

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.02.006

# 加筋橡胶砂和非加筋橡胶砂静力特性对比试验

刘方成, 杨 辉, 甘 霖, 张永富

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 针对土工格室加筋后的橡胶砂研究的缺乏, 对此加筋橡胶砂进行了直剪和固结变形对比试验研究。分别针对橡胶颗粒质量分数为 20% 和 30% 的 2 种配合比的橡胶砂进行了研究, 得到了剪应力-剪应变曲线、竖向位移-剪切位移曲线以及固结压力-沉降曲线。试验结果表明: 土工格室加筋使得橡胶砂的强度有较大提高, 且对粘聚力的提高明显, 对摩擦角的影响较小; 土工格室加筋能显著降低橡胶砂的剪胀和剪缩变形, 能显著减少橡胶砂的竖向压缩变形; 橡胶砂的橡胶颗粒含量越大, 加筋效应越明显。

**关键词:** 橡胶砂; 土工格室加筋; 抗剪强度; 剪胀

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)02-0028-05

## Comparative Study on Static Characteristics of the Reinforced and Non-Reinforced Rubber-Sand Mixtures

Liu Fangcheng, Yang Hui, Gan Lin, Zhang Yongfu

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

**Abstract:** As lack of research of geocell reinforced rubber-sand mixture (RSM), the direct shear and consolidation deformation experiments are conducted on the reinforced RSM. The reinforced RSMs with rubber mass content of 20% and 30% respectively are studied, and the shear stress-shear strain curve, the vertical displacement-shear displacement curve and the consolidation pressure-settlement curve are obtained. The result indicates that: the strength of RSM is greatly enhanced by the reinforcement of geocell, specifically the cohesive factor is significantly improved and the friction angle is slightly affected. After the reinforcement by geocell, the shear contraction and dilatancy of RSM decrease significantly, as well as the vertical deformation under consolidation reduces obviously. The effect of reinforcement by geocell increases with the mass content of rubber in RSM.

**Keywords:** rubber sand mixture (RSM); geocell reinforced; shear strength; dilatation

## 0 引言

近年来, 随着废旧轮胎的增多, 由废旧轮胎破碎而成的橡胶颗粒在工程中的应用逐渐广泛。G. D. Trevor 等人<sup>[1]</sup>、S. Youwai 等人<sup>[2]</sup>对橡胶砂作为挡土墙的填充材料做了数值模拟分析, 发现其能降低残余

变形, 并且能减少地震作用下对挡土墙的作用力。S. M. Marandi 等人<sup>[3]</sup>发现橡胶颗粒与砂的混合物 (rubber-sand mixture, RSM) 用于地震区挡土墙后的轻质填料, 可以很好地减少挡土墙震后位移。岁小溪<sup>[4]</sup>进行了橡胶砂垫层的隔振试验研究, 验证了橡胶砂垫层能够起到很好的隔震效果, 并且根据隔震

收稿日期: 2013-11-29

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研究,

E-mail: 455211101@qq.com

效果和经济效益综合分析,建议采用体积配合比为35%的橡胶砂。已有研究表明,橡胶砂作为一种廉价、轻质、具高阻尼特性的填料,具有优良的工程应用价值,因此对其静动力特性展开研究具有重要意义。

土工格室是一种三维网状结构的柔性加筋材料,在地基处理中应用广泛。本文提出,在展开的土工格室网格中填入橡胶砂,形成具有一定厚度的加筋复合垫层。这种由具有良好阻尼特性的橡胶砂组成的垫层有望用于结构基底隔振或动力基础、高速铁路路基的隔振减震,有关其静动力特性值得深入研究。本文针对土工格室加筋前后橡胶砂的强度及静力变形特性进行研究,以期对相关应用提供参考。

## 1 试验介绍

### 1.1 试样制备

试验所用橡胶颗粒从专业分解废旧轮胎的厂商购得,经颗粒分析得其粒径范围主要为1.5~3.0 mm,平均粒径 $D_{50, rubber}=2.6$  mm,颗粒重度 $G_r=1.289$ 。试验用砂为普通建筑用河砂,粒径范围为0~4 mm,平均粒径 $D_{50, sand}=0.85$  mm,颗粒重度为 $G_s=2.653$ 。橡胶颗粒和砂的颗粒级配均如图1所示。

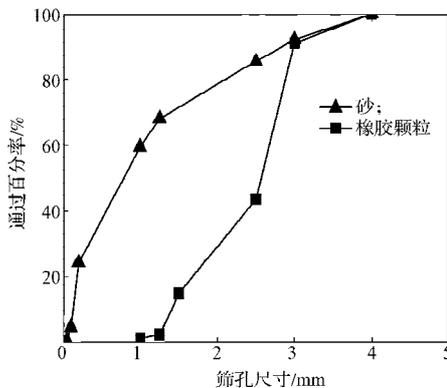


图1 橡胶颗粒和砂的级配曲线

Fig. 1 Grading curves of granulated rubber and sand

将风干后的橡胶颗粒和烘干后的砂按质量比进行混合,搅拌均匀制成橡胶砂。不同配合比下的物理特性参数如表1所示。

表1 不同配合比橡胶砂的最大与最小干密度

Table 1 The  $\rho_{dmax}$  and  $\rho_{dmin}$  of rubber soil mixture with different rubber contents  $g/cm^3$

干密度	配合比 /%						
	0	10	20	30	40	50	100
最大	2.060	1.753	1.510	1.420	1.206	1.076	0.716
最小	1.480	1.205	1.040	0.915	0.877	0.764	0.487

工程中用作加筋的土工格室网格尺寸较大(通常高度为200~300 mm,网格焊点间距300~400 mm),在室内试验由于受试样尺寸的限制,本文采用缩小尺

寸的土工格室来模拟其对土体的加筋效应。具体操作如下:将原土工格室片材裁剪成小条带,用强力胶水连接成立体网状结构,片材厚度为1 mm,格室间距为20 mm×20 mm,高度为20 mm,直径为70 mm,如图2所示。

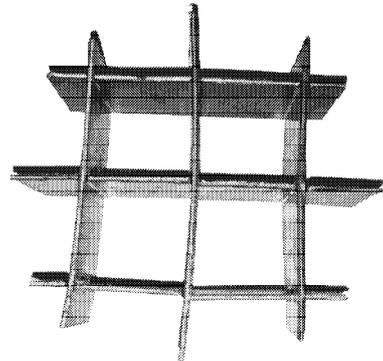


图2 试验用小尺寸土工格室

Fig. 2 The small size geocell used in tests

### 1.2 试验方法

本文对加筋与无加筋橡胶砂静力特性的研究主要通过固结压缩试验和常规直剪试验进行。固结仪为南京土壤仪器厂生产的WG-1B型三联中压固结仪,直剪仪器为南京土壤仪器厂生产的ZJ型应变控制式直剪仪器。

在试验装样时,对不同配合比的橡胶砂按统一的相对密度 $D_r$ 计算单个试样的质量,并用分层击实法击实,确保各试样间试验结果具有可比性。试验控制密度可由相对密度的公式确定。由

$$D_r = \frac{\rho_{dmax}(\rho_d - \rho_{dmin})}{\rho_d(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})}, \quad (1)$$

可得控制密度

$$\rho_d = \frac{\rho_{dmax}\rho_{dmin}}{\rho_{dmax} - D_r(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})}. \quad (2)$$

式(1)~(2)中: $D_r$ 为相对密度,试验中取0.65; $\rho_{dmax}$ , $\rho_{dmin}$ 分别为不同配合比橡胶砂的最大、最小干密度,如表1所示; $\rho_d$ 为装样控制密度。

各个试样的装样质量为

$$m = \rho_d V. \quad (3)$$

式中 $V$ 为试验土盒的净体积。

固结压缩试验和直剪试验均按GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》<sup>[1]</sup>中的规定进行。固结压缩试验中的压力等级分8级荷载(12.5, 25.0, 50.0, 100.0, 200.0, 300.0, 400.0, 800.0 kPa),每级荷载间隔24 h施加。直剪试验中,按设定的竖向固结压力固结30 min后再进行剪切,剪切速率为0.8 mm/min。

### 1.3 试验工况

试验主要考察橡胶砂在有无加筋、不同配合比、

不同竖向固结压力对橡胶砂强度及变形特性的影响。文献[4]建议橡胶砂体积配合比为35%时隔震效果较好,考虑到经济原因,因此其常用的质量配合比应该在20%~30%左右,故试验选取其质量配合比为20%,30%两种工况。竖向固结压力则考虑从50 kPa变化到300 kPa。试验考查的影响因素变化如表2所示,其中任意一个因素的变化均构成一种工况,每个工况下均进行一组(3个)试样的试验。

表2 试验中考虑的影响因素及其取值

Table 2 The influence factors and values in the tests

试验方法	配合比/%	竖向固结压力/kPa	土工格室有无加筋
直剪试验	20, 30	50, 100, 200, 300	无加筋(wj)、加筋(jj)
固结压缩试验	20, 30	12.5~800.0	筋(jj)

## 2 结果与分析

### 2.1 应力-应变曲线对比

图3~6为20%,30%加筋与无加筋橡胶砂在不同竖向固结压力下的剪应力-剪应变曲线。

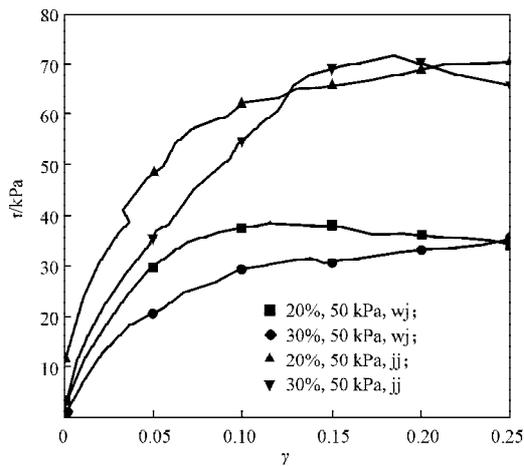


图3 50 kPa  $\tau$ - $\gamma$  曲线  
Fig. 3 The  $\tau$ - $\gamma$  curve under 50 kPa

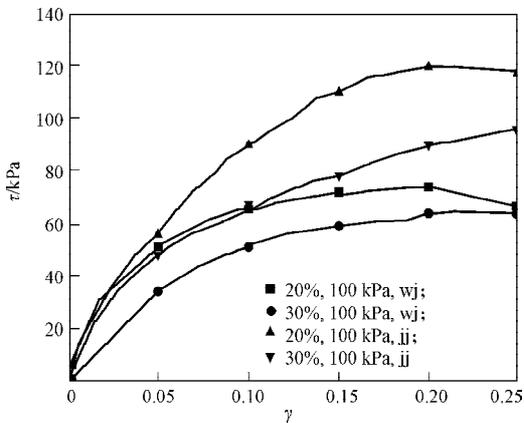


图4 100 kPa  $\tau$ - $\gamma$  曲线  
Fig. 4 The  $\tau$ - $\gamma$  curve under 100 kPa

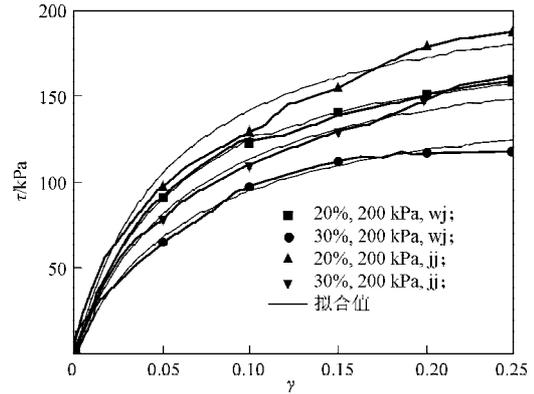


图5 200 kPa  $\tau$ - $\gamma$  曲线  
Fig. 5 The  $\tau$ - $\gamma$  curve under 200 kPa

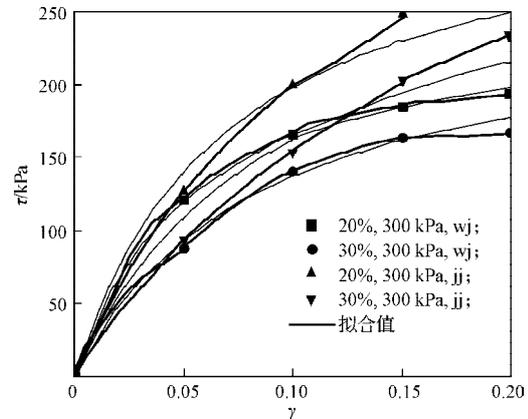


图6 300 kPa  $\tau$ - $\gamma$  曲线  
Fig. 6 The  $\tau$ - $\gamma$  curve under 300 kPa

由图3~6可知:在相同的固结压力下,加筋橡胶砂的应力-应变曲线明显高于非加筋橡胶砂的应力-应变曲线,且随固结压力的不同,加筋和非加筋橡胶砂的应力-应变曲线的差异也发生变化。在固结压力较小时,加筋橡胶砂的应力-应变曲线远高于非加筋橡胶砂的应力-应变曲线,说明此时加筋效应很明显。当固结压力较大时,加筋橡胶砂的应力-应变曲线与非加筋橡胶砂的应力-应变曲线的差异减小,两者在小应变段基本重合,只在很大应变区域两者才有较明显区别,说明在高固结压力下,土工格室对橡胶砂的加筋效应减小。除此之外,从应力应变曲线走向来看,非加筋橡胶砂应力-应变曲线在应变较小时应力随着应变的增大而迅速增大,但随着应变的增大,非加筋橡胶砂的应力增长放缓,甚至有降低的趋势,应力-应变曲线表现出较明显的转折和应变软化趋势;而对于加筋橡胶砂,其应力值随着应变的增加稳步增大,应力-应变曲线的转折点也向大应变方向移动。

由试验曲线可知,加筋和非加筋橡胶砂的应力-应变曲线均符合双曲线型,可用式(4)所代表的方程进行拟合<sup>[6]</sup>,即

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad (4)$$

式中： $G_0$ 为最大剪切模量； $\gamma_r$ 为参考剪应变。

拟合所得20%，30%无筋和加筋橡胶砂的应力-应变曲线参数如表3所示。

表3  $\tau - \gamma$ 关系双曲线拟合系数  
Table 3 The  $\tau - \gamma$  hyperbola fitting coefficient

工况	固结压力 /kPa							
	50		100		200		300	
	$G_0$ /kPa	$\gamma_r$						
20%, wj	1 891	0.022	2 677	0.032	3 381	0.057	4 657	0.054
20%, jj	2 563	0.031	3 248	0.060	3 995	0.055	4 816	0.070
30%, wj	878	0.046	1 191	0.073	2 360	0.067	2 983	0.085
30%, jj	1 198	0.085	1 632	0.073	2 844	0.066	3 323	0.096

从表3可以看出，加筋和无加筋橡胶土的 $\gamma_r$ 值均随着固结压力的增加而增大；当固结压力较小时，同配合比加筋橡胶砂的 $\gamma_r$ 值明显大于无加筋橡胶砂的 $\gamma_r$ 值；当固结压力较大时，同配合比的加筋橡胶砂的 $\gamma_r$ 值与无加筋橡胶砂时较接近。 $G_0$ 值随着固结压力的增加明显增大，相同固结压力、同种配合比时，加筋橡胶砂 $G_0$ 的值明显大于无加筋橡胶砂。因此，当竖向固结压力较小时，加筋橡胶砂相对于非加筋橡胶砂的 $G_0$ 值提高较大，随着固结压力的增大，增加的数值变小。综上可得，随着固结压力的增大，土工格室加筋对橡胶砂的 $G_0$ 值和 $\gamma_r$ 值影响均逐渐变小；随着橡胶颗粒含量的增加，土工格室加筋对橡胶砂 $G_0$ 值的提高更大。

### 2.2 强度包线对比

取剪应力-剪应变关系曲线上剪应力峰值为抗剪强度（无峰值时取剪应变为20%时所对应的剪应力为抗剪强度），可得不同配合比下加土工格室与不加土工格室的橡胶砂强度包线，如图7~8所示。

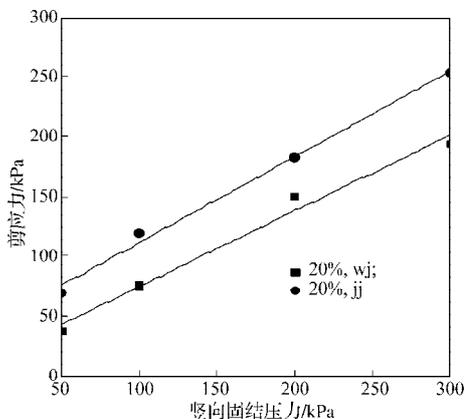


图7 20%配合比橡胶砂的强度包线

Fig. 7 The strength envelope for RSM with 20% rubber content

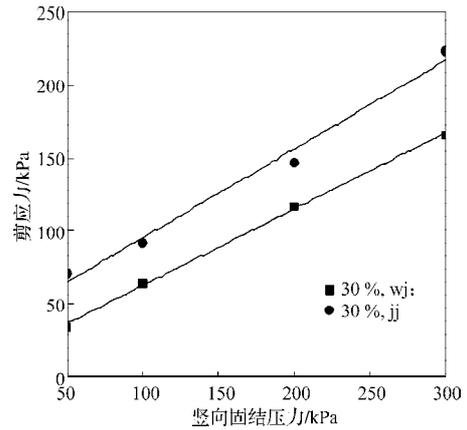


图8 30%配合比橡胶砂的强度包线

Fig. 8 The strength envelope for RSM with 30% rubber content

由图7~8可知，橡胶砂的强度基本符合摩尔-库伦定律，剪切强度随固结压力的增大而线性增大。由试验结果可见，虽然橡胶砂从物理组成上来说属于无粘性土，但由于砂颗粒之间以及砂颗粒与橡胶颗粒之间的摩擦咬合力，其强度曲线的截距并不等于零，这种现象可称为橡胶砂的假粘聚力现象。据图7~8可知，配合比为20%加筋橡胶砂的假粘聚力比不加筋时增加了28.19 kPa；30%加筋橡胶砂的假粘聚力比不加筋时增加了24.44 kPa。配合比为20%加筋橡胶砂的内摩擦角比不加筋时增加了3°；30%加筋橡胶砂的内摩擦角比不加筋时增加了3°。据此可知，随着土工格室的加入，橡胶砂的强度曲线有明显提高，并且主要是使得其假粘聚力值增大，而对内摩擦角的影响较小。

### 2.3 剪切变形特性

图9~10分别为20%，30%配合比下加筋与非加筋橡胶砂在各个竖向固结压力下的竖向位移-剪切位移曲线。竖向位移以压缩为正，膨胀为负。由于试验过程中试样无径向变形，因此竖向位移变化与试样的体积变化在定性规律上是一致的。

由图9~10可见，在竖向应力较小时，加筋橡胶砂与非加筋橡胶砂试样先会有较小程度的压缩，然后迅速转为膨胀，且以膨胀为主，但相同配合比下的加筋橡胶砂的剪胀远小于非加筋橡胶砂的剪胀。在竖向应力较大时，非加筋橡胶砂竖向位移随剪切位移的增加而增大，到达某一个值以后，又会随着剪切位移的增大而降低，说明竖向变形在剪切过程中不稳定；加筋橡胶砂竖向位移首先随剪切位移的增加而增大，到达某一个值以后稳定不变，说明剪切过程中加筋橡胶砂首先被压缩，然后基本稳定在该值不变。对比加筋与无加筋橡胶砂的竖向位移-剪

切位移关系曲线可知，加筋橡胶砂的最终竖向变形都小于非加筋橡胶土，说明土工格室能改善橡胶砂的剪胀或剪缩性质，提高其竖向变形的稳定性。

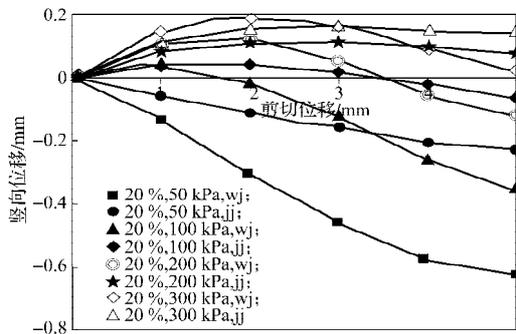


图9 20%配合比橡胶砂剪切位移-竖向位移

Fig. 9 The shear displacement - vertical displacement curve of RSM with 20% rubber content

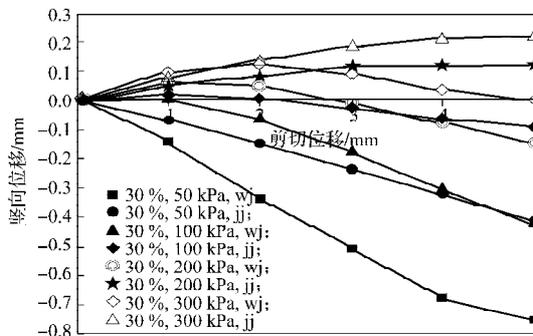


图10 30%配合比橡胶砂剪切位移-竖向位移

Fig. 10 The shear displacement - vertical displacement curve of RSM with 30% rubber content

### 2.4 压缩变形特性对比

图11~12为配合比为20%，30%下的加筋和非加筋橡胶砂竖向应力-变形曲线。从图中可以看出，20%配合比的加筋橡胶砂的累积竖向变形比无加筋时减少了0.43 mm；30%配合比的加筋橡胶砂的累积竖向变形值比无加筋时减少了1.71 mm。由此可知，土工格室加筋显著降低了橡胶砂的竖向固结变形值，亦即土工格室加筋能显著提高橡胶土的压缩模量，且橡胶颗粒含量越大，由于加筋而引起的压缩模量增大效应越明显。

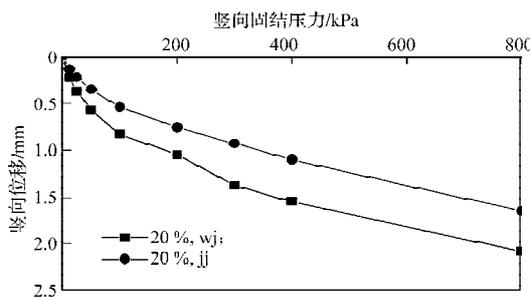


图11 20%橡胶砂的荷载-沉降曲线

Fig. 11 The load-settlement curve of RSM with 20% rubber content

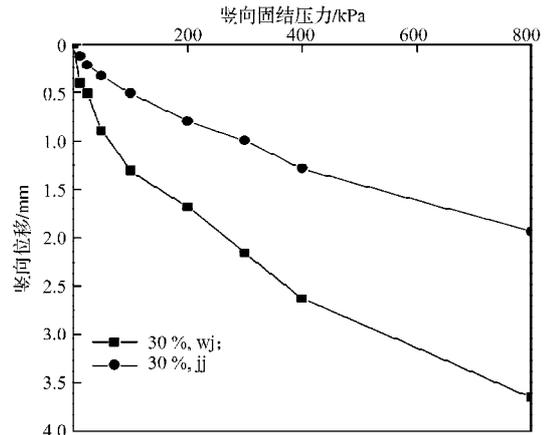


图12 30%橡胶砂的荷载-沉降曲线

Fig. 12 The load - settlement curve of RSM with 30% rubber content

### 2.5 试验机理分析

试验表明，土工格室加筋对橡胶砂的强度特性和变形特性都有明显的改善，且其加筋效应随着橡胶颗粒含量的增加而增大、随着竖向固结压力的增大而减小。分析其机理，土工格室加筋使得橡胶砂强度提高，主要是由于土工格室网兜作用约束橡胶砂的侧向变形为土体提供了附加的侧向围压。当竖向固结压力较小时，这种附加侧向围压的影响越明显；随着竖向固结压力的增大，附加侧向围压的影响减小。因此，在高竖向固结压力下土工格室加筋对橡胶砂剪切强度的提高相对于低竖向固结压力下小。土工格室对橡胶砂变形特性的改善主要得益于土工格室的分隔作用减小了颗粒的重新排列。橡胶砂混合物由不可变形的砂颗粒和可变形的橡胶颗粒组成，在外荷载作用下，橡胶粒首先发生变形，进而引起砂粒的重新排列，从而产生较大的体积应变，格室的加入将土体分割成单独的单元体，由于橡胶颗粒变形而引起的砂颗粒的重新排列受到限制，因此加筋后土体在竖向固结压力和剪切应力作用下的体积变形（剪缩或剪胀）均减小。

## 3 结论

- 1) 土工格室加筋能显著提高橡胶砂的抗剪强度，且土工格室加筋主要是提高橡胶土的粘聚力，对内摩擦角的影响较小。
- 2) 土工格室加筋能显著减小橡胶砂的竖向固结压缩变形和在剪切过程中的体胀或体缩，改善橡胶砂的变形特性。
- 3) 土工格室加筋对橡胶砂强度和变形特性的影响随着竖向固结压力的增大而减小，随着橡胶砂橡胶颗粒含量的增大而增大。（下转第51页）

