

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.06.005

# 土工格室加筋对橡胶砂动剪模量影响的试验研究

刘方成, 陈璐, 岳洪滔

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 对4种质量配合比(0%, 20%, 30%, 100%)和4种竖向固结压力下的加筋与无筋橡胶砂, 进行循环单剪试验, 分析土工格室加筋对橡胶砂动剪模量的影响规律。研究表明: 加筋与无筋橡胶砂的动剪模量均随着动剪应变幅值的增大而减小, 随着橡胶含量的增大而降低, 随着竖向固结压力的增加而升高, 动剪模量曲线均随着固结压力的增大而趋于平缓、非线性特性减弱; 土工格室加筋使得橡胶砂的动剪模量有所提高, 但是随着剪应变幅值和固结压力的增大, 加筋的影响降低; 土工格室加筋使得橡胶砂的模量比衰减延迟, 但其影响亦随固结压力的增大而减弱。

**关键词:** 土工格室加筋; 橡胶砂; 动剪切模量; 循环单剪试验

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)06-0023-06

## Experimental Study on the Effect of Geo-Cell Reinforcement on Dynamic Shear Modulus of Rubber-Sand Mixtures

Liu Fangcheng, Chen Lu, Yue Hongtao

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

**Abstract:** Cyclic simple shear tests are conducted on RSM with 4 rubber contents (0%, 20%, 30% and 100%) under 4 different vertical consolidation pressures, and the effects of geo-cell reinforcement on the dynamic shear modulus of RSM are analyzed. The results show that: The dynamic shear modulus of reinforced and non-reinforced RSM both decrease with the increment of dynamic shear strain amplitude and rubber contents and increase with vertical consolidation pressure increasing. The curves of the dynamic shear modulus intend flatten and the nonlinear characteristics are weakened with the consolidation pressure increasing. The dynamic shear modulus of RSM improves with the geo-cell reinforcement, but as the shear strain amplitude and consolidation pressure increasing the effect of reinforcement decreases. The geo-cell reinforcement delays the attenuation of modulus ratio of RSM and the effect decreases with the consolidation pressure increment.

**Keywords:** geo-cell reinforcement; rubber-sand mixtures (RSM); dynamic shear modulus; cyclic simple shear test

### 1 研究背景

近年来, 随着废旧轮胎数量的增加, 由废旧轮胎破碎而得的橡胶颗粒与砂土、黄土、黏土等掺拌而成的新型土工材料, 已逐步应用于实际工程中。

这不仅满足了工程的需要, 也是一种低廉环保的方法。其中, 橡胶砂作为可用于隔震的换填材料, 其力学特性的研究得到了国内外学者的高度重视。S. M. Marandi<sup>[1]</sup>利用大型循环三轴试验研究了围压与橡胶颗粒含量对橡胶砂动剪模量的影响, 得出了最大

收稿日期: 2015-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108177), 湖南工业大学自然科学基金资助项目(2012HZX20, 2013HZX09)

作者简介: 刘方成(1978-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事新型岩土隔震系统方面的研究,

E-mail: 455211101@qq.com

剪切模量、归一化剪切模量与围压和配合比的函数关系。A. Anastasiadis<sup>[2-5]</sup>等通过扭转共振柱试验研究了不同饱和或干燥状态、不同砂颗粒粒径特性、不同固结时间、不同橡胶颗粒含量、不同应变幅值等情况下橡胶砂的动剪模量和阻尼比特性，并提出了橡胶砂动剪模量和阻尼比的经验公式。岁小溪<sup>[6]</sup>对橡胶砂垫层进行了隔震试验，验证了橡胶砂垫层具有良好的隔震效果，并根据经济效益和隔震效果的综合分析，得出橡胶砂的最佳体积配比为35%。李丽华等<sup>[7]</sup>通过室内数字化动三轴试验研究了橡胶颗粒含量及围压对混合物动强度、动弹性模量和等效阻尼比的影响，结果表明橡胶颗粒的加入能有效地降低混合土的剪切刚度，可以起到隔震减震的作用。

为改善强度、整体性等工程特性，对土体中进行加筋是一种有效途径。U. Balunaini 等<sup>[8]</sup>将土工格栅嵌入在橡胶碎片和砂的混合物中，并通过拉拔试验研究了橡胶碎片尺寸和配比对其抗拔能力的影响，结果表明土工格栅的加入提高了混合物的抗拔能力。S. N. M. Tafreshi 等<sup>[9]</sup>将加筋后的橡胶砂骨料掺入含有软弱土层的路基中并研究其承载力，得出加入橡胶颗粒和加筋材料后，路基的变形能够降低60%~70%的结论。潘越<sup>[10]</sup>通过动三轴试验研究了循环荷载作用下围压和加筋层数对加筋土的动力特性的影响，得出加筋土的动弹性模量随着围压的增大而增大，阻尼比随着动应变的增加逐渐增大。土工格室是一种三维网状结构的柔性加筋材料，相比于土工格栅、土工膜等平面加筋材料，由于其立体网状结构能产生网兜效应，对于提高散体材料的压缩模量、改善垫层的整体性具有更好的加筋效果。刘方成等<sup>[11]</sup>提出用土工格室加筋橡胶砂垫层作为基底隔震换填层，并通过直剪试验对加筋与无筋橡胶砂的静力特性进行了研究，结果表明土工格室加筋提高了橡胶砂的强度和黏聚力，并显著降低了橡胶砂的剪胀、剪缩和竖向压缩变形，且橡胶颗粒含量越大，加筋效果越明显。

本文应用常规尺寸WF循环单剪试验系统，对缩尺模型土工格室加筋橡胶砂的动力特性进行研究，并与无筋橡胶砂进行对比分析，以期能为土工格室加筋橡胶砂垫层隔震分析及相关后续研究提供参考。

## 2 试验介绍

### 2.1 试验仪器与材料

试验在湖南大学WF循环单剪试验系统上进行，该系统可研究的试样直径为70 mm，高度可调，以层叠的薄铜环模拟试样的边界条件。

试验所用砂为普通河砂，所用橡胶颗粒购于专业分解废旧轮胎的厂家。橡胶颗粒和砂颗粒的物理特性如表1所示，颗粒级配曲线如图1<sup>[12]</sup>所示。

表1 试验用砂和橡胶颗粒物理特性

Table 1 The physical properties of sand and rubber particles

试验材料	相对密度 $G_s$	粒径范围/ mm	平均粒径 $D_{50}$ /mm	不均匀 系数 $C_u$
橡胶颗粒	1.21	0.7~2.3	1.50	1.43
砂颗粒	2.59	0~4.5	0.29	1.31

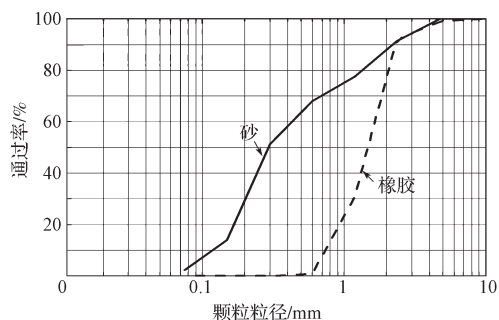


图1 橡胶颗粒和砂的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curves of rubber particles and sand

试验所用土工格室为自制缩尺土工格室，是工程中用于加筋的土工格室按照1:20的比例缩小，来模拟其对橡胶砂的加筋效应。具体制作方法如下：将土工格室片裁剪成宽度为20 mm的带状薄片，用强力胶水进行连接以模拟实际土工格室焊接。制作好的土工格室缩尺模型高度为20 mm，片材厚度为1 mm，每个小格室尺寸为20 mm × 20 mm。试验所用土工格室如图2所示，加筋橡胶砂试验试样如图3所示。

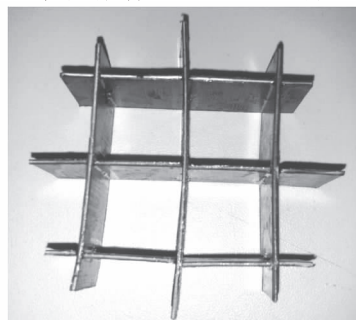


图2 试验用土工格室缩尺模型

Fig. 2 The size of geocell model

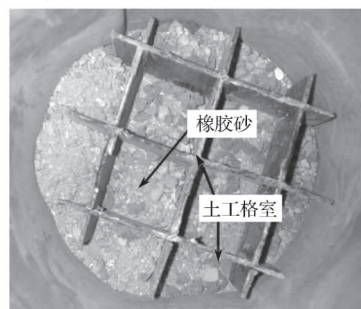


图3 加筋橡胶砂试样

Fig. 3 The reinforcement RSM sample

### 2.2 试验工况

试验主要考虑橡胶与砂的质量配合比、竖向固结压力以及有无加筋等变化条件对橡胶砂动力特性的影响。根据文献[6]的研究, 当橡胶砂体积配合比为35%时具有较好的隔震效果, 考虑经济原因, 合理的隔震橡胶砂质量配合比为20%~30%。故本试验主要选取质量配合比为20%和30%的橡胶砂作为研究对象。同时, 为比较起见, 还对纯砂(橡胶质量分数为0%)和纯橡胶颗粒(橡胶质量分数为100%)进行试验。具体试验工况如表2所示。

表2 试验工况

Table 2 Test conditions

控制参数	质量配合比/%	竖向固结压力/kPa	土工格室
参数取值	0, 20, 30, 100	50, 100, 200, 300	无筋、加筋

### 2.3 试验方法

无筋试样的制备是将橡胶颗粒风干, 并与烘干后的河砂按质量比均匀搅拌, 对不同配合比的橡胶砂采取相同的相对密度进行装样, 根据控制密度, 将一定质量的橡胶砂采用砂雨法分3次击实放入试膜中。加筋橡胶砂在制备时先将自制土工格室放入圆柱体橡胶膜中, 再进行装样。试验采取应变控制剪切, 设定每级应变幅值下循环剪切50次。将试样固结至竖向位移-时间曲线趋于水平后, 保持竖向固结压力不变进行剪切。对每一个试样由小到大分10级剪应变幅值施加循环荷载。剪应变幅值分级及相应的控制位移幅值如表3所示。

表3 荷载分级与应变幅值

Table 3 The load grading and strain amplitude

级别	1	2	3	4	5
位移幅值/mm	0.01	0.02	0.04	0.07	0.10
应变幅值	0.000 5	0.001 0	0.002 0	0.003 5	0.005 0
级别	6	7	8	9	10
位移幅值/mm	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
应变幅值	0.010 0	0.020 0	0.030 0	0.040 0	0.050 0

注: 每级荷载下循环圈数  $N=50$ 。

## 3 试验现象及结果分析

### 3.1 加筋与无筋橡胶砂滞回曲线对比

图4给出了固结压力  $p=100$  kPa时, 质量配合比分别为0%, 30%, 100%的无筋橡胶砂的滞回曲线和质量配合比为30%的加筋橡胶砂的滞回曲线。由图可知, 在相同的应变幅值下, 0%的无筋试样(即纯砂)的滞回曲线均高于30%, 100%无筋试样和30%加筋试样的滞回曲线, 这说明纯砂的模量较高。橡胶砂的动剪模量随着橡胶颗粒含量的增大而减小, 橡胶颗粒

的加入能有效降低混合材料的动剪模量。对比质量配合比为30%的加筋和无筋橡胶砂的滞回曲线可知, 加筋以后橡胶砂的动剪模量有所提高, 但提高幅度不大。

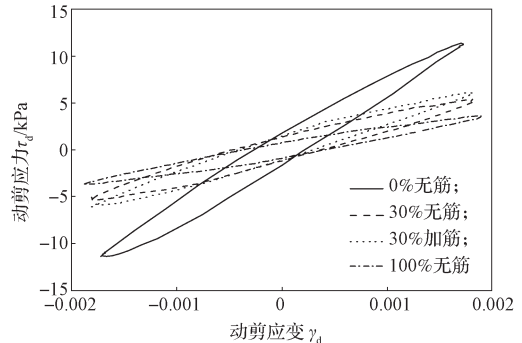
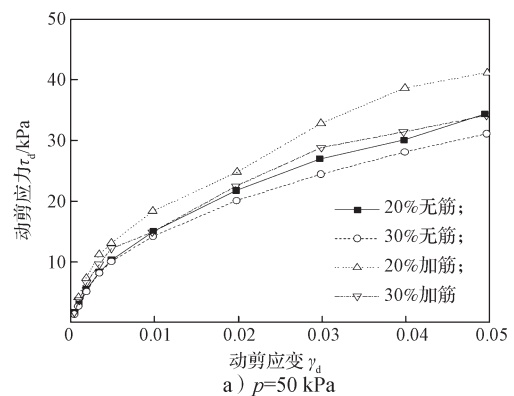


图4 不同配合比下加筋与无筋橡胶砂的滞回曲线

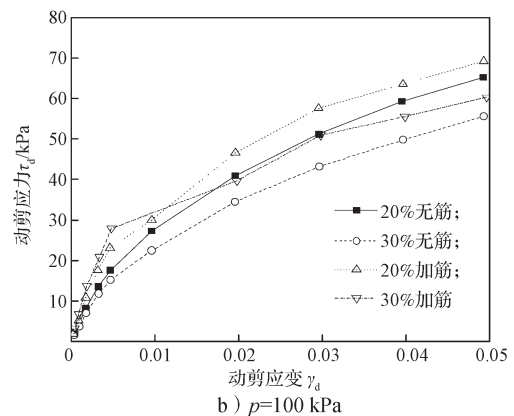
Fig. 4 Hysteresis curves of reinforced and non-reinforced RSM with different rubber content

### 3.2 加筋与无筋橡胶砂骨架曲线对比

图5是质量配合比为20%和30%的加筋与无筋橡胶砂在不同竖向固结压力下的骨架曲线。由图可知, 在相同的固结压力下, 加筋橡胶砂的骨架曲线明显高于无筋橡胶砂的骨架曲线, 这说明土工格室加筋有效提高了橡胶砂混合物的剪切强度; 20%加筋和无筋橡胶砂的骨架曲线均高于30%加筋和无筋橡胶砂的骨架曲线, 这说明无论加筋与否, 橡胶砂的应力应变曲线均随着橡胶颗粒含量的增加而降低。



a)  $p=50$  kPa



b)  $p=100$  kPa

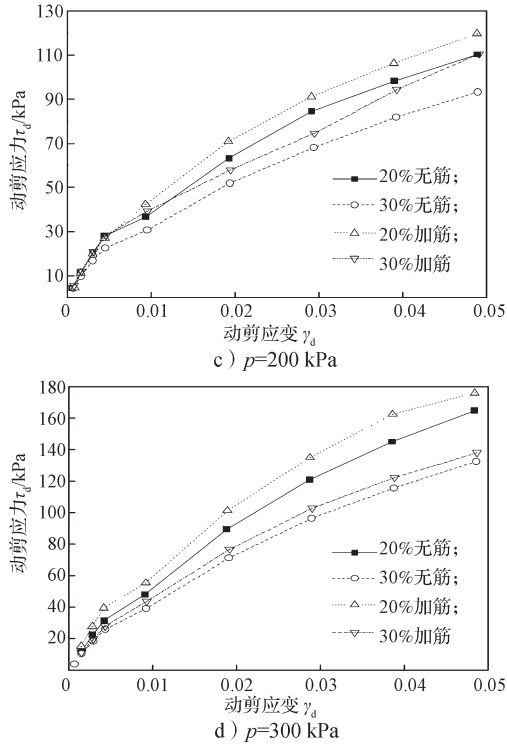


图5 不同条件下橡胶砂的骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curves of RSM under different conditions

对比图5的4幅图可以看出, 固结压力越大, 橡胶砂的应力应变曲线越高。

### 3.3 加筋与无筋橡胶砂动剪模量曲线对比

图6所示为质量配合比20%和30%的加筋与无筋橡胶砂在不同竖向固结压力下的动剪模量曲线。由图可知, 在同一竖向固结压力下, 配合比相同的加筋橡胶砂与无筋橡胶砂相比, 其动剪模量有一定的提高; 但随着应变幅值的增大, 二者动剪模量的差值减小。

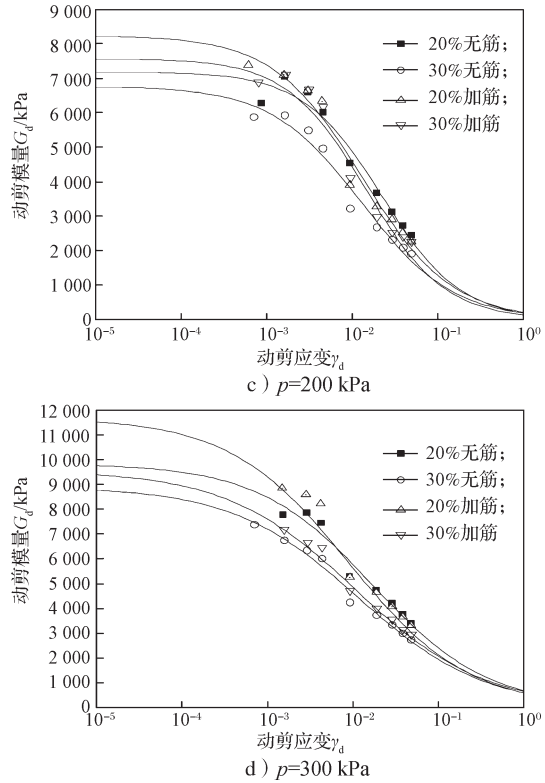
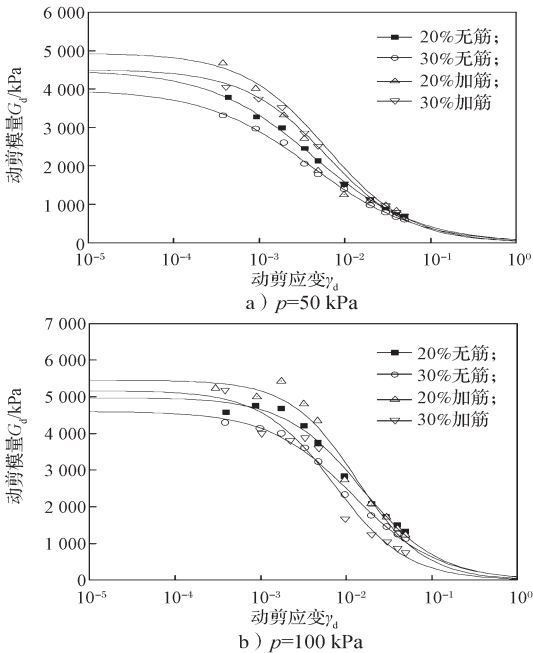


图6 不同条件下橡胶砂的动剪模量曲线

Fig. 6 The dynamic shear modulus curves of RSM under different conditions

对比图6的4幅图可知, 随着竖向固结压力的增大, 同配合比下加筋橡胶砂动剪模量提高的幅度降低, 且所有动剪模量曲线均随着竖向固结压力的增大而趋于平缓(即非线性特性减弱)。

由图6可知, 加筋橡胶砂和无筋橡胶砂的动剪模量曲线均表现出双曲衰减函数的形式, 可用式(1)进行拟合。

$$G_d = \frac{G_0}{1 + (\gamma_d/\gamma_r)^\alpha}, \quad (1)$$

式中:  $G_d$  为动剪模量;

$G_0$  为初始动剪模量(即剪应变幅值为  $10^{-6}$  时的动剪模量);

$\gamma_d$  为动剪应变幅值;

$\gamma_r$  为参考剪应变;

$\alpha$  为衰减指数。

用式(1)对图6的试验曲线拟合, 得到质量配合比为20%和30%的无筋橡胶砂和加筋橡胶砂的动剪模量参数如表4所示。由表可知, 1) 对于加筋和无筋橡胶砂, 在相同固结压力下,  $G_0$  随着橡胶含量的增大而降低; 在相同的配合比下,  $G_0$  随着固结压力的增加而明显增大。2) 比较加筋和无筋橡胶砂, 在相同固结压力和配合比下, 加筋橡胶砂的  $G_0$  值比无筋橡胶砂的有所提高。

表4 20%和30%加筋与无筋橡胶砂拟合曲线参数值

Table 4 The parameter values of fitting curves of reinforced and non-reinforced RSM with 20% and 30% rubber contents

参数	配合比为20%的无筋橡胶砂				配合比为20%的加筋橡胶砂				配合比为30%的无筋橡胶砂				配合比为30%的加筋橡胶砂			
固结压力/kPa	50	100	200	300	50	100	200	300	50	100	200	300	50	100	200	300
$G_0$ /kPa	4 492	4 982	7 192	9 837	4 936	5 453	8 244	11 688	3 983	4 602	6 772	8 906	4 507	5 171	7 574	9 560
$\gamma_r$	0.004	0.015	0.022	0.017	0.006	0.013	0.013	0.009	0.004	0.012	0.013	0.011	0.006	0.007	0.014	0.011
$\alpha$	0.717	0.967	0.939	0.642	0.884	1.106	0.831	0.621	0.704	0.878	0.815	0.590	0.894	1.025	0.940	0.574

3.4 加筋与无筋橡胶砂动剪模量归一化曲线

为研究不同固结压力下动剪模量的衰减规律, 对公式(1)进行变换得到

$$\frac{G_d}{G_0} = \frac{1}{1 + (\gamma_d/\gamma_r)^\alpha}, \quad (2)$$

式中  $G_d/G_0$  称为动模量比或者归一化模量。

图7给出了质量配合比为20%和30%的加筋与无筋橡胶砂, 在不同竖向固结压力下的动剪模量归一化曲线。由图可知, 从总体上看, 无筋橡胶砂的模量归一化曲线要先于加筋橡胶砂的归一化模量曲线呈下降趋势, 即说明在动荷载作用下, 橡胶砂加入土工格室后会延迟其动剪模量的衰减, 但是随着固结压力的增大, 该现象变得不再明显。

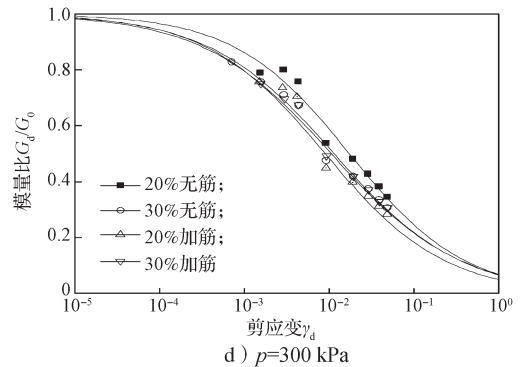
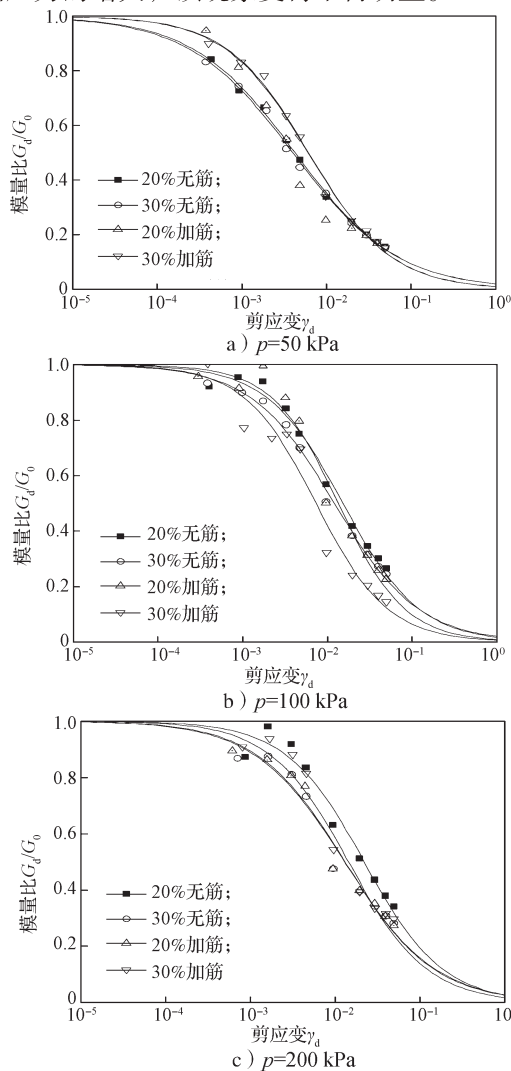


图7 不同条件下橡胶砂的动剪模量归一化曲线  
Fig. 7 The normalization curves of RSM dynamic shear modulus under different conditions

4 结论

- 1) 加筋与无筋橡胶砂的动剪模量均随着动剪应变幅值的增大而减小, 随着橡胶含量的增大而降低, 随着竖向固结压力的增加而升高, 且随着固结压力的增大而趋于平缓, 非线性特性减弱。
- 2) 土工格室加筋使得橡胶砂的动剪模量有所提高, 但是随着剪应变幅值和固结压力的增大, 加筋的影响降低。
- 3) 土工格室加筋使得橡胶砂的动模量比衰减延迟, 但其影响亦随固结压力的增大而减弱。

参考文献:

- [1] Marandi S M. Reducing the Forces Caused by Earthquake on Retaining Walls Using Granulated Rubber-Soil Mixture [J]. International Journal of Engineering Transactions B: Applications, 2011, 24(4) : 337-350.
- [2] 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(1) : 38-53.
- [3] 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(2) : 363-382
- [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*, 2012, 9(2) : 1-17.
- [5] Senetakis K, Anastasiadis A, Ptilakis 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*, 2012, 9(2) : 1-12.
- [6] 岁小溪. 橡胶颗粒-砂混合物的隔震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.  
Sui Xiaoxi. The Study on Seismic Isolation Performance of Granulated Rubber-Sand Mixture[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [7] 李丽华, 肖衡林, 唐辉明, 等. 轮胎颗粒混合土动力特性参数影响规律试验研究[J]. *岩土力学*. 2014, 35(2) : 359-364, 422.  
Li Lihua, Xiao Henglin, Tang Huiming, et al. Dynamic Properties Variation of Tire Shred-Soil Mixtures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(2) : 359-364, 422.
- [8] Balunaini U, Yoon S, Prezzi M, et al. Pullout Response of Uniaxial Geogrid in Tire Shred-Sand Mixtures[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2014, 32 (2) : 505-523.
- [9] Tafreshi S N M, Khalaj O, Dawson A R. Repeated Loading of Soil Containing Granulated Rubber and Multiple Geocell Layers[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42(1) : 25-38.
- [10] 潘越. 循环荷载作用下土工合成材料加筋土动力特性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.  
Pan Yue. The Dynamic Characteristics Research of Geosynthetic Materials Reinforced Soil Under Cyclic Loading[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2013.
- [11] 刘方成, 杨辉, 甘霖, 等. 加筋橡胶砂和非加筋橡胶砂静力特性对比研究[J]. *湖南工业大学学报*, 2014, 28(2) : 28-32.  
Liu Fangcheng, Yang Hui, Gan Lin, et al. Comparative Study on Static Characteristics of the Reinforced and Non-Reinforced Rubber-Sand Mixtures[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2014, 28(2) : 28-32.
- [12] 张永富, 刘方成, 任东滨, 等. 橡胶颗粒-砂混合物三轴CD剪切试验研究[J]. *湖南工业大学学报*, 2015, 29(1) : 17-23.  
Zhang Yongfu, Liu Fangcheng, Ren Dongbin, et al. Study on Shear Characteristics of Rubber-Sand Mixtures by Triaxial CD Tests[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2015, 29(1): 17-23.

(责任编辑: 邓光辉)