

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.100



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



橡胶砂压缩特性透明土试验研究

周恩全¹, 王梦¹, 白宇航¹, 王龙²

(1. 江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 将废旧轮胎破碎成橡胶颗粒, 与砂混合成橡胶砂, 将其作为轻型回填材料用于岩土工程领域, 是目前废旧轮胎处理最有前景的措施之一。砂颗粒和橡胶颗粒在受压过程中表现出截然不同的力学特性, 导致橡胶砂的压缩过程复杂且难以预测。进行透明橡胶砂一维压缩试验, 考虑橡胶掺量和竖向压力的影响, 利用图像处理技术获取橡胶颗粒的变形特征, 探究橡胶砂的变形机制, 并建立橡胶砂压缩特性表征模型。结果表明: 橡胶砂的总竖向应变随着橡胶掺量的增加而增加, 塑性应变在总竖向应变中占比超过 64%, 始终大于弹性应变; 橡胶颗粒有明显的压缩变形, 其竖向应变占橡胶砂总竖向应变最高达 45%; 相比纯砂, 橡胶砂压缩变形的增量主要来源于橡胶颗粒自身压缩变形以及橡胶颗粒变形导致周围砂颗粒滚动重排引起的变形; 基于纯砂及橡胶的压缩模型, 建立了橡胶砂在不同橡胶掺量和竖向压力下的压缩特性表征模型, 该模型具有较好的适用性。

关键词: 透明土; 橡胶砂; 压缩特性; 表征模型

中图分类号: TU411.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)05-0131-10

Transparent soil experimental study on compression characteristics of rubber sand

ZHOU Enquan¹, WANG Meng¹, BAI Yuhang¹, WANG Long²

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, P. R. China;

2. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Crushing waste tires into rubber particles and blending them with sand to form rubber sand as a lightweight backfilling material for application in the field of geotechnical engineering is a promising measure for dealing with waste tires. Sand and rubber particles exhibit distinct mechanical characteristics during the compression process, resulting in a complex and unpredictable compression process of rubber sand. Based on this, one-dimensional compression tests of transparent rubber sand were carried out, considering the influences of rubber content and vertical pressure. The deformation characteristics of rubber particles were obtained through image processing technology, the deformation mechanism of rubber sand was explored, and a characterization model for the compression properties of rubber sand was established. The results indicate that the total vertical strain of rubber sand increases with rubber content. The plastic strain is greater than the elastic, and the plastic strain accounts for over 64% of the total vertical strain. The rubber particles have significant

收稿日期: 2024-07-09

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20210479); 南京市交通运输科技项目(2022)

作者简介: 周恩全(1986-), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境岩土工程及土动力学研究, E-mail: enquan1986@126.com。

Received: 2024-07-09

Foundation items: Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20210479); Transportation Science and Technology Project of Nanjing (2022)

Author brief: ZHOU Enquan (1986-), PhD, associate professor, main research interests: environmental geotechnical engineering and soil dynamics, E-mail: enquan1986@126.com.

compression deformation, and their vertical strain can account for up to 45% of the total. Compared with pure sand, the increment of compression deformation of rubber sand mainly originates from the compression deformation of rubber particles themselves and the deformation caused by the rolling and rearrangement of surrounding sand particles due to the deformation of rubber particles. Based on the compression models of pure sand and rubber, a characterization model for the compression properties of rubbersand under different rubber contents and vertical pressures was established, with good applicability.

Keywords: transparent soil; rubber sand; compression characteristics; characterization model

近年来,随着经济快速发展,汽车保有量大幅增加。根据公安部门统计,截至2023年12月,中国汽车保有量达4.35亿辆。在汽车维护以及报废汽车回收拆解过程中产生的废旧橡胶轮胎也快速增长,截至2023年底,中国年产废旧轮胎约3.5亿条,重约1500万t,且每年产生的废旧轮胎量仍在以6%~8%的速度持续增长^[1]。但中国废旧轮胎再利用率较低,资源化利用废旧橡胶轮胎,将“黑色污染”变为“黑色黄金”,不仅能实现废弃物资源化利用,而且对生态环境及橡胶行业都有重要意义。橡胶具有弹性强、疏水、物理化学性质稳定等特点^[2],废旧轮胎破碎后与砂混合形成的橡胶砂具有密度小、渗透性好^[3]、阻尼比高^[4]等优点,因此,将其应用于岩土工程领域,作为轻质填料用于路基回填、管道回填、挡墙回填以及隔震垫层^[5-6]等工程中,是目前公认处理废旧轮胎最有前景的措施之一。

与砂颗粒相比,橡胶颗粒具有更强的弹性变形,因此,橡胶砂的压缩特性与纯砂存在显著差异^[7-8]。诸多学者已经证实橡胶砂的压缩变形量与橡胶掺量正相关,段伟宏等^[9]发现,若橡胶砂中橡胶颗粒含量较大,混合物中橡胶颗粒会形成主骨架,承担主要荷载,此时橡胶砂对外表现出似橡胶的性质,易被压缩,压缩量为橡胶压缩量;张永富等^[10]对干燥橡胶砂进行侧限压缩试验发现,橡胶砂的压缩量随橡胶掺量的增加而变大;Jamshidi Chenari等^[11]发现,橡胶砂压缩量随着橡胶掺量的增加而增加;周恩全等^[12]、刘路路等^[13]发现,随着橡胶掺量的增加,橡胶砂的压缩系数随之增大,压缩模量减小。显然,与纯砂相比,橡胶砂的压缩性显著增大。纯砂的压缩变形由砂颗粒挤密重排导致,而橡胶砂的压缩变形则由两部分组成:1)橡胶颗粒变形。邓安等^[14]发现,在竖向压力作用下,橡胶砂中橡胶颗粒的体积变形不可忽略;Jamshidi Chenari等^[11]认为,橡胶砂在竖向压力作用下的压缩量增量为橡胶压缩产生的变形。2)颗粒间运动形变。张永富等^[10]认为,橡胶砂的沉降量增量随着橡胶掺量的增加而增加,并且橡胶砂颗粒间的挤密重排产生的沉降大于橡胶颗粒形变产生的沉降。

基于以上研究可以发现,橡胶砂的变形量主要由橡胶颗粒变形量和颗粒间运动产生的变形量组成。但目前的研究均未直接测得橡胶颗粒的变形,无法有效分析橡胶颗粒变形量对橡胶砂变形量的贡献程度,更无法揭示橡胶砂变形的细观机理。透明土是采用透明相似材料人工配制而成的试验材料,其内部透明,在激光照射下形成散斑面,可以用于非接触观测土体内部变形^[15]。透明土试验技术已被应用于土与结构相互作用的分析、岩土受力变形和岩土体内部渗流观察等岩土工程领域的研究中^[16]。笔者引入透明土技术,研究透明橡胶砂的压缩变形特性,利用自主研发的图像识别程序监测压缩过程中橡胶颗粒的形变特征,揭示透明橡胶砂压缩变形的内在机制,进一步基于橡胶和纯砂的压缩模型建立橡胶砂在有侧限条件下的压缩特性表征模型。

1 试验概况

1.1 试验材料

1) 熔融石英砂

模拟透明砂土的固体颗粒主要有无定形硅胶和熔融石英砂两种^[17]。相比无定形硅胶,熔融石英砂的性质更加稳定且颗粒内部孔隙较少,更易制成透明度较高的试样^[18-19],因此,选用熔融石英砂作为模拟透明砂土的固体颗粒,如图1(a)所示。

通过开展颗粒比重试验、颗粒分析试验、最小(大)干密度试验以及休止角试验对熔融石英砂与

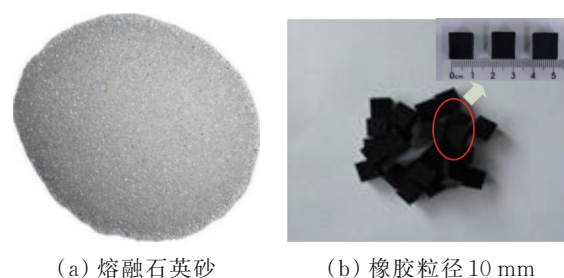


图1 试验材料

Fig. 1 Test materials

天然砂土(天然砂土选用福建平潭标准砂)的基础物理性质进行对比,结果如表 1 和图 2 所示。

表 1 熔融石英砂与天然砂土土工试验结果
Table 1 Geotechnical test results of fused quartz sand and natural sand

试样	颗粒 粒径/mm	颗粒 比重	最小干密度试验		最大干密度试验		休止角/(°)
			最小干密度/(g/cm ³)	最大孔隙比	最大干密度/(g/cm ³)	最小孔隙比	
熔融石英砂	0.1~5.0	2.19	1.17	0.87	1.39	0.57	40
天然砂土	0.1~5.0	2.64	1.46	0.79	1.74	0.51	39

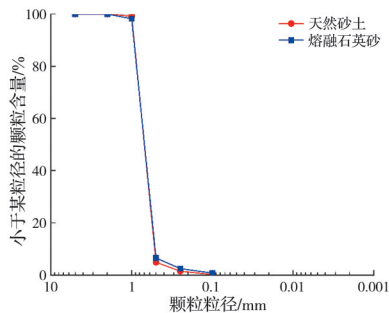


图 2 熔融石英砂与天然砂土颗粒级配曲线
Fig. 2 Particle size distribution curves of fused quartz sand and natural sand

根据土工试验结果可以发现,熔融石英砂与天然砂的颗粒比重较为接近,颗粒级配基本一致。经过物理处理得到的熔融石英砂,易造成颗粒棱角较多、圆形度低、体积充满度低、松散状态下堆积大孔隙多^[17]等问题,而天然砂经过自然冲刷后圆形度较高,从而导致熔融石英砂的最大孔隙比大于天然砂。熔融石英砂的颗粒比重略小于天然砂,加上最大孔隙比的差异,导致熔融石英砂的最小干密度小于天然砂土。熔融石英砂最小孔隙比偏大、最大干密度偏小亦可同理解释。熔融石英砂与天然砂的休止角较为接近。根据土工试验结果可以发现,熔融石英砂的基础物理性质与天然砂较为相似,可以用熔融石英砂模拟天然砂。

2)橡胶

为了更精确有效地识别试验过程中橡胶颗粒的变形,选用规则的方形橡胶颗粒,颗粒边长为 10 mm,比重为 1.21,称为 TDA(tire derived aggregates),如图 1(b)所示。TDA 由废旧汽车轮胎去除钢绞线后破碎切割而成。

3)孔隙液

配置与熔融石英砂具有相同折射率的透明土孔隙液,孔隙液须不与熔融石英砂发生反应,常温下具有稳定的物理化学性质,无(低)毒、无(低)腐蚀性,成本低,易获得。选择正十二烷与 15 号白油的混合液作为透明土孔隙液,孔隙液照片及相关参数如图 3 所示。需要注意的是,正十二烷需要避光保存,且具有轻微腐蚀性,试验中应佩戴相应护具以确保安全。



图 3 孔隙液
Fig. 3 Transparent soil pore fluid

1.2 孔隙液配比及透明土制备

1)孔隙液配比

为使正十二烷与 15 号白油混合形成的孔隙液与熔融石英砂的折射率相同,均为 1.458 5,配置正十二烷与 15 号白油质量比为 1:6、1:7、1:8、1:9、1:10 的 5 个配比,并使用 2-WAJ 型阿贝折射仪测试折射率,结果如图 4 所示。由图 4 可知,正十二烷与 15 号白油的质量比为 1:8.23 时,折射率与熔融石英砂的折射率相同,因此,选用质量配比 1:8.23 配制孔隙液。

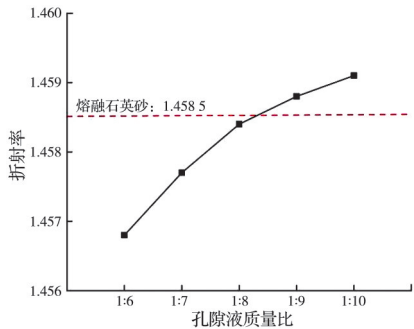


图 4 不同配比孔隙液的折射率
Fig. 4 Refractive index of pore fluids with different ratios

2)透明土的制备

熔融石英砂在生产时含有少量杂质,会影响透明土的透明度,因此,制备前需要水洗烘干。透明土制备的主要步骤为:1)按配比 1:8.23 配制孔隙液,搅拌均匀后静止无气泡;2)按指定密实度计算所需熔融石英砂干样的质量,用小勺将熔融石英砂干样均匀缓慢撒入孔隙液中,并用玻璃棒不断搅拌以减少气泡;3)将试样放入真空箱进行抽真空排气处理,抽气完成后静置以保证密实,若达不到指定密实度可使用加载板压实处理。图 5 所示为制备的透明土试样,厚 5 cm,具有优异的透明度。

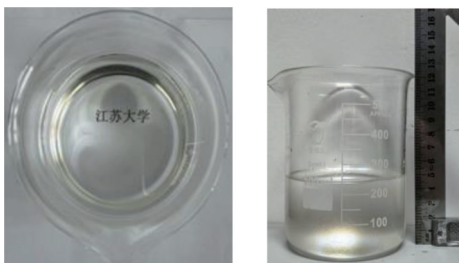


图 5 透明土(5 cm)效果图

Fig. 5 Transparent soil (5 cm) rendering

对干燥及饱和后的熔融石英砂、天然砂进行压缩试验和直剪试验,为开展透明橡胶砂压缩试验提供参考。压缩试验采用快速固结试验,直剪试验采用直接快剪试验,试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案

Table 2 Test scheme

试样	直剪试验		压缩试验
	荷载/kPa	剪切速率/ (mm/min)	
熔融石英砂(干燥、饱和)、天然砂	100、200、 300、400	0.8	50、100、200、400、 800、400、200、50

通过压缩试验得到熔融石英砂与天然砂的应变,其中总应变为施加 800 kPa 荷载时试样的累积应变,弹性应变为试样的可恢复应变,即总应变与试样卸载至 50 kPa 时的应变差值;塑性应变为不可恢复应变,即总应变与弹性应变之差,如图 6 所示。通过直剪试验得到熔融石英砂与天然砂的抗剪强度指标,如表 3 所示。

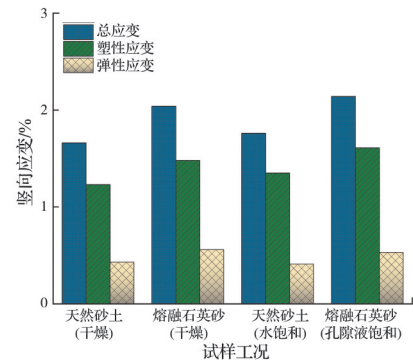


图 6 试样的竖向应变

Fig. 6 Vertical strain of the specimen

表 3 试样各工况抗剪强度指标

Table 3 Shear strength parameters of specimens under various conditions

试样工况	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
熔融石英砂(干燥)	32.7	1.7
天然砂土(干燥)	34.8	2.9
熔融石英砂(孔隙液饱和)	31.4	10.5
天然砂土(水饱和)	33.9	4.3

由图 6 可以看出,熔融石英砂与天然砂无论在干燥还是饱和状态下均以塑性应变为主,且弹性应变几乎不变。由表 3 可以发现,熔融石英砂与天然砂内摩擦角较接近。一般来说,砂性土黏聚力为 0,但由于试验方法、操作和读数的原因,尤其是孔隙液的存在以及颗粒咬合等原因,试样表现出一定的“表观黏聚力”,这符合实际情况。在饱和状态下,两种材料的黏聚力具有较大差异,这是因为使用的孔隙液为正十二烷与 15 号白油,水的黏聚力约为 0.003 m²/s,而由表 1 可知,孔隙液的黏度远大于水,因此,饱和熔融石英砂表现为具有更大黏聚力^[17]。综上,熔融石英砂在物理性质上与天然砂较相似,具有模拟天然砂的基础。

1.3 透明橡胶砂压缩试验

1) 试验设备及试验方案

对掺入 10 mm TDA 的透明橡胶砂开展一维固结压缩试验,采用 wg-1c 型单杠杆中压固结仪,用 G001-12-1 型激光发射器观测试样内部某一切面,具体参数见图 7。用 A7M2 型微单相机进行图像采集。

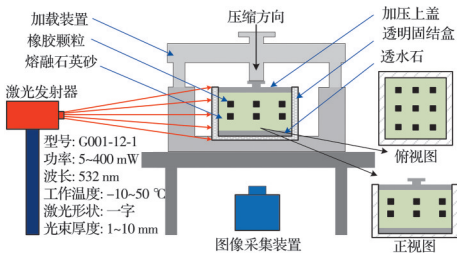


图 7 试验设备

Fig. 7 Test equipment

为便于对压缩土体变形的观测,将普通不锈钢材质压缩固结盒改为有机玻璃材质透明压缩盒。传统压缩固结盒为圆柱形,若直接改为亚克力材质的透明圆柱形会导致射入光线发生畸变,对试验结果造成干扰。高岳^[20]在进行透明土直剪试验时参考美国 ASTM 标准将传统圆形剪切盒改装为方形剪切盒,笔者定制方形透明固结盒(边长为 60 mm,高度为 40 mm),并定制相应的方形透水石,如图 7 所示。

采用 10 mm TDA 进行透明橡胶砂压缩试验。考虑的变量因素为橡胶掺量,纯砂压实度设置为 90%,采用“等体积置换”原则配制了 0%、7.3%、14.6%、21.9% 四种不同橡胶颗粒体积掺量 C_R 的试样,保证各工况颗粒总体积、孔隙体积一致。试验方案如表 4 所示。

2) 试验过程

取适量熔融石英砂,水洗并滤除水分后放入烘

表 4 压缩试验方案

Table 4 Compression test scheme

试验 编号	橡胶体积 掺量/%	颗粒体积/cm ³		
		熔融石英砂	橡胶	总体积
TM1	0	82.26	0	82.26
TM2	7.3	76.26	6	82.26
TM3	14.6	70.26	12	82.26
TM4	21.9	64.26	18	82.26

箱,调节烘箱温度至 105℃烘干,烘干后放入袋中密封保存;取适量橡胶颗粒,水洗后滤除水分,在阴凉处风干,然后放入袋中密封保存。

按照表 4 所示试验方案称取相应质量的熔融石英砂与橡胶颗粒,将试样装入透明固结盒内,手动击实以达到指定压实度。

按照指定配比配制透明孔隙液,将孔隙液从试样顶部倒入固结盒内,之后将固结盒放入真空箱内抽气饱和。将抽气饱和后的固结盒放入固结仪。

不同于普通土体试验,影响透明土试验的环境因素较多,不宜进行长时间固结试验。因此,采用快速固结试验,所加竖向荷载依次为 100、400、800、400、100 kPa,参考《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[21],每级荷载加载时间为 1 h,每级加载前均记录百分表读数。

在每次加载前打开激光发生器,并用摄像机采集图像。为了保证试验精确度,在加载 30 min 时额外进行一次图像采集与读数记录,在同一组固结试验中,摄像机须全程保持固定,不可产生位移。

2 压缩试验结果与分析

2.1 橡胶砂的压缩变形特性

图 8 所示为不同 TDA 掺量透明橡胶砂压缩回弹下的应力-应变曲线。从图 8 可以看出,无论是纯砂还是橡胶砂,其竖向应变都会随着竖向应力的增加而增加,且表现出加载前期应变增长迅速、后期应变增长放缓的趋势。通过观察不同 TDA 掺量的压缩曲线可以看出,掺入 TDA 后试样的压缩性得到显著提升,且掺入 TDA 越多试样的压缩性也越大。通常认为土颗粒刚性不可被压缩^[22],纯砂试样的压缩是颗粒之间位移重组导致孔隙变小而产生的,试验中采用的是等体积置换法,保证了试样初始孔隙不变,因此认为掺入 TDA 后试样压缩性增强主要与 TDA 的压缩变形有关。另外,从图 8 可以看出,各掺量下试样在 800~400 kPa 的回弹量均小于 400~100 kPa 的回弹量,即卸载初期回弹缓慢,后期回弹迅速。同时可以明显看出,掺入 TDA 的试样回弹应变明显大于纯砂土,这是因为 TDA 具有

较强的“恢复”能力,故展现出较大的回弹量。

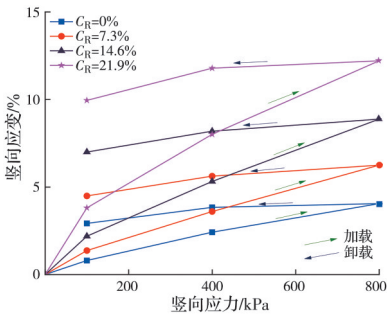


图 8 应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves

将 100 kPa 的压力定义为预压荷载,将加载压缩时的竖向累计应变定义为总应变,将卸载回弹时的竖向累计应变定义为弹性应变,二者之差则为塑性应变。图 9 所示为试样在加-卸载过程中的竖向总应变、塑性应变、弹性应变的变化规律。从图 9 可以看出,随着 TDA 掺量的增加,试样的弹性应变不断增加,原因是不断增多的 TDA 会产生更强的回弹作用。此外,还可以发现,各工况下弹性应变均小于塑性应变,即塑性应变始终占据主导,占比超过 64%。这与周恩全等^[12]的研究结论有所不同。周恩全等^[12]发现,以“等质量置换”为原则制备的橡胶砂,随着橡胶掺量的增大,弹性应变大于塑性应变。这是因为橡胶的颗粒密度小于土颗粒,采用“等体积置换”原则制备的橡胶砂试样初始孔隙大于“等质量置换”制备的橡胶砂试样,导致压缩过程中颗粒更易滚动重组,得到的塑性变形更大,占据主导地位,这与 Neaz Sheikh 等^[23]、Zhang 等^[24-25]的研究结果一致。

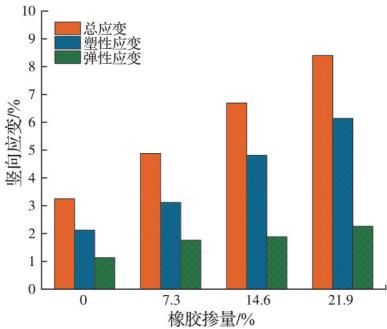


图 9 橡胶砂的竖向应变

Fig. 9 Vertical strain of the specimens

2.2 橡胶颗粒的变形特性

使用相机对橡胶砂的加-卸载过程进行分段采集,并对采集后的照片进行图像识别处理,以分析加-卸载过程中 TDA 的变形特性。由于试验中相机与试样的位置均固定且拍摄时相机焦距也保持不变,因此每张图像的尺寸相同。将各阶段采集的图

片使用自主研发的 PRAS^[26] 配合 ImageJ 软件进行综合分析处理,识别各个工况下 TDA 的尺寸变化,图 10 为加载结束后图像识别的流程。

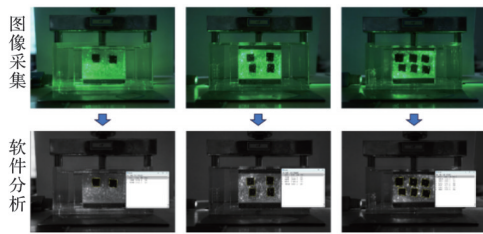


图 10 图像分析流程

Fig. 10 Image analysis process

通过分析可以得到 TDA 在加-卸载过程中竖向及横向的变形量,但无法观测到纵向变形量。因为试验采用的 TDA 为规则正方体颗粒,横向变形与纵向变形的状态一致,因此可以计算得到 TDA 的体积应变,如图 11 所示。由图 11 可知,在 3 种不同的 TDA 掺量下,TDA 的体积应变均随竖向压力的增加而增加。在竖向压力相同时,TDA 的掺量越大,其体积应变也越大,且在卸载时体积应变未恢复到加载时的体积应变。这是因为经过上一级的压力加载后砂土颗粒之间因挤密发生重新排列,即使卸载后,TDA 的体积应变也无法完全恢复。

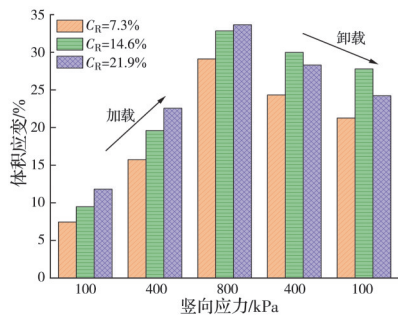


图 11 各工况下 TDA 的体积应变

Fig. 11 Volume strain of TDA under various working conditions

基于图像分析得到的 TDA 体积变形可以计算得到其直接导致的橡胶砂体积应变 $\epsilon_{v,r}$,考虑到该试验为侧限,可将体积应变 $\epsilon_{v,r}$ 转换为竖向应变 ϵ_r 。图 12 所示为橡胶砂试样的总竖向应变 ϵ_{sr} ,以及由于 TDA 体积变形直接转换的试样竖向应变 ϵ_r 。从图 12 中可以看出,随着 TDA 掺量的增加,竖向应变 ϵ_r 占总竖向应变 ϵ_{sr} 的比例也在增加,尤其是当 TDA 掺量达到 21.9% 时, ϵ_r 占 ϵ_{sr} 的比例达到 45%。即此时总竖向应变的 45% 由 TDA 贡献,因此,橡胶砂在压缩过程中橡胶颗粒自身的形变量对土体总竖向应变的影响不可忽略。

为了进一步分析橡胶砂总竖向应变 ϵ_{sr} 的组成,

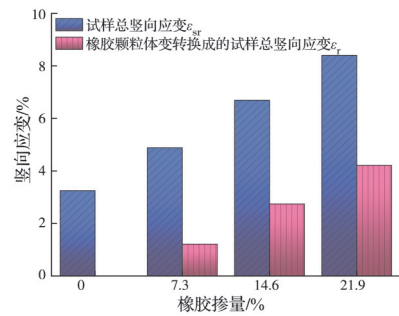


图 12 试样总竖向应变与 TDA 体变转化成的竖向应变之间的关系

Fig. 12 Relationship between the total vertical strain and the vertical strain converted from the volume strain of TDA

图 13 给出了不同竖向压力下掺入 TDA 后的橡胶砂相比纯砂的总竖向应变增量 $\Delta\epsilon_{sr}$ 与橡胶颗粒体变转换成的试样竖向应变 ϵ_r 的关系。实际上,总竖向应变增量 $\Delta\epsilon_{sr}$ 即为该橡胶掺量下橡胶砂的竖向应变与纯砂的竖向应变的差值。从图 13 中可以看到,在 3 种 TDA 掺量下,试样在加载区与卸载区的变化规律具有较高的一致性,且同一 TDA 掺量下 $\Delta\epsilon_{sr}$ 与 ϵ_r 的差值随着 TDA 掺量的增大而逐渐增大,这表明掺入 TDA 后竖向总应变增量 $\Delta\epsilon_{sr}$ 除了包含 ϵ_r 外,还包括其他因素,且不可忽略。

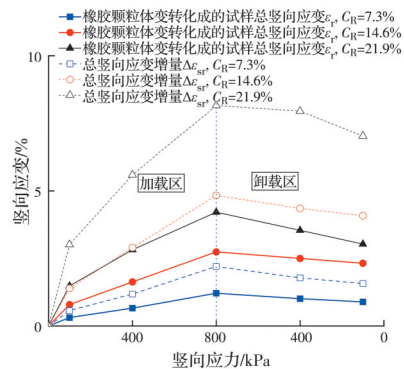


图 13 总竖向应变增量与 TDA 体变转化成的竖向应变对比

Fig. 13 Comparison of the total vertical strain increment and the vertical strain converted from the volume strain of TDA

3 橡胶砂压缩特性细观机理

橡胶颗粒体变转换成的试样竖向应变 ϵ_r 占试样总竖向应变 ϵ_{sr} 的比例随 TDA 掺量的增加而增加;橡胶砂相比纯砂的总竖向应变增量 $\Delta\epsilon_{sr}$ 远大于橡胶颗粒体变转换成的试样竖向应变 ϵ_r ,表明掺入 TDA 后橡胶砂的总竖向应变增量不能简单地用 TDA 的形变来量化。

图 14 为纯砂以及橡胶砂压缩前后示意图。结合图 14 可以将橡胶砂的一维压缩固结特性作如下

解释:

1) 纯砂的竖向应变 ϵ_{s1} 为砂颗粒位移重排所致。

2) 橡胶砂的总竖向应变 ϵ_{sr} 由两部分组成, 分别是 TDA 的压缩形变 ϵ_r 及砂颗粒位移重排导致的形变 ϵ_s ; 而砂颗粒的位移重排形变 ϵ_s 由两部分组成, 分别为砂颗粒被压缩固有的位移重排导致的形变 ϵ_{s1} 以及 TDA 被压缩引发其周围砂颗粒发生滑动位移、重新排列导致的形变 ϵ_{s2} 。

3) 采用等体积替换原则制备橡胶砂试样时各工况的初始孔隙比一致, 因此, 各工况试样中砂颗粒被压缩固有的位移重排导致的形变 ϵ_{s1} 基本一致, 等于纯砂的竖向应变。

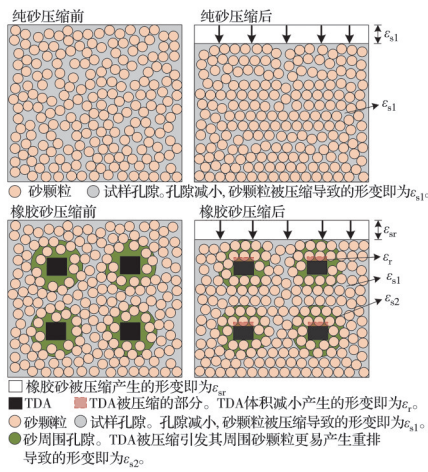


图 14 压缩前后试样的微观机制

Fig. 14 Specimen mesoscopic mechanism before and after compression

4 橡胶砂压缩特性表征模型

4.1 纯砂压缩模型

纯砂试样的压缩模型依据赵颜辉等^[27]提出的无黏性土压缩条件下的应力-应变关系

$$\epsilon_s = t(e_0 - e_1)p^n \quad (1)$$

式中: ϵ_s 为纯砂试样的竖向应变; e_0 为初始孔隙比, 本文为 0.75; e_1 为参考孔隙比; t, n 为拟合参数。

将压缩试验中 TDA 掺量为 0% 的纯砂试样压缩数据代入式(1), 得到拟合参数 $t=1, e_1=0.73, n=0.79$ 。

4.2 纯橡胶压缩模型

由图 11 可知, 随着竖向压力的增大, TDA 的体积应变也增大, 即 TDA 体积应变与竖向压力 p 呈正相关关系, 为了定量描述 TDA 的体积应变, 可用式(2)表征。

$$\epsilon_{v,r} = u \frac{f(p)}{f(E)} \quad (2)$$

式中: $\epsilon_{v,r}$ 为 TDA 的体积应变; u 为拟合参数; $f(p)$ 为关于竖向压力 p 的函数, 根据 Lee 等^[28]、Lee 等^[29]的研究可知, 可用指数函数进行表示; $f(E)$ 为关于橡胶压缩模量 E 的函数。

$$f(p) = \left(\frac{p}{p_a} \right)^b \quad (3)$$

$$f(E) = \frac{E}{p_a} \quad (4)$$

式中: b 为拟合参数; E 为橡胶压缩模量, kPa; p_a 为标准大气压, 100 kPa。

由图 11 可见, 不同掺量的 TDA 在相同竖向压力下的体积应变不同, 这是因为试验中并不是对纯 TDA 进行压缩, 而是将 TDA 与砂进行混合。TDA 周围充满着刚性的砂颗粒, 在压力作用下, 砂土颗粒的存在对 TDA 的压缩变形起到抑制作用, TDA 越高, 砂颗粒对 TDA 压缩变形的抑制能力就越弱。表现为橡胶含量越高, TDA 的体积应变就越大。

因此, 在橡胶砂中, 计算 TDA 的变形需引入考虑 TDA 掺量的拟合参数, 将 TDA 的应变式(2)改写为

$$\epsilon_{v,r} = u \frac{(p/p_a)^b}{(E/p_a)} C_R^k \quad (5)$$

式中: k 为拟合参数; C_R 为橡胶掺量, %。

将图 11 中的数据代入式(5), 使用非线性最小二乘法进行多元回归拟合, 得到拟合参数 $u=339.03, b=0.58, k=0.29$ 。

4.3 橡胶砂压缩模型

试验采用等体积置换原则掺入 TDA, 因此, 所有工况下试样的初始孔隙比均一致。橡胶砂的总应变由 TDA 的压缩形变、砂颗粒被压缩固有的位移重排导致的形变, 以及 TDA 被压缩引发其周围砂颗粒发生滑动位移、重新排列导致的形变 3 部分组成, 实际上, 后两部分均为砂颗粒的位移重排所致。因此, 将纯砂压缩模型引入增幅系数进行修正来考虑后两部分的形变, 此时橡胶砂压缩模型公式可表示为

$$\epsilon_{v,sr} = m\epsilon_{v,r} + \lambda\epsilon_{v,s} \quad (6)$$

式中: $\epsilon_{v,sr}$ 为橡胶砂体积应变; $\epsilon_{v,s}$ 为纯砂土体积应变; λ 为增幅系数; $\epsilon_{v,r}$ 为 TDA 的体积应变, 但需要乘以比例系数 m 转换为橡胶砂试样的体积应变, 当 $C_R=7.3\%$ 时, 比例系数 m 为 0.042; 当 $C_R=14.6\%$ 时, 比例系数 m 为 0.083; 当 $C_R=21.9\%$ 时, 比例系数 m 为 0.125。

因试验为有侧限压缩试验, 试样横向面积为定

值,则此时橡胶砂和纯砂土的体积应变等于竖向应变,即

$$\begin{cases} \epsilon_{v, sr} = \epsilon_{sr} \\ \epsilon_{v, s} = \epsilon_s \end{cases} \quad (7)$$

式中: ϵ_{sr} 为橡胶砂总竖向应变。

式(6)可改写为

$$\epsilon_{sr} = \epsilon_r + \lambda \epsilon_s \quad (8)$$

将式(1)、式(5)代入式(8)可得

$$\epsilon_{sr} = u \left(\frac{p}{p_a} \right)^b C_R^k + \lambda t (e_0 - e_1) p^n \quad (9)$$

将各拟合参数与压缩数据代入式(9),经过拟合分析发现,增幅系数为与 TDA 掺量有关的幂函数形式,即

$$\lambda = 0.43 C_R^{0.53} \quad (10)$$

将 TDA 与砂土的压缩模型拟合参数代入式(9)后进行简化,最终得到橡胶砂压缩模型公式为

$$\epsilon_{sr} = 0.30 C_R^{0.29} p^{0.58} + 0.43 C_R^{0.53} (e_0 - 0.73) p^{0.79} \quad (11)$$

图 15 为通过式(11)计算得到的橡胶砂压缩应变拟合值与试验值的误差图。由图 15 可见,表征模型公式拟合值的相对误差均在 10% 以内,且均匀分布在对角 45% 线两侧。

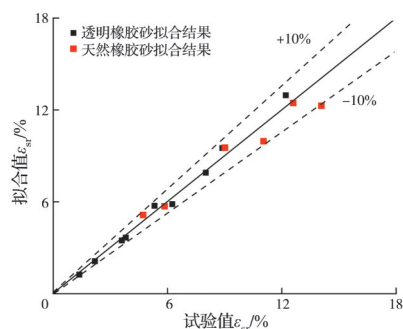


图 15 橡胶砂压缩应变拟合误差图

Fig. 15 Fitting error diagram of compression strain for rubber sand

利用天然砂配置 7.3%、14.6% 橡胶掺量的橡胶砂,并按照透明橡胶砂的试验方案进行一维固结压缩试验。天然橡胶砂的应变试验值及利用式(11)计算得到的拟合值见图 15。由图 15 可见,试验值与拟合值吻合度较高。因此,模型可以较好地表征橡胶砂压缩应变与橡胶掺量之间的关系,该方法具有一定的准确性与合理性。

5 结论

引入透明土技术研究了橡胶砂的一维压缩特性,得到的主要结论如下:

1) 橡胶砂的竖向应变随竖向应力的增加而增加,橡胶砂的总竖向应变随橡胶掺量的增加而增大,加入橡胶可以增大试样的弹性应变,但不可恢复的塑性应变始终占据主导,占比超过 64%。

2) 利用图像识别技术监测到了橡胶颗粒的压缩变形。橡胶颗粒形变直接导致的竖向应变占橡胶砂总竖向应变的比例可达 45%,故其在橡胶砂压缩过程中不可忽视。相比纯砂,橡胶砂的总竖向应变增量远大于橡胶颗粒形变直接导致的竖向应变,表明橡胶颗粒的形变除直接导致试样竖向应变外,还会造成周围砂颗粒的滚动、重排,间接导致试样的竖向应变。基于纯砂及橡胶的压缩模型,结合橡胶砂的压缩变形机制,建立了橡胶砂压缩特性表征模型,拟合值与试验值的误差范围在 10% 以内。

尽管对不同橡胶掺量进行了压缩特性研究,但针对更高橡胶掺量的压缩特性仍有待进一步研究,以建立更具普适意义的橡胶砂压缩特性表征模型。

参考文献

- [1] 2022—2026 年中国轮胎翻新行业预测分析[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2022(5): 18-19.
Forecast and analysis of tire retread industry in China between 2022 to 2026[J]. China Tire Resources Recycling, 2022(5): 18-19. (in Chinese)
- [2] Zhou E, Cui L, Zuo X, et al. Dynamic behaviour of pipe protected by rubber-soil mixtures[J]. Geosynthetics International, 2023, 30(3): 285-295.
- [3] Manohar D R, Anbazhagan P. Shear strength characteristics of geosynthetic reinforced rubber-sand mixtures[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(4): 910-920.
- [4] Zhou E Q, Bai Y H, Zuo X. Evaluation of dynamic behaviour of rubber particle-clay mixtures using the skeleton void ratio approach[J]. Construction and Building Materials, 2024, 426: 136127.
- [5] 周恩全, 崔磊, 姚缘, 等. 非饱和橡胶粉土土水特征曲线及颗粒接触状态[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(6): 104-112.
Zhou E Q, Cui L, Yao Y, et al. Soil-water characteristic curve and particle contact state of unsaturated rubber silt[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(6): 104-112. (in Chinese)
- [6] 尹志勇, 许鸣珠, 景立平, 等. 橡胶-砂混合土动力学研究进展[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(5): 12-20.
Yin Z Y, Xu M Z, Jing L P, et al. Recent research progress and the prospect of rubber-sand mixed soil dynamics[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(5): 12-20. (in Chinese)
- [7] 刘方成, 吴孟桃, 王海东. 废轮胎颗粒砂混合物双轴压

- 缩力学特性细观机理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 1055-1065.
- Liu F C, Wu M T, Wang H D. Microscopic study on mechanical behavior of granulated waste tires and sand mixture under biaxial compression conditions[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(4): 1055-1065. (in Chinese)
- [8] Benessalah I, Arab A, Sadek M, et al. Laboratory study on the compressibility of sand-rubber mixtures under one dimensional consolidation loading conditions [J]. Granular Matter, 2018, 21(1): 7.
- [9] 段伟宏, 张涛, 蔡国军. 橡胶颗粒-砂混合物压缩特性试验研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 2015年全国工程地质学术年会, 2015-08-10, 长春. 北京: 科学出版社, 2015: 210-214.
- Duan W H, Zhang T, Cai G J. Experimental study on compressibility characteristic of rubber-sands mixtures [C]//China Geological Society Engineering Geology Professional Committee. The 2015 National Symposium on Engineering Geology, 2015-08-10, Changchun. Beijing: Science Press, 2015: 210-214. (in Chinese)
- [10] 张永富, 刘方成, 岳洪涛, 等. 橡胶颗粒-砂混合物侧限压缩试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(3): 1-9.
- Zhang Y F, Liu F C, Yue H T, et al. Study on laterally confined compression test of rubber-sand mixtures[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(3): 1-9. (in Chinese)
- [11] Jamshidi Chenari R, Fatahi B, Akhavan Maroufi Mali, et al. An experimental and numerical investigation into the compressibility and settlement of sand mixed with TDA[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35(5): 2401-2420.
- [12] 周恩全, 王琼, 陆建飞. 干燥及饱和橡胶砂压缩和剪切特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6): 104-110.
- Zhou E Q, Wang Q, Lu J F. Compressibility and shear properties of dry/saturated rubber sand[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 104-110. (in Chinese)
- [13] 刘路路, 蔡国军, 刘晓燕. 橡胶-砂轻质填料压缩特性及颗粒破碎研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(5): 882-888.
- Liu L L, Cai G J, Liu X Y. Investigation on compression and particle breakage characteristics of rubber-sand lightweight filler[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(5): 882-888. (in Chinese)
- [14] 邓安, 冯金荣. 变形量定量分析-掺入轮胎橡胶颗粒对砂土剪切性状的影响[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(5): 483-487.
- Deng A, Feng J R. Effect of scrap tire bead addition on shear behavior of sand[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 10(5): 483-487. (in Chinese)
- [15] 刘汉龙, 钟文涵, 仇文岗, 等. 基于透明土石混合体的水力侵蚀特性研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(9): 1868-1877.
- Liu H L, Zhong W H, Zhang W G, et al. Hydraulic erosion characteristics based on transparent soil-rock mixture [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(9): 1868-1877. (in Chinese)
- [16] 胡文强, 周航, 刘汉龙. XCC桩群桩沉桩挤土效应透明土模型试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(6): 107-115.
- Hu W Q, Zhou H, Liu H L. Experimental study of XCC pile group penetration effect based on transparent soil model testing technique[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(6): 107-115. (in Chinese)
- [17] 王兴, 吴建佳, 李丛蕾, 等. 人工合成透明砂与标准砂强度对比试验[J]. 土工基础, 2022, 36(6): 956-962.
- Wang X, Wu J J, Li C L, et al. Comparative strength tests on the transparent synthetic sand and the standard quartz sand[J]. Soil Engineering and Foundation, 2022, 36(6): 956-962. (in Chinese)
- [18] Liu J Y, Iskander M G. Modelling capacity of transparent soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(4): 451-460.
- [19] 周东, 刘汉龙, 仇文岗, 等. 被动桩侧土体位移场的透明土模型试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2686-2694.
- Zhou D, Liu H L, Zhang W G, et al. Transparent soil model test on the displacement field of soil around single passive pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2686-2694. (in Chinese)
- [20] 高岳. 化学注浆扩散机理的透明土试验研究[D]. 江苏徐州: 中国矿业大学, 2015.
- Gao Y. Experimental investigations on the mechanisms of chemical grouting in transparent soil[D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2015. (in Chinese)
- [21] JTG 3430—2020 公路土工试验规程[S].
- JTG 3430—2020 Test methods of soils for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [22] Zhou E Q, Yao Y, Cui L, et al. Dynamic properties of silty sand mixed with rubber particles for medium strain [J]. International Journal of Civil Engineering, 2023, 21 (11): 1867-1878.
- [23] 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.

- [24] Zhang T, Cai G J, Liu S Y, et al. Laboratory observation of engineering properties and deformation mechanisms of cemented rubber-sand mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2016, 120: 514-523.
- [25] Zhang T, Cai G J, Duan W H. Strength and microstructure characteristics of the recycled rubber tire-sand mixtures as lightweight backfill[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25(4): 3872-3883.
- [26] 周恩全, 白宇航, 崔磊, 等. 颗粒图像识别与分析系统 (PRAS)V1.0 [Z]. 2022.
- Zhou E Q, Bai Y H, Cui L, et al. Particle image recognition and analysis system (PRAS) V1.0[Z]. 2022. (in Chinese)
- [27] 赵颜辉, 朱俊高, 张宗亮, 等. 无黏性土压缩曲线的一种数学模式[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3033-3037, 3042.
- Zhao Y H, Zhu J G, Zhang Z L, et al. A compression model for cohesionless soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3033-3037, 3042. (in Chinese)
- [28] 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.
- [29] Lee C, Truong Q H, Lee W, et al. Characteristics of rubber-sand particle mixtures according to size ratio[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22 (4): 323-331.

(编辑 胡英奎)