

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.01.003

橡胶颗粒-砂混合物三轴 CD 剪切试验研究

张永富, 刘方成, 任东滨, 陈璐, 刘娜

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 对6种围压7种不同质量配比的干燥橡胶颗粒-砂混合物(橡胶砂)进行三轴CD试验, 研究不同配比不同围压对橡胶砂的强度特性、偏应力-轴向应变曲线和体应变-轴向应变曲线特性的影响。试验结果表明: 橡胶颗粒质量分数为0%~30%时, 有利于改善砂颗粒的剪切强度特性; 在10%附近时, 内摩擦角出现最大值; 在20%附近时, 其粘聚力出现最大值。橡胶砂的偏应力-轴向应变曲线特性在橡胶颗粒质量分数低于50%时, 与纯砂类似, 表现出双曲线特性; 不低于50%时, 与纯橡胶类似, 表现出近似线弹性, 且由双曲线模型拟合得到的橡胶砂模型参数(如峰值偏应力、初始切线模量以及破坏比)随围压的增加而增加, 随橡胶颗粒含量的增加而减少。橡胶砂的体应变-轴向应变曲线特性在橡胶颗粒质量分数不高于20%时, 与纯砂类似, 有先剪缩后剪胀的特点; 高于20%时, 表现出单调剪缩的特性, 橡胶颗粒含量越大, 剪缩越明显。

关键词: 橡胶砂; 三轴CD试验; 应力-应变关系; 内摩擦角; 粘聚力; 体应变

中图分类号: TU411.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)01-0017-07

Study on Shear Characteristics of Rubber-Sand Mixtures by Triaxial CD Tests

Zhang Yongfu, Liu Fangcheng, Ren Dongbin, Chen Lu, Liu Na

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

Abstract : Conducted triaxial CD tests on 7 different proportions of dry rubber-sand mixtures under six confining pressures. Studied the effects of proportions and confining pressures on properties of shear strength, deviatoric stress-axial strain curves and volumetric strain-axial strain curves of rubber-sand mixtures. The results indicate that: it is beneficial to improve the shear strength properties of sand when the mass fraction of rubber particles is 0%~30%; the angle of internal friction appears the maximum value near to 10% mass fraction; the cohesion appeared the maximum value near 20%. The characteristics of the deviatoric stress-axial strain curves of the rubber-sand mixtures are similar to that of pure sand when the mass fraction is less than 50%, exhibiting hyperbolic curves, and when the mass fraction is no less than 50%, the mixtures are similar to pure rubber particles, exhibiting linear elastic. The rubber sand model parameters(such as the peak deviator stress, initial tangent modulus and failure ratio) obtained from hyperbolic model fitting increase with confining pressures increment and decrease with rubber content increment. The characteristics of volumetric strain- axial strain curves of the mixtures are similar to pure sand when rubber mass fraction is not over 20%, exhibiting contraction followed by dilatation, and above 20%, it appears the characteristics of monotonic shearing shrinkage, and the rubber particle content is more, the shear shrinkage is more obvious.

Keywords : rubber-sand mixtures ; three axis CD test ; stress-strain relationship ; angle of internal friction ; cohesion ; volumetric strain

收稿日期: 2014-05-29

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), 湖南工业大学研究生科研创新基金资助项目(CX1410)

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: 445023904@qq.com

1 研究背景

近年来,日益增加的废旧橡胶轮胎在土木工程中的循环再利用,已经成为影响社会经济和生态环境发展的一个热门问题。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,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]。

基于应用的需要,国内外许多学者对橡胶砂的基本力学特性进行了大量的试验研究。W. Y. Wu等^[2]对粒径范围为2~38 mm的橡胶碎片进行了三轴压缩试验,发现其内摩擦角变化范围为45~60°。S. Yang等^[3]对粒径为2~10 mm的橡胶碎片进行了侧限压缩试验、直剪试验、三轴试验,发现轮胎碎片的剪切强度与颗粒尺寸无关。J. H. Lee等^[4]对轮胎橡胶颗粒质量分数为40%的橡胶砂混合物进行了三轴CD试验,发现其剪切特性介于纯橡胶颗粒和纯砂颗粒之间,并且基于邓肯-张非线性弹性模型提出了橡胶砂混合物的双曲线假定模型。J. G. Zornberg等^[5]对橡胶砂混合物进行了三轴CD试验,考虑橡胶含量、长宽比、砂的相对密度以及围压对其剪切特性的影响,发现橡胶颗粒质量分数低于35%时,混合物具有类似纯砂的剪切特性;而橡胶颗粒质量分数高于35%的混合物具有类似纯橡胶颗粒的特性。P. Gotteland等^[6]对轮胎碎片砂混合物进行了三轴CD试验,发现轮胎碎片质量分数为34%时,对混合物的剪切特性改善最优,并且轮胎碎片水平排列、水平和竖向排列、竖向排列、随机排列对混合物强度的影响依次减弱。G. V. Rao等^[7]对轮胎碎片砂混合物进行了压缩和三轴试验,发现轮胎碎片质量分数低于20%时,可将其作为高速公路路堤的填料。邓安等^[8]对不同配比、不同围压的橡胶砂混合物进行了三轴CD试验,发现其应力-应变曲线的硬化水平随围压增加而增强,而且橡胶含量增加会影响围压与体变的关系。辛凌等^[9]对不同配比的轮胎橡胶颗粒轻质混合土进行了常规三轴固结不排水剪切试验,发现随橡胶含量的增加,废弃轮胎橡胶颗粒轻质混合土的应力应变曲线从软化型向硬化型过渡。李丽华等^[10]对轮胎碎片砂混合物进行了剪切试验,发现加入轮胎碎片后,混合土摩尔-库仑包线呈非线性,且随碎片含量增加抗剪强度、内摩擦角相应增加,非线性特征明显。

虽然国内外对橡胶砂的力学特性进行了一定的研究,但由于橡胶砂是一种颗粒状散体复合材料,不

同试验研究使用的橡胶砂混合物试样的形状、颗粒尺寸、颗粒相对尺寸、橡胶颗粒含量、密度、制样方法、固结时间、以及选定的围压不尽相同,得出的结论具有多样性。为使其在土木工程中有较好应用,有必要对其进行大量深入地研究。本文进行了7种不同配比的干燥橡胶砂在6种围压下的三轴CD试验,得出了其抗剪强度试验值和最优橡胶颗粒含量;此外,分别对围压为50 kPa和100 kPa时,7种不同配比的橡胶颗粒砂混合物的剪切特性进行了分析;同时对纯橡胶颗粒在6种围压下的剪切特性进行分析。

2 试验

2.1 试样材料

试验用砂选用建筑工程中普遍使用的河砂,橡胶颗粒由废旧轮胎经机械打碎得到。经过筛分试验和颗粒粒径分析,可知砂颗粒比重 $G_s=2.59$,平均粒径 $D_{50,s}=0.29$ mm,不均匀系数 $C_{u,s}=1.31$,粒径范围为0~4.5 mm;橡胶颗粒比重 $G_r=1.21$,平均粒径 $D_{50,r}=1.5$ mm,不均匀系数 $C_{u,s}=1.43$,颗粒粒径主要分布范围为0.7~2.3 mm。橡胶和砂的颗粒级配曲线如图1所示。

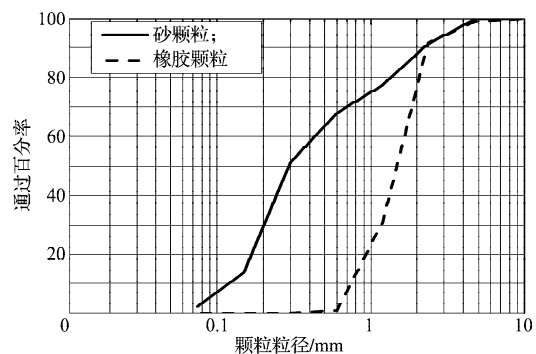


图1 橡胶和砂的颗粒级配曲线

Fig.1 Grading curves of rubber particles and sand

2.2 试验方法

河砂放置于烘箱内烘干,对橡胶颗粒进行风干,然后按计算称量,将其进行均匀混合。为了保证混合物试样在固结完成时初始高度基本不变,避免轴向应变失真过大,同时为了保证混合物的相对密度相差不太大,因此试验控制密度采用0.9倍最大干密度,并由式(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根据GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》^[11]提供的方法进行测定。混合物试样的质量由式(2)计算,橡胶砂混合物中橡胶颗粒和砂颗粒的质量分别由式(3)和式(4)计算,相对密度由式(5)计算得到。

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

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

$$m_r = m\omega, \quad (3)$$

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

$$D_r = \frac{\rho_{d,max}(\rho - \rho_{d,min})}{\rho(\rho_{d,max} - \rho_{d,min})}, \quad (5)$$

式(1)~(5)中: ρ 为试验控制密度;

$\rho_{d,max}$, $\rho_{d,min}$ 分别为最大和最小干密度;

m 为纯橡胶颗粒、纯砂颗粒或橡胶砂混合物试样的质量;

m_r , m_s 分别为混合物中橡胶颗粒和砂的质量;

ω 为混合物中橡胶颗粒的质量分数;

V 为试样体积;

D_r 为相对密度。

不同质量配合比的橡胶砂混合物的密度如表1所示。

表1 不同质量配合比橡胶砂混合物的密度

Table 1 The density of rubber sand mixtures with different mass proportion

配合比 / %	最小干密度 $\rho_{d,min}/(g \cdot cm^{-3})$	最大干密度 $\rho_{d,max}/(g \cdot cm^{-3})$	试验控制密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	相对密度 $D_r/\%$
0	1.44	1.98	1.78	70.37
10	1.27	1.75	1.58	67.90
20	1.08	1.54	1.39	73.91
30	0.94	1.39	1.25	76.79
40	0.85	1.22	1.10	74.47
50	0.77	1.14	1.03	76.88
100	0.50	0.95	0.87	88.18

从表1可以看出:橡胶砂混合物的最大干密度和最小干密度随着橡胶含量的增加而减少。

表2 橡胶砂混合物在不同围压下的抗剪强度参数试验值

Table 2 Tested values of shear strength parameters of the rubber-sand mixtures under different confining pressures

配合比 / %	不同围压的峰值偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f / kPa$						粘聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
	$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 150$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa	$\sigma_3 = 250$ kPa	$\sigma_3 = 300$ kPa		
0	329.9	581.7	881.1	1 181.2			7.5	36.02
10	273.8	468.4	679.1	900.1	1 110.2	1 281.6	14.7	42.27
20	241.3	418.4	561.4	721.5	886.3	1 071.2	18.9	38.34
30	211.0	330.1	449.6	574.6	714.6	864.2	18.2	34.42
40	183.5	276.0	381.7	482.2	613.6	743.6	15.0	31.95
50	141.2	221.0	285.3	385.3	471.9	582.1	12.4	27.40
100	111.6	174.9	239.4	307.1	388.1	461.6	11.1	24.37

由表2可以看出:同一橡胶颗粒含量下,试样的峰值偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 随着围压的增加而变大,这是由于围压的增加,相当于增加了颗粒间的正应力,使得颗粒之间接触紧密,颗粒间的摩擦力也相应增加;而在同一围压下,试样的峰值偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 随橡胶

试验在南京土壤仪器厂生产的SLB-1型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪上进行,采用的剪切速率为1 mm/min,试样的直径 $\Phi = 39.1$ mm,高度 $H = 80$ mm。试样的制备方法如下:在压力室底座上依次放置透水板和滤纸片,将橡皮膜套在底座上,并用橡皮圈扎紧,放置对开圆模,套上紧箍;分4层装样,每层混合物试样按等质量和等橡胶含量混合均匀并依次装入对开圆模内;装样过程中用小棒轻轻击压;试样装填完毕时在其上依次放置一滤纸片和透水板,取下紧箍,调节体变控制箱使进出液管内保留一段空气,以保证试样在固结剪切过程中始终保持干燥;然后放置上帽,并用橡皮圈扎紧,取下对开圆模,试样制备完毕。制备完毕后的试样如图2所示。此后将制备好的试样分别在围压 σ_3 为50, 100, 150, 200, 250, 300 kPa下进行40 min固结后再进行剪切。

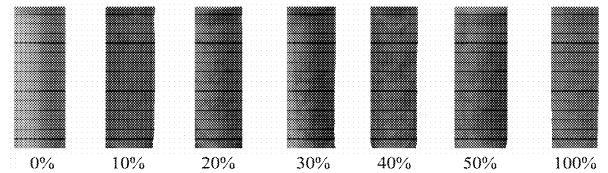


图2 不同橡胶颗粒含量的试样

Fig. 2 Samples with different content of rubber particles

3 试验结果与分析

3.1 抗剪强度

对7种不同质量配比的橡胶砂混合物进行了6种围压下的三轴CD剪切试验,得出了其抗剪强度特性试验值和抗剪强度包线,分别如表2和图3所示。

含量的增加而减少,这是由于橡胶颗粒相比于砂颗粒而言压缩性强、抗剪强度低的缘故。橡胶颗粒质量分数在10%附近时,混合物的内摩擦角出现最大值,此时粘聚力和内摩擦角分别为14.7 kPa和42.27°,内摩擦角相对于纯砂的提高了6.25°(提高17.4%);

橡胶颗粒质量分数在 20% 附近时, 其粘聚力出现最大值, 此时的粘聚力和内摩擦角分别为 18.9 kPa 和 38.34°, 粘聚力相对于纯砂的提高了 11.4 kPa (提高 152%)。从严格意义上说, 纯橡胶颗粒、纯砂颗粒和不同橡胶颗粒含量的橡胶砂混合物一般不存在粘聚力, 但散体颗粒物质在密实的情况下, 相互间能紧密咬合, 表现出具有粘聚力的假象^[12]。

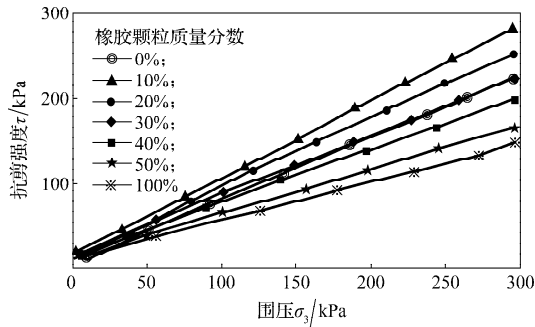


图3 不同配比橡胶砂的抗剪强度曲线

Fig. 3 The shear strength curves of rubber-sand mixtures with different mass proportion

由图 3 可以看出: 试样的抗剪强度包线从上至下对应的橡胶颗粒质量分数依次为 10%, 20%, 30%, 0%, 40%, 50%, 100%。纯砂颗粒与橡胶颗粒质量分数为 30% 的混合物试样的抗剪强度包线基本重合, 在纯砂颗粒中加入的橡胶颗粒质量分数为 0%~30% 时, 有利于改善其强度特性, 加入橡胶颗粒的最佳质量分数约为 10%。

由于试验中橡胶颗粒质量分数为 50% 的橡胶砂混合物和纯橡胶颗粒的偏应力 - 轴向应变曲线无明显峰值偏应力, 因此, 强度特性分析时选取轴向应变为 10% 时对应的偏应力为其峰值偏应力。

3.2 偏应力 - 轴向应变特性

分别针对围压为 50 kPa 和 100 kPa 的 7 种不同配比的橡胶颗粒砂混合物的偏应力 - 轴向应变曲线进行分析。基于邓肯 - 张双曲线弹性模型^[13], 对纯砂和橡胶颗粒质量分数低于 50% 的橡胶砂混合物的偏应力 - 轴向应变曲线进行双曲线拟合, 对不低于 50% 的橡胶砂混合物进行线性拟合。围压分别为 50 kPa 和 100 kPa 时, 不同配比橡胶砂混合物的偏应力 - 轴向应变曲线及其拟合曲线如图 4 所示, 其拟合参数值如表 3 和表 4 所示。

双曲线拟合公式为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1}, \quad (6)$$

线性拟合公式为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a}, \quad (7)$$

式中 (6)~(7) 中: σ_1 为轴向应力; σ_3 为围压; $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为偏应力; ε_1 为轴向应变; a, b 为拟合参数。

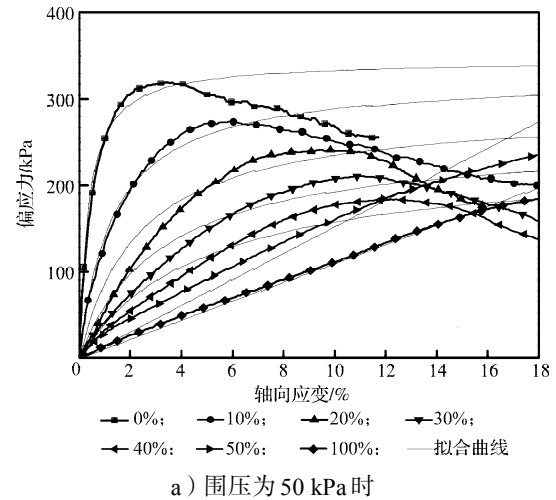
从而有

$$E_0 = \frac{1}{a}, \quad (8)$$

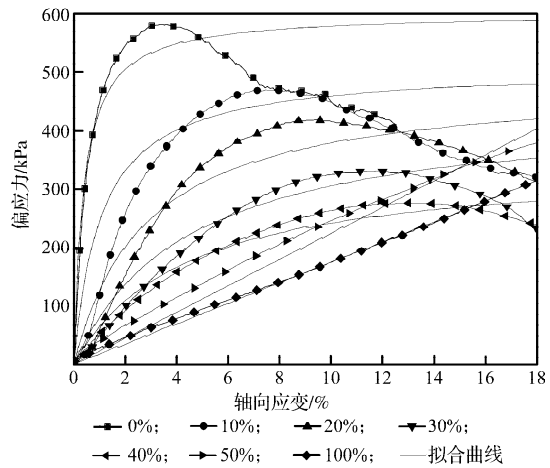
$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \frac{1}{b}, \quad (9)$$

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}, \quad (10)$$

式 (8)~(10) 中: E_0 为初始切线模量; $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为峰值偏应力; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为极限偏应力; R_f 为破坏比。



a) 围压为 50 kPa 时



b) 围压为 100 kPa 时

图4 不同配比的橡胶砂混合物的偏应力 - 轴向应变曲线及其拟合曲线

Fig. 4 The deviatoric stress-axial strain curves and the fitted curves for rubber-sand mixtures with different mix proportion

由图 4a 可以看出, 围压为 50 kPa 时, 橡胶颗粒质量分数为 10%, 20%, 30%, 40% 的橡胶砂混合物偏应力 - 轴向应变曲线与纯砂类似: 具有明显的峰值偏应力, 而且呈应力应变软化型, 这是由于试样的密度为其最大干密度的 0.9 倍, 属较密实试样; 并且其峰值偏应力随橡胶含量的增加而降低, 峰值偏应力对应的破坏

应变随橡胶含量的增加而稍有变大,这是由于混合物试样的轴向压缩变形能力随橡胶含量的增加而变大。此外还可以看出,质量分数为50%的橡胶砂混合物和纯橡胶颗粒的偏应力-轴向应变曲线无明显的峰值偏应力,其几乎呈线性变化,由此可推断出橡胶颗粒质量分数不低于50%的橡胶砂混合物的偏应力-轴向应变曲线近似线性变化,可认为是近似线弹性材料。

由图4b可以看出,围压为100 kPa时,橡胶颗粒含量相同的橡胶砂混合物的偏应力-轴向应变曲线与围压为50 kPa时具有类似的剪切特性,但峰值偏应力随围压的升高而增加,峰值偏应力所对应的破坏应变随围压的升高而稍有降低;此外,偏应力-轴向应变曲线线性段的斜率随围压的升高而增大。

表3 围压为50 kPa时不同配比的橡胶砂混合物的偏应力-轴向应变曲线拟合参数

Table 3 Fitted parameters of the deviatoric stress-axial strain curves of the rubber-sand mixtures with different mix proportion at confining pressure of 50 kPa

配合比 / %	拟合参数				
	<i>a</i>	<i>b</i>	E_0/kPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}/\text{kPa}$	R_f
0	0.000 010	0.002 9	99 590	345.1	0.93
10	0.000 040	0.003 1	24 910	326.1	0.84
20	0.000 081	0.003 4	12 420	289.9	0.83
30	0.000 125	0.003 9	7 970	254.5	0.83
40	0.000 207	0.004 3	4 820	234.1	0.78
50	0.000 657		1 520		
100	0.000 912		1 100		

表4 围压为100 kPa时不同配比的橡胶砂混合物的偏应力-轴向应变曲线拟合参数

Table 4 Fitted parameters of the deviatoric stress-axial strain curves of the rubber-sand mixtures with different mix proportion at confining pressure of 100 kPa

配合比 / %	拟合参数				
	<i>a</i>	<i>b</i>	E_0/kPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}/\text{kPa}$	R_f
0	0.000 006	0.001 7	156 370	600.6	0.97
10	0.000 022	0.001 9	45 130	528.0	0.89
20	0.000 058	0.002 1	17 170	485.4	0.86
30	0.000 101	0.002 3	9 920	440.3	0.75
40	0.000 126	0.002 9	7 950	347.2	0.80
50	0.000 447		2 240		
100	0.000 574		1 740		

由表3和表4可以看出,在50 kPa和100 kPa两种围压下,橡胶砂混合物的偏应力-轴向应变曲线经双曲线模型拟合得到的初始切线模量 E_0 、极限偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 以及破坏比 R_f 均随橡胶含量的增加而减小;在橡胶含量一定的情况下,橡胶砂混合物的初始切线模量 E_0 、极限偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 和破坏比 R_f 均随围压增大而增大;围压为100 kPa时橡胶砂混合物的初

始切线模量 E_0 比围压为50 kPa时提高了24%~81%。

为便于比较,对纯橡胶颗粒在6种围压下的偏应力-轴向应变曲线采用式(7)进行线性拟合分析,其拟合曲线如图5所示,拟合参数值如表5所示。

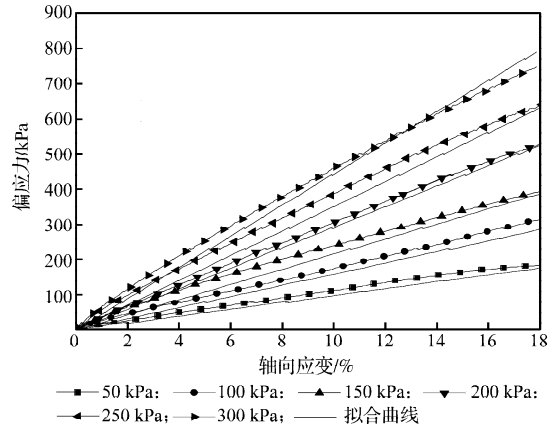


图5 纯橡胶颗粒在不同围压下的偏应力-轴向应变曲线及其拟合曲线

Fig. 5 The deviatoric stress-axial strain curves and fitted curves for pure rubber particles at different confining pressures

表5 纯橡胶颗粒在不同围压下的偏应力-轴向应变曲线拟合参数

Table 5 Fitted parameters of the deviatoric stress-axial strain curves of the pure rubber particles at different confining pressures

围压 / kPa	拟合参数		围压 / kPa	拟合参数	
	<i>a</i>	E_0/kPa		<i>a</i>	E_0/kPa
50	0.000 912	1 096	200	0.000 343	2 916
100	0.000 574	1 744	250	0.000 285	3 507
150	0.000 465	2 149	300	0.000 226	4 430

由图5可以看出,纯橡胶颗粒在不同围压下的偏应力随轴向应变的增加呈现近似线性增大,且无明显的峰值偏应力;此外,拟合曲线的斜率随围压的增大而增大,即纯橡胶颗粒的初始切线模量 E_0 随围压的增大而增大,此特性同样可由表5看出。因此,在本试验条件下,纯橡胶颗粒可认为是一种近似线弹性散体材料。

3.3 体应变-轴向应变特性

由于空气的压缩性比液体水要大,进出液管内保留的一段空气会对试样体应变的准确性造成微小影响,但从定性的角度考虑,该段空气对橡胶砂混合物的体应变-轴向应变规律的影响并不显著,且通过对得出的体应变-轴向应变曲线进行分析,即使其存在,也能够较好地得出试样的体应变-轴向应变特性。当围压分别为50 kPa和100 kPa时,7种不同配比的橡胶颗粒砂混合物的体应变-轴向应变曲线如图6所示。纯橡胶颗粒在6种围压下的体应变-轴向应变曲线如图7所示。

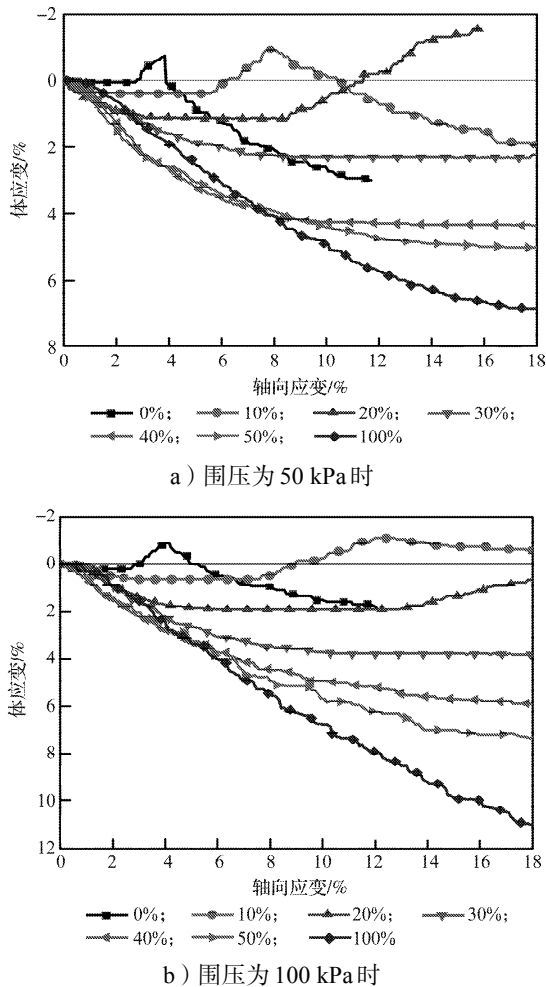


图6 不同配比的橡胶砂体应变-轴向应变曲线

Fig. 6 The volumetric strain-axial strain curves of rubber-sand mixtures with different mix proportion

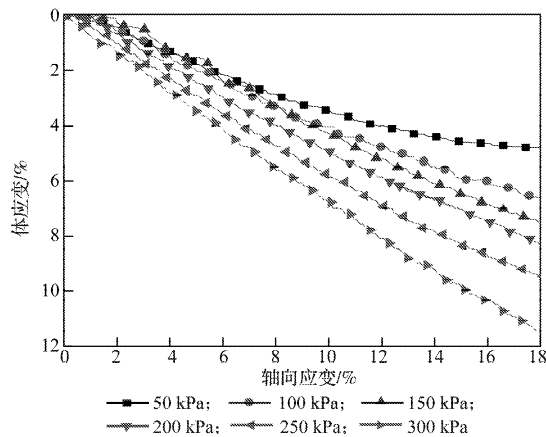


图7 不同围压下的纯橡胶颗粒体应变-轴向应变曲线

Fig. 7 The volumetric strain-axial strain curves of rubber-sand mixtures at different confining pressures

由图6可以看出,围压分别为50 kPa和100 kPa时,橡胶颗粒质量分数为10%的橡胶砂混合物体变特性与纯砂类似,在剪切之初时体积压缩,随后体积膨胀,当剪切至某一轴向应变值时,体积又被压缩;质量分数为20%的试样在剪切之初体积压缩,随后发

生剪胀,但剪胀之后没有出现再次压缩的现象;质量分数为30%~100%的试样则只表现出剪缩,并且在相同围压下,体积压缩量随橡胶含量的增加而变大。产生上述现象的原因是:在橡胶砂混合物中,砂颗粒可认为是不可压缩和不可发生几何变形的,而橡胶颗粒不可压缩^[14]但可以变形;当橡胶颗粒质量分数较小(如10%)时,在压缩剪切过程中,颗粒间的接触以砂-砂接触为主,所以其体变特性与纯砂类似,即剪切之初颗粒间孔隙大于出现剪胀时的临界孔隙,体积剪缩,试样逐渐被压密;当试样被剪切压缩至临界孔隙,在剪应力的继续作用下,颗粒间相互位置排列开始变化,粒间孔隙变大,出现剪胀;当剪切应力增大到某一值时,砂-砂颗粒接触处由于应力集中发生颗粒破碎或去棱角化,粒间孔隙减小,表现出再次剪缩。当橡胶颗粒质量分数增大到20%时,颗粒间的接触既有砂-砂接触,也有砂-胶接触,后者延缓了砂颗粒由于应力集中而发生去棱角化现象,表现出其剪胀之后的再次剪缩被延迟(如图6所示2种围压下20%配比的橡胶砂均未出现再次剪缩)。当橡胶颗粒含量继续增大时,砂-胶接触在总的颗粒接触中占到相当的比例,一方面橡胶颗粒与砂之间的摩擦角相较砂-砂颗粒间的大,抑制了砂颗粒的重新排列,另一方面橡胶颗粒在接触应力作用下发生几何变形,充分填充于粒间空隙,使得橡胶砂混合物总体空隙比减小,因此橡胶砂表现出单调的剪切压缩特性,且橡胶颗粒含量越高,粒间空隙得到填充的比例就越大,总孔隙比就越小,表现出体积压缩越大。

图7给出了纯橡胶颗粒在不同围压下的体应变-轴向应变关系,可以看出:纯橡胶颗粒在不同围压下剪切时的体应变为单调剪缩,并且体积压缩量随围压的变大而增加。这也说明在剪切时,橡胶颗粒由于几何可变形特性,使橡胶颗粒-砂混合料能够被压缩这一事实。

4 结论

本文通过对一定颗粒级配下的干燥橡胶颗粒-砂混合物在不同配比、不同围压下进行三轴压缩剪切试验研究,可得以下结论:

1) 橡胶颗粒质量分数为0%~30%时,橡胶砂的强度包线高于纯砂的强度包线,适当含量橡胶颗粒的掺入有利于改善砂的剪切强度特性。橡胶颗粒质量分数在10%附近时,内摩擦角出现最大值,在20%附近时,粘聚力出现最大值。

2) 橡胶砂混合物的偏应力-轴向应变曲线特性

在橡胶颗粒质量分数低于50%时与纯砂颗粒的偏应力-轴向应变曲线类似,呈应变软化型,并且有明显的峰值偏应力。橡胶颗粒质量分数大于等于50%的橡胶砂偏应力-轴向应变曲线特性与纯橡胶颗粒类似,表现出线弹性特性。在围压一定的情况下,橡胶砂混合物的初始切线模量 E_0 、极限偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 以及破坏比 R_f 均随橡胶含量的增加而减小;在橡胶含量一定的情况下,橡胶砂混合物的初始切线模量 E_0 、极限偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 和破坏比 R_f 均随围压增大而增大。

3) 橡胶砂混合物的体应变-轴向应变曲线特性在橡胶颗粒质量分数不高于20%时与纯砂颗粒的体应变-轴向应变曲线类似,即首先发生剪缩,随后体积膨胀。当橡胶颗粒质量分数高于20%时,橡胶砂混合物与纯橡胶颗粒的体应变-轴向应变曲线类似,在剪切过程中体积单调压缩。

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] Wu W Y, Benda C C, Cauley R F. Triaxial Determination of Shear Strength of Tire Chips[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(5): 479-482.
- [3] Yang S, Lohnes R A, Kjartanson B H. Mechanical Properties of Shredded Tires[J]. Geotechnical Testing Journal, 2002, 25(1): 44-52.
- [4] Lee J H, Salgado R, Bernal A, et al. Shredded Tires and Rubber-Sand as Light Weight Backfill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(2): 132-141.
- [5] Zornberg J G, Cabral A R, Viratjandr C. Behaviour of Tire Shred-Sand Mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(2): 227-241.
- [6] Gotteland P, Lambert S, Balachowski L. Strength Characteristics of Tyre Chips-Sand Mixtures[J]. Studia Geotechnica et Mechanica, 2005, 27(1/2): 55-66.
- [7] Rao G V, Dutta R K. Compressibility and Strength Behaviour of Sand-Tyre Chip Mixtures[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24(3): 711-724.
- [8] 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.
- [9] 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 Hanlong, 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.
- [10] 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 Lihua, Xiao Henglin, Tang Huiming, et al. Shear Performance Optimizing of Tire Shred-Sand Mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1063-1067.
- [11] 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.
- [12] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004:117.
Li Guangxin. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 117.
- [13] Duncan J M, Byrne P, Wong K S, et al. Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Soil Masses[R]. California: University of California, Berkeley, 1980.
- [14] 苏经宇,曾德民,田杰.隔震建筑概论[M].北京:冶金工业出版社,2012:28.
Su Jingyu, Zeng Demin, Tian Jie. Introduction to Isolation Buildings[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 28.

(责任编辑:邓光辉)