

# STC 加筋砂水平循环剪切与竖向激振特性试验研究<sup>①</sup>

鲁 洋, 刘斯宏, 张雨灼, 徐小东

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**随着中国汽车工业的发展,大量废旧轮胎带来的“黑色污染”问题日益显著。提出一种采用废旧轮胎柱(Scrap tire columns, STC)的加筋土结构,并初步探究其作为基础减隔振材料的可行性。通过室内水平循环剪切试验和竖向激振试验研究 STC 加筋砂(STCRS)的水平循环剪切和竖向激振特性。结果表明,最大剪应变为 1% 时 STCRS 的等效阻尼比未加筋前增加约 10%,等效动剪切模量减小 20%~25%,水平向减振性能得以提高;STCRS 的竖向加速度衰减呈现出速度快、幅值大的特点,竖向减振效果较未加筋砂显著提高。STC 加筋砂作为基础减振材料是可行的,且为原形废旧轮胎的资源化利用提供新思路。

**关键词:**废旧轮胎;砂;水平循环剪切;竖向激振;减隔振;环境岩土

**中图分类号:** TU411

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2015)01-0494-06

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0494

## Experimental Study on Horizontal Cyclic Shear and Vertical Excitation Behavior of STC Reinforced Sand

LU Yang, LIU Si-hong, ZHANG Yu-zhuo, XU Xiao-dong

(College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** With the rapid development of the automotive industry in China, “black pollution” caused by scrap tires has become increasingly significant. A reinforcing earth structure using scrap tire columns (STC) is presented in the current research. Horizontal cyclic shear tests and vertical excitation tests were conducted to validate the effectiveness of scrap tire columns reinforced sand (STCRS) on horizontal and vertical damping. The results of the horizontal shear tests show that when the maximum shear strain is 1%, the equivalent damping ratio of STCRS increased by about 10% more than the sand itself, and the shear modulus decreased by 20%~25%, improving the horizontal damping performance. In the vertical vibration tests, the acceleration attenuation showed characteristics of fast speed and large amplitude, indicating that STCRS had a significant damping effect compared to unreinforced sand. STC reinforced sand as a material for seismic isolation is feasible, and is also a new use for scrap tire resources.

**Key words:** scrap tires; sand; horizontal cyclic shear; vertical excitation; vibration absorption and isolation; environmental geotechnology

<sup>①</sup> 收稿日期: 2014-08-20

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金(2014B36614); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KY LX\_0472); 国家自然科学基金面上项目(51379066)

**作者简介:** 鲁 洋(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事水工岩土方面的学习与研究. E-mail: luy@hhu.edu.cn; luyhhu@163.com

**通讯作者:** 刘斯宏(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土石坝、粒状体力学、地基处理方面的教学和科研工作.

E-mail: sihongliu@hhu.edu.cn

## 0 引言

随着我国经济水平的发展,汽车数量剧增,废旧轮胎带来的“黑色污染”问题日益显著。据统计<sup>[1-2]</sup>①,2011 年我国废旧轮胎产生量约 1 000 万吨,2013 年达 1 080 万吨,已超过美国,成为全球废旧轮胎生产第一大国。废旧轮胎的综合利用已成为解决环境和资源再生问题的重要手段,目前利用方式主要包括:废旧轮胎翻新、再生胶生产、热裂解回收利用、原形改制和硫化胶粉生产等。在岩土工程领域,国内外一些学者已经察觉到废旧轮胎的潜在利用价值,将其“变废为宝”,广泛用于挡土墙构筑<sup>[3]</sup>、边坡加固<sup>[5]</sup>、堤岸加固<sup>[5]</sup>、道路工程<sup>[6]</sup>和轻质回填土<sup>[7]</sup>等工程中。

基础减振技术在近几十年的防灾减灾事业中表现出显著优势,传统减振技术的减震消能效果优越,但是由于加工成本和安装技术等因素制约,一般只应用于政府大楼、医院、学校、核电站等重要建筑结构<sup>[8]</sup>。近年来针对村镇及经济欠发达地区的防灾减灾问题已经逐渐引起人们的重视,国内外的一些研究机构和学者对简易、经济适用的基础减振措施进行了有益探索,如尚守平<sup>[9]</sup>提出了钢筋沥青隔振系统,钱国桢<sup>[10]</sup>发明了封闭式约束沙垫层隔震减震地基,刘斯宏<sup>[11]</sup>提出了利用土工袋进行基础减隔振并进行了试验验证。

然而,现有文献中关于废旧轮胎减振性能研究的报道并不多,且主要集中在以下两类。一类学者将轮胎破碎成橡胶颗粒与砂土混合,如 Tsang<sup>[12-13]</sup>提出了一种利用橡胶土(Rubber-soil mixtures, RSM)的岩土隔振技术(Geotechnical seismic isolation, GST),并对其减振性能进行理论分析与数值研究,在此基础上 Xiong 等<sup>[14]</sup>对其进行了振动台试验,验证了 GST 具有减轻地震灾害的显著潜力;另一类学者将废旧轮胎简易加工成橡胶垫片,如 Turner 等<sup>[15]</sup>对废旧轮胎垫(Scrap tire pads, STP)的力学和动力特性进行试验研究, Mishra 等<sup>[16]</sup>也在试验研究的基础上对其进行了有限元分析,结果表明 STP 作为基础减振材料效果较好,且具有成本低廉、轻质、易于处理、环境友好等特点。因此,废旧轮胎在环境岩土工程与减振隔振技术领域有着广泛的应用前景,尤其是用于基础减振能够被大量消耗,具有显著的工程意义和环保效益。

但笔者认为废旧轮胎作为一个主要由橡胶层、尼龙带束层、钢丝层、帘线层等构成的有机整体,其

本身即为一个力学性质良好的结构,在竖向压力作用下胎面势必给内部填充料一个附加的“围压”,根据加筋土结构的“准黏聚力”加筋原理,轮胎的约束给内部土体施加了一个附加黏聚力,增加了土体的强度。因此,从地基加固的角度来看,没有必要利用专门的机械将轮胎破碎成颗粒;倘若原形轮胎加筋土的减振性能也很好,实际工程中完全可以将原形废旧轮胎加筋土用于地震多发区的城镇农居基础减隔振中。

基于这个思路,本文提出一种废旧轮胎柱(Scrap tire columns, STC)加筋土结构,并尝试通过室内水平循环剪切和竖向激振试验来探究 STC 加筋土的减振性能,初步验证其作为基础减振材料的可行性。

## 1 STC 加筋土结构单元

废旧轮胎柱(Scrap tire columns, STC)加筋土结构主要由废旧轮胎填料后形成的 STC 单元体组合而成,由于轮胎的加筋作用主要由胎面的侧向约束提供,故实际工程中为便于施工填料,可将轮胎一侧边切去,再进行填料压实形成 STC 单元体,其形成过程如图 1 所示。不同叠层的 STC 单元组合连接后可以构成形式多样的 STC 加筋土模式。



图 1 废旧轮胎柱加筋土单元示意图

Fig.1 Unit diagram of STC reinforced soils

## 2 试验方案

本文对 STC 加筋砂(STC reinforced sand, STCRS)单元进行一定层数的竖向叠加后形成简单的试样,并对其进行水平循环剪切和竖向激振特性试验,以探究 STCRS 的水平和竖向减振性能。

### 2.1 试验材料

#### (1) 轮胎试样

由于试验装置尺寸的限制,本文选用的废旧轮胎为摩托车废旧轮胎,外径  $D_1$  约为 400 mm、内径  $D_2$  约为 250 mm、高  $h$  约为 100 mm。

#### (2) 砂样

① 中华人民共和国国家发展与改革委员会. 中国资源综合利用年度报告(2012),2012.

砂样为天然河砂,经过筛分等基本物理性质试验,砂样的颗粒级配曲线如图 2 所示,基本物理特性参数列于表 1 中。

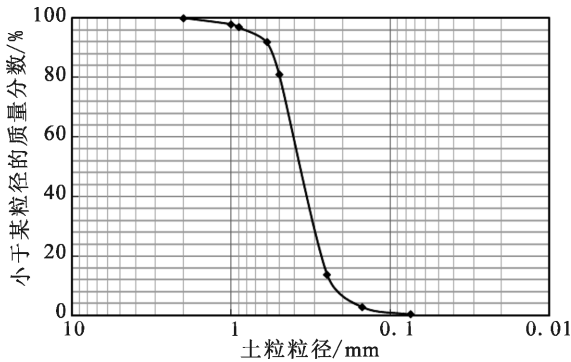


图 2 试验用砂样的颗粒级配曲线

Fig.2 Particle size grading curve of sand used in test

表 1 试验用砂样的物理特性参数

Table 1 Physical parameters of sand used in test

| 重度 $\gamma$<br>( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 含水率<br>$w/\%$ | $C_u$ | $C_c$ | 黏聚力<br>$c/\text{kPa}$ | 内摩擦角<br>$\varphi/(\circ)$ |
|----------------------------------------------------|---------------|-------|-------|-----------------------|---------------------------|
| 15.5                                               | 3.5           | 1.6   | 0.9   | 3.3                   | 31.8                      |

2.2 试验装置及工况

(1) 水平循环剪切试验

为验证 STC 的水平减振效果,分别对 STC 加筋河砂(STC reinforced sand,STCRS)和天然河砂(sand)进行水平循环剪切对比试验。试验采用河海大学水工结构研究所自主研发的水平循环剪切装置。该装置由竖向加载系统、水平向张拉系统、量测系统和底部框架等组成(图 3)。竖向伺服加载系统施加的最大竖向力为 30 kN。整个试验仪固定在混凝土底座上,反力架系统通过螺栓与底部框架连接在一起,左右两张拉系统由马达驱动,通过四根上下可调的螺杆固定于底部框架上,试验过程中调节螺栓高度使整个张拉系统位于同一水平面上,以减小试验时的水平传力误差。试验装置的底板及上部加载板均用角钢形成齿槽,使得试样顶部可随上部加载板一起水平滑动,试样底部固定于齿槽内以防止其沿底板滑动。

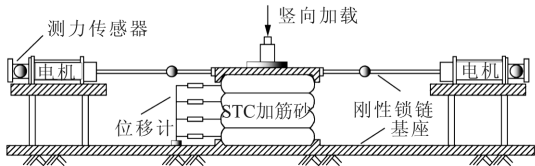


图 3 水平循环剪切试验装置示意图

Fig.3 Diagram of horizontal cyclic shear test device for STC

本文分别对 STCRS 和天然河砂在同一剪应变下进行各 4 组不同竖向压力条件下的水平循环剪切试验,每组循环剪切次数均为 4,具体试验方案如表 2 所示。当进行 STCRS 剪切试验时,将四层 STCRS 单元体竖向叠加后形成试样,当进行天然河砂剪切试验时,采用该仪器配套的碟环式剪切框进行试验。在上部加载板表面设置竖向位移计,当竖向压缩变形稳定(波动小于 0.01 mm)后进行水平循环加载。

表 2 水平循环剪切试验工况

Table 2 Conditions for horizontal cyclic shear tests

| 试验对象                | 最大剪应变/ $\%$ | 竖向压力/ $\text{kPa}$ |
|---------------------|-------------|--------------------|
| STC 加筋河砂<br>(STCRS) | 1.0         | 50                 |
| 天然河砂                |             | 100                |
| (sand)              |             | 200                |
|                     |             | 250                |

(2) 竖向激振试验

为了验证 STC 的竖向减振效果,分别对 STC 加筋河砂和天然河砂进行竖向激振对比试验。试验在一个尺寸为 100 cm $\times$ 100 cm $\times$ 100 cm 的模型箱内进行,如图 4 所示。当进行 STCRS 试验时,将五层 STC 单元体填砂压实后竖直堆叠于模型箱正中,每放置一层 STC 单元后在其上方设置一加速度传感器,并用试验河砂将四周填满击实整平;当进行天然河砂试验时,分层装样,层厚与轮胎高度相同,装完一层后进行击实整平并设置加速度传感器,装完四层砂样后在其顶部铺设一层 STC 单元体并填砂压实。竖向激振振源采用频率为 50 Hz 的电动激振器,每次试验待激振加速度响应稳定后记录数据 20 s。

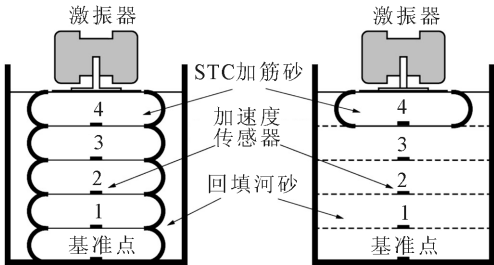


图 4 STC 加筋河砂及河砂本身竖向激振试验示意图

Fig.4 Diagram of vertical excitation tests on STCRS and sand

3 试验结果分析

3.1 水平循环剪切试验结果

土的动剪切模量和阻尼比是土动力学特性的首要参数,也是土层地震反应分析和场地地震安全性评价中的必要参数。动剪切模量是使土体产生单位

动剪应变所需的动剪应力,动剪切模量越大表明抵抗剪切变形的能力越强;阻尼比反映土在周期性动荷载作用下动应力-应变关系滞回环表现出的滞后性,阻尼比越大表明减振消能效果越好。

当把所有阻尼能量损耗等效于黏性阻尼能量损耗时,一个循环加载周期下的土体的动应力-应变滞回环可近似由图 5 中的等效剪切模量  $G_{eq}$  和等效阻尼比  $\lambda_{eq}$  来反映。

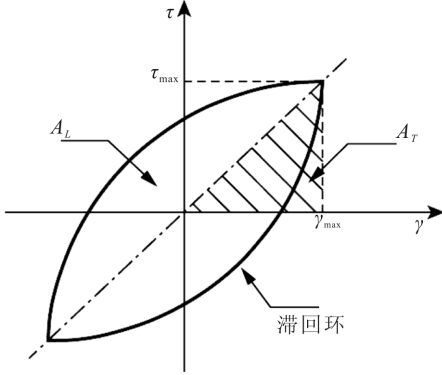


图 5 循环加载下的典型动应力应变关系(滞回环)

Fig.5 Typical relationship between dynamic stress and strain under a cyclic loading (a hysteresis loop)

等效阻尼比的表达式为

$$\lambda_{eq} = \frac{A_L}{4\pi \cdot A_T} \quad (1)$$

式中,  $A_L$  为应力-应变滞回环的面积,即一个周期动应变之内的总能量耗散;  $A_T$  为图 5 中阴影部分三角形的面积,即等效振动系统的最大能量输入。

动剪切模量的表达式为

$$G_{eq} = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}} \quad (2)$$

式中  $\tau_{max}$  和  $\gamma_{max}$  分别表示滞回环顶点对应的最大剪应力和最大剪应变。

本试验取  $\gamma_{max} = 1\%$  时竖向压力分别为 50、100、200 和 250 kPa 四种工况进行水平循环剪切试验,每个工况均进行 4 次循环,绘出 STCRS 和天然河砂的滞回环曲线,由于篇幅限制,文中仅给出竖向压力为 100 kPa 和 200 kPa 的试验曲线,分别如图 6、7 所示。

由式(1)和式(2)计算得出最大剪应变为  $1\%$  时不同竖向压力下 STCRS 和天然河砂的等效阻尼比与等效动剪切模量,汇总于表 3 中,动力参数随竖向压力的变化规律曲线如图 8 所示。

由图 8(a)可知,随着竖向压力的增大,STC 加筋河砂和天然河砂的等效阻尼比均呈减小的趋势:

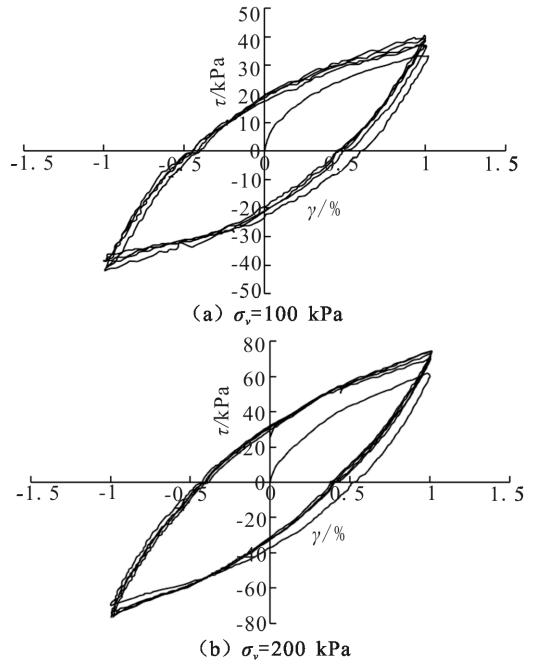


图 6 不同竖向压力下 STC 加筋河砂的滞回环 ( $\gamma_{max} = 1\%$ )

Fig.6 Stress-strain hysteresis loops of the STC reinforced sand (STCRS) under different vertical pressures ( $\gamma_{max} = 1\%$ )

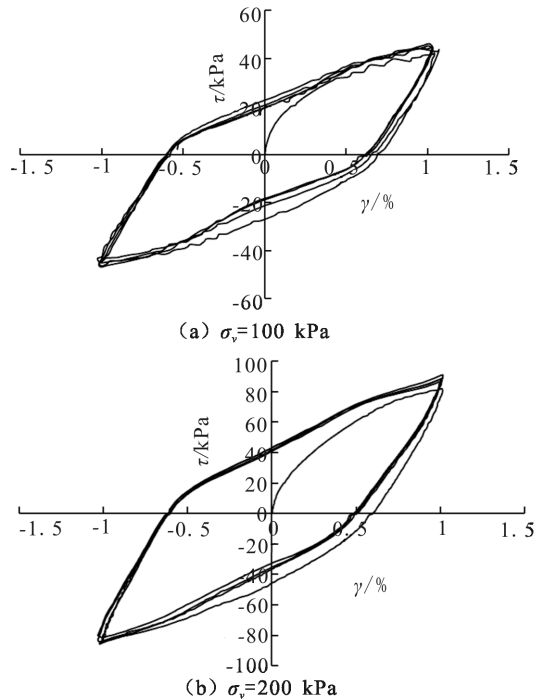


图 7 不同竖向压力下天然河砂的滞回环 ( $\gamma_{max} = 1\%$ )

Fig.7 Stress-strain hysteresis loops of the sand under different vertical pressures ( $\gamma_{max} = 1\%$ )

竖向压力小于 100 kPa 时,STCRS 的等效阻尼相对天然河砂提高了 0.02~0.03,说明经废旧轮胎加筋后的河砂水平向减振消能效果提高了约 10%,且竖向压力小于 100 kPa 时提高的尤为显著;竖向压力大于 200 kPa 时,STCRS 的阻尼比相对天然河砂的增加量不大,表明废旧轮胎加筋砂用于浅层建筑基础的减振消能效果更为显著。

表 3 等效阻尼比与等效动剪切模量

Table 3 Equivalent damping ratio and dynamic shear modulus

| 试验对象             | 竖向压力<br>$\sigma_v$ /kPa | 等效阻尼比 $\lambda_{eq}$ | 等效动剪切模量 $G_{eq}$ /MPa |
|------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| STC 加筋河砂 (STCRS) | 50                      | 0.260                | 2.15                  |
|                  | 100                     | 0.236                | 3.87                  |
|                  | 200                     | 0.212                | 7.11                  |
|                  | 250                     | 0.200                | 8.69                  |
| 天然河砂 (sand)      | 50                      | 0.232                | 2.57                  |
|                  | 100                     | 0.217                | 4.57                  |
|                  | 200                     | 0.207                | 8.86                  |
|                  | 250                     | 0.197                | 11.50                 |

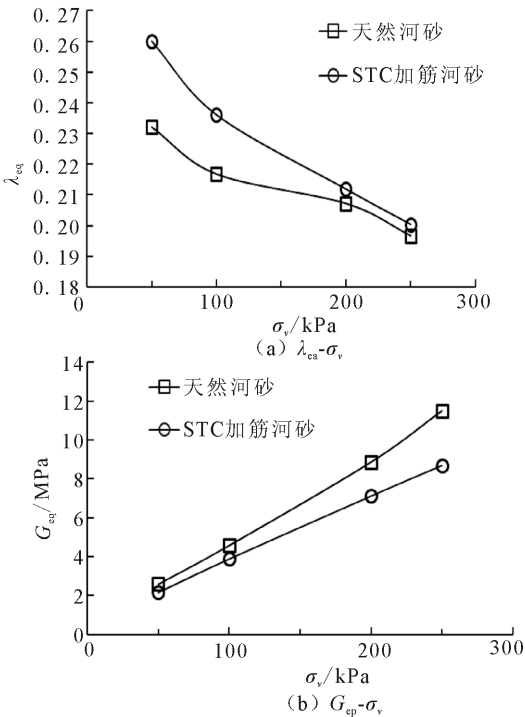


图 8 STC 加筋河砂和天然河砂动力参数比较  
Fig.8 Comparison of the dynamic parameters of STCRS and sand

由图 8(b)可知,随着竖向压力的增大,STC 加筋河砂和天然河砂的等效动剪切模量呈现逐渐增加的趋势,且基本呈线性关系;竖向压力小于 100 kPa 时,STCRS 的等效动剪切模量与天然河砂相差不大,竖向压力大于 100 kPa 时,STCRS 的等效动剪切模量减小了 2~3 MPa,说明经废旧轮胎加筋后的

河砂水平动刚度减小了 20~25%,柔性的增大使得 STC 加筋砂在振动荷载作用下具有“以柔克刚”的减振潜力;随着竖向压力的增大,STCRS 相对天然河砂的水平刚度减小量越来越大,表明废旧轮胎加筋砂用于浅基础加固地基时,动剪切模量相对原始砂土的减小量不大,使得上部结构在 earthquake 荷载作用下不致产生过大的水平位移,确保上部结构的正常使用。

综合上述分析,对于本试验所用材料,当竖向压力小于 100 kPa 时,即废旧轮胎加筋砂用于浅层建筑基础时(小于 6 m),在水平向不但能发挥较好的减振消能作用,还能达到较好的地基加固效果。

3.2 竖向激振试验结果

考虑到试验时激振器的振动加速度不稳定,为方便准确地比较各种工况下 STCRS 和天然河砂的竖向减振效果,对实测的绝对加速度反应进行归一化处理,即对于每次试验,各测点实测加速度反应均同时乘以一相同的系数,以确保各层竖向加速度衰减率不变,且最上层 STC 单元体的最大加速度固定在同一值(1 g),结果如表 4 所示。

表 4 各测点最大加速度及其衰减率

Table 4 Maximum acceleration in each point and their attenuation rates

| 测点 | STC 加筋河砂 (STCRS) |              |      | 天然河砂 (sand) |              |      |
|----|------------------|--------------|------|-------------|--------------|------|
|    | 实测               | 归一化          | 衰减   | 实测          | 归一化          | 衰减   |
|    | $a_{max}/g$      | $a_{Nmax}/g$ | 率/%  | $a_{max}/g$ | $a_{Nmax}/g$ | 率/%  |
| 4  | 6.00             | 1.000        |      | 3.19        | 1.000        |      |
| 3  | 3.19             | 0.532        | 46.8 | 2.10        | 0.658        | 34.2 |
| 2  | 1.99             | 0.332        | 37.6 | 1.69        | 0.530        | 19.5 |
| 1  | 1.67             | 0.278        | 16.3 | 1.68        | 0.527        | 0.6  |

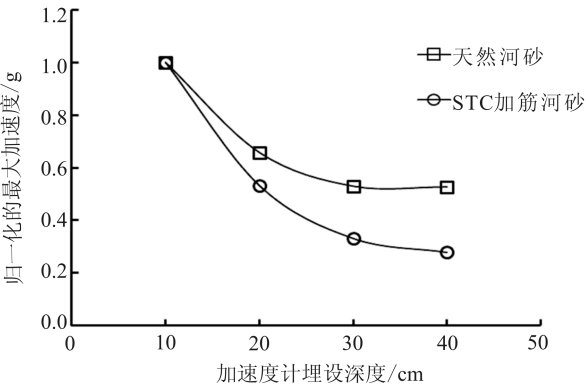


图 9 各测点归一化的最大加速度分布曲线  
Fig.9 A distribution curve for normalized maximum acceleration in each layer of sand and STCRS

由表 4 和图 9 可知,随着加速度计埋深的增加,STCRS 和天然河砂中所测的归一化加速度均逐渐

减小,STCRS 的每层层间衰减率均比天然河砂要大,STCRS 的累积衰减幅值为 0.722 g,远大于天然河砂的 0.473 g;在传感器埋设深度范围内,加速度在天然河砂中逐渐衰减,最终趋于稳定,而加速度在 STCRS 中快速衰减,且有继续减小的趋势,说明经废旧轮胎加筋后的河砂竖向减振效果显著提高。

此外,STCRS 在第一层与第二层的层间加速度衰减 46.8%,约一半的能量被消耗掉,表明埋深较浅时加速度衰减效果显著,即废旧轮胎用于浅层建筑基础竖向减振效果更好。

## 4 结论与展望

本文提出一种利用原形废旧轮胎柱(Scrap tire columns, STC)的加筋土结构,并通过室内水平循环剪切试验和竖向激振试验探究了 STC 加筋砂的水平和竖向减振特性。初步结论如下:

(1) 水平循环剪切试验表明,1%剪应变下,相对天然河砂,STCRS 的等效阻尼比增加约 10%,等效动剪切模量减小 20%~25%。废旧轮胎加筋砂具有一定的水平减振特性。

(2) 竖向激振试验表明,STCRS 的竖向加速度衰减幅度和衰减率均比未加筋前明显增加。废旧轮胎加筋砂具有的显著的竖向减振特性。

(3) 废旧轮胎加筋砂用于浅层基础加固,在增加基础强度的同时能更好地发挥减振效果。

本文仅初步针对 STC 加筋砂进行了简单工况下的水平循环剪切和竖向激振特性试验,为进一步深入研究 STC 加筋土的减振特性,有必要开展其他相关室内试验和现场原位试验。

## 参考文献(References)

- [1] 曹庆鑫.2014 年废橡胶综合利用行业的挑战和希望[EB/OL].<http://news.cria.org.cn/3/19777.html>,2014-03-19/2014-06-07.  
CAO Qing-xin.Challenges and Expectations of the Comprehensive Utilization for Waste Rubber Industry in 2014[EB/OL].<http://news.cria.org.cn/3/19777.html>,2014-03-19/2014-06-07. (in Chinese)
- [2] 江镇海.我国废旧轮胎综合利用的现状与发展[J].橡胶参考资料,2011,41(5):2-5.  
JIANG Zhen-hai.Current Situation and Development of Comprehensive Utilization of Waste Tire in China[J].Rubber Reference Materials,2011,41(5):2-5. (in Chinese)
- [3] Garga V K,O'Shaughnessy V.Tire-reinforced Earthfill.Part 1: Construction of a Test Fill,Performance, and Retaining Wall Design[J].Canadian Geotechnical Journal,2000,37(1):75-96.
- [4] O'Shaughnessy V,Garga V K.Tire-reinforced Earthfill.Part 2:

- Pull-out Behaviour and Reinforced Slope Design[J].Canadian Geotechnical Journal,2000,37(1):97-116.
- [5] 李丽华,孙龙,肖衡林,等.废旧轮胎条加固岸堤影响分析[J].工业建筑,2013,43(增刊 1):434-437.  
LI Li-hua,SUN Long,XIAO Heng-lin,et al.Analysis of Discarded Tire Strip Impact on Reinforced Embankment[J].Industrial Construction,2013,43(S1):434-437. (in Chinese)
- [6] 曹卫东,王超,韩恒春.废旧轮胎在道路工程中的应用综述[J].交通标准化,2005,142(6):78-81.  
CAO Wei-dong,WANG Chao,HAN Heng-chun.Summary on Application of Waste Tires in Highway Engineering[J].Communications Standardization,2005,142(6):78-81. (in Chinese)
- [7] Lee J,Salgado R,Bernal A,et al.Shredded Tires and Rubber-sand as Lightweight Backfill[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,1999,125(2):132-41.
- [8] 朱宏平,周方圆,袁涌.建筑隔震结构研究进展与分析[J].工程力学,2014,31(3):1-9.  
ZHU Hong-ping,ZHOU Fang-yuan,YUAN Yong.Development and Analysis of the Research on Base Isolated Structures[J].Engineering Mechanics,2014,31(3):1-9. (in Chinese)
- [9] 尚守平,周志锦,刘可,等.一种钢筋-沥青复合隔震层的性能[J].铁道科学与工程学报,2009,6(3):13-16.  
SHANG Shou-ping,ZHOU Zhi-jin,LIU Ke,et al.The Research on the Steel-asphalt Isolation Lay[J].Journal of Railway Science and Engineering,2009,6(3):13-16. (in Chinese)
- [10] 钱国桢,许哲,石树中,等.两种农村简易隔震试点建筑介绍[J].工程抗震与加固改造,2014,36(2):27-34.  
QIAN Guo-zhen,XU Zhe,SHI Shu-zhong,et al.Introduction of Two Simply Equipped Base-isolation Buildings in Countryside[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2014,36(2):27-34. (in Chinese)
- [11] Liu S H,Gao J J,Wang Y Q,et al.Experimental Study on Vibration Reduction by Using Soilbags[J].Geotextiles and Geomembranes,2014,42(2014):52-62.
- [12] Tsang H H.Seismic Isolation by Rubber-soil Mixtures for Developing Countries[J].Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2008,37(2):283-303.
- [13] 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 Structural Dynamics,2012,41(14):2009-2024.
- [14] Xiong W,Li Y Z.Seismic Isolation Using Granulated Tire-soil Mixtures for Less-developed Regions: Experimental Validation[J].Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2013,42(14):2187-2193.
- [15] Turer A,Özden B.Seismic Base Isolation Using Low-cost Scrap Tire Pads (STP)[J].Materials and Structures,2008,41(5):891-908.
- [16] Mishra H K,Lgarashi A,Matsushima H.Finite Element Analysis and Experimental Verification of the Scrap Tire Rubber Pad Isolator[J].Bulletin of Earthquake Engineering,2013,11(2):687-707.