

文章编号:1671-6833(2015)04-0062-05

废旧轮胎颗粒-砂混合物的水平循环剪切特性试验研究

徐小东, 鲁 洋, 毛航宇, 刘 锦, 杨 齐

(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘 要:对废旧轮胎颗粒-砂混合物进行水平循环剪切试验,研究竖向荷载、轮胎颗粒含量以及轮胎颗粒尺寸 3 种因素对混合物的等效动剪切模量和等效阻尼比的影响.结果表明:竖向荷载越大,轮胎颗粒与砂混合物的动弹模量越大,等效阻尼比越小;轮胎颗粒含量增加,混合物的等效动剪切模量与等效阻尼比并不是都呈单调变化;试验中,在相同条件下,小粒径的轮胎颗粒与砂混合物的动弹模量相对要小,等效阻尼比要大一些.上述的试验结果给废旧轮胎颗粒-砂混合物在工程应用提供一定的参考.

关键词:颗粒尺寸;竖向荷载;颗粒含量;等效动剪切模量;等效阻尼比

中图分类号: TQ0352.7;TQ0352.9 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.04.015

0 引言

多年来随着我国经济的不断发展和汽车工业的飞速扩张,汽车废旧橡胶轮胎及其他废旧橡胶制品的积累日趋增多.充分利用废旧橡胶轮胎,变废为宝,实现其循环可持续利用,是利国利民的重要举措^[1].由废旧轮胎经过机械破碎得到的轮胎橡胶颗粒由于其高弹性、高耗能性等特性,是良好的廉价土工材料.将轮胎橡胶颗粒与天然河砂按一定比例配合,组成的混合物具有轻质、高弹等良好的工程特性^[2].国内外把废旧轮胎颗粒-砂混合物作为一种新型的土工材料,用作路基填料和挡土墙填料,并对于这种新型的土工材料,开展了相关静力特性的研究. Foose^[3]和 Ghazavi^[4]等利用直剪试验装置,研究了轮胎碎片颗粒混合砂土的抗剪强度性质;邓安等^[5]利用废旧轮胎橡胶颗粒掺入到砂土填料,通过直剪和三轴压缩试验,研究多种掺入比与不同围压条件下砂土剪切性状;李朝晖等^[6]选择废旧轮胎颗粒掺入黄土,研究了混合土的压实特性;辛凌等^[7]利用常规三轴固结不排水剪切试验,研究了废旧轮胎橡胶颗粒与土混合料的抗剪强度特性.废旧轮胎橡胶-砂混合物由于砂颗粒骨架具有较强的抵抗压缩变形的能

力,同时又由于轮胎橡胶颗粒良好的弹性变形能力而具有较好的水平剪切变形能力和减隔震性能.对于轮胎橡胶颗粒-砂混合物的动力特性的试验研究,目前还较少.李丽华等^[8]通过室内数字化动三轴试验,研究了废旧轮胎颗粒含量及围压对混合土动力参数的影响规律. Kostas Sene-takis^[9]利用共振柱研究了轮胎颗粒-砂混合物的动力特性.笔者利用自行研制的大型水平循环剪切试验仪器,开展了废弃轮胎颗粒-砂混合物动力特性的研究,尤其是对不同粒径的废旧轮胎颗粒与砂混合物进行了试验研究.

1 试验介绍

1.1 试验设备

试验所采用的设备是河海大学水工结构研究所自行研制的水平循环剪切试验机,该试验机由试验控制系统、水平张拉系统、反力架系统、竖向加载系统、测量系统及叠环式剪切框等 6 部分组成,如图 1 所示.

1.2 试样制备

试样的材料包括天然河砂、废旧轮胎橡胶颗粒.废旧轮胎颗粒-砂混合物作为一种回填料,回填的深度一般在地下水位以上,含水率接近为

收稿日期:2014-12-23;修订日期:2015-02-10

基金项目:中央高校基本科研业务专项资金资助(2014B36614);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX_0472)

作者简介:徐小东(1989-)男,江苏宿迁人,河海大学硕士研究生,主要从事水工结构及地基处理研究,E-mail:xxdhu@sina.com.

通信作者:鲁洋(1991-)男,江苏南京人,河海大学博士研究生,主要从事水工岩土方面的研究,E-mail:luy@hhu.edu.cn.

零^[10],本试验中的轮胎颗粒-砂混合物经过室内风干,含水率约为 3.5%,由于试样含水率较小可近似等同于地基回填料,用于试验.试验中选用天然河砂的平均粒径为 0.25~0.35 mm,堆积密度约为 1.47 g/cm³,颗粒的级配曲线如图 2 所示.选用的废旧轮胎橡胶颗粒为普通机械破碎颗粒,采用 1~3 mm 和 8~10 mm 两种粒径尺寸,其堆积密度分别约为 0.85 g/cm³和 0.93 g/cm³.河砂与废旧轮胎颗粒按体积比进行混合,装入剪切盒中.试样的规格为直径 35.6 cm,高度 30.0 cm.

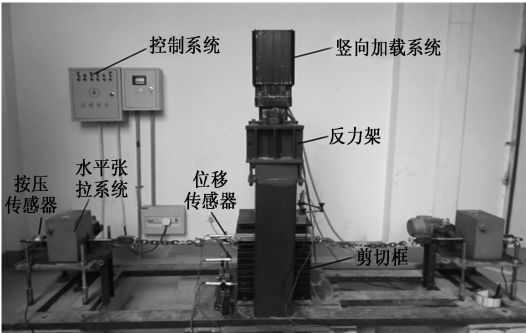


图 1 水平循环剪切试验装置
Fig.1 Horizontal cyclic shear test device

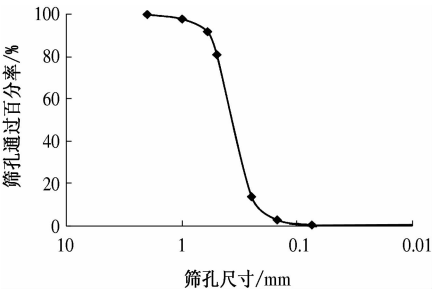


图 2 砂颗粒级配曲线
Fig.2 Gradation curve of sand grain

1.3 试验方法

本试验采用的是水平循环剪切的方法,使用自行研制的水平循环剪切试验机,能够对较大试样的动力特性进行研究.本试验中采用 8 种试样如表 1 所示,废旧轮胎颗粒的质量分数分别为 10%、20%、30%、40%,并与纯砂做对比,试验中试样竖向荷载分别为 50、100、150、200 kPa.试验中水平最大剪应变控制在 1%,测定剪应力和剪应变.

2 试验结果

土体的等效动剪切模量和等效阻尼比是描述土体动力性能的重要参数^[11-12].由于土体的应力-应变关系是非线性的,并且土体应变对应力反应有一定的滞后性,所以当土体受水平循环剪切时,根据试验中剪切力与剪切位移量测结果可以

绘出应力-应变关系曲线,形成椭圆状的滞回圈,典型的滞回圈的形状如图 3 所示.根据图 3,等效动剪切模量 G_p 与等效阻尼比 λ 的计算公式为

$$G_p = \tau_c / \gamma_c \cdot \tag{1}$$

$$\lambda = A_L / \pi S_{\Delta abc} \cdot \tag{2}$$

式中: τ_c, γ_c 为滞回圈顶点的剪应力和剪应变; A_L 为滞回圈的面积; $S_{\Delta abc}$ 为三角形 abc 的面积.

表 1 试验中试样的堆积密度
Tab.1 Bulk density of test specimen

轮胎颗粒含量/%	堆积密度/(g·cm ⁻³)	
	轮胎粒径为 1~3 mm	轮胎粒径为 8~10 mm
10	1.422	1.431
20	1.360	1.376
30	1.297	1.321
40	1.234	1.267

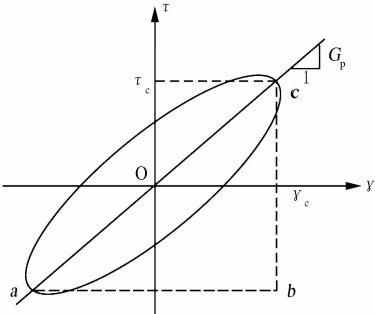


图 3 水平循环剪切试验下典型的应力-应变滞回圈
Fig.3 Typical stress-strain hysteresis loop
obtained from cyclic shear test

在不同竖向荷载 50、100、150、200 kPa 作用下,最大剪应变控制在 1%,废旧轮胎颗粒与砂体积比为 20%,对试样进行水平循环剪切试验.图 4 为不同粒径废旧轮胎颗粒-砂混合物的等效动剪切模量随竖向荷载变化的关系曲线.图 5 为不同尺寸废旧轮胎颗粒-砂混合物的等效阻尼比随竖向荷载变化的关系曲线.

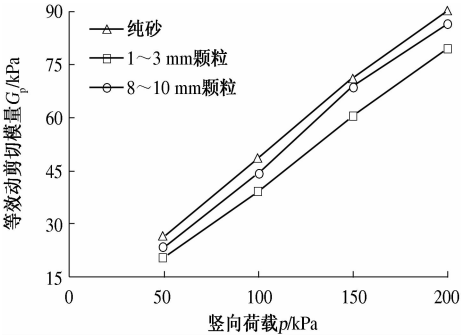


图 4 竖向荷载-等效动剪切模量关系曲线
Fig.4 Relationship curves of vertical load-dynamic
equivalent shear modulus

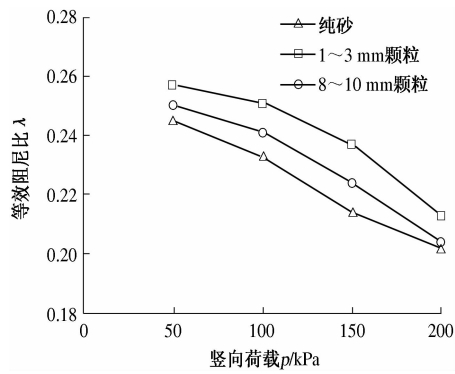


图5 竖向荷载-等效阻尼比关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of vertical load-equivalent damping ratio

对不同粒径的废旧轮胎颗粒含量 10% , 20% , 30% , 40% 混合物进行试验, 在竖向荷载为 100 kPa 作用下, 最大剪切应变控制为 1%. 图 6 为不同粒径的废旧轮胎颗粒-砂混合物动弹模量随废旧轮胎颗粒含量变化的关系曲线, 图 7 为不同粒径的废旧轮胎颗粒-砂混合物的等效阻尼比随废旧轮胎含量变化的关系曲线.

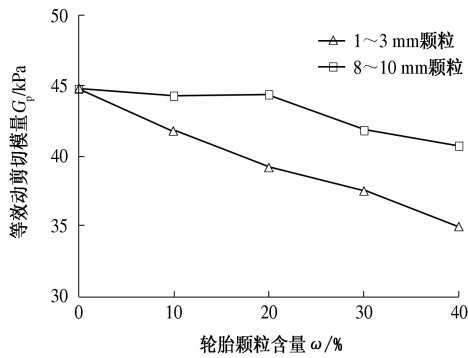


图6 轮胎颗粒含量-等效动剪切模量关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of particle content-dynamic equivalent shear modulus

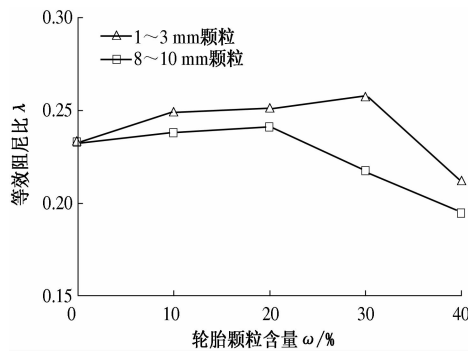


图7 轮胎颗粒含量-等效阻尼比关系曲线

Fig. 7 Relationship curves of particle content-equivalent damping ratio

3 结果分析与讨论

3.1 竖向荷载的影响

从图 4 中可以看出, 河砂中掺入废旧轮胎颗粒后, 等效动剪切模量有所减小, 废旧轮胎颗粒-砂混合物的等效动剪切模量随着竖向荷载增加而变大, 并且基本是呈线性关系. 这是由于轮胎颗粒较砂颗粒更易于变形, 故相对纯砂来说, 河砂掺入轮胎颗粒后, 所得到的混合物的剪切模量减小; 在竖向荷载的作用下, 轮胎橡胶颗粒-砂混合物中颗粒之间接触变得紧密, 竖向荷载越大, 颗粒间接触越紧密, 并且大部分的体积变形在水平受剪切之前已经完成, 其抵抗水平剪切变形能力增强, 故其等效动剪切模量随着竖向荷载增加而增大.

从图 5 可以看出, 废旧轮胎颗粒-砂混合物的等效阻尼比随着竖向荷载的增加而减小, 这是由于随着竖向荷载加大, 试样中颗粒间接触更加紧密, 应力波在试样中传播速度变快^[13], 使得试样对动荷载的反应速度变快, 其等效阻尼比随之减小.

3.2 废旧轮胎颗粒含量的影响

从图 6 可以看出, 随着轮胎颗粒含量的增加, 废旧轮胎颗粒-砂混合物等效动剪切模量逐渐减小. 这是由于轮胎颗粒弹性较大, 轮胎颗粒间接触较多, 与河砂混合后, 试样的弹性变大, 随着轮胎颗粒含量增加, 轮胎颗粒间接触增多, 由于轮胎颗粒间接触变形较大, 试样内部抵抗水平剪切变形的能力减小, 所以混合物的等效动剪切模量逐渐减小.

从图 7 可以看出, 粒径较小废旧轮胎颗粒的混合物在轮胎颗粒含量 30% 以内时, 等效阻尼比逐渐增加, 当轮胎颗粒含量为 40% 时, 等效阻尼比有较大幅度减小. 这是由于等效阻尼比受应力波在试样中传播速度的影响, 刚开始轮胎颗粒含量逐渐增加时, 应力波传播受到轮胎颗粒的阻碍, 传播速度变慢, 对于动力荷载的反应变慢, 所以其等效阻尼比逐渐增大. 但是, 由于掺入轮胎颗粒后混合物的抗剪强度增加^[5], 其主要是轮胎颗粒之间和轮胎与砂颗粒之间的摩擦起作用, 使得相对运动更多地发生在砂颗粒之间, 试样中轮胎颗粒之间和轮胎颗粒与砂颗粒之间更不容易发生相对

运动而消耗能量.因此,当掺入的轮胎颗粒含量增加到一定水平时,后者的影响超过前者,等效阻尼比就会逐渐减小.大粒径轮胎颗粒与砂混合物含量与等效阻尼比的关系曲线,也可以由上述原因解释.

3.3 废旧轮胎颗粒粒径的影响

图4和图6中较大粒径的废旧轮胎颗粒混合物的等效动剪切模量相对小粒径的废旧轮胎颗粒混合物要大一些,这是由于小粒径的轮胎颗粒间的接触机会相对大粒径的轮胎颗粒与砂混合物较多,轮胎颗粒间接触变形相对砂粒要大很多,故小粒径轮胎颗粒与砂混合的等效动剪切模量相对要小一些.其中,在图6中要说明的是,较大粒径废旧轮胎颗粒的混合物的在轮胎颗粒含量为0~20%时,等效动剪切模量略有减小,轮胎颗粒含量为20%~40%时,动剪切模量减小明显.这是由于大粒径的轮胎颗粒含量较小时,轮胎颗粒被砂粒包围其中,成为悬浮颗粒,轮胎颗粒间接触很少或者不接触,其宏观力学性状由砂粒控制为主^[8],所以其动剪切模量没有明显变化,但随着大粒径轮胎颗粒含量增多,轮胎颗粒间的接触增多,试样的内部抵抗变形的能力减小,故动剪切模量出现明显减小.

从图5和图7中可以看出,粒径1~3 mm废旧轮胎颗粒的混合物的等效阻尼比较粒径8~10 mm废旧轮胎的混合物大,这是由于在相同竖向荷载和颗粒含量下,粒径小的轮胎颗粒间的接触相对较多,砂颗粒之间的接触相对较少,应力波在试样传播过程中受到轮胎颗粒阻碍较大,传播速度变慢,因此其等效阻尼比相对较大.

4 结论

(1)在不同竖向荷载作用下,轮胎颗粒-砂混合物的等效剪切模量随着竖向荷载增加而增大,其等效阻尼比随着竖向荷载的增加而减小;

(2)在不同的轮胎颗粒含量下,大粒径的轮胎颗粒-砂混合物先随着轮胎颗粒含量的增加,等效动剪切模量没有明显变化,随后逐渐减小,其等效阻尼比刚开始随轮胎含量增加逐渐增加,后逐渐减小,峰值含量在20%~30%之间.小粒径轮胎颗粒-砂混合物等效动剪切模量随着轮胎颗

粒含量增加而逐渐减小,其等效阻尼比先增加后减小,峰值含量在30%~40%之间;

(3)在相同竖向荷载和轮胎颗粒含量下,在减振隔震效果上,粒径为1~3 mm轮胎颗粒-砂混合物要比粒径为8~10 mm轮胎颗粒-砂混合物要更好一些.

参考文献:

- [1] 马良清,王琰,孙宁,等.我国汽车轮胎行业现状及发展[J].轮胎工业,2009,29(12):707-715.
- [2] 辛凌.橡胶颗粒轻质混合土工程特性试验研究[D].南京:河海大学土木与交通学院,2008.
- [3] FOOSE G J, BENSON C H. Sand reinforced with shredded waste tires[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996,122(9):760-767.
- [4] GHAZAVI M. Shear strength characteristics of sand-mixed with granular rubber[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2004, 22(3):401-416.
- [5] 邓安,冯金荣.掺入轮胎颗粒橡胶对砂土剪切性状的影响[J].解放军理工大学学报,2009,10(5):483-487.
- [6] 李朝晖,张虎元.废轮胎颗粒与黄土混合物压实性能研究[J].岩土力学,2010,31(12):3715-3720.
- [7] 辛凌,刘汉龙,沈扬,等.废弃轮胎橡胶颗粒轻质混合土强度特性试验研究[J].岩土工程学报,2010,32(3):428-433.
- [8] 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.
- [9] SENETAKIS K. Dynamic properties of dry sand/rubber (SRM) and gravel/rubber (GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2012,33(1):38-53.
- [10] 尚守平,岁小溪,周志锦.橡胶颗粒-砂混合动剪切模量的试验研究[J].岩土力学,2010,31(2):377-381.
- [11] 谢定义.土动力学[M].西安:西安交通大学出版社,1988.
- [12] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:中国水利水电出版社,1996.
- [13] 王勇,王艳丽.细粒含量对饱和砂土动弹性模量与阻尼比的影响研究[J].岩土力学,2011,32(9):2623-2628.

Experimental Research on Horizontal Cyclic Shear Behavior of Scrap Tire Particles-Sand Mixtures

XU Xiao-dong, LU Yang, MAO Hang-yu, LIU Jin, YANG Qi

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

Abstract: This paper uses the mixture to study its dynamic shear modulus and equivalent damping ratio under the different vertical loads and different tire particles content through horizontal cyclic simple shear test. The results show that when the vertical load on the mixture between waste tire particles and sand increases, its dynamic shear modulus increases and its equivalent damping ratio decreases. The dynamic shear modulus and equivalent damping ratio of mixture is not a monotonous variation with the addition of tire particles content. In the test, the dynamic elastic modulus of the mixture between tire particles in small size and sand is relatively small and its equivalent damping ratio is relatively big, which can provide a reference in engineer applications for the mixture between waste tire particles and sand.

Key words: particle size; vertical load; particle content; dynamic equivalent shear modulus; equivalent damping ratio

(上接第 56 页)

- [3] 成乐,李彩文,杨双强,等. 铝-钛-硼细化剂对 6082 铝合金组织和性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2014,42(3):32-35.
- [4] 赵红亮,张川,翁康荣,等. RE 对电锤用 AM60B 镁合金曲轴箱件组织和性能的影响[J]. 郑州大学学报:工学版,2013,34(1):58-60.
- [5] YUAN Wu-hua,LIANG Zhen-yu. Effects of La addition on the mechanical properties and thermal-resistant

properties of Al-Mg-Si-Zr alloys based on AA 6201 [J]. Materials and Design,2012,34:788-792.

- [6] 饶克,钟建华,傅群强,等. 稀土对 6063 铝合金导电、导热性能的影响[J]. 铝加工,2002,25(6):22-24.
- [7] 李苗. Al-Ti-C-RE 细化剂的低温绿色制备及其细化行为研究[D]. 郑州:郑州大学材料科学与工程学院,2011.

Effects of Rare Earth and Titanium on Microstructure and Properties of Al-Mg-Si Conductive Material

ZHAO Hong-liang, KONG Ya-ping, LIU Zhi-peng

(School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: We added rare earth and titanium in Al-Mg-Si alloy, and the influence of rare earth and titanium on the microstructure and properties of Al-Mg-Si conductive material were studied in this paper, with the optical microscope, scanning electron microscope, DSC analysis on the microstructure of alloy, and testing the performance. The results show that, RE and Ti both have refining effect on Al-Mg-Si conductive material. When the content of RE is more than 0.3% and the Ti is more than 0.15%, the phase $Al_{20}Ti_2Ce$ will form in Al-Mg-Si alloy, consuming a large amounts of Ti and Ce, which has an unfavorable effect on the mechanical properties and electrical conductivity of the alloy.

Key words: Al-Mg-Si; alloy element; mechanical property; electrical conductivity