

DOI: 10.11779/CJGE202110015

废旧轮胎橡胶颗粒-砂混合料抗剪强度与破坏模式 试验研究

刘启菲, 庄海洋*, 陈佳, 吴琪, 陈国兴

(南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘要: 由废旧轮胎回收橡胶颗粒与砂混合而成的橡胶-砂混合料具有密度低、变形能力强、阻尼高等诸多优点, 将其应用于土木工程, 是实现土木工程绿色可持续发展的重要途径之一。通过对橡胶-砂混合料进行固结不排水剪切试验, 探讨了橡胶颗粒含量 XC 、粒径比 $d_{50,r}/d_{50,s}$ 、相对密实度 D_r 、固结围压 σ'_m 等因素对混合料抗剪性能的影响规律及其机理。研究表明: 随 XC 的增加, 混合料的破坏模式表现出由部分软化-剪胀向完全硬化-剪缩转变。总体来说, 随橡胶颗粒的掺入量增加, 混合土体 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 和内摩擦角均出现较明显下降, 有效内摩擦角则会有一定程度的提高, 且橡胶粒径与砂越接近影响越明显, 而 D_r 的增加可以显著改善混合料的抗剪强度特性。基于土骨架微观结构, 初步解释了试验现象及其规律。

关键词: 橡胶颗粒-砂混合料; 固结不排水试验; 破坏模式; 抗剪强度

中图分类号: TU354; TU317.1

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2021)10 - 1887 - 09

作者简介: 刘启菲(1995—), 女, 博士研究生, 主要从事土力学与岩土地震工程研究。E-mail: liuqifei9573@163.com。

Tests on shear strength and failure mode of rubber particle-sand mixtures

LIU Qi-fei, ZHUANG Hai-yang, CHEN Jia, WU Qi, CHEN Guo-xing

(Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: The recycled waste tire rubber particles mixed with sand have the advantages of low density, strong distortion-resistant capacity and high damping. The mixtures are becoming a kind of new geotechnical material, which realizes the sustainable development of civil engineering. In this study, the influence law and mechanism of the rubber content XC , particle size ratio of rubber and sand $d_{50,r}/d_{50,s}$, relative density D_r and confining pressure σ'_m on the shear resistance of mixtures are evaluated by a series of consolidated undrained tests. The results show that the failure mode shows a transformation from partial softening-dilatancy to complete hardening-contraction with the increase of XC . In general, the increase of XC will lead to a significant decrease of $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ and the internal friction angle, and an improvement of the effective internal friction angle to a certain extent. The closer the rubber particle size is to the sand, the more obvious the influence is. In addition, the increase of D_r can significantly improve the shear strength characteristics of the mixtures. Based on the micro-soil skeleton structure, the experimental phenomenon and its laws are preliminarily explained.

Key words: rubber particle-sand mixture; consolidated undrained test; failure mode; shear strength

0 引言

随着中国家庭汽车保有量的不断提高和物流行业的快速发展, 橡胶轮胎报废量迅速增加, 处于高生产量, 低回收率的现状, 使得大量废旧橡胶轮胎被焚烧、填埋或堆积闲置, 不可避免的对环境和人类健康造成威胁。20世纪90年代, Edil等^[1]和 Masad等^[2]通过室内试验验证了废旧轮胎橡胶颗粒-砂混合物作为挡土墙和公路路基轻质回填料的经济性和实用性, 为废旧轮胎的回收再利用提供了新的解决方案。此后诸多学者对橡胶-砂土混合料的工程特性展开研究, 发现由废

旧橡胶颗粒与砂混合组成的填料, 具有密度低、变形能力强、阻尼高、耐磨性好、渗透能力强、成本低廉等特点, 可广泛应用于土木工程, 如基础填筑、垃圾填埋、码头建设、斜坡加固和建筑抗震等^[3-4], 是一种性质优良的土工材料。

Lee等^[5]、Zornberg等^[6]、Rao等^[7], 通过三轴试

基金项目: 江苏省重点研究计划(社会发展)项目(BE2020711); 国家自然科学基金面上项目(51978333)

收稿日期: 2020 - 12 - 24

*通信作者(E-mail: zhuang7802@163.com)

表1 橡胶-砂混合物基本物理特性指标

Table 1 Basic physical property indexes of rubber-sand mixtures

土样颗粒	粒径范围/mm	相对质量密度 G_s	最大干密度 $\rho_{\max}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最小干密度 $\rho_{\min}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	不均匀系数 C_u
粗砂	0.5~2	2.65	1.824	1.489	1.855
中砂	0.25~0.5	2.66	1.662	1.321	1.129
细砂	0.075~0.25	2.67	1.623	1.373	1.546
橡胶颗粒	2~3	1.88			

验, 探究了废弃轮胎颗粒的掺入对土体抗剪强度的影响, 研究结果均表明, 橡胶的掺入可以提高橡胶砂的抗剪强度。而 Lee 等^[8]和 Anvari 等^[9]分别通过开展三轴试验和直剪试验, 发现橡胶掺入量和相对密实度存在一定阈值, 当超过此阈值, 橡胶的掺入会显著改变原本土体的力链传递。而 Neaz Sheikh 等^[10]通过三轴试验发现橡胶砂混合物的剪切强度会随着混合物中轮胎屑的增加而降低。目前, 国内也已有部分学者对橡胶-砂混合物静力学特性展开研究。刘方成等^[11-12]先后利用直剪试验、三轴试验以及数值模拟的手段探究了不同初始状态、固结围压、配比、相对密实度、粒径比对橡胶砂内摩擦角和内聚力、初始切线模量、泊松比、应力-应变特性、体变特性、模量衰减特性的影响, 发现随着橡胶颗粒的增加, 橡胶砂剪胀特性减弱、剪缩增大。李丽华等^[13]通过直剪试验给出了最优橡胶碎片含量及形状。邓安等^[14]和张涛等^[15]通过开展直剪试验研究了橡胶含量和应力状态对其抗剪强度和应力应变发展影响, 研究结果表明, 应力-应变曲线的硬化水平随围压的增加而增高, 其破坏模式表现出随橡胶掺量增加由“脆性”向“韧性”转变的趋势。

基于以上研究现状, 为进一步探究橡胶含量 X_C 、有效围压 σ'_m 、粒径比 $d_{50,r}/d_{50,s}$ 和相对密实度 D_r 对橡胶-砂混合料的力学特性影响规律, 本文通过进行一系列固结不排水试验, 探究了不同工况下橡胶-砂混合料的典型破坏模式, 分析对应工况下的应力-应变曲线和莫尔应力圆, 得到混合料的破坏偏应力和抗剪强度指标, 确定各影响因素对抗剪强度的耦合影响规律, 初步解释其力学机理, 以期对橡胶-砂混合料的工程应用提供真实准确的试验依据。

1 试验方案

1.1 试验设备与试验材料

试验所用仪器为南京工业大学的 DYNNTS 型 GDS 动三轴仪, 如图 1 所示。该仪器可以采用应变/应力控制加载实现静力三轴试验, 本次试验采用均等固结。

试验中采用中国福建标准砂, 将试验中所使用的砂根据粒径范围分为: 粗砂、中砂和细砂。试验中所

使用的橡胶颗粒是从专业分解废旧橡胶轮胎的厂家购买, 其粒径范围为 2~3 mm。砂颗粒与橡胶颗粒的示意图和级配曲线如图 2 所示, 试验材料的基本物理特性如表 1。

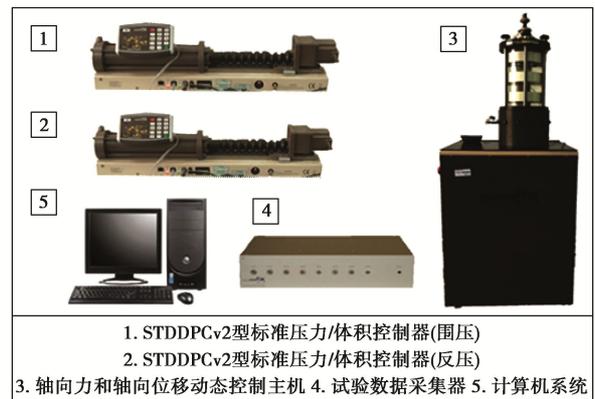


图1 GDS 动三轴仪

Fig. 1 GDS dynamic triaxial test apparatus

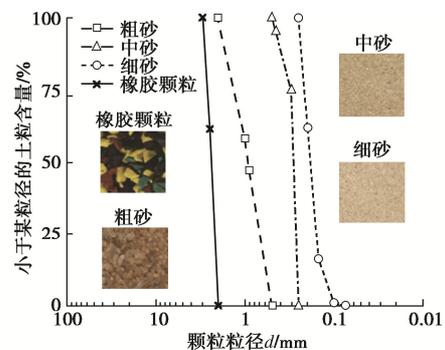


图2 级配曲线

Fig. 2 Grading curves

1.2 试样制备与试验方法

试样高 100 mm, 直径为 50 mm。由于橡胶颗粒与砂颗粒相对质量密度差异较大, 采用砂雨法易造成颗粒分布不均, 而采用湿击法可以较好的控制试样的 e , 同时也能获得较大的 e 值范围^[16]。因此, 本次试验采用湿击法制样, 根据所需的橡胶含量及相对密实度, 将制样所需的烘干砂颗粒与橡胶颗粒分为 4 等份, 控制初始成样含水率为 5%, 滴入无气水后, 将混合料搅拌均匀, 分 4 层夯实成样。制样完成后, 先向试样内部通 CO_2 15 min 左右, 除去试样内部的空气, 再从

试样底部到顶部通无气水直到顶部没有气体排出, 然后对试样进行分级反压饱和。对饱和后的试样进行孔压系数 B 值测定, 若 $B > 0.95$, 认为试样达到饱和和试验的要求, 即可对试样进行均等固结。待试样变形及排水体积稳定, 即认为其固结完成, 对试样进行不排水剪切试验, 控制剪切应变速率为 $0.2\%/min$ 。

本次研究主要考察不同橡胶含量、粒径比、相对密实度对橡胶-砂混合料力学特性的影响, 均等固结不排水剪切试验方案如表 2 所示。

表 2 不排水剪切试验方案

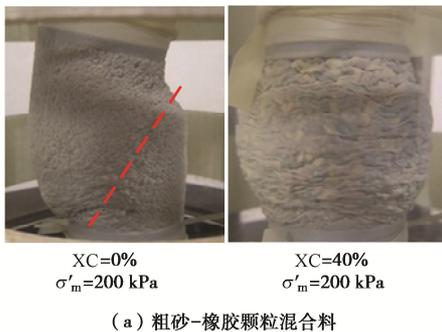
Table 2 Undrained shear test conditions

橡胶含量 XC/%	粒径比 $d_{50,r}/d_{50,s}$	相对密实度 $D_r/\%$	固结围压 σ'_m /kPa
0	2.6, 8.6, 13.1	50	50, 100, 200, 300
10	2.6, 8.6, 13.1	50	50, 100, 200, 300
20	2.6, 8.6, 13.1	50	50, 100, 200
30	2.6, 8.6, 13.1	50	50, 100, 200
40	2.6, 8.6, 13.1	50	50, 100, 200
50	2.6, 8.6, 13.1	50	50, 100, 200
10, 30	2.6, 13.1	70, 90	50, 100, 200, 300

注: $d_{50,r}$, $d_{50,s}$ 分别表示橡胶与砂的平均粒径; 橡胶含量 XC 指橡胶颗粒占土样总质量的百分比。

2 橡胶颗粒-砂混合料的破坏模式

在固结不排水剪切试验中, 不同橡胶含量、粒径比、固结围压、相对密实度下的橡胶-砂混合料表现出不同的力学特性, 图 3 和图 4 为不同工况下混合料试样达到破坏所表现出的状态。由图可以发现, 当橡胶含量越小或相对密实度越小时, 试样破坏时均会出现一个较明显的剪切破坏面, 如图 3 和图 4 中虚线所示。而随着橡胶含量的增加或相对密实度的增大, 试样的破坏形态逐渐转变为侧向鼓胀变形破坏。可以认为, 随着橡胶含量的增多, 剪切过程中橡胶颗粒具有的大变形特性逐渐显现, 混合土体的抗剪强度由主要靠砂颗粒间的咬合转变为主要靠试样中橡胶颗粒的大变形控制; 而相对密实度的增加则会导致试样内部孔隙减少, 颗粒排列更密实, 更不易发生错动。



(a) 粗砂-橡胶颗粒混合料

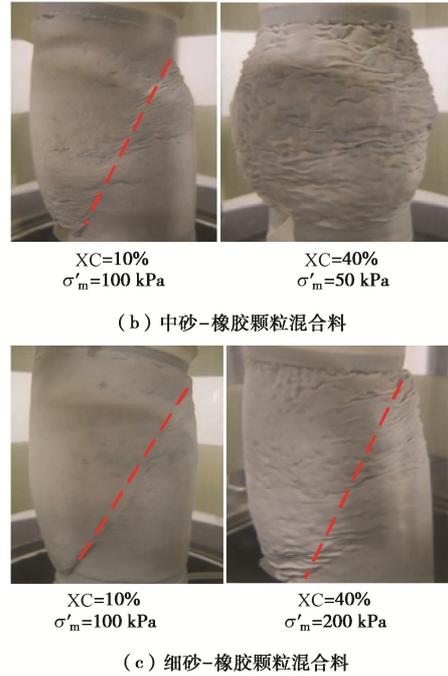


图 3 不同橡胶含量试样破坏状态 ($D_r = 50\%$)

Fig. 3 Failure modes of rubber-sand mixtures under different conditions ($D_r = 50\%$)

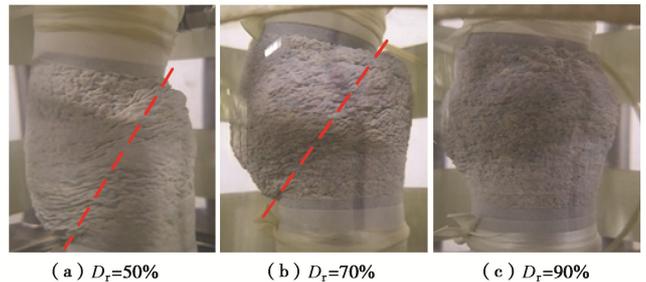


图 4 不同相对密实度下粗砂-橡胶颗粒混合料试样破坏状态 ($XC = 10\%$, $\sigma'_m = 100 kPa$)

Fig. 4 Failure modes of rubber-coarse sand mixtures under different D_r ($XC = 10\%$, $\sigma'_m = 100 kPa$)

橡胶-砂混合料在不同 CU 试验工况下得到的应力-应变曲线如图 5。根据图 5 (a), 当橡胶含量较少时, 应力在到达峰值后会出现明显衰减, 表现为应变软化, 此时试样往往会出现一个明显的剪切破坏面; 当橡胶含量较大, 随着应变的不断增大, 应力逐渐增加, 但其增长速度会逐渐减小, 最后应力逐渐趋于稳定, 表现为应变硬化。即当橡胶含量较少时, 混合料的颗粒之间接触还主要以砂土颗粒的接触为主, 随应变的增加, 土颗粒间错动发生, 当土体达到临界状态后, 土颗粒间的咬合力达到极限, 试样产生剪切破坏面, 导致强度快速下降。随着橡胶含量的增加, 混合土的颗粒接触转变为橡胶颗粒接触为主, 一方面橡胶颗粒在挤压下产生明显的体积侧向变形, 导致试样内部孔隙减少; 另一方面砂土颗粒间的接触面积增加,

为混合料颗粒间提供了更大的咬合力，抑制剪切破坏面的产生，故随应变增长，试样更趋于密实，从而使得试样出现明显的侧胀破坏特征。

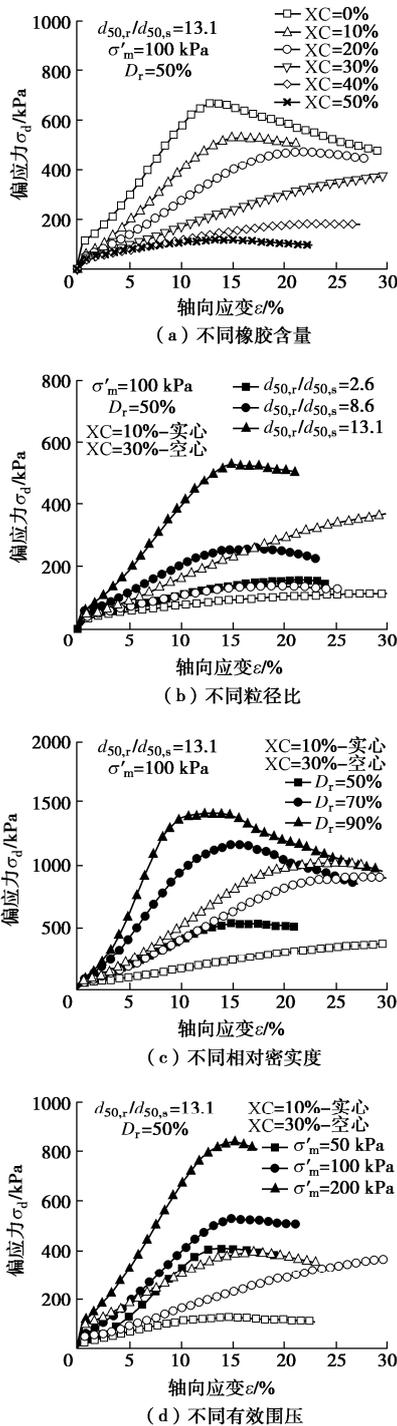


图5 不同工况下橡胶-砂混合料应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of rubber-sand mixtures under different conditions

图5(b)反映了不同粒径比对混合料应力应变曲线的影响。在XC=10%和30%下，混合料的应力应变曲线均呈现出随着粒径比的增加，应力应变曲线增长越快，且峰值越大。可以认为，当橡胶颗粒粒径与砂

颗粒粒径越接近，橡胶颗粒对原本纯砂土体中砂土颗粒之间力链的削弱作用越明显，混合料的抗剪强度衰减越大。由图5(c), 5(d)中不同相对密度和围压下混合料应力-应变发展曲线可以看出，相对密度及围压的增加可以有效提升土体的抗剪强度。

在不排水剪切试验中，由于偏应力的增加会在饱和试样中产生超静孔隙水压力，据此可以判断土体的剪胀剪缩特性^[7]。图6为试验中出现的橡胶-砂混合料的3种典型孔压比发展曲线。当橡胶含量较少时，试样内部颗粒在外荷载作用下发生错位，重新排列，呈现单一的剪胀模式；当橡胶含量较多(如图6(c))，试样内部孔隙较大，外荷载作用下橡胶颗粒首先发生体积压缩，呈现剪缩模式；在这两种状态之间，存在一过渡模式，首先试样内部橡胶颗粒发生体积压缩，当橡胶体积达到不可压缩的临界状态后颗粒间开始发生错动，称这一模式为部分剪胀模式。

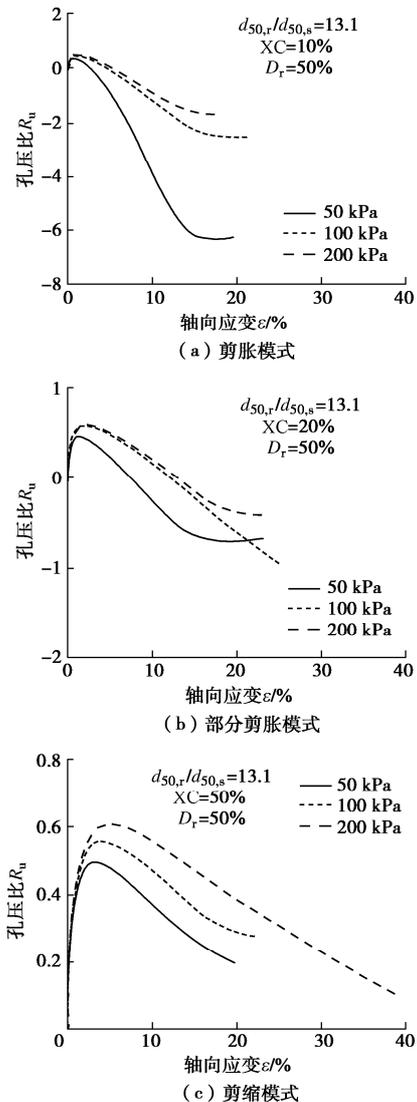


图6 橡胶-砂混合料的典型孔压比曲线

Fig. 6 Typical $R_u - \epsilon$ curves of rubber-sand mixtures

根据以上分析, 橡胶-砂混合料在不排水剪切试验中主要呈现 3 种破坏模式: 部分软化-剪胀模式、部分软化-部分剪胀模式和完全硬化-剪缩模式。总体来说, 对于 $D_r = 50\%$, 当 $XC = 0\% \sim 10\%$ 时, 混合料呈现部分软化-剪胀破坏模式; 当 $XC = 20\% \sim 30\%$ 时, 混合料呈现部分软化-部分剪胀破坏模式; 当 XC 超过 40% 后, 混合料呈现完全硬化-剪缩破坏模式。

3 橡胶颗粒-砂混合料抗剪强度分析

3.1 莫尔-库仑抗剪强度包线的确定

采用 DYNITS 型循环三轴试验仪完成的不排水剪切试验可以完整地反映试样从受力变形直到破坏的全过程, 确定不同橡胶含量下混合料的抗剪强度, 首先需要确定试样的破坏点及其对应的应力状态。对于破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的取值, 根据《土工试验方法标准 (GB / T 50123—2019)》^[18], 当应力-应变曲线存在峰值时, 取峰值对应的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$; 当应力-应变曲线为持续硬化型 (即不存在峰值) 时, 取轴向应变值为 15% 所对应的偏应力作为破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 。

橡胶-砂混合料作为一种新型土工材料, 目前还未明确给出其 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的取值方法。图 7 给出了橡胶-砂混合料的一些典型应力应变曲线。随着橡胶含量的增加, 混合料应力-应变曲线逐渐由应变软化型转变为应变硬化型, 其抗剪强度 (即应力-应变曲线峰值) 峰值所对应的应变也随之增大, 如图 7 (b), $XC = 30\%$ 时, 粗砂混合料在 200 kPa 有效围压下应力峰值出现在应变为 24.5% 处, 其对应峰值强度为 201.6 kPa, 而此工况下, 轴向应变为 15% 处所对应的偏应力为 172.2 kPa。而当橡胶含量超过 30% 或相对密度升高后 (如图 7 (c)), 混合料 $\varepsilon - \sigma$ 曲线往往呈现应变硬化型, 或呈现应变软化型时, 曲线峰值往往出现在 $\varepsilon = 20\%$ 后。由图可以看出, 不同橡胶含量、围压、相对密度下混合料应力-应变发展存在差异, 为研究橡胶-砂混合料在统一破坏偏应力下的力学特性, 规定本次研究中 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的取值方法为: 若土体在 15% 应变范围内存在峰值, 取峰值作为 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$; 若不存在峰值或峰值位于 15% 应变范围外, 则取轴向应变值为 15% 所对应的偏应力作为 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 。理论上, 本方法是偏安全的, 且符合《土工试验方法标准 (GB / T 50123—2019)》^[18]。

3.2 破坏偏应力分析

图 8 给出了相对密度为 50% 时, 根据以上 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的取值方法, 粗、中、细砂-橡胶颗粒混合料在不同橡胶含量和围压下的破坏偏差应力。由图 8 可见: 随着橡胶含量的增加, 各粒径比混合料的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 均呈现下降趋势, 且降低速率逐渐减小。当橡胶掺入量达 50% 后, 较纯砂试样的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 降幅均达 80% 左

右; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的减小趋势随粒径比的增大逐渐趋于线性, 当 $d_{50,r}/d_{50,s} = 2.6$ 时, 橡胶颗粒的少量加入 ($XC = 10\%$) 会导致破坏偏差应力的大幅降低, 降幅约为 60%, 而中砂、细砂混合料仅约为 20% 左右, 表明当橡胶颗粒与砂颗粒粒径越接近, 对其抗剪强度的削弱作用越明显。总体来说, 当掺入橡胶颗粒后, 混合料破坏偏差应力随粒径比的减小而减小; 有效围压越大, 混合料的破坏偏差应力越大。

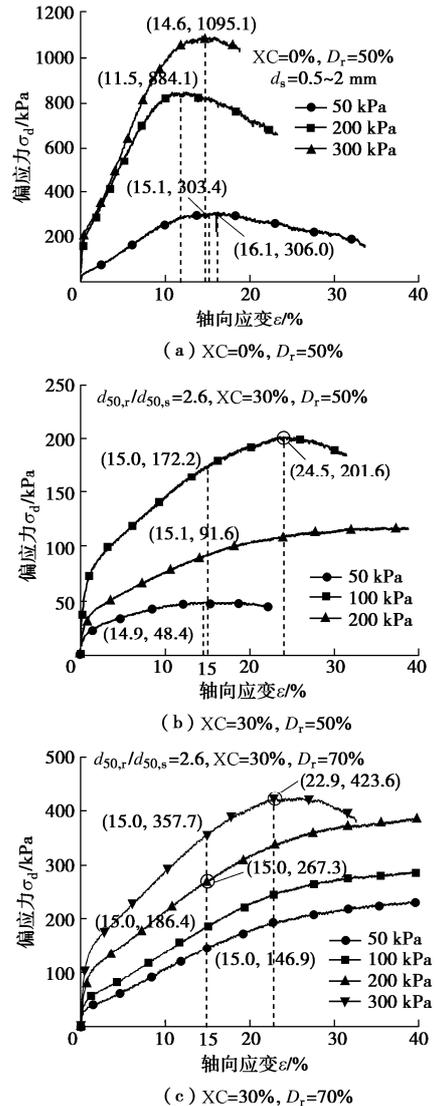
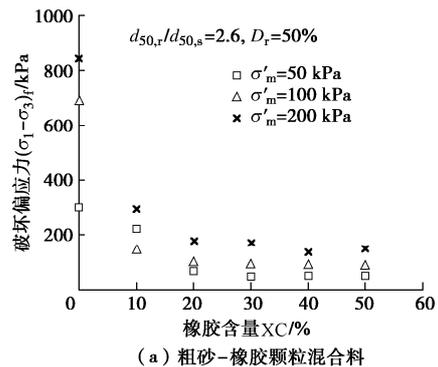


图 7 破坏偏差应力的取值

Fig. 7 Values of failure deviation stress



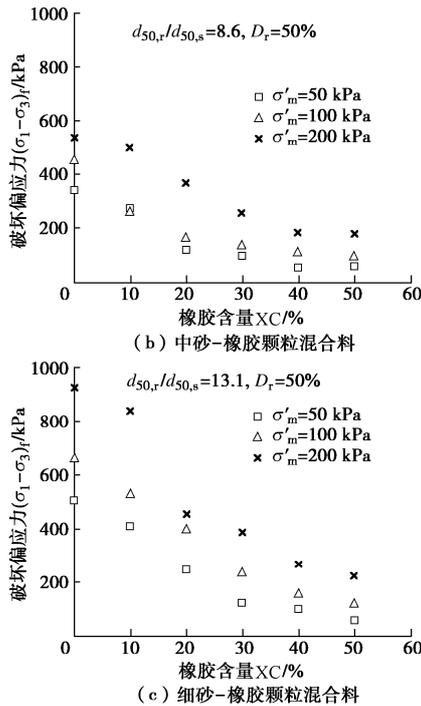


图8 橡胶-砂混合料破坏偏差应力 ($D_r = 50\%$)

Fig. 8 Values of $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ of rubber-sand mixtures ($D_r = 50\%$)

不同相对密实度砂-橡胶颗粒混合料的破坏偏差应力绘于图9。与上述试验结果类似,粗砂-橡胶颗粒混合料的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 在相同橡胶含量、密实度下均明显小于细砂-橡胶颗粒混合料。另外,随相对密实度的提高,混合料的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 均呈不同程度的提高,当相对密实度从50%上升为70%时, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的平均增幅约为53.9%,当相对密实度从70%上升为90%时, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 的平均增幅约为25.1%,可以认为,适当地对土体进行压密,可以有效地提高混合料的抗剪强度。

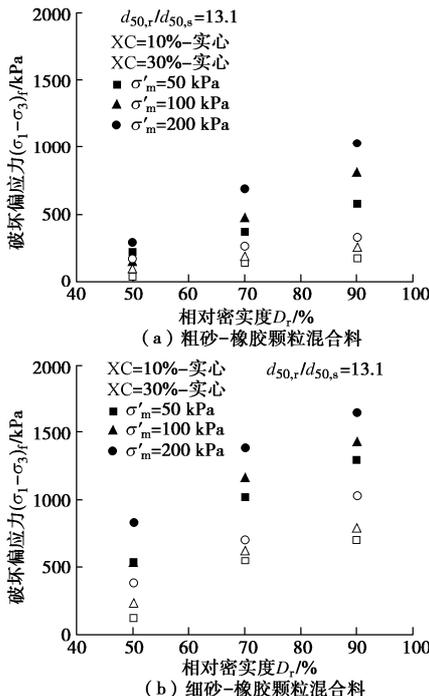


图9 不同相对密实度橡胶-砂混合料破坏偏差应力

Fig. 9 Values of $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ of rubber-sand mixtures under different D_r

3.3 内摩擦角分析

图10, 11给出了部分粗砂混合料的莫尔应力圆及相应抗剪强度包线,由此可得到橡胶-砂混合料的黏聚力及内摩擦角。可以发现,橡胶含量会对混合料的内摩擦角产生显著影响。

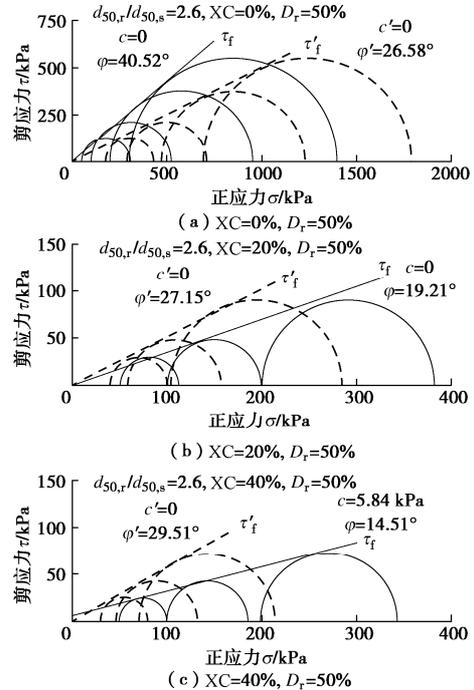


图10 不同橡胶含量粗砂-橡胶颗粒混合料莫尔应力圆

Fig. 10 Mohr's stress circles of rubber-coarse sand mixtures with different XC

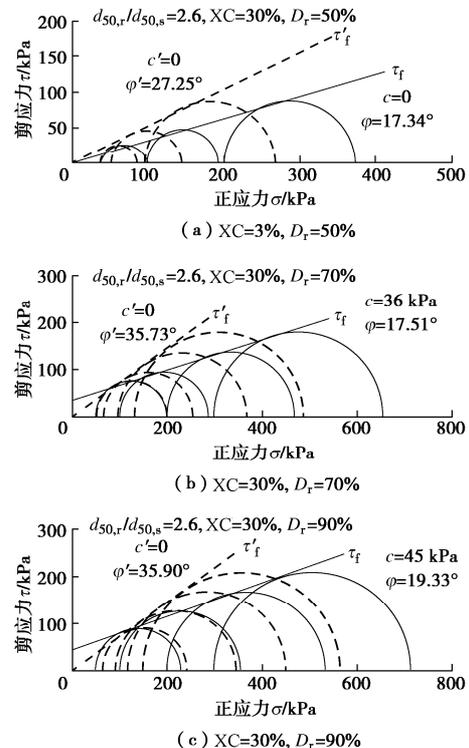


图11 不同相对密实度粗砂-橡胶颗粒混合料莫尔应力圆

Fig. 11 Mohr's stress circles of rubber-coarse sand mixtures with different D_r

土体内摩擦主要由两个部分组成: 一为颗粒之间滑动时产生的滑动摩擦, 另一个是颗粒之间由于咬合产生的咬合摩擦。图 12 给出了不同粒径比下橡胶-砂混合料内摩擦角 ϕ 及有效内摩擦角 ϕ' 随橡胶含量的变化。由图 12 (a) 可以发现, 随着橡胶含量的增加, ϕ 均逐渐减小, 当 $XC = 50\%$ 时, 降幅约为 55%, 原因是橡胶颗粒具有剪切变形大的特性, 其加入会大大降低混合料的总内摩擦角。另外, 存在一临界橡胶含量, 超过此含量后, 内摩擦角减小速率会产生明显变化(粗砂、中砂混合料均在 $XC = 40\%$ 时出现明显拐点)。可以认为, 超过此橡胶含量后, 混合料主要骨架由砂颗粒转变为橡胶颗粒, 此后, XC 继续增加将几乎不会影响混合料的内摩擦角。

由图 12 (b), 有效内摩擦角 ϕ' 在 $25^\circ \sim 30^\circ$ 之间轻微波动。随着橡胶颗粒的掺入, ϕ' 先出现小幅下降后缓慢增大(拐点出现所对应的 XC 约为 $10\% \sim 20\%$)。可以认为, 在纯砂中加入橡胶颗粒, 试样内部力链首先会由“砂-砂接触”, 转变为“砂-砂接触”+“砂-橡胶接触”, 在此阶段, 由于橡胶颗粒具有的高变形能力, 颗粒之间的咬合摩擦会明显下降; 然后, 随着 XC 的继续增加, 试样内部力链变化为“砂-砂接触”+“砂-橡胶接触”+“橡胶-橡胶接触”, 在此阶段, 由于橡胶颗粒发生挤压变形, 会大大增加橡胶颗粒与砂颗粒/橡胶颗粒之间的接触面积, 同时考虑到其具有的高摩擦力, 土体内部的滑动摩擦会大大增加, 另外, 橡胶变形亦会产生额外的咬合摩擦, 故随着橡胶含量的增加, 有效内摩擦角会逐渐增大。

根据图 12, 在相同橡胶含量下, 粒径比越大内摩擦角 ϕ 越大。当 $XC = 0\%$ 时, 粗、中、细砂 ϕ 均为 40° 左右; 当橡胶颗粒少量掺入 ($XC = 10\% \sim 20\%$) 时, 粒径比对混合料 ϕ 的影响较为显著, 相同橡胶含量下, 不同粒径比内摩擦角差异可达 $6^\circ \sim 15^\circ$; 随着橡胶含量的增加, 不同粒径比混合料的 ϕ 差异逐渐减小。当橡胶含量达到 50% 时, 不同粒径比混合料 ϕ 趋于一致, 即可认为此时, 试样内部主要以橡胶颗粒作为传力骨架, 砂颗粒仅起到孔隙填充的作用。

由图 12 (b), 中砂混合料的有效内摩擦角 ϕ' 明显小于粗砂、细砂混合料, 且当橡胶含量超过 20% 后, 中砂混合料 ϕ' 相较于另外两个粒径比会出现更明显的提升, 可以认为, 相较于粗砂 ($C_u = 1.855$) 和细砂 ($C_u = 1.546$), 中砂颗粒不均匀系数 $C_u = 1.129$, 粒径分布较均匀, 属于单一级配砂土, 因此砂颗粒间孔隙更大且更易发生错动, 从而表现为 ϕ' 更小; 而橡胶颗粒的加入通过增大颗粒间接触面积及自身高效的咬合摩擦, 有效地提升了中砂的 ϕ' 。

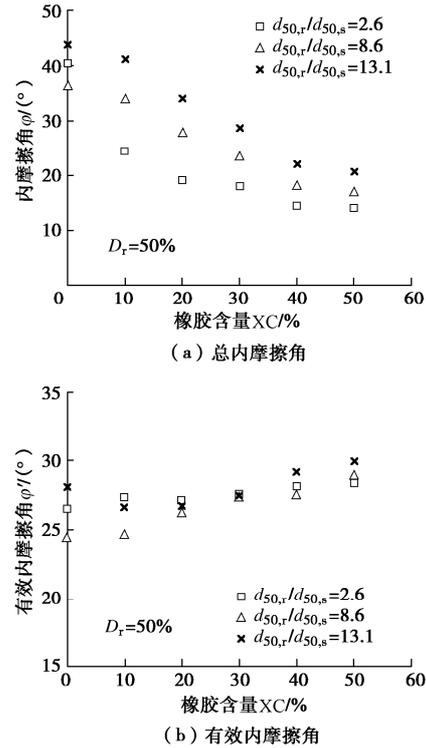


图 12 不同橡胶含量橡胶-砂混合料的内摩擦角

Fig. 12 Internal friction angles of rubber-sand mixtures with different XC

图 13 给出不同相对密度 D_r 混合料的内摩擦角。对于 $XC = 10\%$ 的粗砂混合料, ϕ 随 D_r 增加而增大, 但相同橡胶含量下细砂混合料则呈现相反趋势, 且衰减明显, 原因考虑为: 增大 D_r 则试样内部孔隙减小, 当橡胶与砂粒径相近时, 橡胶颗粒与砂颗粒间接触面积增大, 由于橡胶颗粒所具有的较高摩阻力, ϕ 会显著提高; 而当橡胶颗粒粒径远大于砂颗粒时, 由于橡胶颗粒表面摩阻力远大于砂与砂之间的摩阻力, 细砂颗粒将被牢牢“镶嵌”在橡胶颗粒表面, 随着应变的增加, 更易与接触的砂颗粒产生滚动摩擦, 故 ϕ 有所降低。当 $XC = 30\%$ 时, 由于此时试样内部骨架主要由橡胶颗粒承担, 主要由“橡胶-橡胶接触”和“橡胶-砂接触”承担力链传递, D_r 的增加对 ϕ 影响不大。由图 13 (b), 不同工况下混合料的有效内摩擦角 ϕ' 均随相对密度的增大而增大, 且随着 D_r 的增加, ϕ' 增长速度减缓。当 XC 从 50% 提升到 70% 时, ϕ' 增幅约为 20% , 随着 XC 继续提升至 90% , ϕ' 增幅仅为 $1\% \sim 2\%$ 。

3.4 关于橡胶颗粒-砂混合料黏聚力的讨论

本次研究中所有混合料的有效黏聚力 c' 均为 0 , 即各工况下橡胶-砂混合料内部真黏聚力均为 0 。对于总黏聚力 c , 由图 10 可以发现, 当 $D_r = 50\%$ 时, 混合料的强度包线几乎均过原点, 仅当橡胶含量超过 40% 时, 出现较小黏聚力 ($XC = 50\%$ 时粗砂-橡胶混合料黏聚力最大, 为 8.2 kPa)。可以认为 $D_r = 50\%$ 时, 橡

胶-砂混合料处于较为松散的状态，试样内部孔隙较大，颗粒间以点一点接触为主， c 较小可忽略。由图 11，随着 D_r 的增加，抗剪强度包线将出现明显的黏聚力 c ，列于表 3。随着 D_r 增加至 70%，90%，一方面，试样内部颗粒排列更趋紧密，另一方面，为达到试验规定的 D_r ，橡胶颗粒可能发生轴向的体积压缩而沿径向拉伸，砂颗粒嵌入橡胶颗粒表面导致砂-橡胶接触面增大，考虑到橡胶颗粒表面的高摩阻力，混合料表现出一定的假黏聚力。另外，细砂-橡胶混合料的 c 远大于粗砂混合料，约为其 4~5 倍，考虑是由于细砂混合料单位面积内砂-砂颗粒、砂-橡胶颗粒的接触点更多，咬合作用更强，在剪切过程中，需要消耗更多能量，破坏偏应力更大，故其黏聚力更大，上述试验现象还需要从微观角度进一步研究。

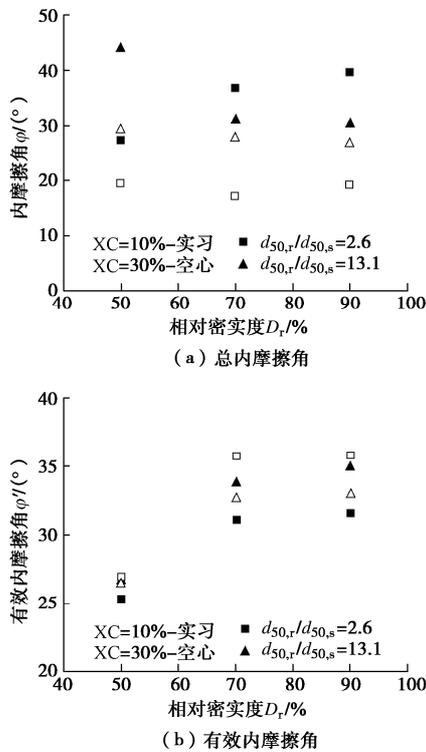


图 13 不同相对密度下混合料的内摩擦角

Fig. 13 Internal friction angle of rubber-sand mixtures with different D_r

表 3 橡胶-砂混合料抗剪强度

Table 3 Shears strength of rubber-sand mixed soil

橡胶含量 XC/%	相对密实度 D_r /%	黏聚力 c /kPa	
		粗砂混合料	细砂混合料
10	50	0	0
	70	50	250
	90	76	350
30	50	0	0
	70	36	125
	90	45	180

4 结 论

通过固结不排水剪切试验，考虑了橡胶颗粒含量 XC、有效围压 σ'_m 、颗粒粒径比 $d_{50,r}/d_{50,s}$ 和相对密实度 D_r 等因素，对废旧轮胎回收橡胶颗粒-砂混合料进行其破坏模式、应力应变关系和抗剪强度指标的分析，得到如下结论：

(1) 橡胶颗粒的加入明显改变了砂土的破坏模式。随着橡胶含量的增加，混合料试样的破坏模式将由部分软化-剪胀模式逐渐转变为完全硬化-剪缩模式。

(2) 破坏偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 随橡胶含量的增大而减小，随粒径比的增大其减小趋势逐渐趋于线性，且橡胶颗粒与砂颗粒粒径越接近，对混合料抗剪强度的削弱作用越明显。

(3) 随 XC 的增加，总内摩擦角均逐渐减小，有效内摩擦角先出现小幅下降后缓慢增大；XC 或 D_r 的增加，可以提升混合料的有效内摩擦角。

(4) 当 D_r 达到 70%后，混合料出现不可忽略的总黏聚力，而土体有效黏聚力始终为 0，表面上说明橡胶颗粒的加入会较为明显地改善土体的力学性能，但具体机理还有待进一步理论分析和验证。

(5) 总体看来，橡胶颗粒的加入降低了砂土的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 和 ϕ ，适量的橡胶含量能一定程度提升混合料的有效内摩擦角；另外，相对密实度的提高能有效提升混合料的抗剪强度。

(6) 综合考虑橡胶-砂混合料工程拌合的均匀性及地基强度等因素，根据本次试验结果，建议采用橡胶含量为 20%~30%、粒径比 $(d_{50,r}/d_{50,s})$ 相对较大的混合料作为地基回填料。

参考文献:

[1] EDIL T B, BOSSCHER P J. Engineering properties of tire chips and soil mixtures[J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17(4): 453 - 464.

[2] MASAD E, TAHA R, HO C, et al. Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material[J]. Geotechnical Testing Journal, 1996, 19(3): 297 - 304.

[3] CALABRESE A, LOSANNO D, SPIZZUOCO M, et al. Recycled Rubber Fiber Reinforced Bearings (RR-FRBs) as base isolators for residential buildings in developing countries: the demonstration building of Pasir Badak, Indonesia[J]. Engineering Structures, 2019, 192(1): 126 - 144.

[4] RAO S M, JOSHUA R E, REKAPALLI M. Batch-scale

- remediation of toluene contaminated groundwater using PRB system with tyre crumb rubber and sand mixture[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, **35**, 101198.
- [5] LEE J H, SALGADO R, BERNAL A, et al. Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill[J]. *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, 1999, **125**(2): 132 - 141.
- [6] ZORNBERG J G, CABRAL A R, VIRATJANDR C. Behaviour of tire shred-sand mixtures[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, **41**(2): 227 - 241.
- [7] RAO G V, DUTTA R K. Compressibility and strength behaviour of sand-tyre chip mixtures[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2006, **24**(3): 711 - 724.
- [8] LEE J S, DODDS J, CARLOS SANTAMARINA J. Behavior of rigid-soft particle mixtures[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, **19**(2): 179 - 184.
- [9] ANVARI S M, SHOOSH PASHA I, KUTANA EI S S. Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, **9**(5): 936 - 944.
- [10] NEAZ SHEIKH M, MASHIRI M S, VINOD J S, et al. Shear and compressibility behavior of sand-tire crumb mixtures[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, **25**(10): 1366 - 1374.
- [11] 刘方成, 吴孟桃, 王海东. 粒径比和配比对橡胶砂力学性能的影响研究[J]. *工程地质学报*, 2019, **27**(2): 376 - 389. (LIU Fang-cheng, WU Meng-tao, WANG Hai-dong. Effect of particle size ratio and mix ratio on mechanical behavior of rubber-sand mixtures[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, **27**(2): 376 - 389. (in Chinese))
- [12] 刘方成, 张永富, 任东滨. 橡胶砂应力-应变特性三轴-单剪联合试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(10): 2769 - 2779. (LIU Fang-cheng, ZHANG Yong-fu, RENG Dong-bin. Stress-strain characteristics of rubber-sand mixtures in united triaxial shear and simple shear tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*. 2016, **37**(10): 2769 - 2779. (in Chinese))
- [13] 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): 1063 - 1067. (LI Li-hua, XIAO Heng-lin, TANG hui-ming, et al. Shear performance optimizing of tire shred-sand mixture[J]. *Rock and Soil Mechanics*. 2013, **34**(4): 1063 - 1067. (in Chinese))
- [14] 邓安, 冯金荣. 砂-轮胎橡胶颗粒轻质土工填料试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2010, **13**(1): 116 - 120. (DENG An, FENG Jin-rong. Experimental study on sand-shredded tire lightweight fills[J]. *Journal of Building Materials*, 2010, **13**(1): 116 - 120. (in Chinese))
- [15] 张涛, 蔡国军, 刘松玉, 等. 橡胶-砂颗粒混合物强度特性及微观机制试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(6): 1082 - 1088. (ZHANG Tao, CAI Guo-jun, LIU Song-yu, et al. Experimental study on strength characteristics and micromechanism of rubber-sand mixtures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(6): 1082 - 1088. (in Chinese))
- [16] ISHIHARA K. Liquefaction and flow failure during earthquakes[J]. *Géotechnique*, 1993, **43**(3): 351 - 451.
- [17] 李广信, 张丙印, 于玉贞. *土力学*[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013. (LI Guang-xin, ZHANG Bing-yin, YU Yu-zhen. *Soil Mechanics*[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese))
- [18] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))