties of RSM are verified. The test results show that: (1) Owing to the restriction of local shear band development in the specimen by the geo-cell, the S-shaping characteristics is less pronounced and the damping ratio increases under large strains when comparing GCRSM to RSM. (2) The dynamic shear modulus of RSM is increased by the geo-cell reinforcement, and the increment becomes more pronounced with addition of rubber content of RSM, which is believed due to the normal stress increment between particles in RSM caused by tuck net effect of geo-cell. (3) The influence of cycle numbers on dynamic properties of RSM decreases with use of geo-cell reinforcement. The decay velocity of the maximum dynamic shear modulus of RSM with both rubber content and vertical pressure is reduced when the geo-cell is used to reinforce RSM. Quantitative influences of geo-cell reinforcement on the dynamic characteristics of RSM are also provided for reference of the following researches and engineering applications.

**Key words:** rubber sand mixture; geo-cell reinforcement; soil dynamic property; cyclic simple shear test; large size specimen

## 0 引言

汽车工业的迅猛发展使得废旧轮胎成为当前社会

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108177)

收稿日期: 2016-07-27

面临的主要固体废弃物之一, 如何高效、有益地利用废旧轮胎, 已成为一项严峻的课题<sup>[1]</sup>。将废旧轮胎破碎成颗粒, 与某种类型的土(通常采用性质稳定的砂土)配合成混合料作为岩土工程中的填料, 利用橡胶颗粒的特殊物理性质解决工程问题, 同时大量消耗废旧轮胎, 是目前环境岩土工程的研究热点。已有研究表明<sup>[2-7]</sup>, 橡胶颗粒与砂混合物(rubber sand mixture, 本文简称橡胶砂或RSM)具有模量低、弹性好、阻尼大的特点, 是一种廉价的轻质耗能材料。

近期历次地震中, 普通多层房屋建筑的严重破坏成为造成重大地震灾难的主要原因, 研究能应用于普通房屋建筑的廉价隔震方法非常必要<sup>[8-9]</sup>。利用橡胶砂低模量、高阻尼的特点, Tsang等<sup>[10-11]</sup>较早提出在建筑结构基础下局部地基范围内铺设一层橡胶砂垫层, 利用土与结构的动力相互作用效应, 降低上部结构在地震等动力荷载作用下的反应, 达到经济有效地隔震的目的。Saman等<sup>[12]</sup>、Abdelhaleem等<sup>[13]</sup>、Bandyopadhyay等<sup>[14]</sup>、Pitilakis等<sup>[15]</sup>相继对橡胶砂垫层的隔震效应与可行性进行了深入研究, 表明其确实是一种可行的隔震方法。但试验研究亦发现<sup>[16]</sup>, 由于橡胶砂垫层宏观上属于各向同性材料, 其在水平方向具有较小的剪切模量的同时, 坚向的压缩模量也比较小, 从而在水平地震作用下容易使上部结构的摇摆运动分量增大, 并且对其基础稳定性具有不利影响。为此, 作者提出用土工格室对橡胶砂垫层进行加筋, 利用三维格室的网兜效应提高橡胶砂垫层的坚向模量、抗剪强度以及整体稳定性, 以期改进橡胶砂垫层的隔震效应、并降低垫层厚度, 从而进一步提高其隔震经济性<sup>[17]</sup>。关于土工格室对岩土材料的加筋效应研究已较为深入<sup>[18-19]</sup>, 但有关其加强散体材料在动力荷载下的特性研究则甚少。当被加筋散体材料为由两种物理力学性质完全不同的颗粒混合而成的橡胶砂时, 关于土工格室加筋的动力效应研究更少。

本文应用笔者自行研制的大型循环单剪试验装置, 对有无土工格室加筋的大尺寸橡胶砂试样在水平循环荷载作用下的受力变形特性进行试验研究, 以探索土工格室加筋对橡胶砂动力特性的影响规律。

## 1 试验材料和设备

试验橡胶砂为由废旧轮胎橡胶颗粒与天然河砂混合得到的混合料。废旧橡胶颗粒由专业分解废旧橡胶的厂家生产, 颗粒粒径在0.5~5 mm之间, 平均粒径1.5 mm, 不均匀系数1.43, 颗粒比重1.21。混合物所用砂为普通建筑河砂(过4.75 mm筛, 去除大颗粒以

保证试样的均匀性)。混合前后的橡胶颗粒和砂如图1所示。两种材料的颗粒特征如表1所示, 级配曲线如图2所示。

加筋用土工格室为高强焊接型HDPE格室, 格室片抗拉强度≥18 MPa, 焊点强度≥100 N/cm, 格室高度200 mm, 焊点间距400 mm, 格室片厚度1 mm。



图1 试验用橡胶颗粒、砂颗粒和混合后的橡胶砂

Fig. 1 Photos of rubber particles, sand particles and rubber sand mixtures

表1 试验材料物理特性

Table 1 Physical properties of test materials

试验材料	比重 $G_s$	粒径范围 /mm	平均粒径 $D_{50}$	不均匀系数 $C_u$
废橡胶颗粒	1.21	0.5~5	1.5	1.43
天然河砂	2.59	0.05~4.75	0.29	1.31

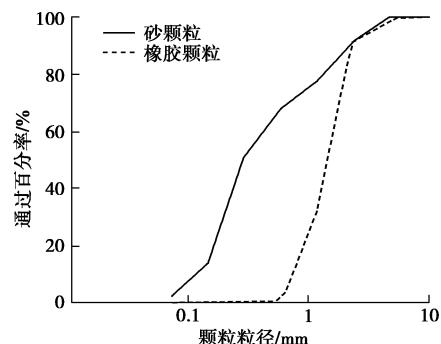


图2 橡胶和砂的颗粒级配曲线

Fig. 2 Grading curves of rubber particles and sand

循环单剪试验能重现强震时场地土的应力应变条件, 并直接测定土的动剪模量和阻尼比, 被公认为是土动力特性测试的理想方法之一。由于土工格室尺寸较大, 常规循环单剪试验无法直接研究土工格室加筋对橡胶砂动力特性的影响。为此, 笔者研制了一套大型循环单剪试验装置, 试样尺寸达直径700 mm、高度200 mm。利用层叠的周向四点式支撑钢环+内衬橡胶膜作为剪切箱, 为试样提供侧向约束。利用水平线性导轨支承剪切底板。固结顶板受竖向立柱上的线性导轨限制, 可在试样水平剪切过程中发生均匀的上下升降运动。试验装置及试样如图3所示, 限于篇幅,

关于该装置详情将另文报道。



图 3 本文大型循环剪切试验装置与试样

Fig. 3 Equipment and specimen of large-scale cyclic simple shear tests

## 2 试验方案

### 2.1 试验制备

试样制备方法如下：①将烘干的河砂和风干的橡胶颗粒按照质量比拌合均匀，分装入密封盛土箱备用；②对不同配合比的橡胶砂进行物理特性指标试验，得到其最大、最小干密度；③对不同配比橡胶砂根据同一相对密度 ( $D_r=0.65$ ) 确定试样控制密度；④根据控制密度和试样体积称取装样质量，采用砂雨法将试样分 3 次均匀落入试模内并分层压实至指定高度。不同配比橡胶砂的最大、最小干密度、控制密度和初始孔隙比如表 2 所示。试验共考虑了 5 种不同橡胶砂配比（以橡胶颗粒质量含量表示）。

表 2 不同配合比橡胶砂密度特性及初始孔隙比

Table 2 Density properties and initial void ratios of rubber-sand mixtures with different mass ratios

配合比 /%	最大干密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	最小干密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	相对密度 $D_r$	控制密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	初始孔隙比 $e_0$
0	2.06	1.48	0.65	1.81	0.31
10	1.75	1.21	0.65	1.51	0.36
20	1.51	1.04	0.65	1.30	0.39
30	1.42	0.92	0.65	1.19	0.40
50	1.08	0.76	0.65	0.94	0.44

### 2.2 试验工况

试验中主要考虑以下参数变化对土工格室加筋橡胶砂动力特性的影响：①橡胶砂配比（以橡胶颗粒的

质量含量表示，记为 rubber content/RC）；②竖向压力 ( $\sigma_v$ )；③剪切位移幅值；④加筋情况（为对比研究，以 RSM 表示无筋橡胶砂，以 GCRSM 表示加筋橡胶砂）。试验工况列于表 3。

表 3 试验工况

Table 3 Test conditions

序号	参数名称	参数取值	单位
①	配合比 RC	0, 10, 20, 30, 50	%
②	固结压力 $\sigma_v$	100, 200, 300	kPa
③	剪切位移幅值	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10	mm
④	剪应变幅值 $\gamma_a$	0.01~0.06	—
⑤	加筋情况	RSM, GCRSM	—

### 2.3 试验方法

试验中，为得到加筋橡胶砂在一定应变幅值范围上的动力特性，采用分级循环加载的方法进行试验，在每一个工况中，对同一试样按位移幅值从小到大依次进行多级加载，每一级位移幅值下循环 60 次。已有研究表明<sup>[20]</sup>，多级循环加载的试验方法对于大尺寸试样的动力特性测试经济可行。加载形式为双向等幅正弦波，频率为 1 Hz。加载控制位移序列如图 4 所示。在水平循环剪切过程中，竖向压力保持不变。

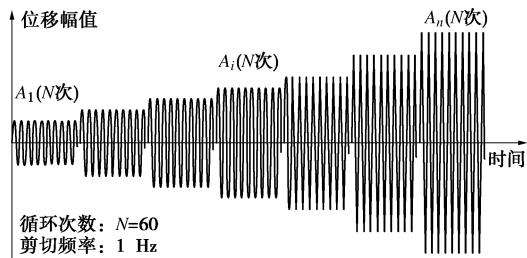


图 4 循环剪切试验加载形式

Fig. 4 Loading type used in cyclic shear tests

## 3 试验结果

### 3.1 土工格室加筋对滞回曲线的影响

图 5 给出了在竖向压力为 100 kPa 时，配合比依次为 0%，10%，20%，30% 和 50% 的橡胶砂在不同水平位移幅值下，RSM 和 GCRSM 的滞回曲线对比。由图 5 可见：

(1) 橡胶含量为 0%（纯砂）时，RSM 的滞回曲线表现出较明显的反 S 形特征（即应力 - 应变滞回曲线切线斜率在接近应力变号时突然降低并保持缓慢增加，在应变转向前急剧增大），且随着应变幅值的增大，滞回曲线反 S 形越明显。此现象与常规土在大应变幅值下的循环流动（cyclic mobility）现象相似，一般认为是由于大应变时土体中产生剪切带所致（Ishihara<sup>[21]</sup>, Vucetic<sup>[22]</sup>）。在相同应变幅值下，GCRSM 的滞回曲线



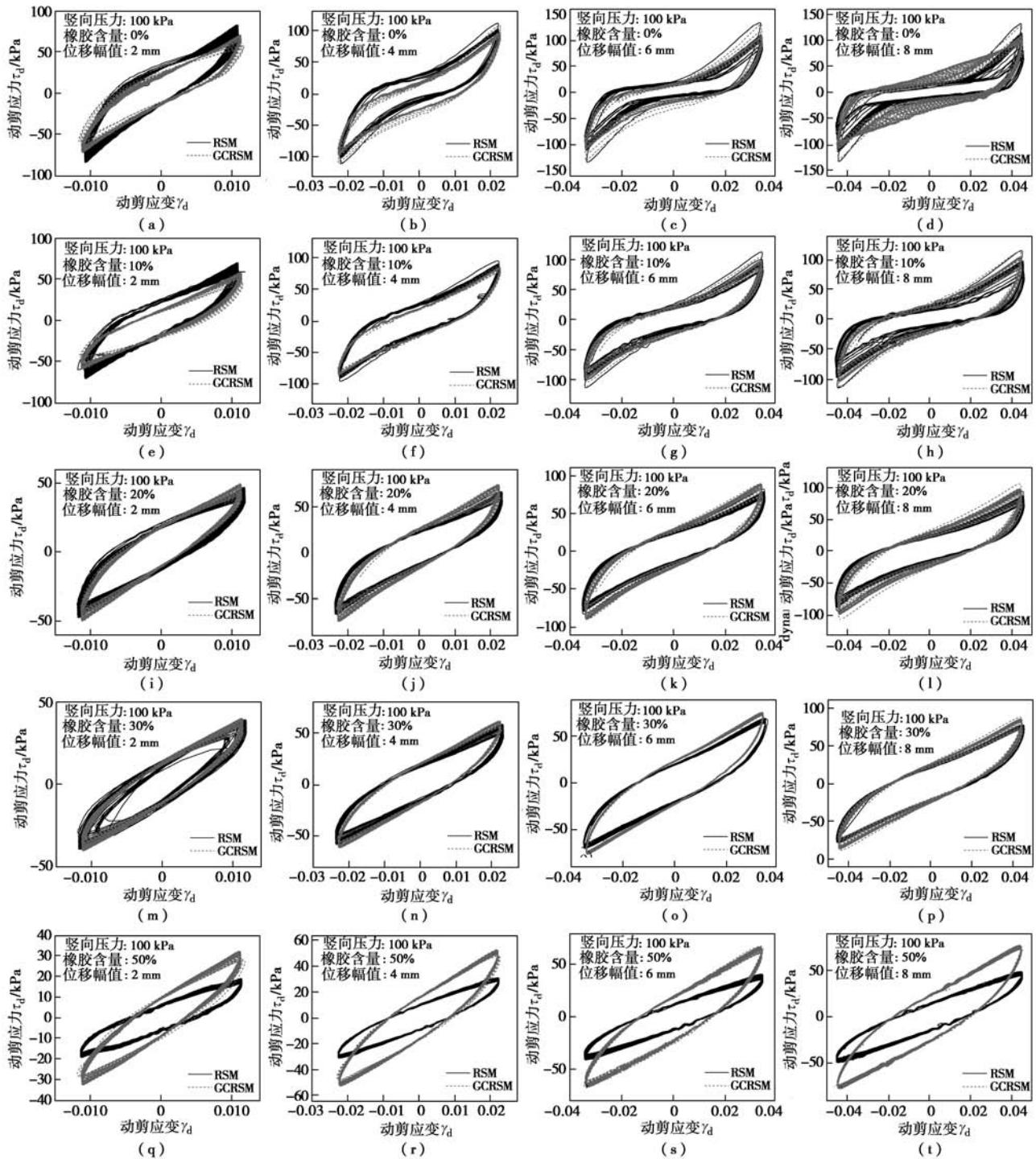


图 5 坚向压力 100 kPa 时土工格室加筋橡胶砂和非加筋橡胶砂滞回曲线对比

Fig. 5 Comparison of hysteretic loops of RSM and GCRSM under vertical pressure of 100 kPa

倒 S 现象相对 RSM 明显减弱, 反映出土工格室的加入限制了剪切带的形成。

(2) 随着橡胶含量增大, RSM 滞回曲线的反 S 形现象逐渐消失, RSM 与 GCRSM 滞回曲线之间的形状差异减小; 这是由于橡胶颗粒的良好弹性缓冲了剪切过程中砂颗粒之间的绕过和翻滚, 使得土体的变形在整个试样高度上均匀发生, 延缓了剪切带的发生。

(3) 当橡胶含量较低时, GCRSM 滞回圈的斜率与 RSM 基本相同, 甚至前者略小于后者, 随着橡胶

含量增大, GCRSM 的滞回曲线斜率相对于 RSM 的滞回曲线斜率增大逐渐明显。这是因为在橡胶含量较低时, 砂-砂接触为主要的传力路径, 此时加入土工格室, 格室片阻断了部分砂-砂传力路径, 使得 GCRSM 相对于 RSM 抗剪刚度下降; 随着橡胶含量的增大, 砂-胶接触、胶-胶接触增多, 橡胶砂的整体抗剪刚度较低, 此时加入土工格室, 则由于其网兜效应使得颗粒接触时的法向应力增加、颗粒间发生相对位移所需克服的阻力增大, 宏观上表现为 GCRSM 相对于 RSM 抗剪

刚度提高。

(4) 在同一应变幅值下, GCRSM 滞回曲线随循环次数而变化的幅度小于 RSM。随着橡胶含量的增加, GCRSM 与 RSM 滞回曲线随循环次数变化幅度的差异减小。其原因分析为: 土动力特性受循环次数影响的机理是土体中传力骨架随加载的进行而重新排列。当橡胶含量较低时, 橡胶砂中传力骨架以砂-砂接触为主, 随着循环剪切的进行, 传力骨架上颗粒位置重排并伴随砂颗粒的去棱角化, 使得传力骨架上的颗粒排列趋于松散或压密, 剪切刚度随循环次数而变化较为显著, 此时土工格室的加入约束了传力骨架上土颗粒的重新排列, 从而使得 GCRSM 滞回曲线受循环次数的影响相对 RSM 降低。当橡胶含量较高时, 橡胶砂传力骨架中砂-胶、胶-胶接触所占比例增加, 由于橡胶颗粒具有高弹性, 砂-胶、胶-胶两种接触中橡胶颗粒的自身变形能力缓冲了颗粒的重新排列, 亦减少了砂颗粒的去棱角化现象, 使得橡胶砂循环剪切特性受加载次数的影响减小, 与土工格室的影响效应类似。故对于高橡胶含量的橡胶砂, GCRSM 与 RSM 滞回曲线随循环次数变化均较小, 且两者差异也减小。

### 3.2 土工格室加筋对 $G_d - \gamma_a$ 和 $D - \gamma_a$ 曲线的影响

根据如图 6 所示的典型滞回曲线示意图, 土动剪模量  $G_d$  和阻尼比  $D$  可以下公式计算得到

$$G_d = \tau_a / \gamma_a, \quad (1)$$

$$D = A_{\text{Loop}} / \pi A_T, \quad (2)$$

式中,  $G_d$  为动剪模量,  $D$  为阻尼比,  $\tau_a$ ,  $\gamma_a$  分别为滞回曲线的剪应力幅值和剪应变幅值,  $A_{\text{Loop}}$  为滞回曲线所围的面积,  $A_T$  为滞回曲线顶点连线所示虚线三

角形的面积。

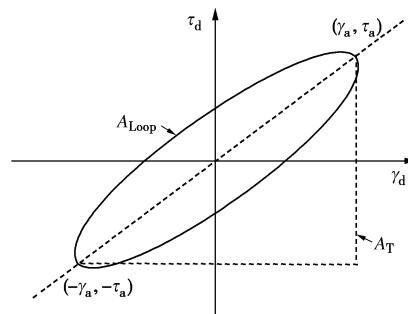


图 6 典型的滞回曲线

Fig. 6 Typical hysteretic loop

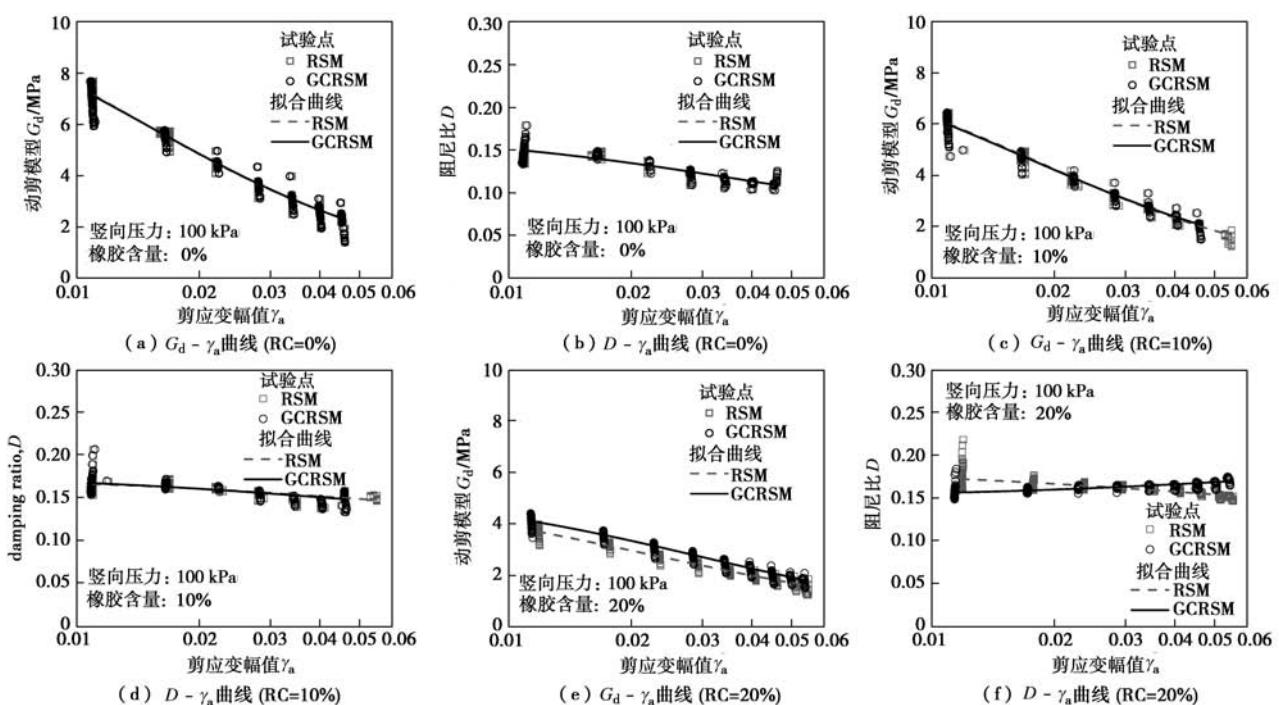
图 7 给出了橡胶含量依次为 0%, 10%, 20%, 30% 和 50% 时, 橡胶砂在竖向压力为 100 kPa 时的动剪模量随动剪应变幅值的变化曲线 ( $G_d - \gamma_a$  曲线) 和阻尼比随动剪应变幅值的变化曲线 ( $D - \gamma_a$  曲线)。在每一个图中, 均给出了相同工况下 RSM 和 GCRSM 的试验结果对比。由图 7 可见:

(1) 在同一级动应变幅值下, GCRSM 的动剪模量  $G_d$  和阻尼比  $D$  试验点分布相对于 RSM 的更为集中, 说明土工格室加筋使橡胶砂动力特性受循环加载次数的影响减小。

(2) 随着橡胶含量的增加, GCRSM 和 RSM 动力特性受循环次数影响的差异减小。

采用 Darendeli 等动力特性方程<sup>[23]</sup>对橡胶砂动力特性试验结果进行拟合:

$$G_d = \frac{G_{d\max}}{1 + (\gamma_a / \gamma_{a,\text{ref}})^a}, \quad (3)$$



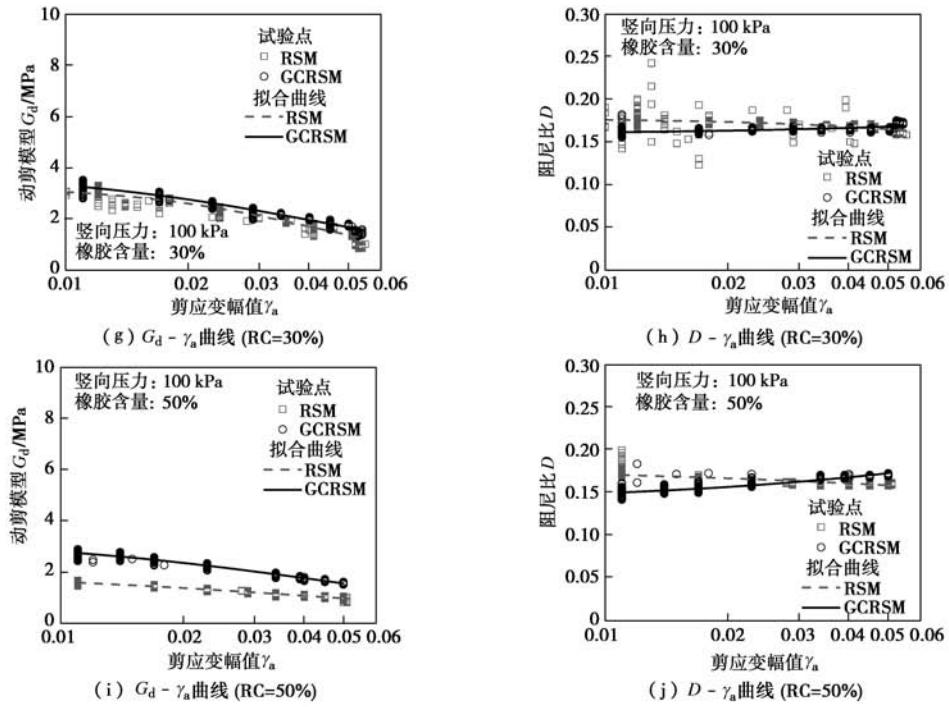
图 7 不同配比 RSM 和 GCRSM 的  $G_d - \gamma_a$  和  $D - \gamma_a$  试验曲线Fig. 7 Curves of  $G_d - \gamma_a$  and  $D - \gamma_a$  of RSM and GCRSM with different rubber contents

表 4 橡胶砂动力特性参数试验拟合值

Table 4 Fitted values of parameters of dynamic curves of rubber sand mixtures

$\sigma_v$ /kPa	RC/%	RSM					GCRSM				
		0	10	20	30	50	0	10	20	30	50
100	$G_{d\max}$ /MPa	12.64	8.876	5.584	3.275	1.998	11.98	9.447	5.411	3.806	3.311
	$\gamma_{a,\text{ref}}$	0.014	0.019	0.023	0.042	0.047	0.015	0.017	0.03	0.042	0.045
	$\alpha$	1.23	1.37	1.037	1.841	0.93	1.266	1.261	1.179	1.326	1.122
	$b$	-0.191	-0.068	-0.135	-0.045	-0.134	-0.183	-0.089	0.08	0.043	0.197
200	$D_{\min}/\%$	17.482	17.281	18.335	17.652	17.659	17.238	17.683	15.07	15.936	14.17
	$G_{d\max}$ /MPa	13.96	11.61	9.522	5.976	3.541	10.38	8.372	9.67	6.493	5.176
	$\gamma_{a,\text{ref}}$	0.028	0.025	0.029	0.04	0.055	0.038	0.043	0.029	0.042	0.051
	$\alpha$	1.456	1.221	1.319	1.147	1.122	1.889	1.579	1.093	1.066	1.067
300	$b$	0.012	-0.019	0.058	0.009	0.008	0.209	0.064	0.111	0.164	0.241
	$D_{\min}/\%$	12.574	14.646	14.278	16.501	14.714	9.66	13.712	13.565	13.591	12.318
	$G_{d\max}$ /MPa	16.19	12.05	13.27	8.18	4.982	12.91	11.65	11.39	8.107	4.993
	$\gamma_{a,\text{ref}}$	0.037	0.038	0.025	0.039	0.056	0.046	0.041	0.036	0.046	0.065
	$\alpha$	1.547	1.42	1.002	1.15	1.037	1.659	1.178	1.204	1.011	1.019
	$b$	0.174	0.139	0.181	0.126	0.019	0.168	0.057	0.116	0.12	0.16
	$D_{\min}/\%$	8.509	10.545	12.122	13.872	14.005	10.06	13.573	12.899	14.075	12.379

$$D = b \left( \frac{G_d}{G_{d\max}} \right)^{0.1} D_{\text{masing}} + D_{\min}, \quad (4)$$

$$D_{\text{masing}} = c_1 D_{\text{masing}, \alpha=1.0} + c_2 D_{\text{masing}, \alpha=1.0}^2 + c_3 D_{\text{masing}, \alpha=1.0}^3, \quad (5)$$

$$D_{\text{masing}, \alpha=1.0} (\%) = \frac{100}{\pi} \left[ 4 \frac{\gamma_a - \gamma_{a,\text{ref}} \ln \left( \frac{\gamma_a + \gamma_{a,\text{ref}}}{\gamma_{a,\text{ref}}} \right)}{\gamma_a^2} - 2 \right], \quad (6)$$

$$c_1 = -1.1143\alpha^2 + 1.8618\alpha + 0.2523, \quad (7)$$

$$c_2 = 0.0805\alpha^2 - 0.0710\alpha + 0.0095, \quad (8)$$

$$c_3 = -0.0005\alpha^2 + 0.0002\alpha + 0.0003. \quad (9)$$

式中  $G_{d\max}$  为最大动剪模量;  $G_d$  为当动应变幅值等于  $\gamma_a$  时的动剪模量;  $\gamma_a$  为动剪应变幅值;  $\gamma_{a,\text{ref}}$  为参考动剪应变幅值;  $\alpha$  为模量曲线衰减参数;  $D$  为阻尼比;  $D_{\text{masing}}$  表示 Masing 滞回准则预计阻尼比;  $D_{\min}$  表示小应变阻尼比;  $b$  为阻尼比曲线参数。

不同配比橡胶砂在不同竖向压力下的动力特性参数拟合值列于表 4。竖向应力  $\sigma_v = 100$  kPa 时各配比橡胶砂动力特性模拟曲线仍示于图 7 中。由 GCRSM 和 RSM 动力特性拟合曲线对比, 可得:

(1) 当橡胶含量较低 ( $RC \leq 10\%$ ) 时, RSM 和 GCRSM 的  $G_d - \gamma_a$  曲线和  $D - \gamma_a$  曲线基本重合, 土工格室加筋对橡胶砂动剪模量影响甚小。

(2) 当橡胶含量增大到 20% 及以上时, GCRSM 的  $G_d - \gamma_a$  曲线相对于 RSM 的  $G_d - \gamma_a$  曲线偏高, 且随着橡胶含量的增大愈明显。

(3) 当橡胶含量增大到 20% 及以上时, GCRSM 的  $D - \gamma_a$  曲线与 RSM 的  $D - \gamma_a$  曲线出现交叉, 在应变幅值  $\gamma_a < 0.03$  时, GCRSM 的阻尼比相对 RSM 略微偏小, 而在应变幅值  $\gamma_a > 0.03$  时, GCRSM 的阻尼比则比 RSM 的阻尼比偏大。

(4) 在本文试验的应变幅值范围内, RSM 的阻尼比随动剪应变幅值增大而降低, GCRSM 的阻尼比则随动剪应变幅值增大而增大。

图 8 给出了竖向应力为 100 kPa 时不同配比的 GCRSM 与 RSM 的动剪模量之比  $G_{d,GCRSM}/G_{d,RSM}$ , 阻尼比之比  $D_{GCRSM}/D_{RSM}$  随剪应变幅值  $\gamma_a$  的变化曲线。图 9 给出了配比为 20%, 30% 时, 在不同竖向压力下的 GCRSM 与 RSM 的动剪模量之比  $G_{d,GCRSM}/G_{d,RSM}$ , 阻尼比之比  $D_{GCRSM}/D_{RSM}$  随剪应变幅值  $\gamma_a$  的变化曲线。

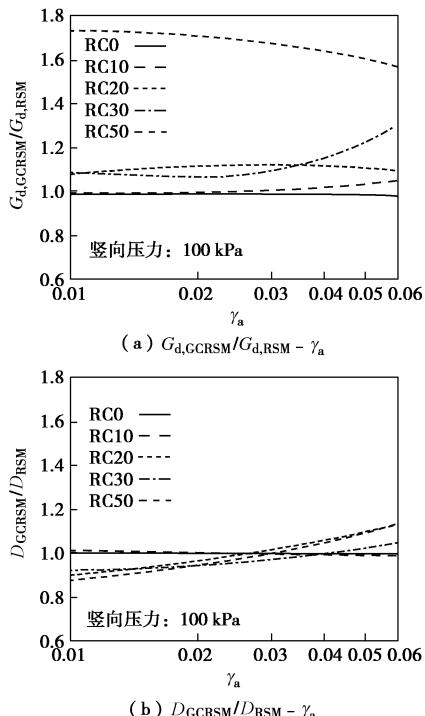


图 8 GCRSM 与 RSM 的动剪模量之比、阻尼比之比随剪应变幅值的变化 ( $\sigma_v = 100$  kPa)

Fig. 8 Variation of ratios of dynamic shear modulus and damping ratio of GCRSM to RSM with amplitude of shear strain

( $\sigma_v = 100$  kPa)

由图 8, 9 可见:

(1) 当橡胶含量较小 ( $RC \leq 10\%$ ) 时,

$G_{d,GCRSM}/G_{d,RSM}$  和  $D_{GCRSM}/D_{RSM}$  均接近 1; 当橡胶含量较大 ( $RC \geq 20\%$ ) 时,  $G_{d,GCRSM}/G_{d,RSM}$  在试验应变幅值范围内大于 1, 且橡胶含量越大,  $G_{d,GCRSM}/G_{d,RSM} - \gamma_a$  曲线越高, 而此时  $D_{GCRSM}/D_{RSM} - \gamma_a$  曲线呈线性关系, 在应变幅值  $\gamma_a$  小于 0.03 时  $D_{GCRSM}/D_{RSM} < 1$ , 在  $\gamma_a$  大于 0.03 时  $D_{GCRSM}/D_{RSM} > 1$ 。

(2) 当橡胶含量在 20%~30% 之间时,  $G_{d,GCRSM}/G_{d,RSM}$  在 1.0~1.3 之间变化,  $D_{GCRSM}/D_{RSM}$  在 0.9~1.1 之间变化, 且随着竖向压力的增大, 土工格室加筋对橡胶砂动剪模量和阻尼比的影响减小。

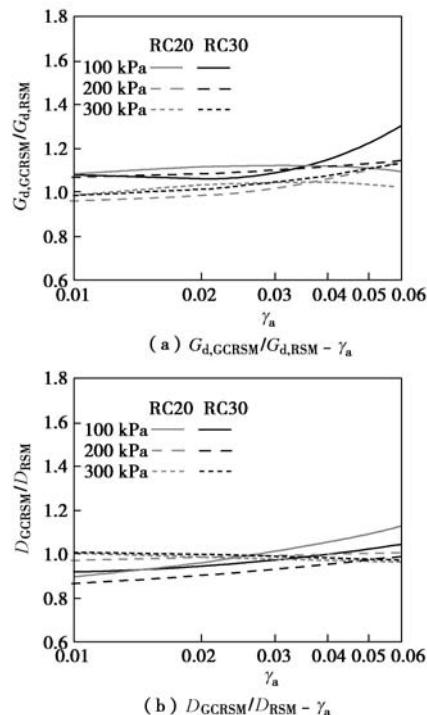


图 9 GCRSM 与 RSM 的动剪模量之比、阻尼比之比随剪应变幅值的变化 ( $RC=20\% \& 30\%$ )

Fig. 9 Variation of ratios of dynamic shear modulus and damping ratio of GCRSM to RSM with amplitude of shear strain ( $RC=20\% \& 30\%$ )

### 3.3 土工格室加筋对橡胶砂最大动剪模量的影响

图 10 给出了 RSM 和 GCRSM 最大动剪模量  $G_{dmax}$  与  $RC=0\%$  的橡胶砂(纯砂)的比值  $G_{dmax}/G_{dmax,RC=0\%}$  随  $RC$  的衰减关系。由图 10 可见:

(1) 橡胶砂相对于纯砂最大动剪模量之比  $G_{dmax}/G_{dmax,RC=0\%}$  随橡胶含量  $RC$  衰减的速率随着竖向压力增大而减小;

(2) 比较 GCRSM 和 RSM 在不同竖向压力下的  $G_{dmax}/G_{dmax,RC=0\%} - RC$  平均曲线, 前者的衰减速率比

后者的更小。

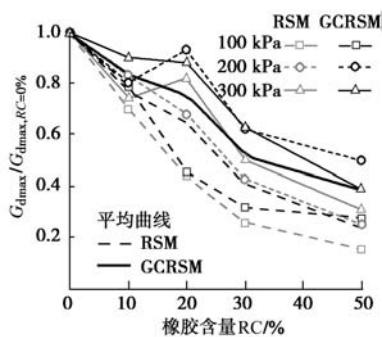


图 10 RSM 和 GCRSM 的  $G_{d\max}$  随橡胶含量的变化规律比较

Fig. 10 Comparison of variation of  $G_{d\max}$  with rubber content between RSM and GCRSM

图 11 给出了不同橡胶含量时 RSM 和 GCRSM 最大动剪模量  $G_{d\max}$  与竖向压力为 100 kPa 时橡胶砂的最大动剪模量比值  $G_{d\max}/G_{d\max,\sigma_v=100 \text{ kPa}}$  随竖向压力  $\sigma_v$  的变化关系。由图 11 可见：

(1) 配比越大,  $G_{d\max}/G_{d\max,\sigma_v=100 \text{ kPa}} - \sigma_v$  关系斜率越大;

(2) 比较 GCRSM 和 RSM, 前者的  $G_{d\max}/G_{d\max,\sigma_v=100 \text{ kPa}} - \sigma_v$  关系平均曲线斜率比后者的  $G_{d\max}/G_{d\max,\sigma_v=100 \text{ kPa}} - \sigma_v$  关系平均曲线斜率小。

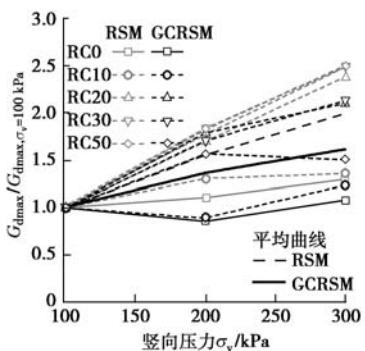


图 11 RSM 和 GCRSM 的  $G_{d\max}$  随竖向压力的变化规律比较

Fig. 11 Comparison of variation of  $G_{d\max}$  with vertical pressure between RSM and GCRSM

图 12 给出了 GCRSM 和 RSM 最大动剪模量比值  $G_{d\max,GCRSM}/G_{d\max,RSM}$  随橡胶含量 RC 的变化关系。图中散点为试验点, 实线为不同竖向压力下的  $G_{d\max,GCRSM}/G_{d\max,RSM} - \text{RC}$  平均关系曲线。

由图 12 可见：

(1)  $G_{d\max,GCRSM}/G_{d\max,RSM}$  在 0.8~1.4 之间, 随 RC 增大而增大;

(2) 当  $RC < 23\%$  时,  $G_{d\max,GCRSM}/G_{d\max,RSM}$  小于 1.0, 反之,  $G_{d\max,GCRSM}/G_{d\max,RSM}$  大于 1.0;

(3) 当 RC 在 20%~30% 时,  $G_{d\max,GCRSM}/G_{d\max,RSM}$  在 0.9~1.1 之间变化。

### 3.4 土工格室加筋对橡胶砂模量比曲线的影响

图 13 给出了由试验结果拟合得到的 GCRSM 与 RSM 的模量比曲线的对比情况。图(a)给出了模量比曲线  $G_d/G_{d\max} - \gamma_a$ , 图(b)给出了 GCRSM 和 RSM 两者模量比的比值  $(G_d/G_{d\max})_{GCRSM}/(G_d/G_{d\max})_{RSM}$  随剪应变幅值  $\gamma_a$  的变化曲线。

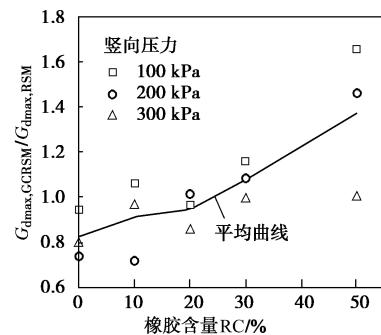


图 12 GCRSM 和 RSM 的  $G_{d\max}$  相对比值随橡胶含量变化关系

Fig. 12 Variation of relative ratio of  $G_{d\max}$  of GCRSM to  $G_{d\max}$  of RSM with rubber content

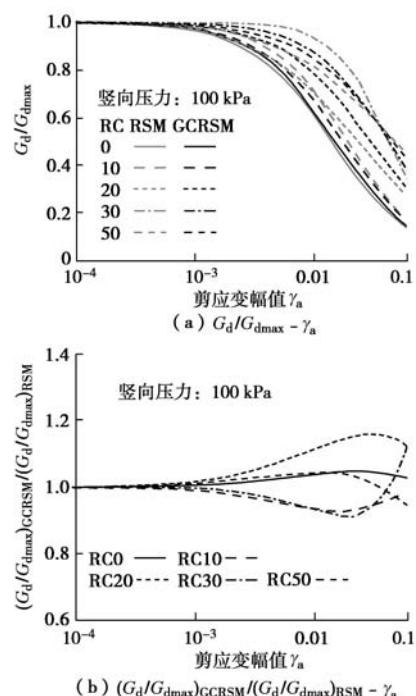


图 13 GCRSM 和 RSM 的  $G_d/G_{d\max} - \gamma_a$  比较

Fig. 13 Comparison of  $G_d/G_{d\max} - \gamma_a$  between RSM and GCRSM

由图 13 可见：

(1) 相同配比的 GCRSM 与 RSM 模量比曲线相差较小, 尤其是在应变幅值小于  $10^{-3}$  时两者基本重合;

(2) 在竖向压力 100 kPa 时, 在  $10^{-4}$  到 0.06 应变范围上,  $(G_d/G_{d\max})_{GCRSM}/(G_d/G_{d\max})_{RSM}$  在 0.9~1.18 之间, 即格室加筋对橡胶砂模量比曲线的影响在 20% 以内。

### 3.5 土工格室对橡胶砂动力特性影响机理分析

土工格室对散体材料的加筋作用主要体现为网兜效应, 即土体在竖向压力作用下发生侧向变形, 使得格室片张紧, 格室片的反作用力使得土体围压增加, 颗粒间接接触法向应力增大, 剪切时土颗粒相互错动移位所需克服的阻力增大, 宏观上就表现为剪切模量增大。橡胶含量越大, 橡胶砂压缩模量越小, 在竖向压力作用下发生侧向变形也越大, 从而土工格室的网兜效应发挥越极致, 使得橡胶砂的动剪模量增大越明显。

当剪应变幅值较小时, 加筋橡胶砂中的颗粒由于土工格室的网兜效应产生的附加围压而接触更紧密, 颗粒间传力途径增加, 能量传播过程中的损耗减少, 故加筋橡胶砂相对于无筋橡胶砂的阻尼比略有降低。当剪应变幅值较大时, 无土工格室加筋的橡胶砂往往容易产生剪切带(研究表明, 变形局部化是土体在大应变时的重要特征<sup>[24-25]</sup>), 参与摩擦耗能的土颗粒主要局限在剪切带附近范围内, 从而阻尼比随剪应变幅值增大反而有降低趋势; 而土工格室加筋延缓了橡胶砂变形局部化的发展, 使得整个试样高度范围内的土颗粒仍然参与摩擦耗能, 故阻尼比继续随剪应变幅值增大而增大。

## 4 结 论

本文通过大尺寸循环单剪试验研究了土工格室加筋对水平循环荷载作用下橡胶砂动力特性的影响。结论如下:

(1) 土工格室加入橡胶砂后, 由于限制了剪切带的发展、促使剪切变形在整个试样高度上均匀发生, 使得橡胶砂在大应变下的滞回曲线反S形特征减弱, 滞回曲线形状更为饱满, 从而使得橡胶砂阻尼比始终随着剪应变幅值的增大而增大。

(2) 由于网兜效应使得橡胶砂颗粒间的接触压力增大, 土工格室的加筋使得橡胶砂动剪模量增大, 且随着橡胶含量的增大而愈明显。

(3) 土工格室的加入有效约束了往复剪切过程中, 传力骨架颗粒间的相对错动位移, 使得橡胶砂受循环加载次数的影响降低, 动力特性更加趋于稳定。

(4) 土工格室加筋使得橡胶砂最大动剪模量随橡胶含量增大而衰减的速率降低, 使得其随竖向压力增大而增加的速率减小。

(5) 本文给出了土工格室加筋对橡胶砂动力特性影响的定量分析结果, 可为后续研究和工程应用提供参考。

## 参 考 文 献:

[1] 中国工业和信息化部. 再生资源综合利用先进

适用技术目录(第二批) [EB]. 2014. (Ministry of Industry and Information Technology of PRC. Catalogue of advanced applicable technologies for comprehensive utilization of renewable resources (the 2nd batch) [EB]. 2014. (in Chinese)) <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n12845605/n1391689/15875428.html>.

- [2] FENG Z Y, SUTTER K G. Dynamic properties of granulated rubber-sand mixtures[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(3): 338 - 344.
- [3] 尚守平, 岁小溪, 周志锦, 等. 橡胶颗粒-砂混合物动剪切模量的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 377 - 381. (SHANG Shou-ping, SUI Xiao-xi, ZHOU Zhi-jin, et al. Study of dynamic shear modulus of granulated rubber-sand mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 377 - 381. (in Chinese))
- [4] ANASTASIADIS A, SENETAKIS K, PITILAKIS K, et al. Dynamic behavior of sand/rubber mixtures: Part I effect of rubber content and duration of confinement on small-strain shear modulus and damping ratio[J]. Journal of ASTM International, 2011, 9(2): 1 - 17.
- [5] ANASTASIADIS A, SENETAKIS K, PITILAKIS K, et al. Dynamic behavior of sand/rubber mixtures, Part II: Effect of rubber content on  $G/G_0\gamma$ -DT curves and volumetric threshold strain[J]. Journal of ASTM International, 2011, 9(2): 1 - 12.
- [6] ANASTASIADIS A, SENETAKIS K, PITILAKIS K. Small-strain shear modulus and damping ratio of sand-rubber and gravel-rubber mixtures[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, 30: 363 - 382.
- [7] SENETAKIS K, ANASTASIADIS A, PITILAKIS K. Dynamic properties of dry sand/rubber (SRM) and gravel/rubber (GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 33: 38 - 53.
- [8] RONALD L M, LINDSAY R J, TREVOR E K. The economics of seismic isolation in buildings[J]. Earthquake Spectra, 1990, 6(2): 245 - 263.
- [9] 曹万林, 戴祖远, 叶 炜, 等. 村镇建筑低成本隔震技术研究现状与展望[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 38 - 46. (CAO Wan-lin Cao, DAI Zu-yuan, YE Wei, et al. Research and prospect of low-cost isolation techniques for rural buildings[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(6): 38 - 46. (in Chinese))
- [10] TSANG H H. Seismic isolation by rubber-soil mixtures for

- developing countries[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2008, **37**(2): 283 – 303.
- [11] TSANG H H, LO S H, XU X, et al. Seismic isolation for low-to-medium-rise buildings using granulated rubber-soil mixtures: numerical study[J]. *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, 2012, **41**: 2009 – 2024.
- [12] SAMAN Y S, MONA R. Effect of seismic isolation by rubber soil mixture on seismic demand of steel moment frame in near fault area[J]. *Structure and Steel*, 2012, **7**(10): 41 – 60.
- [13] ABDELHALEEM A M, EL-SHERBINY R M, LOTFY H, et al. Evaluation of rubber/sand mixtures as replacement soils to mitigate earthquake induced ground motions[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris, 2013: 3163 – 3166.
- [14] BANDYOPADHYAY S, SENGUPTA A, REDDY G R. Performance of sand and shredded rubber tire mixture as a natural base isolator for earthquake protection[J]. *Earthquake Engineering & Engineering Vibration*, 2015, **14**(4): 683 – 693.
- [15] 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.
- [16] 岳小溪. 橡胶颗粒-砂混合物隔震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2009. (SUI Xiao-xi. Study on isolation performance of rubber sand mixtures[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2009. (in Chinese))
- [17] 刘方成, 任东滨, 刘娜, 等. 土工格室加筋橡胶砂垫层隔震效果数值分析[J]. *土木工程学报*, 2015, **47**(增刊2): 1 – 7. (LIU Fang-cheng, REN Dong-bin, LIU Na, et al. Numerical simulation on the isolation effect of geocell reinforced rubber-sand mixture cushion earthquake base isolator[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, **47**(S2): 109 – 118. (in Chinese))
- [18] LESHCHINSKY B, LING H. Effects of geocell confinement on strength and deformation behavior of gravel[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE,
- 2013, **139**(2): 340 – 352.
- [19] 邓鹏, 郭林, 蔡袁强, 等. 考虑填料-土工格室相互作用的加筋路堤力学响应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, **34**(3): 621 – 630. (DENG Peng, GUO Lin, CAI Yuan-qiang, et al. Mechanical behavior of reinforced embankment considering interaction between gravel and geo-cell[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, **34**(3): 621 – 630. (in Chinese))
- [20] 尚守平, 刘方成, 杜运兴, 等. 应变累积对黏土动剪模量和阻尼比影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2006, **27**(5): 683 – 688. (SHANG Shou-ping, LIU Fang-cheng, DU Yun-xing. Experimental study on effect of shear strain accumulation on dynamic shear modulus and damping ratio of clay soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, **27**(5): 683 – 688. (in Chinese))
- [21] ISHIHARA K. Modeling of stress-strain relations of soils in cyclic loading[C]// Proceedings of 5th Conference on Numerical Methods in Geomechanics. Nagoya, 1985: 373 – 380.
- [22] VUCETIC M. Normalized behavior of clay under irregular cyclic loading[J]. *Canada Geotechnical Journal*, 1990, **27**: 29 – 46.
- [23] DARENDELI M B, STOKOE K H. Dynamic properties of soils subjected to the 1994 Northridge Earthquake[R]. Austin: Civil Engineering Department, University of Texas at Austin, 1997.
- [24] 李元海, 朱合华, 靖洪文, 上野胜利. 基于数字照相的砂土剪切变形模式的试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007, **35**(5): 685 – 689. (LI Yuan-hai, ZHU He-hua, JING Hong-wen, et al. Experimental investigation of shear deformation patterns in sands based on digital image correlation[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2007, **35**(5): 685 – 689. (in Chinese))
- [25] 左永振, 程展林, 赵娜. 千枚岩碎屑土三轴试验剪切带扩展性状的CT研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(8): 1524 – 1531. (ZUO Yong-zhen, CHENG Zhan-lin, ZHAO Na. Expansion mechanism of shear bands in phyllite detritus soil by CT technology[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(8): 1524 – 1531. (in Chinese))