

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.130



干燥及饱和橡胶砂压缩和剪切特性

周恩全, 王琼, 陆建飞

(江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:将废弃轮胎作为建筑材料应用在土木工程领域是对其回收处理最有前景的方法之一。为了研究轮胎橡胶颗粒改良砂土的效果,选取橡胶颗粒与福建砂的混合土为研究对象,研究了橡胶砂的压缩和抗剪特性,分析了橡胶含量与干湿状态对橡胶砂力学特性的影响,并建立了双曲线模型预测橡胶砂受剪过程的剪应力与剪切位移关系。结果表明:橡胶砂的压缩变形随橡胶含量增大而增大,饱和橡胶砂的压缩变形明显大于干燥橡胶砂;橡胶砂的剪应力-剪切位移曲线表现出应变硬化特征;橡胶砂的抗剪强度与橡胶含量的关系不大;干燥试样内摩擦角随着橡胶含量的增大而降低,饱和试样的内摩擦角随着橡胶含量的增大而轻微升高;通过双曲线模型预测的剪应力-剪切位移关系曲线与试验结果吻合。

关键词:橡胶砂;压缩特性;抗剪特性;抗剪强度;双曲线模型

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)06-0104-07

Compressibility and shear properties of dry/saturated rubber sand

ZHOU Enquan, WANG Qiong, LU Jianfei

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

Abstract: The usage of scrap tires as construction materials in civil engineering is one of the most promising ways in recycling this troublesome waste material. In order to investigate the effect of adding granulated rubber in improving the performance of sand, the compressibility and shear properties of granulated rubber-Fujian sand mixtures was studied by confined compression tests and direct shear tests. The influence of rubber content and water content on the mechanical characteristics of rubber-sand mixtures were studied, and a hyperbolic model was established to predict the shear stress-strain relationship of rubber sand. The research findings are as follows: The compression deformation of rubber-sand mixtures increases with the rubber content, and the compression deformation of saturated mixtures is greater than that of the dry mixtures. The shear stress-horizontal displacement curve of rubber-sand mixtures shows a strain-hardening characteristic. There is no obvious relationship between shear strength and rubber content, and the pore water has great influence on internal friction angle of rubber sand. The internal friction angles of dry samples decrease with the increase of rubber content. The internal friction angles of saturated samples

收稿日期:2018-09-05

基金项目:国家自然科学基金(51508236);江苏省自然科学基金(BK20150519);中国博士后基金(2015M580397);江苏大学高级人才科研启动基金(15JDG172)

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

Received:2018-09-05

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51508236); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20150519); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2015M580397); Research Foundation for Advanced Talents of Jiangsu University (No. 15JDG172)

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

increase with the rubber content. The hyperbolic constitutive model can be used to predict the shear stress-displacement relationship of rubber sand.

Keywords: rubber sand; compression characteristics; shear behavior; shear strength; hyperbolic model

汽车工业的发展为现代社会提供便利的同时,也产生了愈来愈多难以处理的废旧轮胎。如果废旧轮胎处理不当,不仅造成环境污染,还会引发火灾并危害人们健康,如 1999 年美国 Stanislaus 县数百万废弃轮胎发生自燃,严重污染环境^[1]。研究表明,橡胶砂混合土具有体积密度低、物理化学耐久性好,渗透性与纯砂相当等优点^[2]。因此,橡胶砂作为轻质填料已探索性地应用于公路路堤^[3-4]、挡土墙后填土^[5-6],也作为消能垫层应用于动力基础或建筑基础中,以减少振动和地震影响^[7-9]。

对橡胶砂混合土的压缩特性及抗剪强度特性进行研究是将其应用到实际工程中的必要前提。目前,学者主要对干燥或稍湿状态的橡胶砂开展了压缩特性研究,研究表明,橡胶砂的压缩性能、回弹模量与橡胶含量密切相关,压缩变形和回弹变形随着橡胶含量的增加而增加^[10-11];Rao 等^[12]还指出当橡胶颗粒含量超过某一临界值(20%)时,其竖向应变会急剧增大;邓安等^[10]针对含水量约为 5%的橡胶砂开展压缩试验,提出了一种双曲线方程来描述橡胶砂变形与加载之间的关系。同样,关于其抗剪强度特性,学者们也主要关注了干燥或稍湿状态时的橡胶砂,但研究仍没有达成共识。Anvari 等^[13]、顾成壮等^[14]研究发现混合土的抗剪强度会随着橡胶颗粒的加入而变大,Ghazavi^[15]研究表明橡胶含量对混合土抗剪强度影响并不大,而 Tanchaisawat 等^[16]研究发现橡胶含量的增大反而会使得混合土抗剪强度下降;关于抗剪强度指标,绝大多数学者均认为加入橡胶颗粒会导致混合土内摩擦角变大,但 Sellaf 等^[5]研究却发现,随着橡胶含量的增加,橡胶砂内摩擦角的变化并无规律性。

这些研究积极推动了废旧橡胶的工程应用^[17-19],但研究主要关注干燥或稍湿状态下橡胶砂的力学特性,对高含水量状态下橡胶砂压缩及抗剪强度特性的研究不多,而作为公路路基填料或支护结构回填料的橡胶砂需要考虑处于潮湿或饱和状态等不利条件下的力学性质变化。本文采用压缩试验和直剪试验研究了干燥和饱和状态下橡胶砂混合土的压缩特性及抗剪强度特性。

1 压缩特性研究

1.1 试验材料、试样制备和试验过程

1.1.1 试验材料和试验设备 试验研究对象为橡胶砂混合土,由福建标准砂和橡胶颗粒混合制成,具体参数见表 1。福建标准砂的最大、最小干重度分别为 18.53、16.01 kN/m³,测定流程均按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)^[20]进行,橡胶颗粒是将废旧轮胎通过机械切割、破碎并除去钢绞线后得到,其粒径为 1~5 mm,根据 ASTM D 6270-08 (2012)划分属于橡胶颗粒^[21]。图 1、图 2 给出了试验所用材料的实物图和颗粒级配曲线。

压缩试验所用仪器为 WG-1C 型单杠杆中压固结仪。

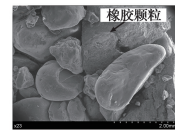
表 1 试验用福建标准砂及橡胶颗粒的物理参数

Table 1 Index properties of the Fujian sand and rubber particles used in the tests

指标	特征 颗粒 d_{50}	不均匀 系数 C_u	曲率 系数 C_c	最大 孔隙比 e_{max}	最小 孔隙比 e_{min}	颗粒 密度 G_s
福建标准砂	0.65	7.41	0.43	0.67	0.45	2.68
橡胶颗粒	3.10	1.48	0.88	1.32	0.74	1.21



(a) 福建标准砂 (b) 橡胶颗粒



(c) 扫描电镜拍摄混合土接触状态

图 1 试验用材料

Fig. 1 Materials tested

1.1.2 试样制备与试验方案 在压缩试验中,主要考虑橡胶质量含量和干湿状态对混合土压缩-回弹性能的影响,橡胶质量含量分别为 0%、5%、10%和 15%,干湿状态分别为干燥和饱和状态,具体见表 2。按照各工况混合土干密度不变为标准来控制制备试样,纯砂的相对实度为 50%,然后,根据等质

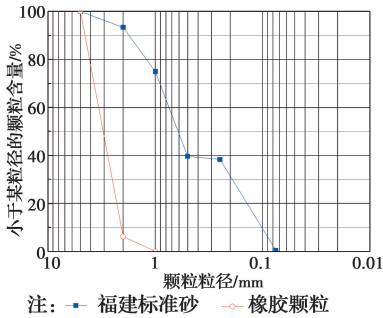


图2 福建标准砂和橡胶颗粒的颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain size distribution of Fujian sand and granulated rubber material

量替换原则制备不同橡胶含量的混合土。

$$RC(\%) = \frac{m_R}{m_R + m_S} \times 100 \quad (1)$$

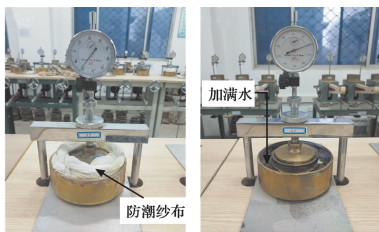
式中:RC指橡胶颗粒的质量含量,%; m_R 为橡胶质量; m_S 为砂质量。

表2 压缩试验的影响因素

Table 2 The influence factors of compression tests

橡胶质量含量/%	0	5	10	15	
含水量/干燥			0		
%	饱和	20.15	17.84	15.59	13.31

圆柱形试样的直径和高度分别为61.8 mm和20 mm,分3层击实制样。对于4个干燥工况,将击实后的干燥试样直接安装到固结仪里,调平后开始加载,如图3(a)所示。对于4个饱和工况,先将击实后的干燥试样置于真空饱和器内,抽2 h真空来保证试样完全饱和,然后将饱和试样安装到固结仪中,后续操作同干燥试样,开始进行压缩试验,如图3(b)所示。



(a) 干燥试样 (b) 饱和试样

图3 制备完成的试样

Fig. 3 Prepared samples

试验中设置了11级竖向荷载:12.5、25、50、100、200、400、800、400、200、100、0 kPa,每级加载后固结约24 h后视为稳定状态,即可进行下一级加载。

1.2 试验结果

图4给出了不同工况下橡胶砂试样的压缩、回弹曲线,可以发现:干燥和饱和状态下的橡胶砂试样的压缩特性均表现出前期迅速增长、后期增速减慢的应变发展模式;加载至最大荷载后,逐渐卸载至0 kPa,试样发生回弹,初期回弹缓慢,后期回弹发展迅速。当荷载及干湿状态相同时,试样的竖向累积应变随着橡胶含量的增加而增大,显然,这是因为橡胶颗粒具有较强压缩-回弹特性,加入橡胶颗粒后混合土的压缩回弹能力也大幅提升,因此,当荷载及干湿状态相同时,拥有更多橡胶颗粒的试样其累积竖向应变也相应更大。图4同时表明,在其他试验条件相同时,饱和试样的竖向应变显著大于干燥试样的竖向应变,这是因为饱和试样颗粒表面水膜润滑作用效果明显,增加了试样的可变形性能和适应变形能力。

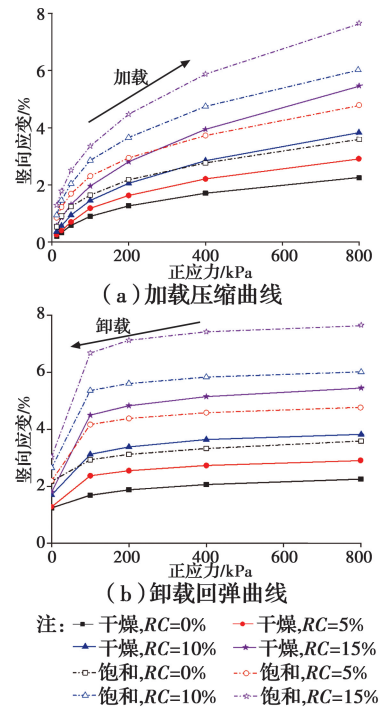


图4 不同工况下试样的压缩回弹曲线

Fig. 4 The vertical settlement and rebound curves of samples under different conditions

图5给出了不同工况下橡胶砂混合土竖向应变-橡胶颗粒含量关系曲线。其中“总应变”是指“弹性应变”与“塑性应变”之和。结果显示,在干燥、饱和状态下试样的应变发展呈现出一致的规律性:试样的总应变、弹性应变、塑性应变均随着橡胶含量的增大而增大,但塑性应变增幅不明显。值得注意的是,纯砂试样的塑性应变大于弹性应变,而加入橡胶

颗粒后混合土的塑性应变小于弹性应变,且两者的差异随着橡胶含量的增大而变大。显然,这是因为橡胶颗粒的存在显著增大了混合土的弹性变形性能。但在实际工程应用中,变形过大可能会导致结构的不稳定,因此,在将橡胶砂混合土应用于土木工程中时应充分考虑弹性变形过大带来的影响。

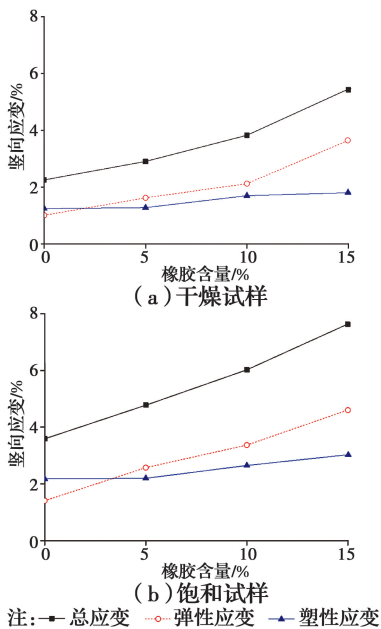


图 5 不同工况下试样的竖向应变

Fig. 5 Vertical strains under different conditions

2 抗剪特性研究

2.1 试验方案

直剪试验所用仪器为 ZJ 型应变控制式直剪仪,圆柱形试样的直径和高度分别为 61.8 mm 和 20 mm。

在直剪试验中,同样探讨了橡胶颗粒含量和干湿状态对橡胶砂抗剪特性的影响。橡胶质量含量分别为 0%、5%、10% 和 15%,干湿状态分别为干燥和饱和状态,具体参数同表 2。试验材料和试样制备方法与上述压缩试验相同。试验设置了 4 组正应力:100、200、300、400 kPa。剪切位移速率为 2.4 mm/min。

2.2 试验结果

图 6 为部分试样的剪应力-剪切位移关系曲线,可以发现:相同橡胶含量条件下,干燥及饱和试样的曲线具有一致的发展规律,但同样干燥或饱和状态下,纯砂和橡胶砂混合土的曲线发展呈现出应变软化和应变硬化两种不同形态。纯砂试样的应变软化具体表现为:前期剪应力随着剪切位移的增大而不

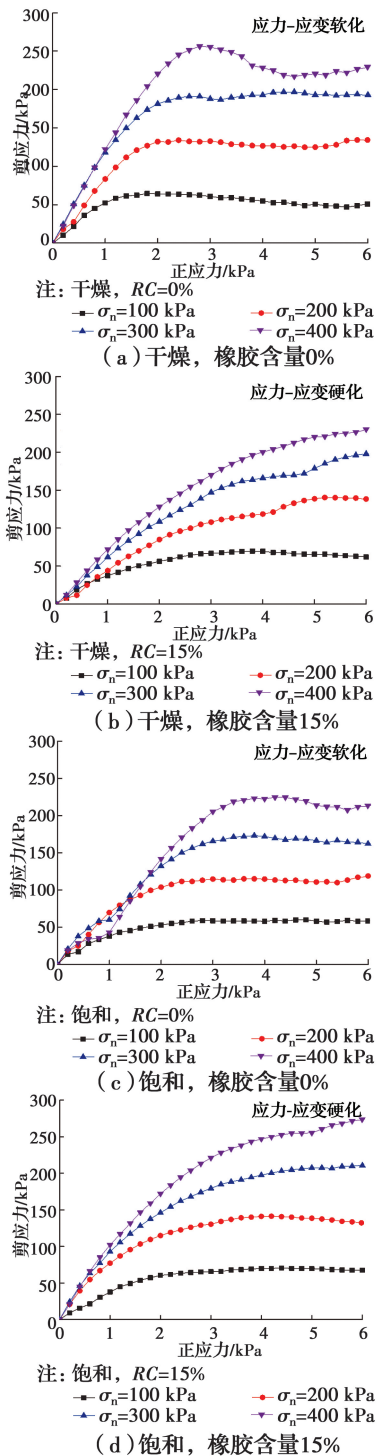


图 6 剪应力-剪切位移关系曲线

Fig. 6 Shear stress-horizontal displacement curves

断升高,达到峰值后其剪应力不再增大。橡胶砂混合土试样的应变硬化具体表现为:剪应力在剪切过程持续升高,并不出现峰值。造成这种应变硬化现象的原因是:混合土相比纯砂具有较大压缩性,这一点在前文的压缩试验中已经得到证实,因此压缩性较明显的混合土在受剪过程中具有一定的剪切收缩特性,宏观上即表现出应变硬化特征。

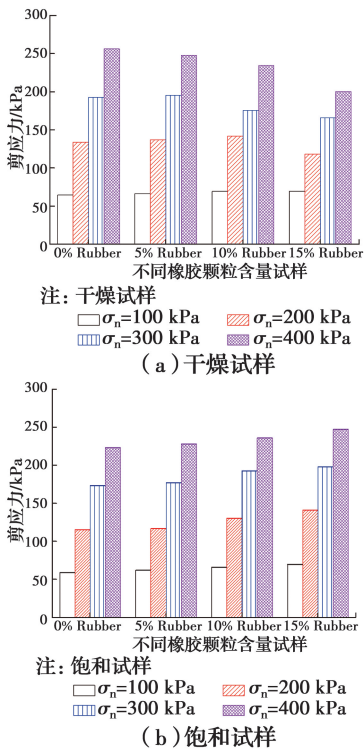


图7 不同试样的抗剪强度

Fig. 7 The shear strength of different samples

2.2.1 抗剪强度 图7给出了不同试样的抗剪强度,当无峰值应力出现时,将剪切位移4 mm所对应的剪应力定义为试样的抗剪强度^[20]。从图7中发现:1)抗剪强度随正应力增大而增大;2)总体上抗剪强度受橡胶颗粒含量的影响不明显,这与Ghazavi^[15]的研究结论是一致的。

2.2.2 抗剪强度指标 根据Mohr-Coulomb强度准则计算得到试样的抗剪强度指标内摩擦角。图8给出了内摩擦角与橡胶颗粒含量的关系曲线,从中可发现:干燥及饱和状态下内摩擦角与橡胶颗粒含量的关系表现出不同的发展趋势:干燥试样的内摩擦角随着橡胶含量增大而大幅度减小,但饱和试样橡胶含量增大,内摩擦角并没有下降,反而轻微增加。

内摩擦角由两部分组成:滑动摩擦 ω_1 和咬合摩擦 ω_2 。对于干燥试样,橡胶颗粒的加入可能会增大颗粒间的滑动摩擦 ω_1 ,但由于橡胶颗粒使得混合土试样呈现出明显的剪缩特性,导致剪胀效应减小,即咬合摩擦 ω_2 减小,显然,当前干燥条件下咬合摩擦 ω_2 减小的程度要大于滑动摩擦 ω_1 的增加,所以,干燥试样的内摩擦角随着橡胶含量增大而减小。对于饱和试样,一方面孔隙水破坏颗粒表面的吸附膜以及橡胶颗粒的加入同时增大了滑动摩擦 ω_1 ,另一方

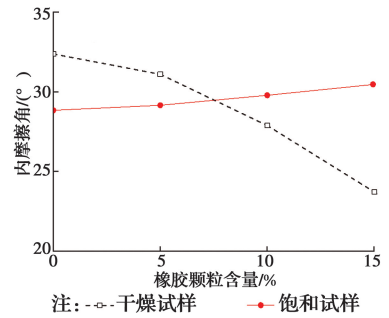


图8 内摩擦角与橡胶颗粒含量的关系

Fig. 8 The relationship between internal friction angle and rubber content

面,混合土的剪缩导致咬合摩擦 ω_2 减小,当前饱和条件下咬合摩擦 ω_2 减小的程度要小于滑动摩擦 ω_1 的增加,所以,饱和试样的内摩擦角随着橡胶含量的增大而轻微增大。需要说明的是,上述机理是基于试验结果分析,仍需要进一步的验证研究。

2.2.3 剪应力-剪切位移双曲线模型 通过上述分析发现,不同橡胶颗粒含量的橡胶砂混合土剪应力-剪切位移关系展现出应变软化和应变硬化两种模式,且在剪应力达到峰值前,其剪应力-剪切位移关系均呈现出双曲线特征,考虑利用Duncan-Chang双曲线模型来描述橡胶砂受剪切到达峰值前的剪应力-剪切位移关系。

将Duncan-Chang模型应用到直剪试验中,可以得到不同正应力下橡胶砂剪应力与剪切位移的关系

$$\tau = \frac{\delta/D}{a + b\delta/D} \quad (2)$$

式中: τ 为剪应力; δ 为剪切位移; D 为试样直径;参数 a 为初始切线模量 E_{si} 的倒数;参数 b 为极限剪切强度 τ_{ult} 的倒数。

1) 初始剪切模量

初始切线剪切模量 E_{si} 与正应力 σ_n 间具有的关系

$$E_{si} = k p_a \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^n \quad (3)$$

式中: k 为无量纲模型参数; n 为无量纲指数参数; p_a 为标准大气压,取101.4 kPa。

2) 模型参数的确定

将式(2)变换为:

$$\frac{\delta}{\tau} = aD + b\delta \quad (4)$$

由式(4)可见, $\frac{\delta}{\tau}$ 与 δ 成线性关系,根据试验数

据绘出 $\frac{\delta}{\tau}$ - δ 直线,则 aD 和 b 为直线的截距和斜率,即可得到相应条件下的初始剪切模量 E_{si} (试验值)和极限剪应力 τ_{ult} 。

对式(3)两边取对数,可得

$$\lg\left(\frac{E_{si}}{p_a}\right) = \lg k + n \lg\left(\frac{\sigma_n}{p_a}\right) \quad (5)$$

即 $\lg\left(\frac{E_{si}}{p_a}\right)$ 与 $\lg\left(\frac{\sigma_n}{p_a}\right)$ 成线性关系,利用 E_{si} 与正应力 σ_n 关系即可得到 k 和 n 值。据此可得到每一工况下初始剪切模量(预测值)的表达式。

图9为 $RC=15\%$ 时干燥、饱和橡胶砂试样的试验实测值和双曲线模型预测值对比图,并给出了决定系数 R^2 数值,不同试验条件下的决定系数 R^2 均在 0.8 左右,表明拟合曲线与试验数据点拟合度较好,可以使用 Duncan-Chang 模型对橡胶砂直剪试验的剪应力-剪切位移关系进行模拟。

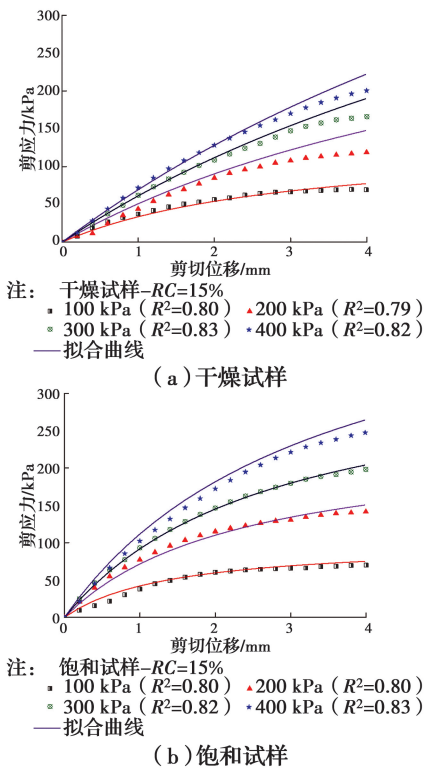


图9 不同干湿状态 $RC=15\%$ 橡胶砂试验和模型预测曲线

Fig. 9 Experimental and predicted behavior of different samples for $RC=15\%$

3 结论

1) 橡胶砂的压缩变形由弹性变形和塑性变形两部分组成,随着橡胶含量的增加,两者均逐渐增加,但弹性变形的增长更明显。饱和橡胶砂的压缩变形

要明显大于干燥橡胶砂的压缩变形量。

2) 纯砂的剪应力-剪切位移关系曲线表现出应变软化的特征,而加入橡胶颗粒后混合土的剪应力-剪切位移关系曲线表现出应变硬化特征。

3) 橡胶砂的抗剪强度随正应力的增大而增大,但受橡胶颗粒含量的影响不明显。干燥试样的内摩擦角随着橡胶颗粒含量的增加而减小,饱和试样的内摩擦角随着橡胶颗粒含量增加而变大。孔隙水对试样内摩擦角的影响较为明显且机理复杂,需进一步研究。

4) 利用 Duncan-Chang 双曲线模型预测橡胶砂受剪过程中剪应力-剪切位移关系曲线峰值前部分,结果是可行的。

参考文献:

- [1] HEYER L C. Swell, stiffness and strength of expansive soil-rubber (ESR) mixtures at various scales; Effect of specimen and rubber particle sizes [M]. Colorado State University, Colorado, 2012.
- [2] ADALIER K, PAMUK A. On the important mechanical properties of rubber-sand [J]. Advanced Materials Research, 2013, 685: 8-14.
- [3] GAO H M, BU C Y, WANG Z H, et al. Dynamic characteristics of expanded polystyrene composite soil under traffic loadings considering initial consolidation state [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 102: 86-98.
- [4] LI J, SABERIAN M, NGUYEN B T. Effect of crumb rubber on the mechanical properties of crushed recycled pavement materials [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 218: 291-299.
- [5] SELLAH H, TROUZINE H, HAMHAMI M, et al. Geotechnical properties of rubber tires and sediments mixtures [J]. Engineering Technology & Applied Science Research, 2014, 4(2): 618-624.
- [6] MOGHADAM M J, ZAD A, MEHRANNIA N, et al. Experimental evaluation of mechanically stabilized earth walls with recycled crumb rubbers [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(5): 947-957.
- [7] LI B, HUANG M S, ZENG X W. Dynamic behavior and liquefaction analysis of recycled-rubber sand mixtures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(11): 04016122.
- [8] MASHIRI M S, VINOD J S, SHEIKH M N.

- Liquefaction potential and dynamic properties of sand-tyre chip (STCh) mixtures[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2016, 39(1): 20150031.
- [9] EHSANI M, SHARIATMADARI N, MIRHOSSEINI S M. Shear modulus and damping ratio of sand-granulated rubber mixtures [J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(8): 3159-3167.
- [10] 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 A, FENG J R. Experimental study on sand-shredded tire lightweight fills [J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(1): 116-120. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] RAO G V, DUTTA R K. Compressibility and strength behaviour of sand-tyre chip mixtures[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2006, 24(3): 711-724.
- [13] ANVARI S M, SHOOSH PASHA I, KUTANAEI 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.
- [14] 顾成壮, 胡卸文, 张茂淳, 等. 强降雨下饱和平滑型滑坡坡体水流运动及其边坡稳定效应分析: 以四川汉源二蛮山滑坡为例[J]. *岩土力学*, 2013, 34(4): 1075-1081.
GU C Z, HU X W, ZHANG M C, et al. Analysis of flow motion and its effect on the slope stability of plane sliding landslide saturated under heavy-rain: A case study of Ermanshan landslide in Hanyuan county of Sichuan province [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(4): 1075-1081. (in Chinese)
- [15] GHAZAVI M. Shear strength characteristics of sand-mixed with granular rubber [J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2004, 22(3): 401-416.
- [16] TANCHAISAWAT T, BERGADO D T, VOOTIPRUEX P, et al. Interaction between geogrid reinforcement and tire chip-sand lightweight backfill [J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2010, 28(1): 119-127.
- [17] SHARIATMADARI N, ZEINALI S M, MIRZAEIFAR H, et al. Evaluating the effect of using shredded waste tire in the stone columns as an improvement technique [J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 176.
- [18] MEHRJARDI G T, TAFRESHI S N M, DAWSON A R. Numerical analysis on Buried pipes protected by combination of geocell reinforcement and rubber-soil mixture [J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2015, 13(2): 90-104.
- [19] KYSER D, RAVICHANDRAN N. Properties of chipped rubber roofing membrane and sand mixtures for civil engineering applications [J]. *Journal of Building Engineering*, 2016, 7: 103-113.
- [20] 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
Geotechnical test method standard: GB/T 50123—1999 [S]. Beijing: China Planning Publishing House, 1999.
- [21] Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications: ASTM D6270—08 (2012) [S]. Pennsylvania: ASTM International, 2012.

(编辑 胡玲)