

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.03.001

橡胶颗粒-砂混合物侧限压缩试验研究

张永富, 刘方成, 岳洪涛, 甘霖

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 对7种不同橡胶质量分数的干燥橡胶砂进行了侧限压缩试验, 考虑了12级竖向应力对其压缩特性的影响。试验结果表明: 1) 橡胶砂的回弹量、弹塑性应变以及总应变均随橡胶质量分数的增加而变大; 竖向应力相同时, 橡胶砂的累积沉降量、孔隙比、压缩系数均随橡胶质量分数的增加而增加; 橡胶质量分数相同时, 橡胶砂的累积沉降量、密度、压缩模量均随竖向应力的增大而增大, 且塑性应变大于弹性应变; 这些变化特性, 橡胶砂比纯砂颗粒明显, 纯橡胶颗粒比橡胶砂显著。2) 纯砂颗粒和橡胶质量分数为10%的橡胶砂, 其 $e-\log(p)$ 曲线具有线性回归特性, 两者的线性拟合斜率较小且相近; 橡胶质量分数为20%~50%的橡胶砂以及纯橡胶颗粒试样, 其 $e-\log(p)$ 曲线近似线性特性, 其线性拟合斜率随橡胶质量分数的增加而变大, 且相同橡胶质量分数试样的 $e-\log(p)$ 曲线的分段斜率随竖向应力对数值的增大而变大。3) 橡胶砂和纯橡胶颗粒试样的压缩系数-竖向应力段曲线, 表现出非线性特性, 这种非线性随橡胶砂中橡胶质量分数的增大越来越显著。4) 相同竖向应力段的压缩模量随橡胶质量分数的增加呈指数衰减, 且竖向应力段越大, 衰减越明显。

关键词: 橡胶砂; 侧限压缩试验; 压缩特性

中图分类号: TU411.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)03-0001-09

Study on Laterally Confined Compression Test of Rubber-Sand Mixtures

Zhang Yongfu, Liu Fangcheng, Yue Hongtao, Gan Lin

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Conducted a series of laterally confined compression tests on rubber-sand mixtures of 7 different rubber mass fractions, in which considering the impact of 12 levels vertical pressure on the compression properties of the mixtures. Results of the tests indicate that: 1) The springback, the elastic-plastic strain and the total strain of rubber-sand mixtures increase with the increment of rubber mass fractions. When vertical pressure are the same, the cumulative settlement, the void ratio and the compression coefficients of rubber-sand mixtures increase with the increment of rubber mass fractions. When rubber mass fractions are the same, the cumulative settlement, the density and the compression modulus of rubber-sand mixtures increase with the vertical pressure increment, and its plastic strains are larger than its elastic strains. These change characteristics of rubber-sand mixtures are more obvious than that of pure sand particles and are less distinct than that of pure rubber particles. 2) The $e-\log(p)$ curves of the pure sand particles and the rubber-sand mixtures of 10% rubber mass fraction have the characteristics of linear regression, and their linear fitting slopes are small and close. The $e-\log(p)$ curves of the pure rubber particles and the rubber-sand mixtures of 20% to 50% rubber mass fraction approximate linear characteristics, and their linear fitting slopes increase with the increment of rubber mass fractions. The subsection slope of $e-\log(p)$ curves increase with the vertical stress logarithm value increasing when rubber mass fractions are the same. 3) The

收稿日期: 2015-02-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108177), 湖南省自然科学基金资助项目(10JJ4040), 湖南工业大学自然科学基金资助项目(2013HZX09, 2012HZX20)

作者简介: 张永富(1989-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为隔震与振动, E-mail: studyzyf@163.com

compression coefficient-vertical stress section curves of the pure rubber particles and rubber-sand mixtures exhibit nonlinear characteristics, it is more and more obvious with the rubber mass fraction increasing. 4) Compression modulus of the same vertical stress sections decays with rubber mass fractions increasing, and the greater the vertical stress section, the more obvious the attenuation.

Keywords : rubber-sand mixtures; laterally confined compression tests; compression properties

1 研究背景

近年来,随着汽车数量的增加,废旧橡胶轮胎产生量越来越多,其能否得到充分循环利用,是影响社会经济和生态环境发展的重要问题之一。由废旧橡胶轮胎颗粒与砂混合组成的填料(简称橡胶砂),由于具有质轻、弹性变形能力强、渗透能力强、成本低廉等特点,可被应用于公路路基、边坡、挡土墙、垃圾填埋场、地下排水系统等的回填中,是土木工程中一种具有广泛应用前景的新型环保轻质复合材料^[1];此外,废旧轮胎碎片也是一种很好的动载缓冲材料^[2]。目前,国外关于轮胎碎片及其与砂土混合物压缩特性的研究较多,但国内并不多见。K. Adalier等^[3]以轮胎颗粒、砂及其混合物为试验对象,进行了大量试验,发现可将橡胶砂应用于道路工程路基回填。S. Yang等^[4]对粒径为2~10 mm的橡胶碎片进行了压缩、直剪、三轴剪切试验,研究了颗粒尺寸对轮胎碎片剪切强度的影响。T. B. Edil等^[5]以轮胎碎片、砂粒、土粒以及轮胎碎片与砂土混合物为试验材料,对比研究了其压实、压缩、强度以及渗透系数等工程特性,发现采用施加竖向压力的方法比使用振动的方法更易获得密实的橡胶砂土,且施加竖向压力的初始段橡胶砂表现为塑性压缩,当其孔隙被压缩至很小时,其力学特性表现为线弹性。S. Yoon等^[6]将轮胎碎片与砂回填于路堤内,且让车辆在该路表自由通行,同时对位于路堤内3个不同部位的9块沉降板的沉降量进行监测并记录,记录观测时间为1 a,200 d后路堤的沉降量已经很小,1 a后的最终总沉降量约为12 mm,且路表没有不均匀沉降出现。H. Sellaf等^[7]将橡胶颗粒分别与2种软弱土按不同的质量比进行混合,对其进行了直剪、加卸载压缩试验,发现橡胶软土的黏聚力、液限、塑性指数、最优含水率、压缩指数、再压缩指数以及最大干密度等岩土工程特性,随胶粒含量的增加而降低,而内摩擦角随胶粒含量的增加先变大后变小;还发现混合物的承载比在含水率为3%时比含水率为5%时大。S. Naval等^[8]对比研究了河砂和条状

橡胶纤维混合物(长宽比为22.5)的承载比和沉降系数,通过一系列承载力试验,发现河砂中加入少量条状橡胶纤维,能改善其承载力性能,橡胶质量分数为0.75%且加筋土层厚度为基础模型宽度的1.5倍时,承载比出现最大值,为1.64。S. N. M. Tafreshi等^[9]将干燥的平均粒径为1.65 mm的砂粒和长宽比为3~5的轮胎碎片进行混合,将其填入模型铁箱中的自然土层内,进行承载力试验,发现加筋土层的加入可使模型箱中的自然土层承载力得到提高,且得出了加筋最优条件。李朝晖等^[10-11]对轮胎和黄土颗粒及其5种不同配比混合物进行了竖向加卸载压缩试验,发现胶粒含量越多,混合土的压缩系数和可恢复变形越大,压缩模量越小;其压缩特性主要取决于粒间接触和颗粒刚度,并建议将其应用于对变形要求不高的岩土工程中,如涵洞顶部回填、动载缓冲等;还发现其橡胶质量分数小于20%时,压实特性与黄土相似;其橡胶质量分数大于40%,压实特性与无粘性土类似。邓安等^[12]得出了橡胶砂土在单向压缩时,其弹塑性变形均随砂颗粒含量的减少而增加。

橡胶颗粒及其与砂土的混合物,相比于常规土工材料,具有较强的压缩变形能力,在岩土工程中是一种具有较高潜在应用价值的廉价、质轻、环保、净污^[13]、缓冲、耗能和隔震的复合散体材料;此外,还能改善软弱土和疏松砂土的强度特性。基于应用的需要,有必要对橡胶砂的压缩特性进行大量的基础性试验研究,为其在土木工程中的应用提供参考。本文对7种不同橡胶质量分数的橡胶砂,在12级竖向压力下进行侧限压缩试验,分析橡胶砂的累积沉降量、回弹量、竖向弹塑性应变和总应变、密度、孔隙比、压缩系数、压缩模量的变化特性。

2 试验

2.1 试样材料

试验所用橡胶颗粒是由废旧轮胎经机械破碎得到的黑色颗粒状碎屑,试验砂为河砂,2种材料的颗粒特征如表1所示,级配曲线如图1所示^[14]。

表1 砂和橡胶颗粒物理特性

Table 1 The physical properties of sand and rubber

试验材料	比重 G_s	粒径范围 / mm	平均粒径 D_{50}/mm	不均匀 系数 C_u
橡胶颗粒	1.21	0.70~2.30	1.50	1.43
砂	2.59	0.60~4.50	0.29	1.31

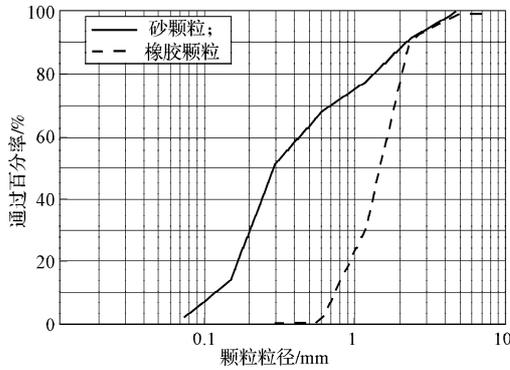


图1 橡胶和砂的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curves of rubber particles and sand

2.2 试验方法

试验工况和制样控制参数分别如表2和表3所示。试样制样控制密度由式(1)计算得到。不同配比下混合物的最大干密度和最小干密度参照GB/T50123—1999《土工试验方法标准》^[15]提供的方法进行测定。配样总质量由式(2)计算,橡胶砂中橡胶和砂颗粒的质量分别由式(3)和式(4)计算,相对密度由式(5)计算。

$$\rho = 0.9\rho_{dmax}, \quad (1)$$

$$m = \rho V, \quad (2)$$

$$m_r = mw, \quad (3)$$

$$m_s = m(1-w), \quad (4)$$

$$D_r = \frac{\rho_{dmax}(\rho - \rho_{dmin})}{\rho(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})}, \quad (5)$$

式(1)~(5)中: ρ 为制样控制密度;

w 为混合物中橡胶颗粒的质量分数,是橡胶颗粒质量与混合物总质量之比;

m 为纯橡胶颗粒、纯砂颗粒或橡胶砂试样的质量;

ρ_{dmax}, ρ_{dmin} 分别为不同 w 下试样的最大和最小干密度;

m_r, m_s 分别为混合物中橡胶和砂颗粒的质量;

V 为试样体积;

D_r 为试样相对密度。

表2 试验工况

Table 2 Test conditions

试验参数	参数取值
竖向应力 p/kPa	12.5, 25, 50, 100, 200, 300, 400, 800, 400, 200, 100, 0
橡胶质量分数 $w/\%$	0, 10, 20, 30, 40, 50, 100

表3 制样控制参数

Table 3 The control parameters of the samples

$w/\%$	$\rho_{dmin}/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\rho_{dmax}/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\rho /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$D_r/\%$	m_s/g	m_r/g
0	1.44	1.98	1.78	70.37	106.9	0
10	1.27	1.75	1.58	70.60	85.1	9.5
20	1.08	1.54	1.39	73.91	66.5	16.6
30	0.94	1.39	1.25	76.79	52.5	22.5
40	0.85	1.22	1.10	74.47	39.5	26.4
50	0.77	1.14	1.03	76.88	30.8	30.8
100	0.50	0.97	0.87	88.18	0	52.4

将得出的试验数据按以下方法进行处理:试样的初始孔隙比由式(6)计算;第 i 级荷载下不同 w 试样的孔隙比由式(7)计算;第 i 级荷载至第 $i+1$ 级荷载作用范围下不同 w 试样的压缩系数、压缩模量分别由式(8)和式(9)计算。

$$e_0 = \frac{(1+\omega_0)G_s\rho_w}{\rho_0} - 1, \quad (6)$$

$$e_i = e_0 - \frac{(1+e_0)}{h_0} \Delta h_i, \quad (7)$$

$$a_{i-(i+1)} = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i}, \quad (8)$$

$$E_{s,i-(i+1)} = \frac{1+e_i}{a_{i-(i+1)}}, \quad (9)$$

式(6)~(9)中: $e_0, \omega_0, G_s, \rho_0, h_0$ 分别为不同 w 试样的初始孔隙比、初始含水率、比重、实际初始密度、实际初始高度(修正后的高度),由于采用的是干燥试样,因此取 $\omega_0=0$;

ρ_w 为水的密度;

e_i, e_{i+1} 分别为第 i 级和第 $i+1$ 级荷载下不同 w 试样的孔隙比;

Δh_i 为第 i 级荷载作用下试样的总压缩量;

$a_{i-(i+1)}$ 和 $E_{s,i-(i+1)}$ 分别为第 i 级荷载至第 $i+1$ 级荷载作用范围下不同试样的压缩系数和压缩模量。

2.3 试验步骤

在固结仪内放置大护环,大护环内底部铺上透水石,在其上放置一滤纸片,然后依次放置开口面积为 30 cm^2 的下护环、环刀和导环;将称量混合好的橡胶砂分4层装入内径为 61.8 mm ,高度为 20.0 mm 的环刀内;使用击样器(将击锤沿导杆抬高至一定高度后放手使其沿导杆自由下落)将橡胶砂击、压至与环刀上表面齐平,停止击、压,此时会看到试样表面有回弹,并且 w 越大回弹越明显;最后,在试样表面依次铺一滤纸片,放置透水石和传压板,装样完毕。将装有试样的固结仪准确地放在加荷横梁的中心,调整杠杆平衡,施加 1 kPa 预压荷载,调整百分表至“0”读数,待预压稳定后,用游标卡尺测

量并记录其回弹值,见表4;然后依次采用12.5, 25, 50, 100, 200, 300, 400, 800 kPa对试样进行加压,最后依次采用400, 200, 100, 0 kPa进行卸压;待试样沉降稳定(即每隔24 h)后读取并记录该级荷载下的百分表读数,记录数据后施加下一级荷载。

橡胶颗粒相比于传统的土工材料具有压缩性高,回弹能力强等特点。装样时,停止击、压试样后,不同配比的橡胶砂出现回弹,且随 w 的增加回弹越明显。回弹稳定后,试样的初始高度除纯砂颗粒的高度与环刀高度相等外,橡胶砂的初始高度均大于环刀的高度。因此,需根据回弹值对橡胶砂在各级荷载下的初始高度、初始密度和初始相对密度进行修正,得出其实际初始控制参数,基于修正值得出的橡胶砂在各级荷载下的压缩特性才会更真实。 w 为10%和20%时橡胶砂的装样示意图如图2所示;不同 w 试样的实际初始参数和侧限压缩试验分别如表4和图3所示。



图2 装样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of samples preparation

表4 不同 w 试样的实际初始参数

Table 4 The actual initial parameters of samples with different rubber mass fractions

$w/\%$	实际初始参数			
	回弹量/cm	高度/cm	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	相对密度/%
0	0	2.00	1.782	70.37
10	0.01	2.01	1.567	66.88
20	0.03	2.03	1.366	70.87
30	0.07	2.07	1.209	68.93
40	0.08	2.08	1.056	65.32
50	0.17	2.17	0.946	58.38
100	0.95	2.95	0.592	31.48

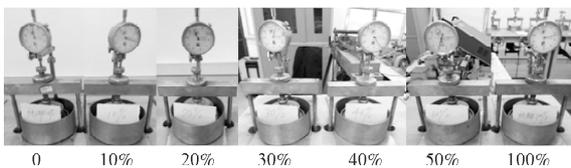


图3 不同 w 试样的侧限压缩试验

Fig. 3 The laterally confined compression tests of samples with different rubber mass fractions

3 试验结果与分析

通过对7种不同 w 且干燥的试样进行侧限压缩

试验,得到了试样在各级荷载作用下的累积沉降量、荷载-沉降回弹曲线,竖向应变、孔隙比、压缩模量分别与橡胶质量分数的曲线,实际密度、实际相对密度、孔隙比分别与竖向应力的曲线,压缩系数、压缩模量分别与竖向应力段的曲线,并对试样的这些压缩特性进行分析。

3.1 沉降回弹特性

各级荷载下,不同 w 试样的累积沉降量如表5所示;卸荷至0 kPa时的回弹量,加荷至800 kPa时的总应变以及加卸载完毕时的弹塑性应变如表6所示,其中 $p=800$ kPa时对应的累积沉降量为其总沉降量;不同 w 试样荷载-沉降回弹曲线如图4所示;试样的竖向应变与橡胶质量分数曲线如图5所示。本文将试样的总应变视为试样弹性应变和塑性应变的总和。

表5 各级荷载下不同 w 试样的累积沉降量

Table 5 The cumulative settlements of samples with different rubber mass fractions under different loads mm

竖向应力 p/kPa	橡胶质量分数 $w/\%$						
	0	10	20	30	40	50	100
12.5	0.001	0.003	0.008	0.018	0.023	0.055	0.061
25	0.020	0.051	0.092	0.250	0.372	0.530	0.918
50	0.052	0.156	0.308	0.595	0.774	1.103	1.989
100	0.098	0.317	0.548	0.921	1.306	1.857	3.399
200	0.166	0.497	0.895	1.384	1.941	2.710	5.053
300	0.212	0.620	1.135	1.695	2.365	3.269	6.064
400	0.249	0.716	1.288	1.929	2.697	3.675	6.767
800	0.358	0.965	1.672	2.495	3.512	4.689	8.323
400	0.289	0.835	1.454	2.128	3.067	4.125	7.102
200	0.254	0.789	1.218	1.887	2.689	3.727	6.119
100	0.232	0.712	1.112	1.691	2.481	3.431	5.623
0	0.221	0.655	1.026	1.549	2.282	3.132	5.081

表6 各级荷载下不同 w 试样的回弹量及竖向应变

Table 6 The rebound values and vertical strains of samples with different rubber mass fractions under different loads

$w/\%$	试验参数			
	回弹量/mm	总应变/%	弹性应变/%	塑性应变/%
0	0.137	1.79	0.69	1.10
10	0.310	4.80	1.54	3.26
20	0.646	8.24	3.18	5.05
30	0.946	12.05	4.57	7.48
40	1.230	16.89	5.91	10.97
50	1.557	21.61	7.18	14.43
100	3.242	28.21	10.99	17.22

从表5、表6及图4可知: p 相同时,试样的累积沉降量随 w 的增加而增加,这是由于橡胶颗粒具有很强的压缩性,因此试样的压缩量随 w 的增大而增大; w 相同时,加载时的累积沉降量随 p 的增大而增大;当卸荷至0 kPa时,回弹量随 w 的增加而变大,橡胶

颗粒的回弹量约为砂颗粒回弹量的 23.7 倍,表明橡胶颗粒的弹性模量比砂颗粒的弹性模量小很多,橡胶颗粒压缩变形能力比砂颗粒强。从表 6 和图 5 可知:试样的弹、塑性应变以及总应变均随 w 的增加而变大,表明颗粒间的初始孔隙随 w 的增加而增加,这与文献[10]得出的橡胶土中的胶粒掺量越多,可恢复变形越大的结论类似,也与文献[12]得出的橡胶砂中的胶粒掺量越大,其弹塑性变形越大的结论一致;此外,试样的塑性应变大于其弹性应变,表明颗粒间的挤密重排产生的沉降大于颗粒形变产生的沉降。因此,将橡胶砂作为土木工程中的轻质填料或建筑物基础下的隔震层,需考虑橡胶砂的沉降特性对上部结构稳定性的影响。

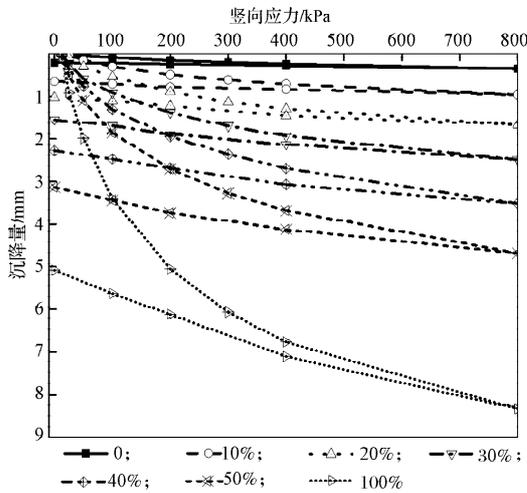


图 4 不同 w 试样荷载沉降回弹曲线

Fig. 4 The vertical load and settlement-rebound curves of samples with different rubber mass fractions

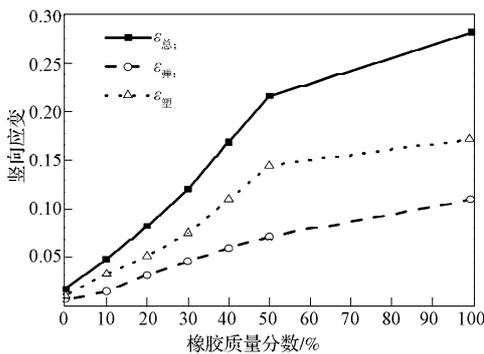


图 5 试样的竖向应变与橡胶质量分数的关系曲线

Fig. 5 The relationship curves for the vertical strain and rubber mass fraction of samples

3.2 密度特性

橡胶砂是一种复合材料,胶粒的存在使其相比于常规土工材料,压缩性增强,体积压缩量变大,对橡胶砂和纯胶粒试样进行侧限压缩时,不能忽视这一因素对其压缩特性的影响。由于其体积随 p 的增

大而变小,且体积的减少量随 w 的增大而变大,因此,试样在各级荷载下的密度和相对密度是变化的,且与制样控制密度有一定的差距。为能较好地说明这一特性,计算了各级荷载下不同 w 试样的实际密度和实际相对密度。各级荷载下不同试样的实际密度和实际相对密度分别如表 7 和表 8 所示;不同试样的实际密度与竖向应力的关系曲线,实际相对密度与竖向应力的关系曲线分别如图 6 和图 7 所示。

表 7 各级荷载下不同 w 试样的实际密度

Table 7 The actual density of samples with different rubber mass fractions under different loads g/cm^3

竖向应力 p/kPa	橡胶质量分数 $w/\%$						
	0	10	20	30	40	50	100
0	1.782	1.567	1.366	1.209	1.056	0.946	0.592
12.5	1.782	1.567	1.366	1.210	1.057	0.948	0.593
25	1.784	1.571	1.372	1.223	1.075	0.969	0.611
50	1.787	1.579	1.387	1.244	1.097	0.996	0.635
100	1.791	1.592	1.403	1.265	1.127	1.034	0.669
200	1.797	1.607	1.428	1.295	1.164	1.081	0.714
300	1.801	1.617	1.446	1.316	1.191	1.113	0.745
400	1.804	1.625	1.458	1.333	1.213	1.138	0.768
800	1.814	1.646	1.488	1.374	1.270	1.206	0.824

表 8 各级荷载下不同 w 试样的实际相对密度

Table 8 The actual relative density of samples with different rubber mass fractions under different loads $\%$

竖向应力 p/kPa	橡胶质量分数 $w/\%$						
	0	10	20	30	40	50	100
0	70.37	66.30	70.00	68.67	64.26	57.22	32.03
12.5	70.39	66.34	70.10	68.88	64.56	57.86	32.39
25	70.67	67.11	71.20	71.57	69.01	63.35	37.46
50	71.14	68.80	74.02	75.57	74.14	69.97	43.79
100	71.82	71.38	77.15	79.35	80.93	78.69	52.12
200	72.83	74.27	81.67	84.73	88.04	88.55	61.90
300	73.51	76.25	84.80	88.34	92.45	93.02	67.87
400	74.06	77.79	86.80	91.05	93.69	94.71	72.03
800	75.67	81.78	91.81	95.62	96.09	97.43	81.22

从表 7 和图 6 可知:相同 w 试样的实际密度随 p 的增加而变大,砂颗粒的实际密度与其制样密度接近。当 $p < 100$ kPa 时,橡胶砂试样的实际密度小于制样密度;当 $p = 100$ kPa 时,其实际密度略大于制样密度;当 $p > 100$ kPa 时,其实际密度均大于制样密度。纯橡胶颗粒的实际密度小于其制样密度,且其实际密度随 p 的增加越来越接近制样密度,当 $p = 800$ kPa 时,其实际密度略小于制样密度。这些现象表明胶粒具有弹性变形能力强的特点,特别是橡胶质量分数较高的橡胶砂对竖向压力的变化较为敏感。

从表 8 和图 7 可知:不同 w 试样的实际相对密度随 p 的增加而变大,与其对应的实际密度具有类似的特性。因而在对橡胶砂进行相关力学试验时,需

考虑橡胶砂在各级荷载下密度改变对其力学特性的影响。

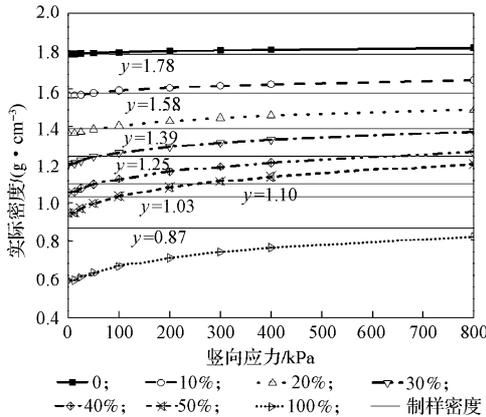


图6 不同w试样的实际密度与竖向应力的关系曲线

Fig. 6 The actual density-vertical stress curves of samples with different rubber mass fractions

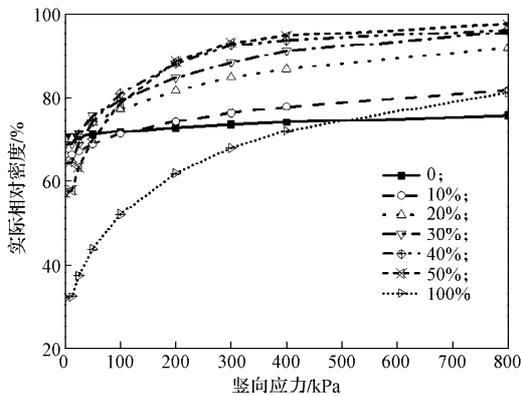


图7 不同w试样的实际相对密度与竖向应力的关系曲线

Fig. 7 The actual relative density-vertical stress curves of samples with different rubber mass fractions

3.3 孔隙比特性

各级p下不同w试样的孔隙比e如表9所示,不同w试样的e-p曲线、e-log(p)曲线、e-log(p)曲线回归方程分别如图8、图9和表10所示,各级p下的e-w曲线如图10所示。

表9 各级p下不同w试样的孔隙比

Table 9 The void ratio of samples with different rubber mass fractions under different p

竖向力 p/kPa	橡胶质量分数 w/%						
	0	10	20	30	40	50	100
0	0.4551	0.5618	0.6891	0.7983	0.9226	1.0022	1.0508
12.5	0.4550	0.5616	0.6884	0.7968	0.9205	0.9949	1.0466
25	0.4536	0.5578	0.6814	0.7766	0.8882	0.9512	0.9870
50	0.4513	0.5497	0.6634	0.7467	0.8511	0.8983	0.9126
100	0.4480	0.5372	0.6435	0.7183	0.8019	0.8288	0.8145
200	0.4430	0.5230	0.6146	0.6781	0.7432	0.7502	0.6996
300	0.4397	0.5136	0.5946	0.6511	0.7040	0.6987	0.6293
400	0.4370	0.5062	0.5819	0.6308	0.6733	0.6613	0.5804
800	0.4291	0.4868	0.5499	0.5816	0.5980	0.5678	0.4722

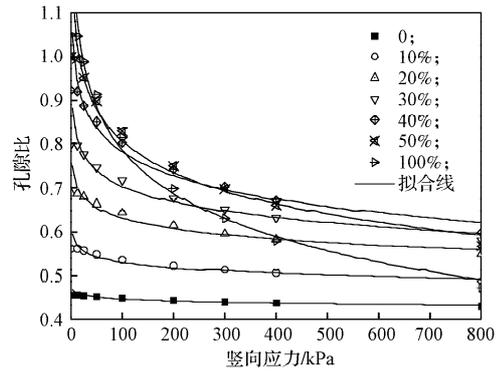


图8 不同w试样的e-p曲线

Fig. 8 The e-p curves of samples with different rubber mass fractions

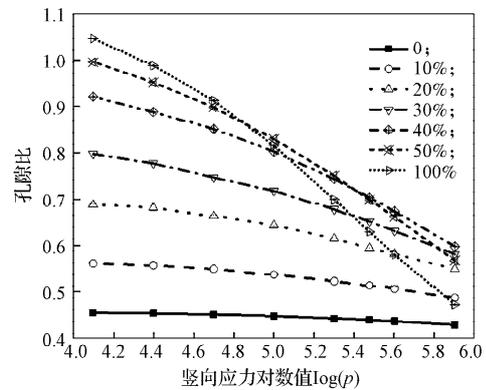


图9 不同w试样的e-log(p)曲线

Fig. 9 The e-log(p) curves of samples with different rubber mass fractions

表10 不同w试样的e-log(p)曲线回归方程

Table 10 The regression equations of e-log(p) curves of samples with different rubber mass fractions

橡胶质量 分数 w/%	回归方程	R ²
0	e=0.474-0.014*log(p)	0.93
10	e=0.615-0.042*log(p)	0.96
20	e=0.789-0.079*log(p)	0.96
30	e=0.942-0.119*log(p)	0.98
40	e=1.138-0.178*log(p)	0.97
50	e=1.283-0.238*log(p)	0.98
100	e=1.440-0.327*log(p)	0.99

从表9和图8可知:相同w试样的e随p的增大而变小,纯砂颗粒的e随p的增大变化平缓,且在各级p下的e均小于橡胶砂的e;纯橡胶颗粒试样的e随p的增大变化陡快;孔隙比是指试样中孔隙体积与颗粒体积之比,一般认为e>1.0的土是疏松高压缩性土^[16]。表9中纯橡胶颗粒在p为0和12.5 kPa时的e分别是1.0508和1.0466,w=50%的橡胶砂在p=0 kPa时的e为1.0022。因此,本文的纯橡胶颗粒和w=50%的橡胶砂可以认为是疏松的高压缩性复合材料。

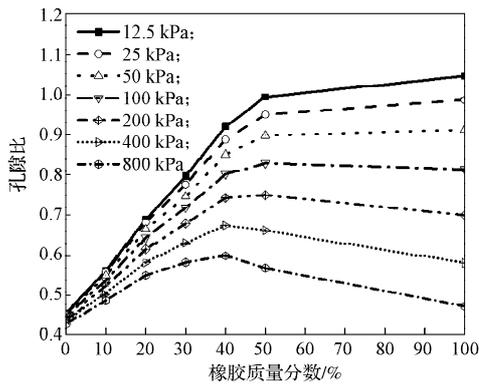


图 10 各级 p 下试样的 $e-w$ 曲线
Fig. 10 The $e-w$ curves of samples under different p

从图 9 和表 10 可知: 纯砂颗粒和 w 为 10% 试样的 $e-\log(p)$ 曲线具有线性回归特性, 斜率较小且接近; w 为 20% 至 50% 以及纯橡胶颗粒试样 $e-\log(p)$ 曲线近似线性特性, 其线性拟合斜率随 w 的增加而变大, 且相同 w 试样其 $e-\log(p)$ 曲线的分段斜率随 $\log(p)$ 的增大而变大, 纯橡胶颗粒 $e-\log(p)$ 曲线的拟合斜率约为纯砂颗粒的 23.4 倍, 约为 10% 橡胶砂的 7.8 倍。这都充分表明, 向河砂中加入一定颗粒级配的橡胶颗粒, 其压缩变形能力迅速增强。

从表 9 和图 10 可知: 在 p 为 12.5~100 kPa 时, 试样的 e 随橡胶 w 的变大而变大。在 p 为 100~800 kPa 时, w 为 0~40% 试样的 e 随 w 的变大而变大, 但 w 为 40%~100% 试样的 e 随 w 的变大而变小, 这是由于, 初始孔隙比较大的高 w 橡胶砂相比于低 w 橡胶砂在较大 p 下其孔隙压缩量大, 因此其孔隙比迅速减小, 而低 w 橡胶砂的孔隙比随 p 的增加降低缓慢。

3.4 压缩系数特性

不同 p 段不同 w 试样的压缩系数 a_v 如表 11 所示, 不同 w 试样的 a_v-p 曲线和不同 p 段的 a_v-w 曲线分别如图 11 和图 12 所示。

表 11 不同 p 段不同 w 试样的压缩系数
Table 11 The compression coefficients of samples with different rubber mass fractions under different p sections MPa^{-1}

竖向应力 段/kPa	橡胶质量分数 $w/\%$						
	0	10	20	30	40	50	100
12.5~25	0.111	0.298	0.559	1.612	2.581	3.502	4.766
25~50	0.093	0.326	0.719	1.199	1.486	2.112	2.978
50~100	0.067	0.250	0.399	0.566	0.983	1.390	1.960
100~200	0.049	0.140	0.289	0.402	0.587	0.786	1.150
200~300	0.033	0.096	0.200	0.270	0.392	0.515	0.703
300~400	0.027	0.075	0.127	0.203	0.307	0.374	0.489
400~800	0.020	0.048	0.080	0.123	0.188	0.234	0.270

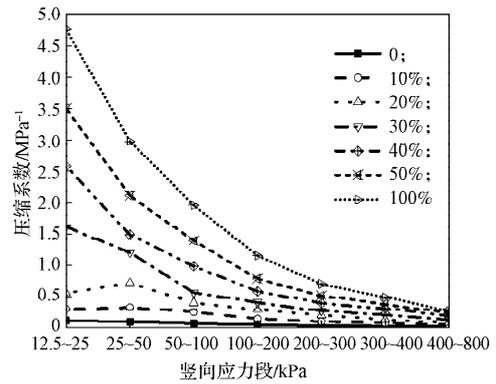


图 11 不同 w 试样的 a_v-p 段曲线
Fig. 11 The a_v-p curves of samples with different rubber mass fractions

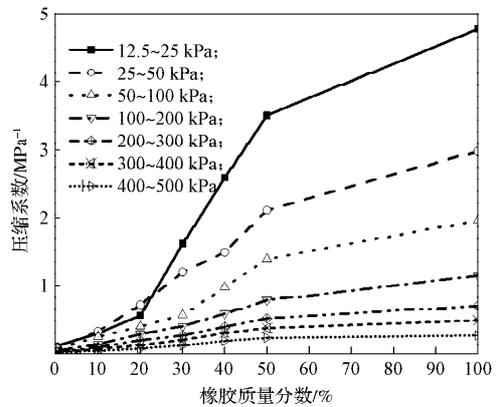


图 12 不同 p 段试样的 a_v-w 曲线
Fig. 12 The a_v-w curves of samples under different p sections

从表 11 和图 11 可知: 相同 w 试样的 a_v 随 p 段的变大而变小, 纯砂颗粒的 a_v 随 p 段的增大变化平缓, 且各 p 段的 a_v 均小于橡胶砂各 p 段的 a_v ; 不同 w 的橡胶砂和纯橡胶颗粒试样的 a_v-p 段曲线表现出非线性特性, 这种非线性随 w 的增大变得更加显著。

从表 11 和图 12 可知: p 段相同时, 不同 w 试样的 a_v 随 w 的增加而变大, w 相同时, 相邻 p 段 a_v 的降低量随 p 段的增大而变小。这表明混合物试样中胶粒含量越多越易被压缩, p 段越大越难被压缩。若将橡胶砂用于实际工程的回填, 虽然工程的质量得到了减轻, 但为了克服混合物竖向压缩不稳定造成的不均匀沉降而铺设的上覆土层, 其厚度需随橡胶砂中胶粒含量的增加而增加, 这样便能避免橡胶砂特别是其橡胶含量较高时的竖向不稳定性带来的工程误差。此外, 参照 GB50007—2011《建筑地基基础设计规范》中的 4.2.6 条^[17], 同时结合表 11 中的相关数值可知: 本文中用到的纯砂颗粒可认为是低压缩性材料; w 为 10%~30% 的橡胶砂可认为是中压缩性材料; w 为 40%~50% 的橡胶砂和纯橡胶颗粒可认为

是高压缩性材料。

3.5 压缩模量特性

不同 p 段不同 w 试样的压缩模量 E_s 如表 12 所示, 不同 w 试样的 E_s-p 段曲线如图 13 所示, 不同 p 段的 E_s-w 曲线和其指数拟合回归方程分别如图 14 和表 13 所示。

表 12 不同 p 段不同 w 试样的压缩模量

Table 12 The compression modulus of samples with different rubber mass fractions under different p sections MPa

竖向应力段/kPa	橡胶质量分数 $w/\%$						
	0	10	20	30	40	50	100
12.5~25	13.16	5.23	3.02	1.11	0.74	0.57	0.43
25~50	15.61	4.77	2.34	1.48	1.27	0.92	0.67
50~100	21.68	6.19	4.17	3.08	1.88	1.37	0.98
100~200	29.27	10.99	5.69	4.27	3.07	2.32	1.58
200~300	43.12	15.94	8.09	6.21	4.45	3.40	2.48
300~400	42.10	20.29	12.53	8.12	5.55	4.54	3.33
400~800	79.76	31.14	19.80	13.27	8.88	7.11	5.84

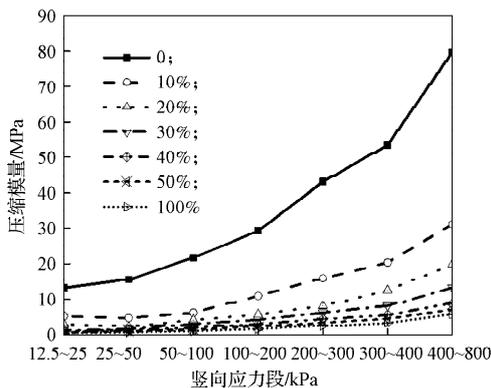


图 13 不同 w 试样的 E_s-p 段曲线

Fig. 13 The E_s-p curves of samples with different rubber mass fractions

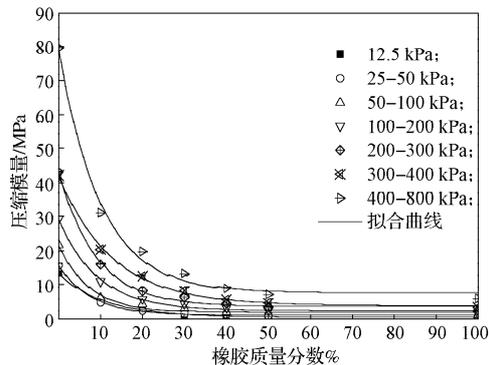


图 14 不同 p 段试样的 E_s-w 曲线

Fig. 14 The E_s-w curves of samples under different p sections

从表 12 和图 13 可知: 相同 w 试样的 E_s 随 p 段的增大而变大, 纯砂颗粒 E_s-p 段曲线变化陡快, 纯橡胶颗粒的 E_s-p 变化平缓, 橡胶砂的 E_s-p 段曲线变化

快慢介于两者之间, 且混合物中胶粒含量越多, 其 E_s 随 p 段的增大而变大的现象越不明显; 此外, 各 p 段下纯砂颗粒的压缩模量均比橡胶砂和纯橡胶颗粒的压缩模量大。

表 13 不同 p 段试样的 E_s-w 指数拟合回归方程

Table 13 The E_s-w exponential fitting regression equations of samples under different p sections

竖向应力段/kPa	指数回归方程	R^2
12.5~25	$E_s=12.65*\exp(-w/11.0)+0.45$	0.995
25~50	$E_s=14.57*\exp(-w/7.66)+1.01$	0.997
50~100	$E_s=19.76*\exp(-w/7.35)+1.83$	0.984
100~200	$E_s=26.78*\exp(-w/9.24)+2.39$	0.995
200~300	$E_s=39.42*\exp(-w/9.00)+3.57$	0.996
300~400	$E_s=38.02*\exp(-w/12.86)+3.82$	0.997
400~800	$E_s=71.66*\exp(-w/9.97)+7.55$	0.992

从表 13 和图 14 可知: p 段相同时, 橡胶砂的 E_s 随 w 的增加而降低; 各 p 段的 E_s-w 曲线能较好地与指数拟合曲线吻合。这表明相同 p 段的 E_s 随 w 的增加呈指数衰减, 且 p 段越大, 衰减越明显。以上现象表明, 在砂颗粒中加入橡胶颗粒, 其压缩模量显著降低, 且其压缩模量的降低量随加入胶粒的增加而变大; 因而, 在获得廉价环保的动载缓冲、轻质材料时, 还需考虑橡胶砂土低压缩模量造成结构物的不稳定性。

4 结论

1) 橡胶砂的回弹量、弹塑性应变以及总应变随橡胶质量分数的增加而变大; 竖向压力相同时, 橡胶砂的累积沉降量、初始孔隙比、压缩系数均随橡胶质量分数的增加而增加; 橡胶质量分数相同时, 橡胶砂的累积沉降量、密度、压缩模量均随竖向应力的增大而增大, 且塑性应变大于弹性应变。这些特性, 橡胶砂比纯砂颗粒明显, 纯橡胶颗粒比橡胶砂显著。

2) 纯砂颗粒和橡胶质量分数为 10% 的橡胶砂, 其 $e-\log(p)$ 曲线具有线性回归特性, 两者的线性回归曲线斜率很小且很接近; 橡胶质量分数为 20%~50% 的橡胶砂以及纯橡胶颗粒试样, 其 $e-\log(p)$ 曲线近似线性特性, 其线性拟合斜率随橡胶质量分数的增加而变大, 且相同橡胶质量分数试样的 $e-\log(p)$ 曲线的分段斜率随竖向应力对数值的增大而变大。

3) 橡胶砂和纯橡胶颗粒试样的压缩系数 - 竖向应力段曲线表现出非线性特性, 这种非线性随橡胶砂中橡胶质量分数的增大越来越显著。

4) 相同竖向应力段的压缩模量随橡胶质量分数

的增加呈指数衰减,且竖向应力段越大,衰减越明显。

5)本文中用到的纯砂颗粒可认为是低压缩性材料;橡胶质量分数为10%,20%,30%的橡胶砂可认为是中压缩性材料;橡胶胶质量分数为40%,50%的橡胶砂和纯橡胶颗粒可认为是高压缩性材料。

参考文献:

- [1] Anbazhagan P, Mamatha M, Soumyashree P, et al. Laboratory Characterization of Tyre Crumbs Soil Mixture for Developing Low Cost Damping Materials[J]. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2011, 4(6): 63-66.
- [2] Hazarika H, Kohama E, Sugano T. Underwater Shake Table Tests on Waterfront Structures Protected with Tire Chips Cushion[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(12): 1706-1719.
- [3] Adalier K, Pamuk A. On the Important Mechanical Properties of Rubber-Sand[J]. Advanced Materials Research, 2013, 685: 8-14.
- [4] Yang S, Lohnes R A, Kjartanson B H. Mechanical Properties of Shredded Tires[J]. Geotechnical Testing Journal, 2002, 25(1): 44-52.
- [5] Edil T B, Bosscher P J. Engineering Properties of Tire Chips and Soil Mixtures[J]. Geotechnical Testing, 1994, 17(4): 453-464.
- [6] Yoon S, Prezzi M, Siddiki N Z, et al. Construction of a Test Embankment Using a Sand-Tire Shred Mixture as Fill Material[J]. Waste Management, 2006, 26(9): 1033-1044.
- [7] Sellaf H, Trouzine H, Hamhami M, et al. Geotechnical Properties of Rubber Tires and Sediments Mixtures[J]. Engineering, Technology and Applied Science Research, 2014, 4(2): 618-624.
- [8] Naval S, Kumar A. Utilisation of Waste Tire Fibers in Granular Soil[C]//Proceedings of Indian Geotechnical Conference. Roorkee: [s. n.], 2013: 22-24.
- [9] Tafreshi S N M, Norouzi A H. Bearing Capacity of a Square Model Footing on Sand Reinforced with Shredded Tire - an Experimental Investigation[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 547-556.
- [10] 李朝晖,张虎元.废轮胎颗粒与黄土混合土压缩特性研究[J].工程勘察,2012(3): 12-17.
- Li Zhaohui, Zhang Huyuan. The Compressibility of Granulated Rubber and Loess Mixtures[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2012(3): 12-17.
- [11] 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 Zhaohui, Zhang Huyuan. Compaction Properties of Granulated Rubber and Loess Mixtures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3715-3720.
- [12] 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 Jinrong. Experimental Study on Sand-Shredded Tire Lightweight Fills[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1): 116-120.
- [13] Edil T B, Park J K, Kim J Y. Effectiveness of Scrap Tire Chips as Sorptive Drainage Material[J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, 130(7): 824-831.
- [14] 张永富,刘方成,任东滨,等.橡胶颗粒-砂混合物三轴CD剪切试验研究[J].湖南工业大学学报,2015,29(1): 17-23.
- Zhang Yongfu, Liu Fangcheng, Ren Dongbin, et al. Study on Shear Characteristics of Rubber-Sand Mixtures by Triaxial CD Test[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(1): 17-23.
- [15] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,1999: 57-59.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123—1999 Standard for Soil Test Method [S]. Beijing: China Planning Press, 1999: 57-59.
- [16] 赵明华,余晓.土力学与基础工程[M].武汉:武汉理工大学出版社,2009: 17.
- Zhao Minghua, Yu Xiao. Soil Mechanics and Foundation Engineering[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2009: 17.
- [17] 中华人民共和国建设部. GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012: 17.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50007—2011 Code for Design of Building Foundation[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012: 17.

(责任编辑:邓光辉)