

DOI: 10.11779/CJGE201706014

橡胶-砂颗粒混合物强度特性及微观机制试验研究

张 涛^{1, 2}, 蔡国军^{*1, 3}, 刘松玉^{1, 3}, 段伟宏^{1, 3}, 王鹏程^{1, 3}

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;
3. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 为揭示橡胶-砂颗粒混合物强度变化规律和微观结构特征, 通过室内直剪试验、无侧限抗压强度试验和扫描电镜试验, 研究橡胶掺量、竖向应力和养护龄期等对颗粒混合物抗剪强度、内摩擦角、应力-应变关系和抗压强度的影响, 同时定性评价颗粒混合物微观结构的变化, 探讨橡胶-砂颗粒混合物相互作用的微观机制。结果表明: 橡胶-砂颗粒混合物密度随橡胶掺量增加而线性减小; 橡胶颗粒的添加会降低颗粒混合物的抗剪强度和抗压强度, 内摩擦角与橡胶掺量呈线性减小关系; 橡胶-砂颗粒混合物的应力-应变特征随橡胶掺量增加表现出由“脆性”向“韧性”转变的趋势; 低橡胶掺量的颗粒混合物受荷介质主要是砂颗粒组成的受力链, 橡胶颗粒可有效阻止砂颗粒的滑移和倾覆, 高橡胶掺量的颗粒混合物主要依靠橡胶颗粒的大变形承担荷载。

关键词: 废弃轮胎; 橡胶颗粒; 强度; 应力-应变特征; 微观机制

中图分类号: TU449 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)06-1082-07

作者简介: 张 涛(1986-), 男, 安徽合肥人, 博士, 主要从事工业废渣再利用和特殊地基处理等方面的研究工作。
E-mail: zhangtao_seu@163.com。

Experimental study on strength characteristics and micromechanism of rubber-sand mixtures

ZHANG Tao^{1,2}, CAI Guo-jun^{1,3}, LIU Song-yu^{1,3}, DUAN Wei-hong^{1,3}, WANG Peng-cheng^{1,3}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering and Environmental Safety (Southeast University), Nanjing 210096, China)

Abstract: To illustrate the variation laws of strength characteristics and micromechanism of rubber-sand mixtures, a series of laboratory tests including direct shear tests, unconfined compressive strength tests and scanning electron microscopy analysis are conducted to study the effects of rubber fraction, vertical stress and curing time on the shear strength, internal friction angle, stress-strain characteristics and unconfined compression strength of sand-rubber mixtures. Moreover, the variations of microstructure of rubber-sand mixtures are qualitatively evaluated, and the micromechanisms of the mixtures are also discussed. The experimental results show that the density of rubber-sand mixtures decreases linearly with the increase in rubber fraction. Addition of rubber chip can reduce the shear strength and unconfined compression strength of mixtures. The relationship between internal friction angle and rubber fraction is linear. The stress-strain characteristics of rubber-sand mixtures exhibit a tendency to change from “brittle” to “ductile” with the increase in rubber fraction. Some force chains are generated to support the external loading when the rubber fraction is low. Rubber chips often play an important role in preventing the slipping and buckling of sand particles. The rubber-sand mixtures with high rubber fraction mainly rely on the large deformation of rubber chips to support the loading.

Key words: scrap tire; rubber chip; strength; stress-strain characteristic; micromechanism

0 引言

随着国民经济的快速增长和交通运输业的高速发展, 汽车的个人拥有量逐年增加^[1]。废弃轮胎作为汽车产业的副产品, 数量呈逐年上升趋势。据统计, 2013 年我国废轮胎年产量约为 1080 万 t, 且每年以 5%~

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672294); 国家重点研发计划课题(2016YFC0800201); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CUG170636, CUGL170807)

收稿日期: 2016-03-05

*通讯作者(E-mail: focuscui@163.com)

6%的速度增长^[2-3]。目前处理废弃轮胎的方法主要有囤积、填埋、焚烧和翻新, 堆积和填埋处理会滋生大量有害寄生虫, 焚烧则会释放大量有毒气体, 同时焚烧后的残渣对周围环境和地下水也会产生严重威胁^[4-5]。废弃轮胎是一种宝贵的材料资源, 如何合理、有效的处理这些材料是目前中国汽车制造工业亟待解决的问题之一。

除上述传统处理方法外, 欧美学者在 20 世纪末开始探索将废弃轮胎作为新型建筑材料应用于土木工程建设中^[6-7]。废弃轮胎相对于土体来说具有低重度^[8]、低渗透性^[9]、良好的保温性能和较强的变形能力^[10], 常作为轻质替代材料应用于道路和挡墙的回填材料, 以及桥台、码头的振动阻尼层等^[11-12]。将废弃轮胎或橡胶颗粒(来源于废弃轮胎)应用于土木工程建设中需要对其工程特性进行系统研究。Bernal 等^[13]和 Lee 等^[14]通过室内试验分析, 得出橡胶颗粒的相对密度为 1.08~1.36, 内摩擦角为 20°~35° 的结论。Kim 等^[15]通过无侧限抗压强度试验研究了橡胶颗粒混合疏浚淤泥的力学特性, 认为混合物的抗压强度随橡胶掺量的增加而减小, 但峰值应力对应的应变却不断增大, 材料表现出“韧性”特征。段伟宏等^[16]研究了橡胶-砂混合物的压缩特性, 分析了橡胶掺量对混合物残余应变、压缩模量的影响。Senetakis 等^[17]利用共振柱试验研究了橡胶-砂颗粒混合物的动力特性, 提出了归一化剪切模量与阻尼比之间的关系。现有关于橡胶-砂颗粒混合物材料的研究多集中于其力学特性, 鲜有对这种刚-柔性材料的微观结构和颗粒间相互作用机制进行系统研究。

本文以常见的橡胶-砂颗粒混合物为研究对象, 通过室内直接剪切试验和无侧限抗压强度试验研究橡胶掺量、竖向应力和养护龄期等对橡胶-砂颗粒混合物密度、抗剪强度、内摩擦角、抗压强度和应力-应变特征的影响, 同时对混合物进行扫描电镜分析, 定性评价其微观结构的变化, 最后基于室内试验结果, 探讨了橡胶-砂颗粒混合物(刚-柔性材料)在受荷条件下相互作用的微观机制。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验砂选用厦门艾思欧标准砂, 平均粒径 d_{50} 为 0.17 mm, 土粒相对密度 G_s 为 2.63, 最大孔隙比 e_{max} 为 0.95, 最小孔隙比 e_{min} 为 0.61。橡胶颗粒由废弃轮胎粉碎得到, 平均粒径 d_{50} 为 0.85 mm, 相对密度 G_s 为 1.08~1.15, 密度 ρ 为 0.35 g/cm³, 单个颗粒具有棱角, 呈不规则形状(如图 1 所示)。橡胶颗粒的平均粒径约为砂的 5 倍。采用#325 普通硅酸盐水泥作为橡胶-

砂混合物胶结材料, 通过 X 射线荧光光谱分析得到水泥的化学成分为 SiO_2 的含量为 23.6%, Al_2O_3 的含量为 9.2%, CaO 的含量为 52.4%, Fe_2O_3 的含量为 3.1%, K_2O 的含量为 0.6%, MgO 的含量为 0.9%, Na_2O 的含量为 0.7%, SO_3 的含量为 2.3%, 其他为 6.4%。



图 1 试验橡胶颗粒

Fig. 1 Image of test rubber chips

1.2 试验方法

将试验所用标准砂风干, 与橡胶颗粒混合, 橡胶颗粒掺量分别为 0%, 15%, 30%, 45% 和 60%。橡胶掺量定义为橡胶颗粒的体积与混合物总体积的百分比, 即

$$RF = (V_R/V_T) \times 100\% \quad (1)$$

式中, RF 为橡胶颗粒掺量, V_R 为橡胶颗粒体积, V_T 为橡胶-砂混合物总体积。对于直接剪切试验, 将一定量的橡胶-砂混合物和蒸馏水放入不锈钢容器内, 搅拌 5 min 使得混合物均匀后, 将混合物分层填充至环刀内。每个环刀试样计算含有水分 15 g, 环刀内径为 61.8 mm, 高为 20 mm。直剪试验前, 对各掺量试样进行称重, 便于计算混合物密度。直接剪切试验参考《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999) 进行, 竖向应力分别设置为 100, 200, 300, 400 kPa, 剪切速率为 0.8 mm/min。

对于无侧限抗压强度试验, 将橡胶-砂混合物、蒸馏水和水泥搅拌均匀后, 分层均匀填充至内径 50 mm, 高 50 mm 的 PVC 模具中, 计算每个试样内含有水泥 15 g。将制作好的无侧限抗压强度试样两端塑封, 放入标准养护室内(养护条件为温度 20±3°C, 相对湿度 ≥95%) 养护至相应龄期, 脱模、进行相关试验。无侧限抗压强度试验依据《公路土工试验规程》(JTGE40—2007) 进行, 采用 YSH-2 型应变控制式无侧限抗压强度仪, 轴向应变速率 ≤1%/min。扫描电镜试验(SEM) 对 28 d 龄期下无侧限抗压强度平行试样进行, 取有新鲜断面约 1 cm² 的典型试块, 先用液氮(-190°C) 急速冷冻, 再用 XIANOU-18N 冷冻干燥仪进行抽真空 24 h, 保证试样孔隙中的水完全升华, 样品达到干燥状态。SEM 试验采用日本日立公司的

S-3400N II 型扫描电子显微镜进行。

2 试验结果与分析

2.1 橡胶-砂混合物密度

图 2 为不同橡胶掺量的橡胶-砂混合物密度测试结果。图中混合物密度随橡胶含量增加而显著减小，密度与橡胶掺量间表现出良好的线性关系（相关系数 $R^2=0.999$ ），其数学表达式为

$$\rho = 1.502 - 0.012RF \quad , \quad (2)$$

式中， ρ 为橡胶-砂混合物密度 (g/cm^3)，RF 为橡胶掺量 (%)。由前述两种试验材料的基本性质可知，橡胶颗粒相对密度约为砂相对密度的 1/2，当橡胶-砂混合物中橡胶掺量不断增加时，即 RF 增大时，混合物相对密度逐渐降低，相应的密度呈减小趋势。橡胶-砂混合物具有低密度的性质，是其可作为轻质填料的主要原因之一。Lee 等^[14]研究了橡胶掺量对橡胶-砂混合物（砂的平均粒径是橡胶颗粒的 4 倍）的密度变化，其结果如图 2 所示。虽然橡胶、砂材料的粒径比例不同，同样的，混合物密度随橡胶掺量的增加而减小，其相关关系式为（相关系数 $R^2=0.991$ ）：

$$\rho = 1.715 - 0.012RF \quad . \quad (3)$$

通过比较式 (2)、(3) 可以发现，不论橡胶-砂材料的粒径大小，混合物密度均随橡胶掺量的增加呈线性减小趋势。本文试验结果得到混合物密度 ρ 与橡胶掺量 RF 相关系数的斜率与文献报道的结果相同（两关系式斜率均为 0.012）。由此说明，材料颗粒粒径比例的变化对橡胶-砂混合物密度减小的速率基本没有影响，降低混合物密度的主要方法是增加橡胶颗粒的含量。

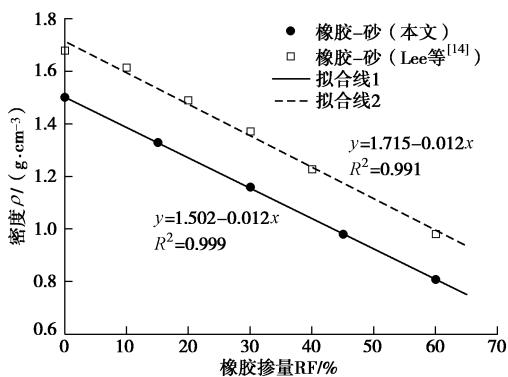


图 2 橡胶-砂密度随橡胶含量的变化

Fig. 2 Variation of density of rubber-sand mixtures with rubber fraction

2.2 抗剪强度

图 3 为橡胶-砂混合物抗剪强度与竖向应力的相关关系。图中橡胶-砂混合物抗剪强度随竖向应力的增加而线性增加。相同竖向应力条件下，较高橡胶掺量

的混合物具有较低的抗剪强度。高、低竖向应力条件下，不同橡胶掺量的混合物抗剪强度间的差异程度不同。100 kPa 竖向应力条件下，(0%~60%) RF 掺量下的橡胶-砂混合物抗剪强度分别为 46.5, 50.0, 51.8, 48.2, 32.2 kPa，不同掺量混合物间抗剪强度值相差不大；当竖向应力增至 400 kPa 时，各掺量（由低到高）橡胶-砂混合物抗剪强度分别为 273.4, 271.6, 228.7, 205.5, 160.8 kPa，低橡胶掺量与高橡胶掺量的抗剪强度间存在显著差异。

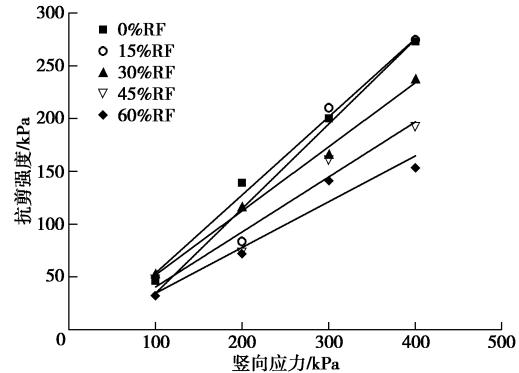


图 3 抗剪强度与竖向应力的关系

Fig. 3 Relationship between shear strength and vertical stress

图 4 为橡胶-砂混合物中橡胶掺量 RF 与抗剪强度的相关关系。相同竖向应力条件下，混合物抗剪强度随橡胶掺量 RF 增加呈减小趋势。高应力条件下混合物抗剪强度随 RF 增加而减小的剧烈程度较低应力条件下更显著。对于橡胶-砂混合物而言，其颗粒之间的胶结性能很弱，抗剪强度主要取决于混合物的摩擦角。从图 4 中可以看出，随着橡胶掺量 RF 的增加，橡胶-砂颗粒混合物的内摩擦角呈减小趋势。为进一步定量评价橡胶掺量 RF 对混合物内摩擦角 φ 的影响，图 5 给出了橡胶-砂混合物内摩擦角 φ 随橡胶掺量 RF 的变化。图 5 中明显看出，橡胶-砂混合物内摩擦角随橡胶掺量 RF 的增加而线性减小。RF 等于 0%（混合物为砂）时，内摩擦角为 35.6° ；RF 增加至 60% 时，橡胶-砂混合物的内摩擦角仅为 23.2° 。橡胶-砂混合物内摩擦角与橡胶掺量 RF 的拟合关系式为 ($R^2=0.939$)：

$$\varphi = 36.420 - 0.199RF \quad , \quad (4)$$

式中， φ 为橡胶-砂混合物的内摩擦角 ($^\circ$)。综上所述，橡胶颗粒的添加会降低砂土的抗剪强度和内摩擦角，橡胶含量对混合物抗剪强度的影响程度在高竖向应力条件下更为显著。

图 6 为不同竖向应力条件下橡胶-砂混合物的剪应力 - 应变关系。图中可以明显看出：在各级竖向应力条件下，当橡胶-砂混合物的橡胶掺量 RF 为 0%（无橡胶颗粒）时，试样剪应力峰值对应的剪切变形 Δl 最小，在 1~2 mm 之间；随着橡胶掺量 RF 的增加，试样在达到峰值剪应力后，可经历的剪切变形不断增加。

试样剪切破坏形式由“脆性破坏”逐渐转变为“韧性破坏”。从应力-应变关系曲线的形态来看, 在100~300 kPa竖向应力条件下, 橡胶-砂混合物(RF>0%)的应力-应变曲线均表现为“硬化”型; 当竖向应力增加至400 kPa时, 15%和30%橡胶掺量试样的应力-应变曲线表现为“软化”型, 而45%和60%掺量试样仍为“硬化”型。值的注意的是, “软化”型应力-应变曲线中存在一段平稳过程, 这是由于剪切过程中橡胶颗粒产生较大变形所致。众所周知, 无黏性土的应力-应变关系呈现应变“软化”主要是由于在高竖向应力条件下, 颗粒之间的排列较为紧密, 剪切时颗粒之间产生相对滚动, 颗粒间的位置重新排列的结果。橡胶颗粒的掺入在一定程度上可有效阻止砂土颗粒受剪时产生的倾覆和滚动^[18]。

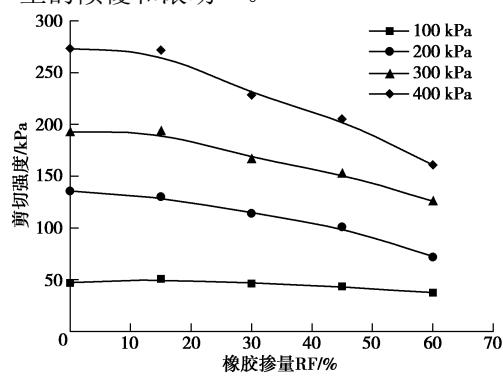


图4 橡胶含量与剪切强度的关系

Fig. 4 Relationship between shear strength and rubber fraction

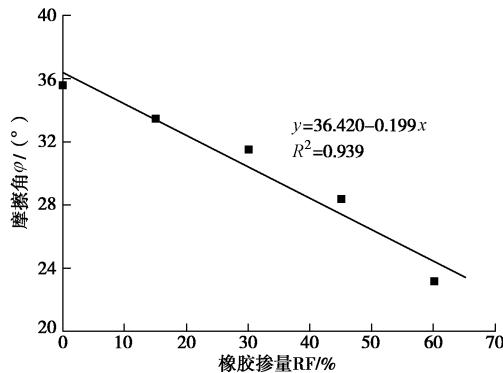


图5 橡胶含量与摩擦角的关系

Fig. 5 Relationship between internal friction angle and rubber fraction

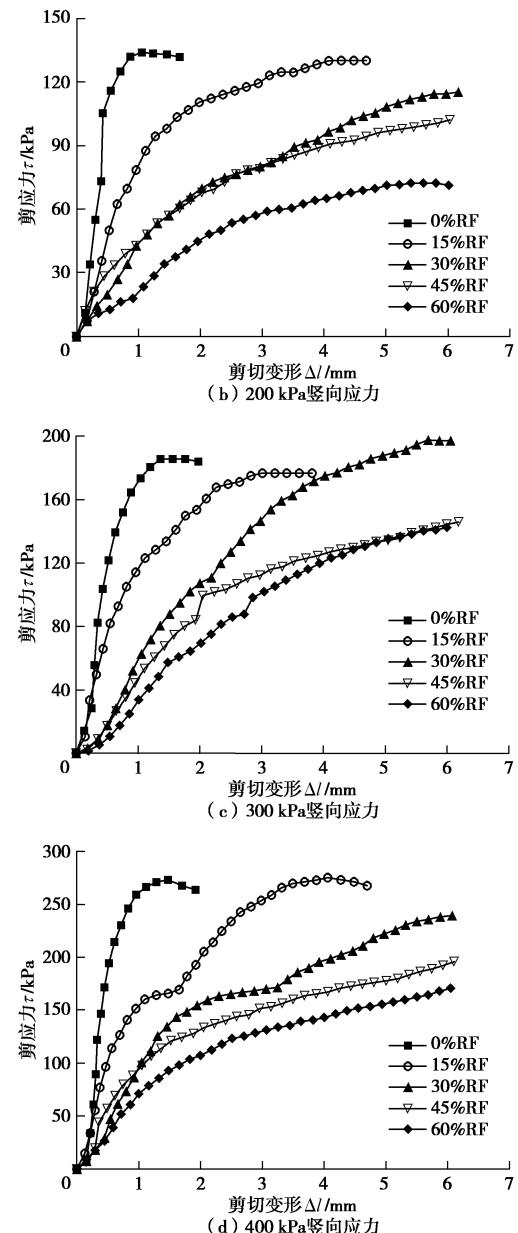
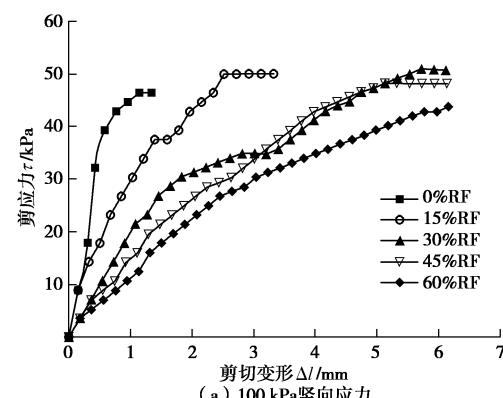


图6 不同竖向应力下的应力-应变特征

Fig. 6 Stress-strain characteristics of sand-rubber mixtures under different vertical stresses

2.3 无侧限抗压强度

图7为橡胶-砂混合物在不同养护龄期下的无侧限抗压强度。图中可以明显看出: ①橡胶掺量 RF 的增加, 混合物的无侧限抗压强度逐渐降低; ②随养护龄期的增加, 不同橡胶掺量混合物的无侧限抗压强度均有不同程度增加, 橡胶掺量 RF 越小, 无侧限抗压强度增加程度越明显。橡胶-砂混合物试样中添加少量(15 g)的无机固化剂(水泥), 使得橡胶与砂颗粒之间产生胶结, 便于制样和评价混合物的强度特性。水泥在两种无黏性材料中经过一定时间的水化反应, 产生具有胶结作用的水化产物, 将橡胶和砂颗粒有效联结起来, 在增强混合物黏聚力的同时, 也形成了更为稳定的微观结构。经过 35 d 养护后, 0%RF 试样的抗

压强度为 369.9 kPa, 而 60%RF 试样的抗压强度为 82.2 kPa, 前者约为后者的 4 倍。由此可见, 橡胶-砂混合物中, 承受外部荷载的骨架主要由砂颗粒组成, 当砂颗粒含量较少时, 橡胶颗粒形成的骨架承受荷载的能力较小^[19]。

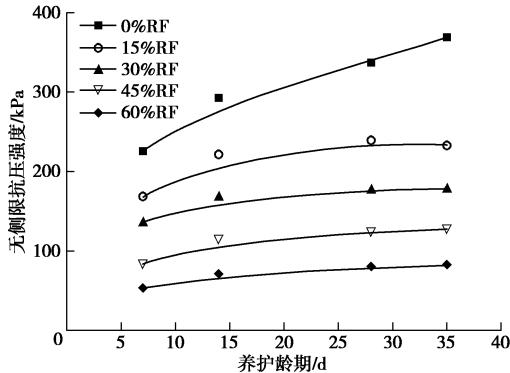


图 7 无侧限抗压强度随养护龄期的变化

Fig. 7 Variation of unconfined compression strength of specimens with curing time

图 8 为橡胶-砂混合物无侧限抗压强度与橡胶掺量的相关关系。图中不同养护龄期下, 无侧限抗压强度随橡胶掺量 RF 增加而显著减小; 相同养护龄期下, 无侧限抗压强度间的差异随橡胶掺量的增加而逐渐减小。60%RF 的橡胶-砂混合物强度在不同养护龄期下的差别不大。由此说明, 在少量固化剂存在的条件下, 橡胶-砂颗粒混合物承受荷载的介质依次为砂颗粒和橡胶颗粒。

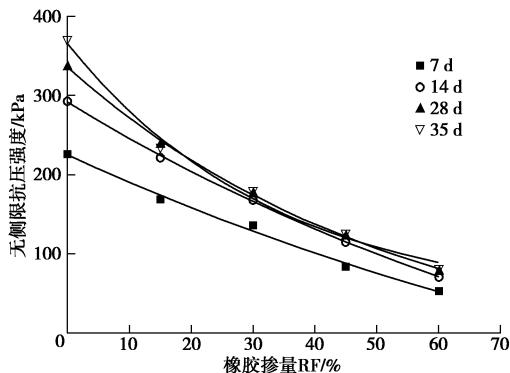


图 8 橡胶掺量对无侧限抗压强度的影响

Fig. 8 Effects of rubber fraction on unconfined compression strength of specimens

3 橡胶-砂混合物微观机制

3.1 微观结构

为进一步定性评价橡胶-砂颗粒混合物(刚-柔性材料)的微观结构, 本文对橡胶-砂混合物进行了扫描电镜分析, 其结果如图 9 所示。图 9 为不同橡胶掺量的橡胶-砂混合物的扫描电镜照片。当橡胶-砂混合物

中不含橡胶颗粒时, 砂粒之间通过少量的水泥水化产物联结, 同时可以看到, 砂粒形状较为圆滑, 在高竖向应力条件下颗粒间易产生滚动和滑移(如图 9(a)所示); 当砂粒中添加少量橡胶颗粒后, 橡胶颗粒被砂粒所包围(如图 9(b) 和 9(c) 所示), 此时混合物的受荷骨架仍为砂粒(受力链), 少量橡胶颗粒的存在可有效阻止砂粒在较大荷载作用下的倾覆和滑移; 当橡胶掺量较大时, 砂粒填充于橡胶颗粒形成的孔隙中, 混合物的受力骨架主要由橡胶颗粒担当, 相同荷载下混合物产生的应变也较大(如图 9(d) 和 9(e) 所示)。图 9(f) 为 15% 橡胶掺量试样放大 2000 倍照片。图中可以明显看到, 橡胶-砂试样中局部形成了网状空间结构, 大量针状物生成, 这些水泥水化产物在无黏性颗粒(砂粒和橡胶颗粒)中起到很好的联结作用。

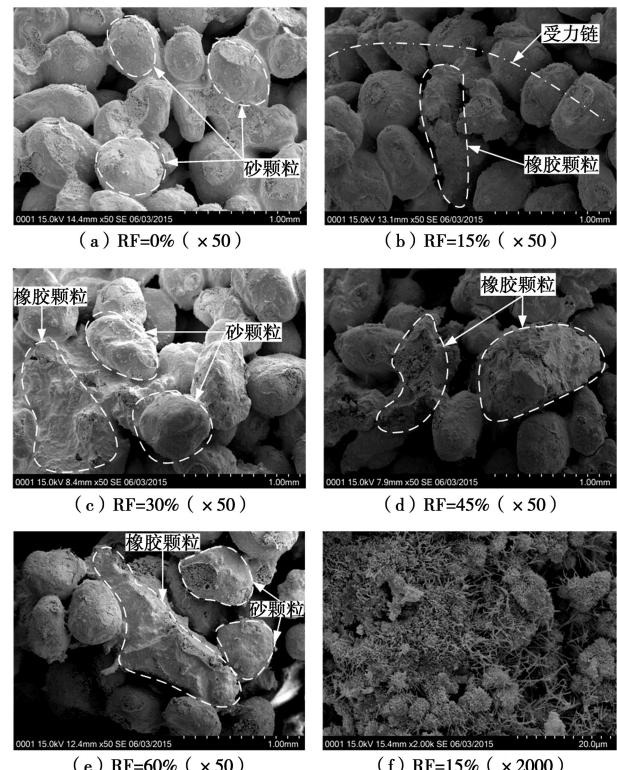


图 9 橡胶-砂混合物微观结构照片

Fig. 9 SEM images of sand-rubber mixtures with different rubber fractions

3.2 受力机制分析

图 10 为橡胶-砂混合物受力机制示意图。对于橡胶-砂混合物(刚-柔性材料)而言, 当橡胶颗粒(柔性材料)含量较少时, 橡胶颗粒被砂粒包围, 对混合物施加一定的竖向应力 σ 后, 橡胶颗粒产生较大变形, 但位置基本未发生显著改变, 而砂粒则产生一定的滑移和滚动, 在受力稳定后形成主、次受力链, 承受外部荷载, 混合物的最终变形为 Δh_1 (如图 10(a) 所示); 当橡胶掺量较大时, 橡胶颗粒占据混合物中大部分体

积, 砂粒则填充于橡胶颗粒形成的孔隙中, 坚向应力 σ 施加后, 橡胶颗粒产生大变形 Δh_2 适应外部荷载。此时, 混合物的主要受荷骨架转变为橡胶颗粒, 砂粒基本无明显的滑移和滚动现象^[14, 20]。

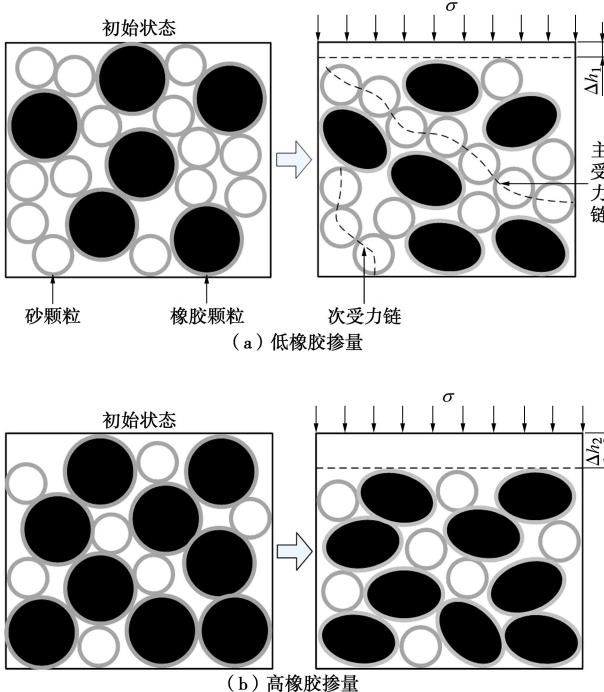


图 10 橡胶-砂混合物受力机制示意图

Fig. 10 Schematic diagram of micromechanism for sand-rubber mixtures

对于橡胶-砂颗粒混合物(刚-柔性材料)的受力机制可以总结为: ①当柔性材料含量较少时, 刚性材料是构成承受外部荷载骨架的主要成分, 柔性材料会产生一定的变形, 但其可以阻止刚性材料的滑移和倾覆; ②当柔性材料含量较多时, 刚性材料不再是受力骨架的主要组成成分, 混合物中未形成刚性受力链承受外部荷载, 柔性材料产生较大的弹塑性变形。柔性材料的添加可降低刚-柔性材料的重度, 减小“剪胀”特性, 增加吸收动荷载能量的作用。

4 结 论

本文通过室内直剪试验和无侧限抗压强度试验研究了橡胶-砂颗粒混合物的强度、应力-应变特性和微观结构, 并探讨了刚-柔性材料的受力机制, 得出以下4点结论。

(1) 橡胶-砂颗粒混合物密度随橡胶掺量的增加而线性减小, 材料颗粒粒径对橡胶-砂颗粒混合物密度减小速率基本没有影响, 增加橡胶含量是降低混合物密度的主要方法。

(2) 橡胶-砂颗粒混合物抗剪强度和抗压强度均随橡胶掺量增加而减小, 高竖向应力下混合物抗剪强

度对橡胶掺量的变化更为敏感, 内摩擦角与橡胶掺量间呈线性减小关系。

(3) 橡胶-砂颗粒混合物剪切破坏形式随橡胶含量增加由“脆性破坏”转变为“韧性破坏”, 峰值应力对应的应变逐渐增大, 应力-应变关系由“软化”型向“硬化”型转变。

(4) 低橡胶掺量的橡胶-砂颗粒混合物承受荷载的介质主要是砂颗粒组成的受力链, 橡胶颗粒可有效阻砂颗粒的滑移和倾覆。高橡胶掺量的混合物中, 橡胶颗粒承受主要荷载并产生较大的弹性变形, 砂颗粒填充混合物孔隙。

参考文献:

- [1] 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. (XIN Ling, LIU Han-long, SHEN Yang, et al. Consolidated undrained triaxial compression tests on lightweight soil mixed with rubber chips of scrap tires[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 428-433. (in Chinese))
- [2] 方芳, 周勇敏, 张继. 废轮胎回收制胶粉及其应用进展[J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(1): 164-168. (FANG Fang, ZHOU Yong-min, ZHANG Ji. Advances in recycling of waste tyre for preparation of powdered rubber and its applications[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2007, 25(1): 164-168. (in Chinese))
- [3] TSOI W Y, LEE K M. Mechanical properties of cemented scrap rubber tyre chips[J]. Géotechnique, 2010, 60(2): 133-141.
- [4] 张正甫, 刘松玉, 蔡光华, 等. 废旧轮胎在道路工程中的研究进展[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊2): 361-368. (ZHANG Zheng-fu, LIU Song-yu, CAI Guang-hua, et al. Research progress of scrap tires used in road engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 361-368. (in Chinese))
- [5] 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. (LI Zhao-hui, ZHANG Hu-yuan. Compaction properties of granulated rubber and loess mixtures[J]. Rock and Soil Mechanics 2010, 31(12): 3715-3720. (in Chinese))
- [6] TAFRESHI S N M, MEHRJARDI G T, DAWSON A R. Buried pipes in rubber-soil backfilled trenches under cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(11): 1346-1356.
- [7] HENNEBERT P, LAMBERT S, FOUILLEN F, et al.

- Assessing the environmental impact of shredded tires as embankment fill material[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(5): 469 – 478.
- [8] SANTONI R L, TINGLE J S, WEBSTER S L. Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(3): 258 – 268.
- [9] CHRIST M, PARK J B, HONG S S. Laboratory observation of the response of a buried pipeline to freezing rubber-sand backfill[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, **22**(9): 943 – 950.
- [10] PAMUKCU S, AKBULUT S. Thermoelastic enhancement of damping of sand using synthetic ground rubber[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(4): 501 – 510.
- [11] AYDILEK A H, MADDEN E T, DEMIRKAN M M. Field evaluation of a leachate collection system constructed with scrap tires[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(8): 990 – 1000.
- [12] EDIL T B, BOSSCHER P J. Engineering properties of tire chips and soil mixtures[J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, **17**(4): 453 – 464.
- [13] BERNAL A, SALGADO R, SWAN R H, et al. Interaction between tire shreds, rubber-sand and geosynthetics[J]. Geosynthetics International, 1997, **4**(6): 623 – 643.
- [14] LEE J S, DODDS J, SANTAMARINA J C. Behavior of rigid-soft particle mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, **19**(2): 179 – 184.
- [15] KIM Y T, KANG H S. Engineering characteristics of rubber-added lightweight soil as a flowable backfill material[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, **23**: 1289 – 1294.
- [16] 段伟宏, 张 涛, 蔡国军. 橡胶颗粒-砂混合物压缩特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, **23**(增刊 1): 200 – 204. (DUAN Wei-hong, ZHANG Tao, CAI Guo-jun. Experimental study on compressibility characteristic of rubber-sands mixtures[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, **23**(S1): 200 – 204. (in Chinese))
- [17] 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.
- [18] BOLTON M D. The strength and dilatancy of sands[J]. Géotechnique, 1986, **36**(1): 65 – 78.
- [19] ZHANG T, CAI G, LIU S, et al. Laboratory observation of engineering properties and deformation mechanisms of cemented rubber-sand mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2016, **120**: 514 – 523.
- [20] LEE C, TRUONG Q H, LEE J S. Cementation and bond degradation of rubber-sand mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, **47**(7): 763 – 774.

2017 年岩土工程西湖论坛：岩土工程测试技术 (杭州 · 一号通知)

随着我国基本建设工程的进一步推进, 岩土工程测试面临着更严峻的挑战, 对相关测试技术也有着更高的要求。为顺应国家、社会需求, 探讨解决岩土工程测试技术面临的重大问题, 拟定于 2017 年 10 月在浙江杭州召开“2017 年岩土工程西湖论坛: 岩土工程测试技术”学术会议, 就岩土工程测试技术中的相关热点问题和研究进展进行讨论, 邀请各有关单位、学者和工程技术人员踊跃参加。

会议主题: 岩土工程测试理论、技术新进展。

主办单位: 中国工程院土木、水利与建筑工程学部; 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心。

组委会联系方式: 陆水琴、王笑笑: 电话 0571-88208775, 邮箱 lusq87@163.com; wangxiuxiu713@163.com, 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心网址: <http://www.zjdxyt.com>。

(会议组委会 供稿)