

DOI: 10.7672/sjgs2017010054

不同筋材界面剪切试验研究*

李丽华^{1,2}, 高萌¹, 罗诗哲¹, 陈艳君¹, 石安宁¹, 文贝¹

(1. 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

[摘要] 为了研究废旧轮胎、土工格室和土工格栅3种不同土工合成材料的筋-土界面抗剪特性,对试样开展了一系列大型直剪试验。对比了3种筋材的加筋效果,并研究了竖向荷载对筋-土界面抗剪强度和剪应力-剪切位移曲线特征的影响。试验结果表明:筋-土界面的剪切应力与剪切位移关系为非线性;几种不同筋材加筋效果较为显著,其中废旧轮胎的加筋效果最为明显;筋-土界面的黏聚力提高较大,内摩擦角变化相对较小,表明筋-土界面主要依靠提高黏聚力增大其抗剪强度。确定了各筋材加筋界面抗剪强度指标,并分析了3种筋材的加筋机理。

[关键词] 直剪试验;土工合成材料;剪切特性;试验

[中图分类号] TU458

[文献标识码] A

[文章编号] 1002-8498(2017)01-0054-04

Study on Characteristics of Different Geosynthetics and Sand Interface in Direct Shear Test

Li Lihua^{1,2}, Gao Meng¹, Luo Shizhe¹, Chen Yanjun¹,Shi Anning¹, Wen Bei¹

(1. Institute of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: In order to study on the interface shear characteristics between reinforcement materials and soil of three kinds of geosynthetics include the scrap tire, geocell and the geogrid, a series of large-scale direct shear test are conducted on the samples. The reinforcement effect of three kinds of reinforcement materials are compared, and the interface between reinforcement materials and soil direct shear strength characteristics and shear stress-displacement characteristics of geosynthetics under different vertical stresses are analyzed comparatively. The result shows that, the relationship curve of shear stress-displacement of the interface between reinforcement materials and soil is nonlinear, the reinforcement effect of several reinforced materials are great and the most significant effect of material is scrap tire. The cohesive force of the interface between reinforcement materials and soil increased greatly, comparatively the friction angle changes less, indicated that the shear strength improved mainly by increasing cohesion of the interface between reinforcement materials and soil. The shear strength indexes of interface reinforced soil and the reinforcement mechanism of soil are determined, and the reinforced mechanism of the three geosynthetics are analyzed.

Key words: direct shear test; geosynthetics; shear characteristics; testing

0 引言

在国内外工程勘察、设计、施工过程中测定土体抗剪强度指标时经常以直剪试验结果作为参考数据。目前,大多采用直剪试验和拉拔试验来测定加筋材料与填料之间的界面性能。许多学者利用土工织物、土工格栅、土工格室等不同性能的筋材对界面特性开展了大量的研究工作^[1-10]。

废旧轮胎碎片与砂组成的混合物与纯砂相比,

* 国家自然科学基金项目(51308197);湖北省教育厅重点项目(D20151402);岩土力学与工程国家重点实验室开放基金(Z014011);湖北省桥梁安全监控技术及装备工程技术研究中心基金(QLZX2014016)

[作者简介] 李丽华,副教授,硕士生导师,博士,E-mail: lilihua466@163.com

[收稿日期] 2015-12-01; [修订日期] 2016-02-24

具有密度轻、耗能大、弹性变形能力强、剪切模量低等特点,广泛应用于软基处理、挡土墙和涵顶回填、桥台跳车治理以及建筑隔震减振等工程领域。将废旧轮胎应用于实际工程中,可使得废旧轮胎这种难以降解的固体废弃物循环利用,符合循环经济的发展要求,因而国内外学者越来越重视这一课题的研究^[11-13]。

筋材与土体之间的相互作用机理随筋材与土体的不同而大不相同,如土工织物和土工布都是整体无开口式的片式筋材,其筋土界面强度大多是材料表面与土体之间的摩擦阻力,土工格栅、土工格室及废旧轮胎,作为有开口的立体式结构筋材,在直剪试验条件下其与砂土的相互作用机理在表现形式上比片式筋材显得更为复杂^[14]。土工格室与充填于其中的土料相互作用,其对填料产生了较大的侧向约束作用,格室侧壁对其中的土料产生向上的摩擦力,从而形成了一个有较大抗拉强度与抗剪强度的复合体结构。

本文进行了筋-土界面的一系列大型直剪试验,研究了不同筋材与土体之间的界面直剪特性,并考虑不同竖向荷载对筋-土界面剪切特性的影响,为其在工程中的应用提供参考。

1 试验设备与材料选取

1.1 试验设备

本试验所用设备为四川大学华西岩土仪器研究所研制的ZY50-2G大型直接剪切试验机,该系统由直剪仪和传感器以及PC系统组成。直剪仪主机主要由安装有垂直、水平加载油缸的封闭框式主机架、上下剪切盒、透水板、传力板、下剪切盒位移滚动机构、开缝环、开缝滚柱等组成。测量系统由垂直载荷传感器、水平载荷传感器以及二次数字显示仪表、垂直位移计、水平位移计等组成。试样尺寸为 $\phi 504.6\text{mm} \times 400\text{mm}$,可以较好地克服试验时的尺寸效应。大型直剪仪如图1所示。

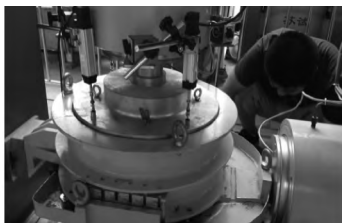


图1 大型直剪仪

Fig.1 Large direct shear apparatus

1.2 试验材料

试验材料包括整个废旧轮胎、三向格栅、土工格室和武汉地区的砂土,砂土参数如表1所示。各

种筋材的参数如表2、3所示。废旧轮胎的基本性能指标如表4所示。

表1 砂土物理性质指标

最大干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最小干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/%	砂土相对密度	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	有效粒径/mm	限制粒径/mm
1.89	1.65	3.74	2.67	5.4	1.4	0.14	0.57

表2 三向格栅主要技术指标

规格	节点有效性	低应变时的 径向拉伸模量	质控拉伸 模量
TX160	95%	520kN/m/0.5%	315kN/m/2%

表3 土工格室主要技术指标

土工格室 型号	延伸率/%	格室片 抗拉屈服强度/ MPa	断裂伸长率/%	焊接处 抗拉强度/ ($\text{N}\cdot\text{cm}^{-1}$)	最大 拉伸力/ MPa
TGLG-PP-50-400	7.6	24	9.8	100	102.8

表4 废旧轮胎基本性能指标

轮胎直径/cm	厚度/cm	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
40	1	20	200	0.33

1.3 试验方案

直剪试验采用应变控制制式。为了系统研究各种筋材与砂土之间的筋土界面相互作用机理,以及不同法向应力对界面特性的影响,本次直剪试验包括4类基本试验,即纯砂、三向格栅、土工格室和整个轮胎的直剪试验。由于ZY50-2G大型直接剪切试验机的最大垂直荷载为700kN(即最大垂直应力3.5MPa),根据相关试验规程,采用4种不同的法向应力分别为200、400、800、1600kPa,进行加筋效果比较的同时尽可能减少误差的产生。考虑到各个加筋材料的尺寸较大,试验过程中剪切速率为0.5 mm/min,上、下盒均为填料,筋材放在上、下盒之间。制样时,通过控制每层需夯实土的质量获得所需土样的指定密度。试验时,先固结稳定后再进行剪切。剪切时,垂直液压油缸通过传力板对上剪切盒施加竖向荷载,水平液压油缸推动下剪切盒,使土体产生剪切位移。当剪切位移达到试样直径的12%时,试验终止。试验的部分试样如图2所示。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

2.1.1 剪应力-位移关系曲线

剪切试验时分别施加200、400、800和1600kPa

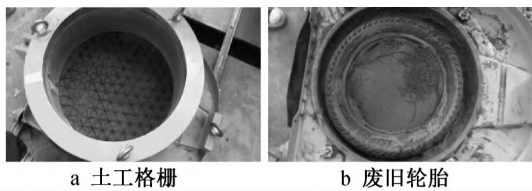


图 2 直剪试样

Fig. 2 The reinforced specimen of geosynthetics

的竖向荷载,并测定了不同荷载条件下,试样达到剪切破坏时的水平推力。通过试样达到剪切破坏时的水平推力和直剪仪横截面面积的比值,计算可得界面上的剪应力。大型直剪试验所得应力-位移关系曲线如图 3 所示。

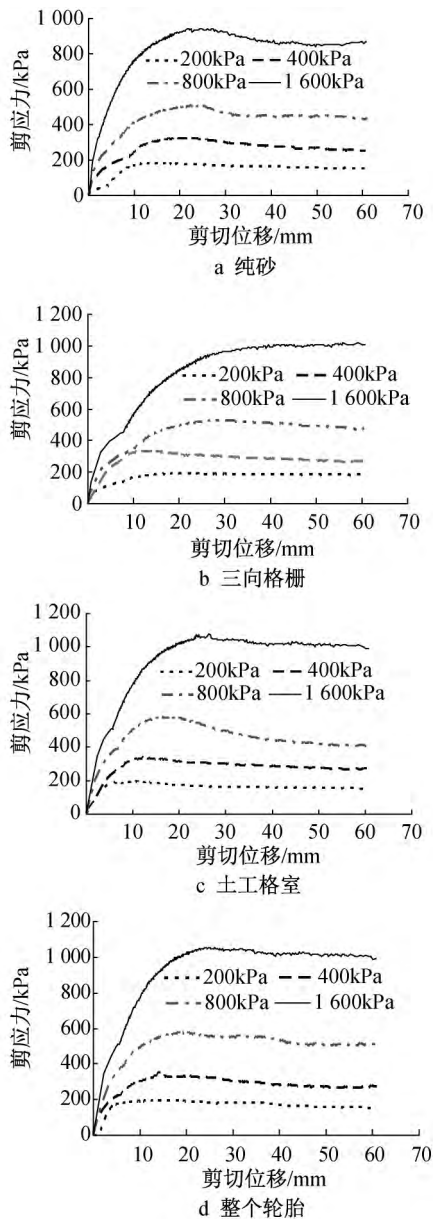


图 3 剪应力与剪切位移关系曲线

Fig. 3 Relation curves of shear stress-displacement

图 3b 与图 3a 比较 相同竖向荷载条件下,三向

格栅剪应力-位移曲线的峰值较纯砂显著增大。随着竖向荷载增加,三向格栅剪应力-位移曲线的峰值较纯砂中更加明显,达到峰值时的剪切位移依次减小。三向格栅在 200kPa 时的应力-位移曲线比 400kPa 时软化现象更明显,可知筋材是三向格栅时,荷载越小,软化现象越明显。三向格栅在 1600kPa 时抗剪强度最终趋于稳定值。

图 3c 与图 3b 比较 相同竖向荷载条件下,土工格室剪应力-位移曲线的峰值较格栅有不同程度的提高。剪切过程中剪应力随位移的增大而增加,达到峰值强度后,剪应力减小幅度较低,曲线出现不同程度的应变软化。

图 3d 与图 3b 比较 相同竖向荷载条件下,废旧轮胎剪应力达到峰值时的位移均比三向格栅小,且曲线的峰值较三向格栅曲线更加明显,其应力-位移曲线是非线性关系。例如 800kPa 时,废旧轮胎剪应力峰值为 593.8kPa,达到峰值时的位移为 18.4mm;三向格栅剪应力峰值为 530.8kPa,达到峰值时的位移为 29.0mm。随着荷载的增加,废旧轮胎剪应力-位移曲线的峰值均比三向格栅曲线提高幅度大。在土体的剪切过程中,分为线性增加和非线性平稳收敛两个阶段。同种筋材的试样,竖向荷载越小,曲线的软化现象越明显。竖向荷载对试样的剪胀效应具有一定的抑制作用,土样的剪胀效果越强,曲线的峰值更加明显。

从图 3 可以看出:①纯砂剪切时存在峰值,表现出应变软化特征;加入筋材后的土体软化程度较纯砂相对降低。②同种筋材的试样,应力-位移曲线随荷载的增加,其峰值强度增加,剪切变形增大。三向格栅、土工格室及整个轮胎应力-位移曲线均有此变化规律,可见土工合成材料对改善砂土的界面强度特性效果显著。③直剪试验的应力-位移曲线是非线性关系,并且随着竖向荷载的增加,筋-土界面间的剪切应力增大,峰值时的位移却逐渐减小。铺设土工合成材料使得土体与筋材界面间的应力-应变特性改变,抗剪强度提高。

2.1.2 剪切强度参数特性

对筋-土界面法向应力和剪应力进行直线拟合,结果如图 4 所示,可得各筋材与土体界面间的剪切强度指标,其中直线线性公式的常数项即为界面黏聚力 c 系数项即为界面内摩擦角 φ 的正切值。大型直剪试验纯砂与筋-土界面抗剪强度指标汇总如表 5 所示。

由图 4 可知,几种筋材的抗剪强度均显著大于纯砂的抗剪强度。三向格栅和土工格室的抗剪强度很接近,但小于轮胎及轮胎碎片的加筋作用。由

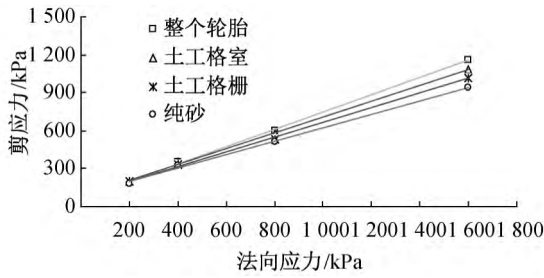


图4 法向应力和剪应力的直线拟合

Fig. 4 Linear fitting of positive stress and shear stress

表5 筋-土界面抗剪强度指标

Table 5 The index summary of interface shear strength between reinforcement materials and soil

特性指标	纯砂	纯砂 + 三向土工格室	纯砂 + 土工格室	纯砂 + 整个废旧轮胎
内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	30.17	31.42	32.85	33.25
黏聚力 c / kPa	37.27	50.63	64.90	76.46

表4 筋-土界面抗剪强度指标可知,相比纯砂,整个轮胎筋-土界面的黏聚力提高 105.2%,土工格室筋-土界面的黏聚力提高 74.1%,三向土工格栅筋-土界面的黏聚力提高 35.8%。总体来说,各筋-土界面的抗剪强度均得到明显提高,其中整个废旧轮胎的加筋效果最为明显。

2.2 加筋机理分析

由图3 A可以看出,各筋材与土体的界面抗剪强度包络线与纯砂剪切强度包络线基本平行,说明筋材对土体界面内摩擦角影响不明显,而对黏聚力影响相对较大。铺设筋材后土体的黏聚力提高较大,内摩擦角变化相对较小。由筋-土界面抗剪强度指标可知,三向格栅、土工格室和废旧轮胎的筋-土界面内摩擦角和黏聚力依次增大,其中整个废旧轮胎的筋-土界面内摩擦角和黏聚力最大。纯砂剪切面的剪切应力主要依靠土体之间的摩擦力,而加筋复合剪切面所受剪切力除了土体与土体和土体与筋材表面之间的摩擦力外,还受到土体与筋材之间的咬合力,并且这种咬合力随竖向荷载的增加而增大。

分析3种筋材的加筋机理。土工格栅的网眼多而密,与周围土体咬合与嵌固,充分发挥其界面摩擦抗剪作用。因此,三向格栅的黏聚力增幅显著。土工格室和废旧轮胎,都是有开口的立体式结构筋材,与充填于其中的填料相互作用,并且对填料提供了较大的侧向约束作用,筋材侧壁对其中的土料产生向上的摩擦力,从而形成了一个有较大抗拉强度与抗剪强度的复合体结构。土工格室、整个废旧轮胎与土体相互作用,形成复合体结构,所以其抗

剪强度远大于土工格栅等片式筋材。

3 结语

1) 大型直剪试验的剪应力和剪切位移关系呈非线性,且随竖向荷载的增加,界面抗剪强度提高,峰值时的剪切位移逐渐减小。

2) 同种筋材的试样,应力-位移曲线随荷载的增加,其峰值强度增加,剪切变形增大。筋-土界面软化程度较纯砂相对降低,加筋材料对改善砂土的界面强度特性效果显著。

3) 几种筋材与土界面间的内摩擦角与纯砂的内摩擦角相差不大,但黏聚力提高显著,加筋效果较明显,相比纯砂抗剪强度均明显提高。与纯砂相比,三向格栅、土工格室和整个轮胎的复合土剪切界面黏聚力增幅分别为 35.8%、74.1% 和 105.2%。

参考文献:

[1] 张孟喜,张石磊,黄瑾. 低超载下条带式带齿加筋界面特性[J]. 岩土工程学报,2007,29(11): 1623-1629.

[2] 闫澍旺, BARR B. 土工格栅与土相互作用的有限元分析[J]. 岩土工程学报,1997,19(6): 56-61.

[3] MORACI N, GIOFFRE D. A simple method to evaluate the pullout resistance of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil [J]. Geotextiles and geomembranes, 2006, 24 (2): 116-128.

[4] TAFRESHI S N M, DAWSON A R. Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement [J]. Geotextiles and geomembranes, 2010, 28(1): 72-84.

[5] 吴景海,王德群,陈环. 土工合成材料加筋砂土三轴试验研究[J]. 岩土工程学报,2000(2): 37-43.

[6] 马强,肖衡林,李丽华,等. 三向格栅加筋桥头路堤的试验和数值模拟分析[J]. 岩土工程学报,2013(S1): 287-293.

[7] 王吉力,马时冬. 土与土工织物接触界面间摩擦特性的试验研究[J]. 岩土力学,1992,13(4): 35-44.

[8] 吴景海,陈环,王玲娟,等. 土工合成材料与土界面作用特性的研究[J]. 岩土工程学报,2001,23(1): 89-93.

[9] 刘炜,汪益敏,陈页开,等. 土工格室加筋土的大尺寸直剪试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(11): 3133-3138.

[10] MORACI N, RECALCATTI P. Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil [J]. Geotextiles and geomembranes, 2006, 24 (4): 220-242.

[11] 李丽华,肖衡林,唐辉明,等. 轮胎碎片-砂混合土抗剪性能优化试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(4): 1075-1081.

[12] FOOSE G J, BENSON C H, BOSSCHER P J. Sand reinforced with shredded waste tires [J]. Journal of geotechnical engineering, 1996, 122(9): 760-767.

[13] BALUNAINI U, MOHAN V K D, PREZZI M, et al. Shear strength of tyre chip-sand and tyre shred-sand mixtures [J]. Proceedings of the ICE-geotechnical engineering 2014, 167(6): 585-595.

[14] 王军,林旭,刘飞禹,等. 砂土与格栅界面相互作用的直剪试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(S1): 113-120.