

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.05.005

配比和相对密实度对橡胶砂静力参数的影响

刘方成, 郑玉凤, 刘娜, 张云飞

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为研究配比和相对密实度对橡胶砂静力参数的影响, 对橡胶砂混合物的不同配比、不同相对密实度进行了三轴剪切试验, 结果表明: 在相同的橡胶含量下, 试样的初始切线模量、偏应力与相对密实度呈正相关, 偏应力峰值随相对密实度的增加近似线性增加; 在相同的相对密实度下, 橡胶砂的偏应力-轴向应变曲线随橡胶含量的增加表现出先上升后下降的变化规律, 偏应力峰值随橡胶含量的增加近似线性减小, 且偏应力达到峰值时对应的轴向应变变大; 橡胶砂泊松比随相对密实度的增大而增大, 但随着橡胶含量的增加, 相对密实度对橡胶砂泊松比的影响变小。

关键词: 橡胶砂; 相对密实度; 泊松比; 静力参数

中图分类号: TU441

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)05-0024-08

Influence of Proportioning and Relative Density on Static Parameters of Rubber-Sand

LIU Fangcheng, ZHENG Yufeng, LIU Na, ZHANG Yunfei

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

Abstract: A research has been conducted on the influence of proportioning and relative density on static parameters of rubber-sand, followed by a triaxial shear test for different proportions and relative density of rubber-sand mixture. The results show that: with the rubber content a constant, the initial tangent modulus and deviatoric stress of the sample are positively related to the relative density, the peak value of deviatoric stress increases approximately linearly with the increase of relative density; with the relative density a constant, the deviatoric stress-axial strain curves of the rubber sand undergoes an increasing then a decreasing trend, and the peak value of the deviatoric stress decreases approximately linearly with the increase of rubber content, while the corresponding strain becomes larger when the partial stress reaches the peak value; the Poisson ratio of rubber sand increases positively with the increase of the relative density, while the influence of relative density on the Poisson ratio of rubber sand decreases with the increase of the rubber ratio.

Keywords: rubber-sand; relative density; Poisson's ratio; static parameters

1 研究背景

随着我国人民生活水平的不断提高, 汽车的使用量日益增加, 产生的废旧轮胎逐渐增多。报废轮胎通

常被储存在垃圾填埋场或者被遗弃在自然界中, 对社会环境造成了重大威胁, 回收这些不可生物降解的废弃轮胎是土木工程专业研究的焦点。废旧轮胎具有质轻、高弹性、高压缩性等特点, 可以将其磨成不同尺

收稿日期: 2017-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108177)

作者简介: 刘方成(1978-), 男, 湖南常宁人, 湖南工业大学副教授, 主要从事结构隔震与振动方面的教学与研究,

E-mail: fcliu@hut.edu.cn

寸的橡胶颗粒, 然后与砂混合组成轻质耗能填料(简称橡胶砂)应用于土木工程。橡胶砂混合物与其他材料相比有较低的生产成本, 这种处置方法也是减少废旧轮胎的好方式, 不仅有良好的经济效益, 还有较好的环保效益。目前, 国内外学者对橡胶砂的物理力学特性已进行了大量研究, 但是对橡胶砂泊松比的研究相对较少。

泊松比是材料的重要力学参数之一, 尤其是对于土类等散体材料而言, 其取值非常复杂, 影响因素众多, 值得深入研究^[1]。T. Kokusho^[2]对 Toyoura 砂的泊松比进行了试验研究, 分析得知 Toyoura 砂的泊松比为 0.2~0.3, 并得到其泊松比在小应变阶段与应变幅值成正相关。刘娜等^[3]基于比值法、割线法、公式法计算了橡胶砂混合物的泊松比, 并利用广义虎克定律推导出三轴试验条件下更适合反映橡胶砂泊松比变化规律的泊松比公式。王凤池等^[4]探讨了橡胶粉掺量、水泥掺量对橡胶水泥土弹性模量、变形量及泊松比的影响, 得到了泊松比与橡胶粉掺量成正比关系、与水泥掺量成反比关系, 且橡胶粉掺量对泊松比的影响没有水泥掺量对泊松比的影响明显的结论。陈晨^[5]为了研究砾砂的力学性状与行为进行了三轴固结排水试验, 得知砾砂的峰值强度随相对密实度的增加而增大, 并得到了相对密实度与试验参数 K 的对数近似成二次函数关系、与试验参数 n 没有相关性的结论。B. N. Madhusudhan 等^[6]为研究相对密度和有效围压对砂颗粒泊松比的影响进行了波速试验, 得到围压和相对密实度均与泊松比成负相关, 且围压对粗砂泊松比的影响没有对细砂泊松比的影响显著的结论。徐日庆等^[7]对影响砂土力学行为的因素进行了试验研究, 发现相对密实度、围压均与砂土的峰值强度成正比关系, 并且两者是影响砂土结构的主要因素, 不同的相对密实度、围压诱导的结构不同, 其力学行为也不同。潘政等^[8]对砂卵砾石料进行了三轴固结排水剪切试验, 得到相对密实度、围压与抗剪强度成正比例关系, 试样非线性强度指标与相对密实度近似线性相关, 试验参数 L 与相对密实度线性相关, 并建立了相关的公式。张永富等^[9]对 7 种不同橡胶质量分数、6 种不同围压的橡胶砂进行了三轴试验, 结果表明橡胶砂的偏应力-轴向应变曲线在低配比时表现为双曲线特性, 且由双曲线拟合得到的模型参数随橡胶含量的增加而减小, 随围压的增加而增加; 橡胶砂的偏应力轴向应变曲线在高配比时表现出非线性弹性。

橡胶砂的静力参数是反映橡胶砂强度和变形特性的关键指标。多数研究限于定性描述, 定量分析的

研究不多, 因此有必要将物理参数与力学特性建立关系以了解材料的变化。本文对橡胶砂的不同配比和相对密实度进行了三轴剪切试验, 讨论了配比和相对密实度对橡胶砂静力参数的影响及其变化规律, 并建立相关参数与相对密实度的关系, 以期后续研究提供试验依据。

2 试验

2.1 试验材料

橡胶颗粒为废旧轮胎破碎颗粒, 其粒径范围为 0.7~2.3 mm, 平均粒径 $D_{50}=1.5$ mm; 砂为福建标准砂, 其粒径范围为 0.05~2.00 mm, 平均粒径 $D_{50}=0.66$ mm, 不均匀系数 $C_u=7.81$ 。橡胶和砂的颗粒级配曲线如图 1 所示。

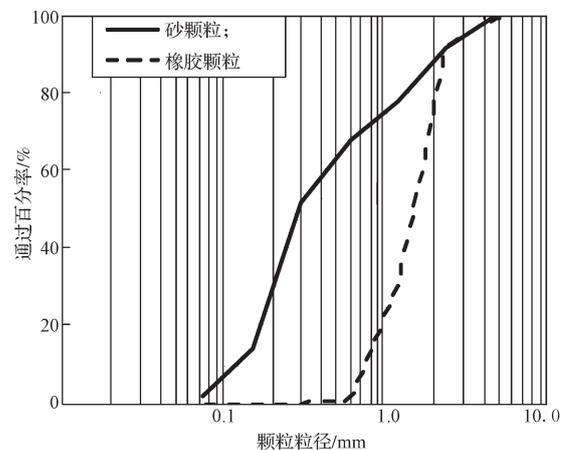


图 1 橡胶和砂的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curves of rubber-sand

2.2 试验仪器

本研究选用的试验仪器为 SLB-1 型应力-应变控制式三轴剪切渗透试验仪, 如图 2 所示。

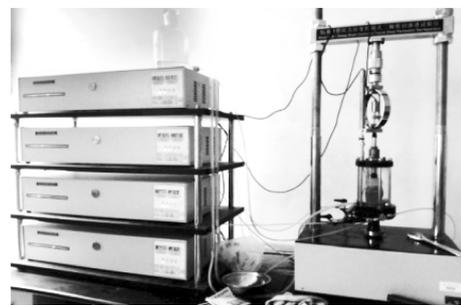


图 2 三轴试验仪

Fig. 2 Triaxial tester

采用三剪试验仪进行 CD 试验 (consolidated drained shear test) 时, 试样的直径 $\Phi=39.1$ mm, 高度 $H=80$ mm, 待试样固结完成后, 以 1 mm/min 剪切速率进行剪切试验, 采样时按剪切变形量为 0.1 mm 记录数据, 测量出试样的抗剪切破坏能力。绘制出的

偏应力-轴向应变曲线,若有峰值,则以该值为峰值偏应力;若无峰值,则选取轴向应变为15%时对应的偏应力为峰值偏应力。

2.3 试验工况

表1为不同橡胶质量分数试样的密度试验结果,试验方法及过程参考文献[10]。表2为不同相对密实度混合料的质量,由式(1)和表1计算得到。表3为三轴剪切试验工况,考虑了5种相对密度和3种橡胶质量分数在围压为100 kPa时对试样剪切特性的影响。

相对密实度与最大、最小干密度的关系式为

$$D_r = \frac{\rho_{max}(\rho - \rho_{min})}{\rho(\rho_{max} - \rho_{min})}, \quad (1)$$

式中: D_r 为相对密实度;

ρ_{min} 、 ρ_{max} 分别为最小、最大干密度;

ρ 为干密度。

表1 密度试验结果

Table 1 Density test results

橡胶质量分数 $r_v/\%$	$\rho_{max}/(g \cdot cm^{-3})$	$\rho_{min}/(g \cdot cm^{-3})$
10	1.78	1.44
20	1.59	1.30
30	1.38	1.09

表2 不同相对密实度混合料的质量

Table 2 Quality of the mixture g

D_r	物质	橡胶质量分数 $\%$		
		10	20	30
0	橡胶	14.44	24.90	31.34
	砂	130.01	99.63	73.13
0.3	橡胶	15.14	26.38	33.47
	砂	136.32	105.52	78.11
0.5	橡胶	15.65	27.46	35.07
	砂	140.88	109.86	81.83
0.7	橡胶	16.19	28.64	36.82
	砂	145.75	114.56	85.93
0.9	橡胶	16.77	29.92	38.76
	砂	150.97	119.68	90.45

表3 试验工况

Table 3 Test condition

橡胶质量分数 $\%$	相对密实度 D_r	围压 /kPa	每组试样数 / 个
10, 20, 30	0, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9	100	3

3 试验结果分析

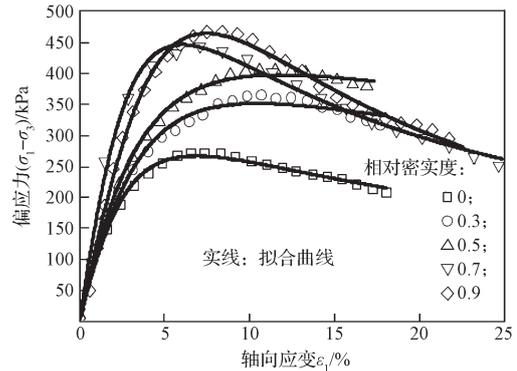
3.1 偏应力-轴向应变特性

本研究中选用三轴剪切仪,分别测出橡胶质量分数为10%、20%和30%的3个不同配比下的橡胶砂混合物,在0, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9相对密实度下的偏

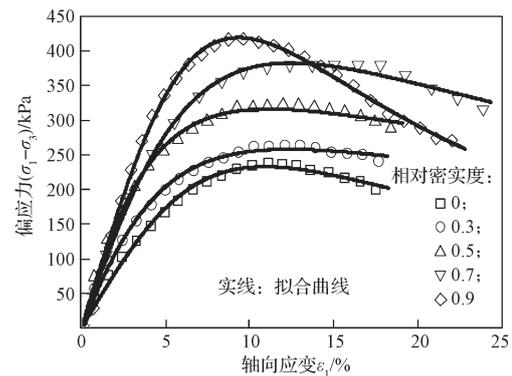
应力,得出不同相对密实度下、不同橡胶质量分数的偏应力-轴向应变的变化曲线,并对其进行比较分析。

3.1.1 不同相对密实度橡胶砂的偏应力-轴向应变曲线

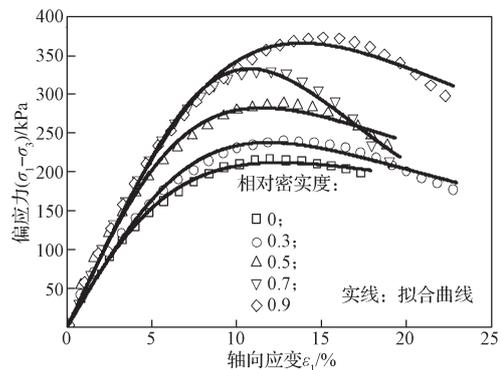
图3为橡胶砂在不同相对密实度下的偏应力-轴向应变关系曲线,图中 σ_1 为轴向应力, σ_3 为围压, ϵ_1 为参考轴向应变。



a) 橡胶质量分数为10%



b) 橡胶质量分数为20%



c) 橡胶质量分数为30%

图3 不同 D_r 的橡胶砂偏应力-轴向应变及拟合曲线
Fig. 3 Deviatoric stress-axial strain curves and the fitted curves for rubber-sand with different relative densities

由图3可知,相对密实度对橡胶砂的偏应力轴向应变有较大影响。当橡胶含量相同时,试样的初始切线模量、偏应力随相对密实度的增加而增大,且偏应

力峰值也越来越大。相对密实度较大时, 偏应力会出现明显的峰值, 表现为应变软化型, 其原因是密实度较大时, 颗粒间咬合作用较强, 产生的应力较大; 当偏应力出现最大值后, 颗粒间的咬合作用达到极限, 橡胶砂结构崩解变松, 外力做的功减小, 峰值强度也趋于平缓。当相对密实度增加到一定程度后, 颗粒间的咬合力达到一个极限值, 此时外力要做的功趋于稳定, 内摩擦角的增长随之趋于平缓。对比图3各图可知: 随着橡胶含量的增加, 应力-应变曲线越来越平缓且应力峰值变小, 这是因为橡胶含量的增加使相对密实度减小, 导致偏应力值变小; 偏应力达到橡胶质量分数峰值后出现了应力交叉, 是由于橡胶

颗粒排列发生了变化, 更趋于均匀密实。

用如下公式对橡胶砂应力-应变曲线进行拟合:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{E_0 \varepsilon_1}{1 + (\varepsilon_1 / \varepsilon_r)^\alpha}, \quad (2)$$

式中: E_0 为初始弹性模量;

ε_r 为参考剪应变;

α 为试验参数。

图3中, 试验值与拟合值能够较好地吻合, 说明橡胶砂的非线性应力-应变关系用式(2)进行拟合是合理的。不同橡胶质量分数下应力-应变关系参数拟合值如表4所示。

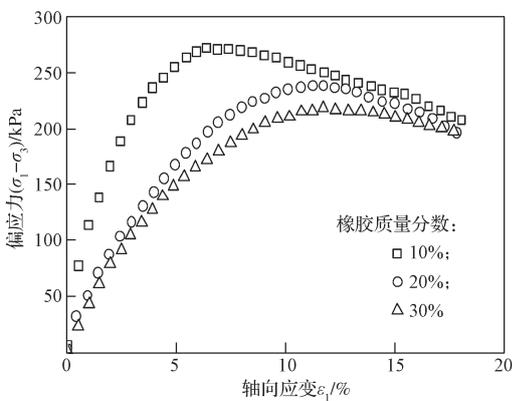
表4 橡胶砂应力-应变试验关系参数拟合值

Table 4 Fitted values of rubber sand stress & strain test parameters

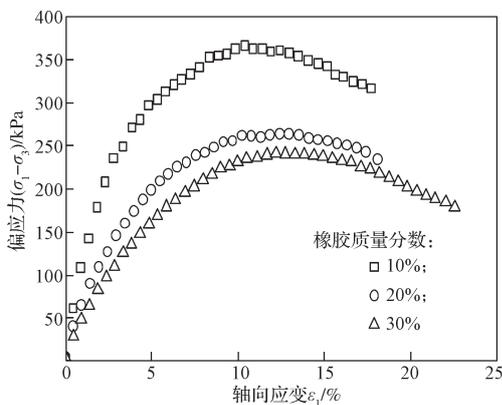
橡胶质量 分数 $r_r/\%$	$D_r=0$			$D_r=0.3$			$D_r=0.5$			$D_r=0.7$			$D_r=0.9$		
	E_0/Pa	$\varepsilon_r/\%$	α												
10	108.01	4.75	1.56	109.46	5.96	1.45	121.67	5.90	1.38	177.14	4.97	1.72	126.19	7.37	1.98
20	40.84	11.39	2.10	59.67	8.27	1.54	83.33	7.20	1.52	70.06	10.85	1.78	79.56	10.45	2.30
30	38.03	11.08	1.80	37.06	12.80	2.18	46.74	12.08	2.12	45.64	13.66	3.12	46.47	15.01	2.32

3.1.2 不同配比橡胶砂的偏应力-轴向应变曲线

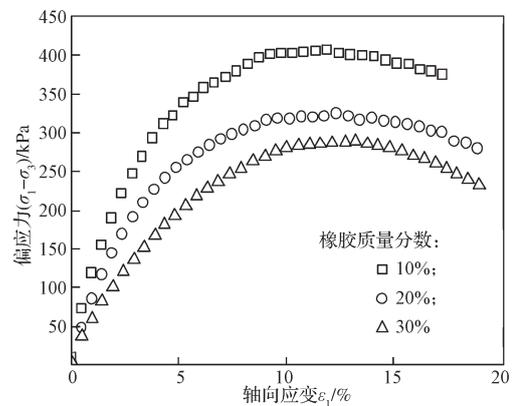
图4为各橡胶砂的偏应力-轴向应变关系。



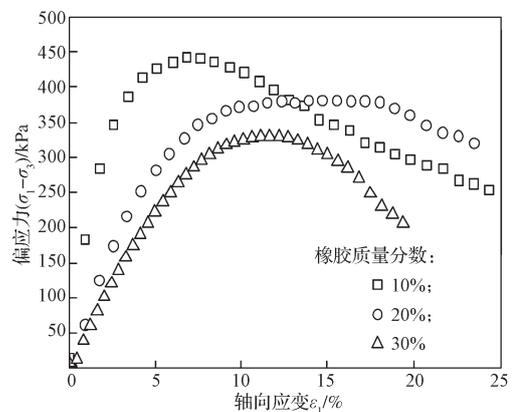
a) $D_r=0$



b) $D_r=0.3$



c) $D_r=0.5$



d) $D_r=0.7$

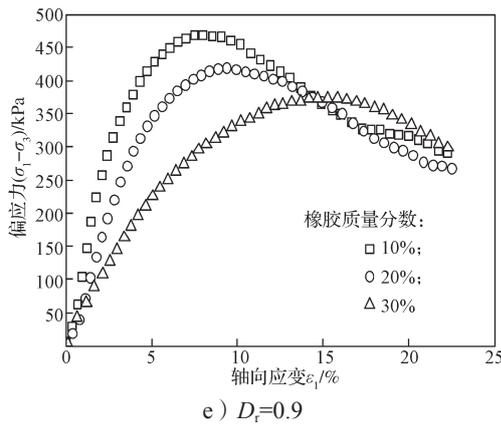


图4 不同橡胶质量分数橡胶砂的偏应力-轴向应变曲线
Fig. 4 Deviatoric stress-axial strain curves of rubber sand with different proportions

由图4可知,试样在5种不同相对密度下的偏应力-轴向应变曲线都出现应变先硬化后软化的现象。在相同的相对密度下,橡胶砂的偏应力-轴向应变曲线均表现出先上升后下降的变化趋势,偏应力峰值随橡胶含量的增加而变小,且偏应力达到峰值时对应的应变变大。由此得出,橡胶的含量对偏应力-轴向应变曲线形态有一定的影响,即橡胶含量越多,偏应力峰值对应的应变越大;橡胶含量较少时,最大应力状态出现在小应变阶段。可见橡胶含量的增加能延长试样破坏时的应变。

有学者^[11]提出用割线模量 E_T 来表现应力-应变关系曲线的非线性特性,其中

$$E_T = (\sigma_1 - \sigma_3) / \varepsilon_1 = 1/a [1 - b(\sigma_1 - \sigma_3)], \quad (3)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \varepsilon_1 / (a + b\varepsilon_1). \quad (4)$$

由试验数据分析得出, a 、 b 是与轴向应力有关的函数, a 为 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 轴上的截距, b 为试样破坏前 $\varepsilon_1 / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 的斜率。 a 、 b 用以下关系式表示:

$$1/a = A_1\omega^2 + A_2\omega + A_3, \quad (5)$$

$$b = B_1e^{B_2\omega}. \quad (6)$$

式(5)~(6)中: ω 为试样的含水率;

A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_1 、 B_2 为函数参数,取值见图5~6。

将式(5)~(6)代入式(3)得:

$$E_T = (A_1D_r^2 + A_2D_r + A_3) [1 - B_1e^{B_2D_r} (\sigma_1 - \sigma_3)]. \quad (7)$$

图5~6为相关参数与相对密度的关系。

由图5~6可以看出,随着橡胶含量的降低, $1/a$ (应力-应变曲线中初始应变为0时, $1/a$ 为初始切线模量)变大,原因是橡胶含量的降低意味着橡胶砂中砂含量的增加,试样的变形相对减少,从而导致弹性模量增加。橡胶质量分数为10%和30%时,

$1/a$ 和 D_r 有良好的线性关系,可按式(3)~(7)确定诸参数,橡胶配比为20%时,反映在 $1/a$ 与相对密度(图5)关系上是一条曲线,不是线性关系,不符合 $\varepsilon_r/\varepsilon_1 = f + D\varepsilon_r$ 的规律,其中 f 、 D 为应力应变参数。不同橡胶质量分数下的参数 b 可用同一函数拟合。另外需指出,图中散点零星分布,可能是由于试样受力不均匀或试验仪器接触误差所致。

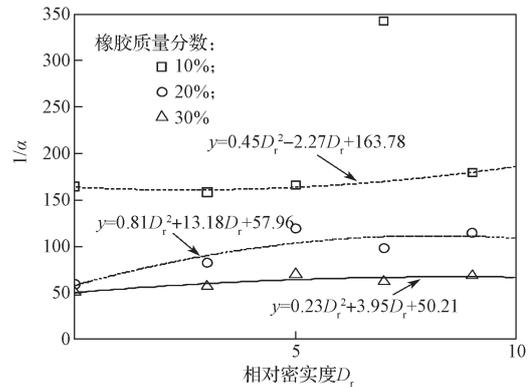


图5 参数 $1/a$ 与相对密度的关系
Fig. 5 Parameter $1/a$ and the relative density

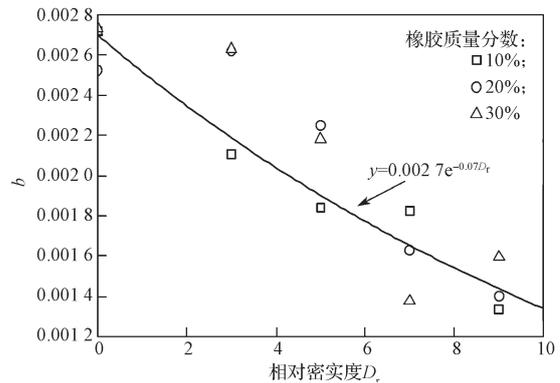


图6 参数 b 与相对密度的关系
Fig. 6 Parameter b and the relative density

3.1.3 两种结果对比分析

为了更鲜明地表达橡胶质量分数和相对密度对橡胶砂偏应力峰值的影响,课题组给出了试样在不同橡胶含量、不同相对密度下的偏应力峰值(如表5所示)、偏应力峰值与相对密度的关系曲线(如图7所示)和偏应力峰值与配比的关系曲线(如图8所示)。

表5 不同橡胶含量、不同相对密度的偏应力峰值

橡胶质量分数/%	相对密度 D_r				
	0	0.3	0.5	0.7	0.9
10	271.4	369.2	408.7	443.5	468.4
20	238.9	264.9	325.3	380.3	418.4
30	217.7	241.0	289.2	330.3	374.6

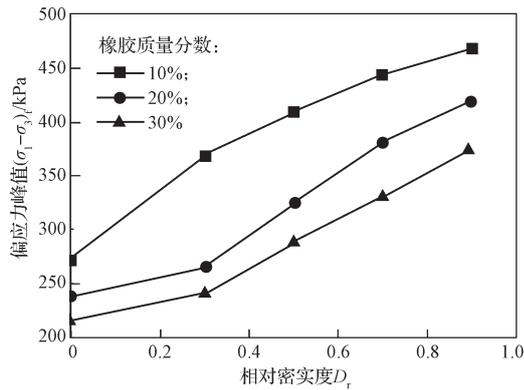


图7 偏应力峰值与相对密实度的关系曲线
Fig. 7 Relationship curves of deviatoric stress peak and the relative density

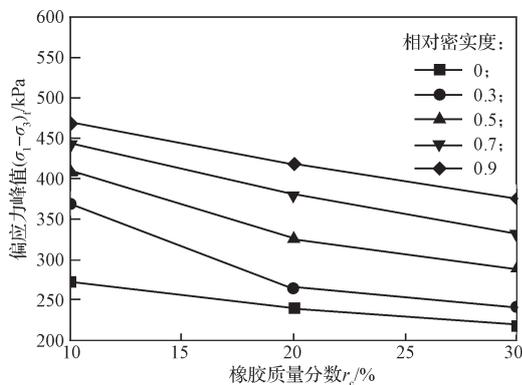


图8 偏应力峰值与橡胶质量分数的关系曲线
Fig. 8 Relationship curves of deviatoric stress peak and proportion

由表5、图7~8可知,偏应力峰值随相对密实度的增加呈近似线性增加,即相对密实度与峰值强度成正比例关系;偏应力峰值随橡胶含量的增加呈近似线性减小,即橡胶质量分数与峰值强度成反比例关系。橡胶砂混合物是非黏性散体材料,相对密实度越大,颗粒间填充越密实、咬合作用越强,发生相对移动所要克服的阻力越大。试样在外力作用时发生剪切,颗粒在剪切面上发生滚动或移动,出现与试样所承受压力大小有关的体应变。

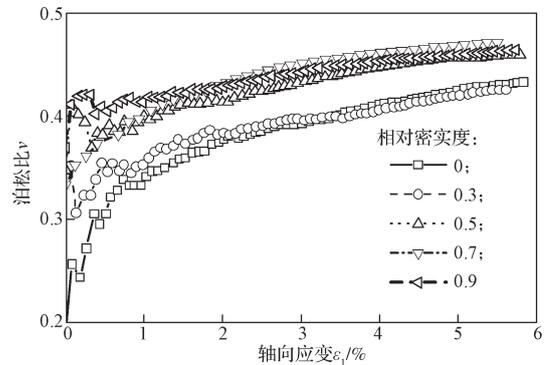
3.2 泊松比

目前测试土样泊松比的方法有静力法和动力法两种,由于两种方法的适用范围和精度不同,本试验宜选用静力法,静力法根据三轴试验实测土样轴向和侧向变形确定泊松比,然后给出泊松比与应变的关系。

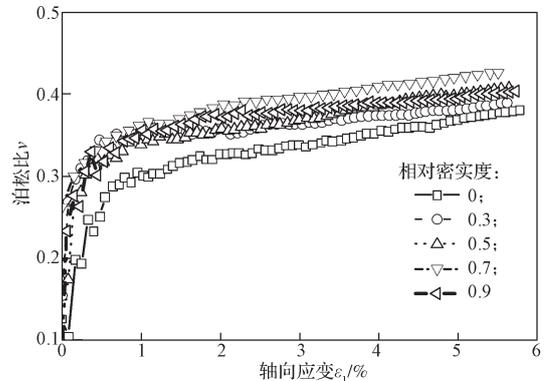
3.2.1 不同相对密实度的泊松比特性

图9给出了橡胶质量分数为10%,20%,30%的橡胶砂在不同相对密实度下泊松比-轴向应变关系曲线。从图9可以看出:橡胶质量分数为30%时,试样的相对密实度越大,泊松比越大。橡胶质量分数为10%,20%时,泊松比变化表现出不同的规律:相对密实度小于0.7时,橡胶砂泊松比随着相对密实度的

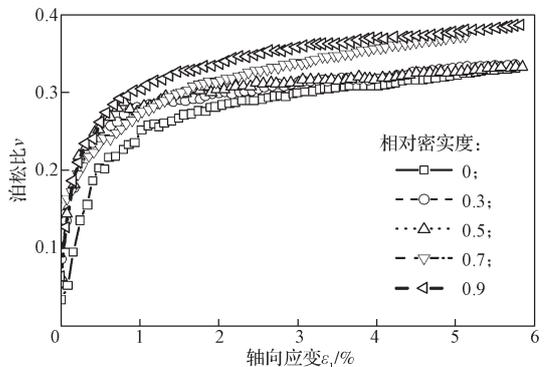
增大而增大;相对密实度为0.7时,橡胶砂泊松比最大;相对密实度大于0.7时,橡胶砂泊松比随着相对密实度的增大而减小。



a) 橡胶质量分数为10%



b) 橡胶质量分数为20%



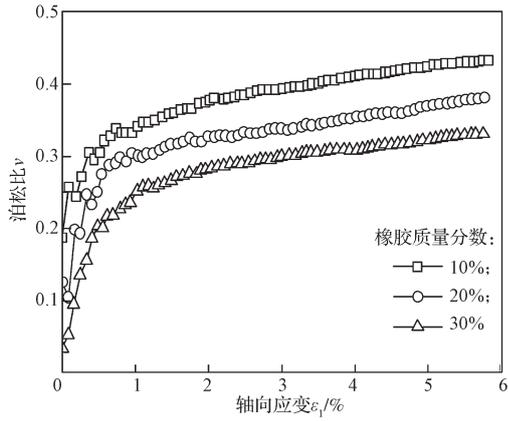
c) 橡胶质量分数为30%

图9 不同相对密实度橡胶砂的泊松比-轴向应变曲线
Fig. 9 Poisson's ratio-axial strain curve with different relative densities

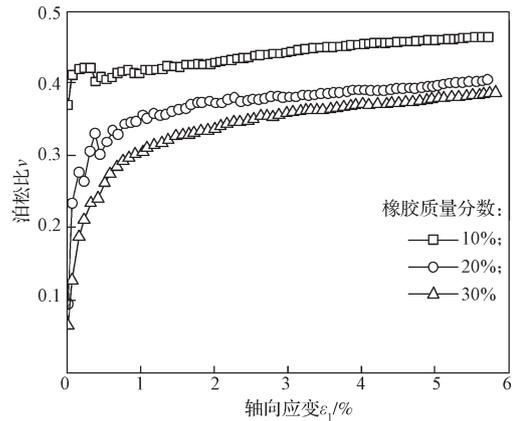
由此可以看出,试样的相对密实度愈大其泊松比愈高这一规律只适用于橡胶质量分数大的试样,对于橡胶质量分数小的试样,其泊松比可能会随着密实度的增大而减小。试样橡胶含量较低的泊松比普遍高于试样橡胶含量较高的泊松比,由此说明,橡胶的加入减小了橡胶砂的泊松比。

3.2.2 不同配比的泊松比特性

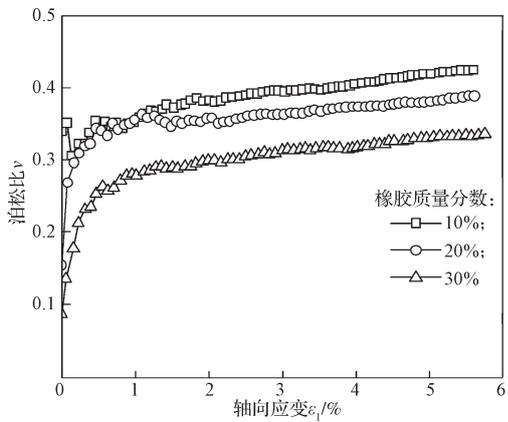
图10给出了橡胶砂在不同相对密实度下的泊松比-轴向应变关系曲线。



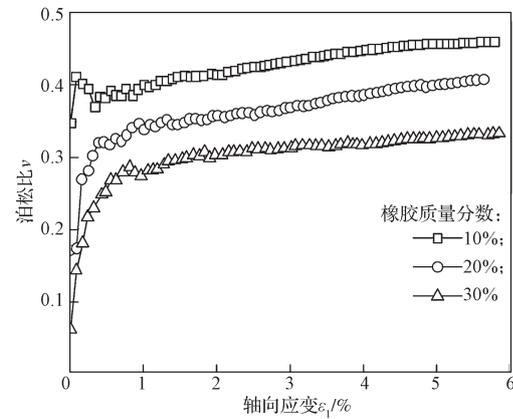
a) $D_r=0$



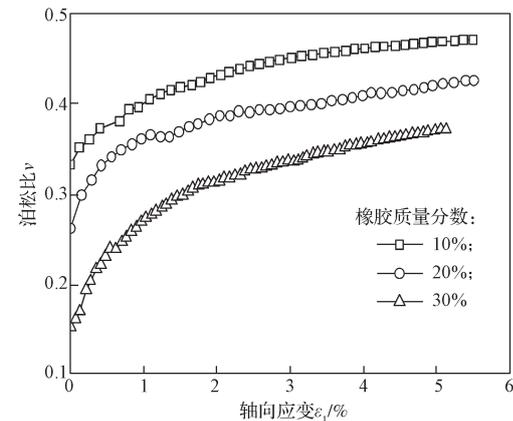
e) $D_r=0.9$



b) $D_r=0.3$



c) $D_r=0.5$



d) $D_r=0.7$

图 10 不同橡胶质量分数橡胶砂的泊松比 - 应变曲线

Fig. 10 Poisson's ratio strain curve with different proportions

由图 10 可知：低橡胶含量试样的泊松比明显高于高橡胶含量试样的泊松比，由于橡胶砂具有非黏性特性，随着橡胶颗粒的增多，颗粒排列更为紧密，颗粒间的压缩变形变小，表现出的力学特性泊松比变小。同一相对密实度下，橡胶砂泊松比表现为在小应变时增加快，大应变时增加缓慢。随着相对密实度的增大，橡胶砂泊松比普遍表现为增大趋势，且其差值不大，由此说明，相对密实度对橡胶砂泊松比的影响小于橡胶含量对橡胶砂泊松比的影响。

4 结论

1) 在相同的橡胶含量下，试样的初始切线模量、偏应力与相对密实度呈正相关，相对密实度较大时，偏应力会出现明显的峰值；随着橡胶含量的增加，偏应力 - 轴向应变关系曲线越来越平缓且偏应力峰值变小，并在偏应力达到峰值后出现了偏应力交叉。

2) 在相同的相对密实度下，橡胶砂的偏应力 - 轴向应变曲线表现出先上升后下降的变化规律，偏应力峰值随橡胶含量的增加而变小，且偏应力达到峰值时对应的应变也变大。

3) 橡胶含量较低试样的泊松比普遍高于橡胶含量较高试样的泊松比，橡胶的加入减小了橡胶砂泊松比数值。

4) 相对密实度对橡胶砂泊松比的影响小于橡胶含量对橡胶砂泊松比的影响。

参考文献:

[1] 吴 体, 侯汝欣. 烧结多孔砖砌体弹性模量及泊松比的试验研究 [J]. 建筑结构, 2010, 42(12): 117-119.
WU Ti, HOU Ruxin. Experimental Studies on Elastic Modulus and Poisson Ratio of Fired Perforated Brick

- Masonry[J]. Building Structure, 2010, 42(12): 117-119.
- [2] KOKUSHO T. Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range[J]. Soils and Foundations, 1980, 20(2): 45-60.
- [3] 刘娜, 刘方成, 张小强, 等. 三轴试验中橡胶-砂混合物泊松比计算方法研究[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(6): 16-22.
- LIU Na, LIU Fangcheng, ZHANG Xiaoqiang, et al. Study of Poisson's Ratio Calculation Method for Rubber-Sand Mixture Under the Triaxial Test[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(6): 16-22.
- [4] 王凤池, 燕晓, 黄志强, 等. 橡胶水泥土模量与泊松比的变化规律[J]. 沈阳工业大学学报, 2010, 32(4): 449-453.
- WANG Fengchi, YAN Xiao, HUANG Zhiqiang, et al. Changing Rule in Modulus and Poisson Ratio of Rubberized Cement-Soil[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2010, 32(4): 449-453.
- [5] 陈晨. 相对密实度对砾砂初始切线模量的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(5): 579-583.
- CHEN Chen. Influence of Relative Density on Initial Tangential Modulus of Gravelly Sand[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2016, 38(5): 579-583.
- [6] MADHUSUDHAN B N, KUMAR J. Effect of Relative Density and Confining Pressure on Poisson Ratio Form Bender and Extender Elements Tests[J]. Géotechnique, 2010, 60(7): 561-567.
- [7] 徐日庆, 王兴陈, 朱剑锋, 等. 初始相对密实度对砂土强度特性影响的试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 345-349.
- XU Riqing, WANG Xingchen, ZHU Jianfeng, et al. Experiment of Initial Relative Density Effects on Sand Strength[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2012, 33(3): 345-349.
- [8] 潘政, 朱俊高, 方智荣. 相对密实度对砂卵砾石料强度影响的试验研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(2): 130-133.
- PAN Zheng, ZHU Jungao, FANG Zhirong. Study on Relative Density Effects on Strength Behaviour of Sand-Gravel Material by Triaxial Test[J]. Yellow River, 2016, 38(2): 130-133.
- [9] 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 Tests[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(1): 17-23.
- [10] 刘娜. 橡胶-砂混合物泊松比研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016.
- LIU Na. Study on Poisson's Ratio of Rubber-Sand Mixtures[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology 2016.
- [11] 郭国庆. 关于粗粒土应力应变特性及非线性参数的试验研究[J]. 水利学报, 1983(11): 44-50.
- GUO Guoqing. Experimental Study on Stress-Strain Characteristics and Nonlinear Parameters of Coarse Grained Soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983(11): 44-50.

(责任编辑: 申剑)