

文章编号:1007-9629(2021)06-1242-06

橡胶-粉土轻质混合土击实及动变形特性研究

周恩全, 张蒋浩, 崔磊, 宗之鑫, 陆建飞

(江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:将废弃橡胶轮胎颗粒与粉土混合制成轻质混合土,并对其进行击实试验和动三轴试验,基于 Davidenkov 方程建立了混合土的动弹性模量比-应变本构方程,同时根据经验关系建立了混合土的阻尼比-应变本构方程.结果表明:掺入橡胶颗粒显著减小了橡胶-粉土轻质混合土的最大干密度和最优含水率;当围压相同时,橡胶颗粒掺量越高,混合土的最大动弹性模量越低,动弹性模量比衰减越快;掺入橡胶颗粒显著增大了粉土的阻尼比,当围压相同时,橡胶颗粒掺量越高,混合土的阻尼比越大.

关键词:橡胶颗粒;混合土;最优含水率;模量;阻尼比

中图分类号:TU43

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.06.016

Compaction and Dynamic Deformation Properties of Rubber-Silt Lightweight Mixed Soil

ZHOU Enquan, ZHANG Jianghao, CUI Lei, ZONG Zhixin, LU Jianfei

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

Abstract: Waste rubber tire particles were mixed with silt to make lightweight mixed soil, and the compaction tests and dynamic triaxial tests were carried out. Based on Davidenkov equation, the dynamic elastic modulus ratio-strain constitutive equation of mixed soil was established. The damping ratio-strain constitutive equation of mixed soil was established according to the empirical relationship. The results show that the maximum dry density and optimum water content of rubber-silt lightweight mixed soil are significantly reduced by adding rubber particles. When the confining pressure is the same, the higher content of rubber particles, the lower the maximum dynamic elastic modulus of mixed soil, and the faster the dynamic elastic modulus decays. The damping ratio of silt is significantly increased by adding rubber particles. When the confining pressure is the same, the higher the content of rubber particles, the higher the damping ratio of mixed soil.

Key words: rubber particle; mixed soil; optimum water content; modulus; damping ratio

中国汽车工业的快速发展导致废旧轮胎产量快速增长,而废旧轮胎的利用仍以堆放、焚烧等为主,既不经济还会造成环境污染^[1],因此学者们尝试将废旧轮胎破碎后与土混合作为填料,应用于路基、挡土墙等工程中^[2-4],以期为废旧轮胎再利用提供新的方法.

目前,对于橡胶混合土动模量与阻尼比的研究

仍未达成共识,且对橡胶-粉土混合土模量与阻尼特性的研究鲜有报道.Xia等^[5]发现橡胶黏土混合土的动弹性模量和动阻尼比的变化规律与纯黏土一致;Nakhaei等^[6]、卢震等^[7]发现随着橡胶含量的增加,橡胶黏土混合土的动弹性模量逐渐降低,阻尼比逐渐增大.在橡胶-砂/砾混合土方面,学者们一致认为混合土与纯土的动弹性模量与阻尼比发展规律一致,

收稿日期:2020-08-24; 修订日期:2020-12-05

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

第一作者:周恩全(1986—),男,山东烟台人,江苏大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail: enquan1986@126.com

随着橡胶含量的增大,动弹性模量随之减少.Pistolas等^[8-14]发现混合土的阻尼比随着橡胶含量的增大而增大;Madhusudhan等^[15]发现橡胶-砂混合土的阻尼比随着橡胶含量的增大而降低;李丽华等^[16]发现橡胶-砂混合土的等效阻尼比先随着橡胶含量的增大而增大,之后又随之减小.

本文将橡胶颗粒掺入粉土制成橡胶-粉土轻质混合土(RSMS),通过击实试验和动三轴试验研究混合土的最大干密度、最优含水率、动弹性模量及其阻尼比特性,为橡胶-粉土轻质土的工程应用提供参考.

1 试验

1.1 原材料

粉土(S)取自江苏省镇江市,塑限(质量分数,本文涉及的塑限、含水率等除特别指明外均为质量分数)为19.41%,液限为26.35%,最优含水率为17.0%;橡胶颗粒(RP)由废旧汽车轮胎经机械切割、破碎后去除钢绞线得到.粉土和橡胶颗粒的基本物理性能见表1.表中 C_u 为不均匀系数; C_c 为曲率系数; $e_{\max}$ 为最大孔隙比; $e_{\min}$ 为最小孔隙比; G_s 为颗粒相对密度.

表1 粉土和橡胶颗粒的基本物理性能
Table 1 Basic physical properties of slit and rubber particles

Material	C_u	C_c	$e_{\max}$	$e_{\min}$	G_s
S	12.67	0.88	1.50	0.64	2.71
RP	1.48	0.88	1.32	0.74	1.21

1.2 试验方法

1.2.1 击实试验

击实试验主要研究橡胶颗粒掺量 φ_{RP} (本文橡胶颗粒掺量均为体积分数)对混合土击实特性的影响,取 $\varphi_{RP}=0\%、10\%、20\%、30\%$,制备的混合土分别记为RSMS0、RSMS10、RSMS20、RSMS30,其中RSMS0即为纯粉土.试验仪器采用ZLJ-I型全自动两用击实仪,击实筒直径100 mm,高127 mm.试验过程为:制备干燥土样,并配置目标含水率,每组混合土制备5种含水率试样,且相邻2种试样的含水率差值为2%;反复搅拌使橡胶颗粒与粉土混合均匀,覆上保鲜膜,静置24 h;将击实筒内壁均匀涂抹凡士林,称量击实筒的质量;将试样均匀分3层进行击实,每层锤击25下,每层击实完毕需对试样表面刮毛,在第3次装样前需安装套环;击实完毕后,取下护筒,刮除超出筒壁部分的土,将击实筒外壁清理干净,称取质量;在试样的中心处取2点,收集土样,质量为20 g,用于测量试样的实际含水率 w ,计算试样干密度 ρ_d ,

并将最大干密度对应的含水率定义为最优含水率.

1.2.2 动变形特性试验

动变形特性试验主要研究橡胶颗粒掺量、围压 p_c ($p_c=50、100、200$ kPa)对混合土动变形特性的影响,采用DSZ-2型动三轴仪,输入1 Hz正弦波加载,试样直径39.1 mm,高80 mm.试验过程为:分4层均匀制备试样,每层混合土按预设质量充分搅拌以保证橡胶颗粒分布均匀,每层混合土压实到预定高度后,将土样表面刮毛,再进行下1层制样;接着将试样装入压力仓中进行排水等压固结,当试样变形量不大于0.01 mm/h时完成等压固结;然后对固结完成试样进行应力控制式不排水加载,应力幅值逐级增大,增大幅值为10 kPa,每级应力循环8次,加载完毕后进行5 min排水固结;最后根据应力-应变滞回曲线计算混合土的动弹性模量和阻尼比.考虑试样每级8次应力循环所表现出的动力特性具有一定的差异,采用每级荷载2~7次循环的动弹性模量和阻尼比平均值.

2 击实特性

图1为混合土的击实曲线.由图1可见:含水率较低时,试样(除RSMS20以外)的干密度随含水率升高而逐渐增大,表明试样的击实效果逐步提升;含水率达到最优含水率之后,随着含水率的进一步升高,由于“橡皮土”效应,试样干密度逐渐降低,即试样的击实效果逐步减弱.

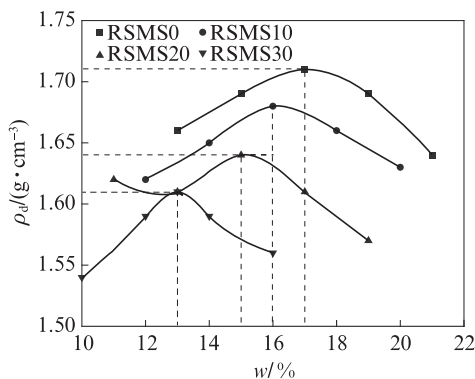


图1 混合土的击实曲线

Fig. 1 Compaction curves of mixed soil

由图1还可见,不同掺量橡胶颗粒的掺入,可以明显改变粉土的击实特性.与纯粉土相比,混合土的最大干密度和最优含水率均显著降低,且随着橡胶颗粒掺量的增大,其最大干密度不断减小,RSMS30的最大干密度和最优含水率分别比纯粉土RSMS0降低约5.85%、23.5%.橡胶颗粒的掺入有一定的轻质效果,这是由于本文采用“等体积替换”的原则制备混合土试样,

而橡胶颗粒的密度明显低于粉土,因此橡胶颗粒掺量越大的混合土试样干密度就越低.最优含水率的变化是因为:(1)橡胶颗粒的掺入使混合土的粒径更加不均匀,级配变得更加良好(见图2),且橡胶颗粒掺量越大,混合土级配越良好,混合土越容易压密;(2)橡胶颗粒粒径较大,颗粒比表面积较小,随着橡胶颗粒掺量的增大,混合土中颗粒与颗粒之间的总接触面积逐渐减小,那么增加颗粒间的润滑作用所需的水就越来越少,颗粒易移动,混合土更易压密.

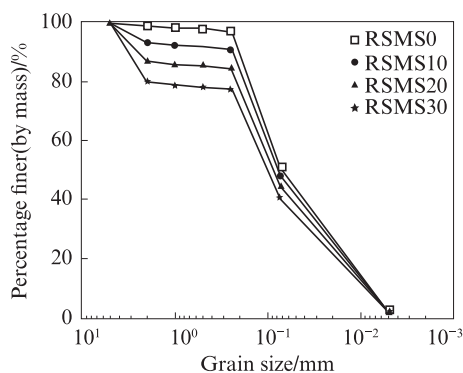
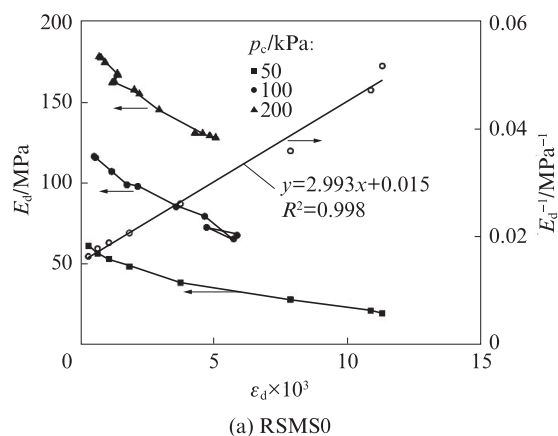
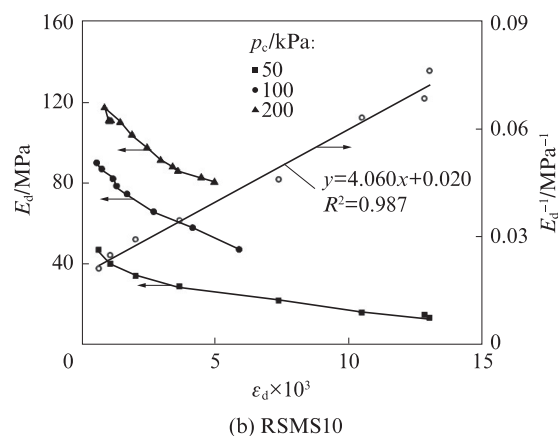


图2 混合土的级配曲线

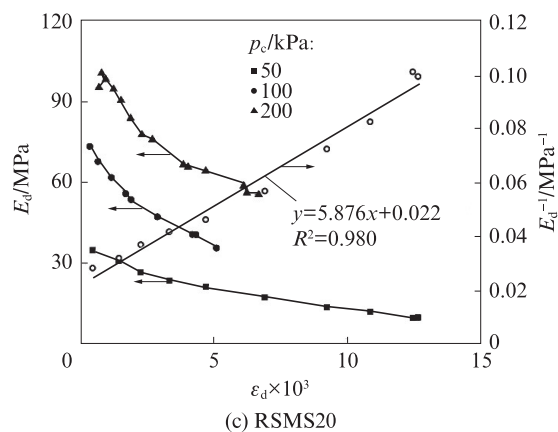
Fig. 2 Grain size distributions of mixed soil



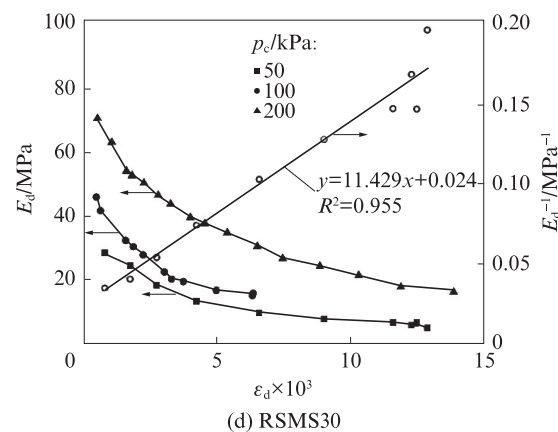
(a) RSMS0



(b) RSMS10



(c) RSMS20



(d) RSMS30

图3 混合土的 E_d - ϵ_d 和 E_d^{-1} - ϵ_d 曲线Fig. 3 E_d - ϵ_d and E_d^{-1} - ϵ_d curves of mixed soil

3 动变形特性

3.1 动弹性模量

3.1.1 动弹性模量 E_d 与应变 ϵ_d 的关系

混合土的 E_d - ϵ_d 曲线见图3.由图3可见:混合土的动弹性模量随其应变增大呈现逐渐衰减的趋势;同一应变水平下,围压越高,混合土动弹性模量越大,这是因为随着围压的增大,试样受到的约束应力越大,颗粒之间的接触应力越大,试样的变形能力就越弱,即表现出其动弹性模量越高;加入橡胶颗粒后,同一应变水平下,混合物的动弹性模量明显降低,且随着橡胶颗粒掺量的增大,其动弹性模量亦逐渐降低,显然是因为橡胶颗粒本身相比粉土具有相对较大的弹性变形性能,加入橡胶颗粒后,混合土的变形性能势必也会相应增大.即在同样的应力水平下,橡胶颗粒掺量越大的混合土发生的应变越大,这与周恩全等^[17]对橡胶混合土压缩特性的研究结果是一致的.因此,在橡胶混合土工程应用时,必须要对其较大的变形能力给予充分的考虑.

3.1.2 最大动弹性模量 $E_{d,max}$

$p_c=50$ kPa时,混合土的 E_d^{-1} - ϵ_d 曲线见图3.由图

3可见: E_d^{-1} 与 ϵ_d 呈现出典型的线性关系,表明纯粉土及混合土的动应力与动应变关系均符合双曲线模型^[18-19],即 E_d^{-1} 与 ϵ_d 之间的关系可表示为:

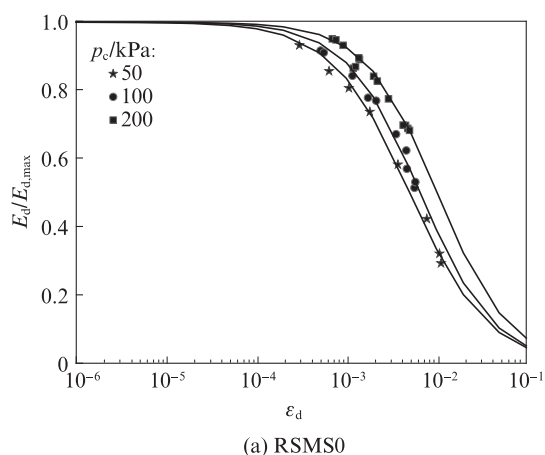
$$E_d^{-1} = a + b\epsilon_d \quad (1)$$

式中: a 、 b 分别为 E_d^{-1} - ϵ_d 直线的截距、斜率。

令 $\epsilon_d=0$,由式(1)可得到 $E_{d,\max}=a^{-1}$,其计算结果见表2。由表2可见, $E_{d,\max}$ 受围压、橡胶颗粒掺量的影响显著:纯粉土及混合土的 $E_{d,\max}$ 与围压成正相关,随着围压的增大, $E_{d,\max}$ 不断增大;混合土的 $E_{d,\max}$ 与橡胶颗粒掺量成负相关,随着橡胶颗粒掺量的增大, $E_{d,\max}$ 不断减小。

表2 不同围压下混合土的 $E_{d,\max}$ 计算结果
Table 2 Calculated $E_{d,\max}$ of mixed soil under different confining pressures

p_c/kPa	MPa			
	RSMS0	RSMS10	RSMS20	RSMS30
50	65.551	50.355	45.175	41.836
100	126.879	98.417	78.454	49.223
200	187.204	126.301	108.845	79.603



3.1.3 动弹性模量比 $E_d/E_{d,\max}$ 与应变 ϵ_d 关系

为了更直观描述混合土动弹性模量的衰退特征,基于Davidenkov模型^[21],建立了归一化后的 $E_d/E_{d,\max}$ - ϵ_d 关系模型:

$$\frac{E_d}{E_{d,\max}} = 1 - \left[\frac{\left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_0} \right)^{2B}}{1 + \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_0} \right)^{2B}} \right]^A \quad (2)$$

式中: A 、 B 和 ϵ_0 均为无量纲拟合参数。

不同围压下混合土的 $E_d/E_{d,\max}$ - ϵ_d 曲线见图4。由图4可见:围压对纯粉土及混合土的影响展示出一致的规律性, $E_d/E_{d,\max}$ 随着 ϵ_d 增大而逐渐衰减;随着围压的增大, $E_d/E_{d,\max}$ 的衰减速率越缓慢,即在相同的 ϵ_d 水平下,围压越大, $E_d/E_{d,\max}$ 的值也越大。

不同橡胶颗粒掺量混合土的 $E_d/E_{d,\max}$ - ϵ_d 曲线见图5。由图5可见:橡胶颗粒的掺入明显加快了 $E_d/E_{d,\max}$ 的衰减速率;随着橡胶颗粒掺量的增大, $E_d/E_{d,\max}$ 衰减的速率增大。

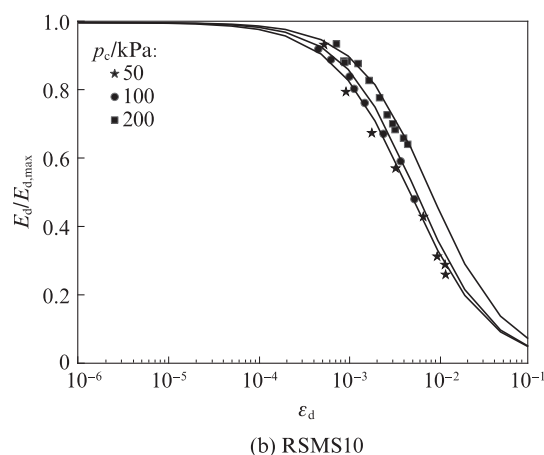


图4 不同围压下混合土的 $E_d/E_{d,\max}$ - ϵ_d
Fig. 4 $E_d/E_{d,\max}$ - ϵ_d curves of mixed soil under different confining pressures

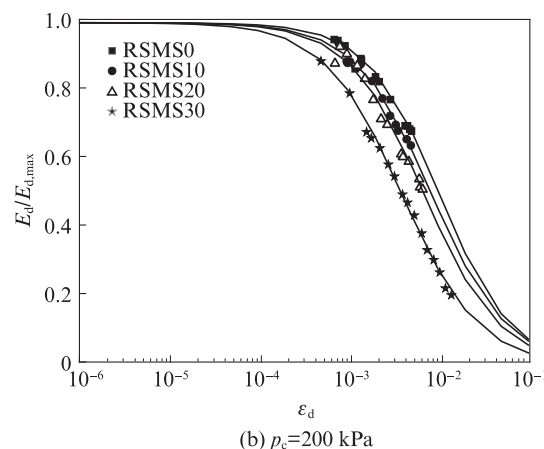
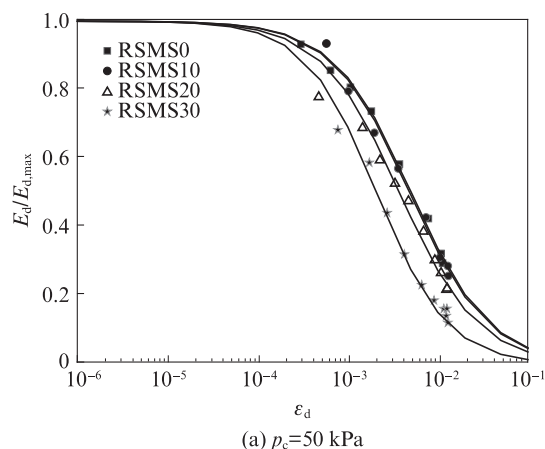


图5 不同橡胶颗粒掺量混合土的 $E_d/E_{d,\max}$ - ϵ_d 的曲线
Fig. 5 $E_d/E_{d,\max}$ - ϵ_d curves of mixed soil with different φ_{RP}

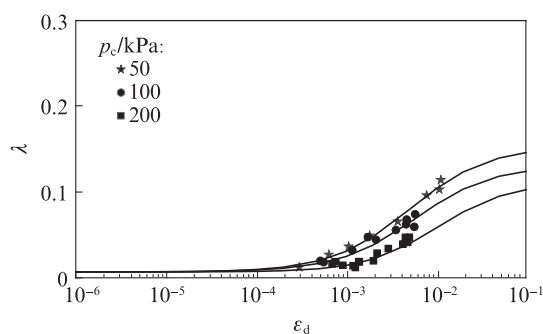
3.2 阻尼比

借鉴阻尼比 λ 与归一化剪切模量 $G/G_{\max}$ 的经验关系^[20],提出描述混合土 λ 与 $E_d/E_{d,\max}$ 关系式:

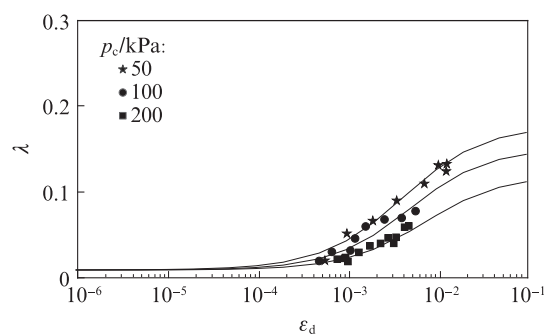
$$\lambda = \lambda_{\min} + \lambda_0 \left(1 - \frac{E_d}{E_{d,\max}} \right)^C \quad (3)$$

式中: $\lambda_{\min}$ 为混合土的基本阻尼比,与试样的性质有关; λ_0 、 C 为拟合参数,与试样的性质有关,决定阻尼比曲线的形状特性。

不同围压下混合土的 λ - ϵ_d 曲线见图6。由图6可见,围压对纯粉土及混合土 λ 的影响展示出一致的规律性,随着围压的增大, λ 随着 ϵ_d 上升的速率减缓,即在相同的 ϵ_d 水平下,围压越大, λ 越小。



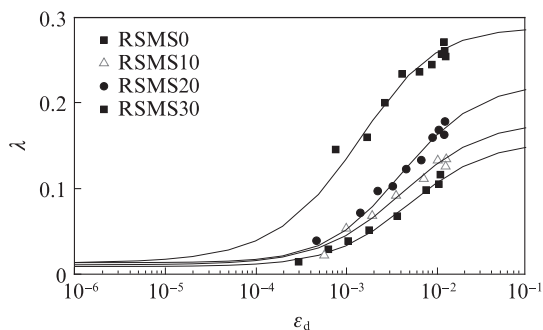
(a) RSMS0



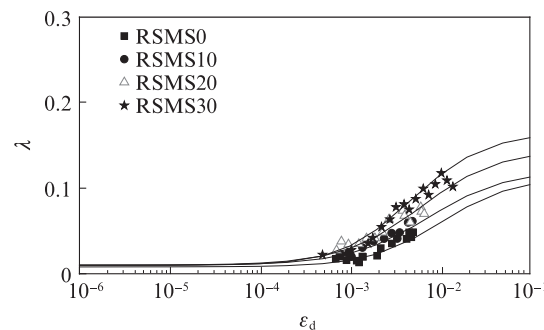
(b) RSMS10

图6 不同围压下混合土的 λ - ϵ_d 曲线

Fig. 6 λ - ϵ_d curves of mixed soil under different confining pressures



(a) $p_c = 50$ kPa



(b) $p_c = 200$ kPa

图7 不同橡胶颗粒掺量混合土的 λ - ϵ_d 的曲线

Fig. 7 λ - ϵ_d curves of mixed soil with different φ_{RP}

4 结论

(1)橡胶-粉土轻质混合土的最大干密度和最优含水率随着橡胶颗粒掺量的增大而减小。当橡胶颗粒的体积分数从0%增大到30%时,混合土的干密度降低了5.85%,表现出一定的轻质效果;最优含水率降低了23.5%。

(2)混合土的最大动弹性模量随着围压的增大而增大,随着橡胶颗粒掺量的增大而降低;基于

不同橡胶颗粒掺量混合土的 λ - ϵ_d 曲线见图7。由图7可见,掺入橡胶颗粒对粉土的 λ 有明显的影响:随着橡胶颗粒掺量的增大, λ 随着 ϵ_d 增大而上升的速率加快,即在相同的 ϵ_d 水平下,橡胶颗粒掺量越大, λ 也越大。这是因为橡胶颗粒能够通过其本身的变形耗散所承受的荷载,具备良好的阻尼特性,因此掺入橡胶颗粒后,混合土的阻尼比增大,并且随着橡胶颗粒掺量的增加,混合土的阻尼比不断增大;加入橡胶颗粒后,减小了混合土的比表面积,会减小由于颗粒相互作用而引发的耗能阻尼,提高其耗能特性,这也证明了利用橡胶混合土作为减振耗能的岩土填料是可行的。

Davidenkova模型建立的混合土动弹性模量比-应变本构方程表明,围压越大、橡胶颗粒掺量越低,混合土的动弹性模量比随应变衰减越缓慢。

(3)建立的混合土阻尼比-应变本构方程表明,当围压相同时,橡胶颗粒掺量越高,混合土的阻尼比越大。这说明在粉土中加入橡胶颗粒,能显著增大其阻尼比,提高耗能特性,利用橡胶改良粉土作为减振耗能的岩土填料是可行的。

(4)由于动三轴试验本身测试精度的局限性,本

文试验数据主要集中在 $10^{-4} < \epsilon_d < 10^{-2}$ 这一区间,需要进一步研究 $\epsilon_d < 10^{-4}$ 时混合土的动变形特性.本文的研究初步得到了将橡胶颗粒部分代替粉土的混合土击实及动变形特性,为今后橡胶-粉土混合土的研究及工程应用提供了有益的数据和参考.但是实际工程比室内试验要复杂多样,需要对混合土的利用开展持续深入研究,进一步验证混合土在工程实践中应用的合理性和有效性.

参考文献:

- [1] ENQUAN Z, QIONG W. Experimental investigation on shear strength and liquefaction potential of rubber-sand mixtures[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019(6):1-11.
- [2] YOON S, PREZZI M, SIDDIKI N Z. Construction of a test embankment using a sand-tire shred mixture as fill material[J]. *Waste Management*, 2006, 26(9):1033-1044.
- [3] YOUWAI S, BERGADO D T. Numerical analysis of reinforced wall using rubber tire chips-sand mixtures as backfill material[J]. *Computers and Geotechnics*, 2004, 31(2):103-114.
- [4] 周恩全, 宗之鑫, 王琼, 等. 橡胶-粉土轻质混合土中管道动力响应特性[J]. *岩土力学*, 2020, 41(4):1388-1395.
ZHOU Enquan, ZONG Zhixin, WANG Qiong, et al. Dynamic characteristics of pipe buried in rubber-silt lightweight mixtures[J]. *Rock and Soil Mechanics*. 2020, 41(4):1388-1395. (in Chinese)
- [5] XIA R J, WEI H H, WANG G B, et al. Experimental research on dynamic characteristics of rubber model soil[C]// *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering*. Shanghai:Springer Nature Singapore, 2018:358-367.
- [6] NAKHAEI A, MARANDI S M, KERMANI S S. Effect of granulated rubber-soil mixture on reducing retaining walls displacement under earthquake forces [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 94-96:3-17.
- [7] 卢震, 陈开圣. 橡胶黏土混合土动剪切模量及阻尼比试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(2):250-257.
LU Zhen, CHEN Kaisheng. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of rubber-clay mixture [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(2):250-257. (in Chinese)
- [8] PISTOLAS G A, ANASTASIADIS A, PITILAKIS K. Dynamic behaviour of granular soil materials mixed with granulated rubber: Effect of rubber content and granularity on the small-strain shear modulus and damping ratio[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, 36(2):1267-1281.
- [9] PISTOLAS G A, ANASTASIADIS A, PITILAKIS K. Dynamic behaviour of granular soil materials mixed with granulated rubber: Influence of rubber content and mean grain size ratio on shear modulus and damping ratio for a wide strain range[J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2018, 3:1-14.
- [10] PISTOLAS G A, Anastasiadis A, PITILAKIS K. Dynamic properties of gravel-recycled rubber mixtures: Resonant column and cyclic triaxial tests[C]// *Proceedings of the 16th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. Edinburgh:ICE Publishing, 2015:2613-2618.
- [11] FIROOZJANI Y R, MARANDI S M, KERMANI S S. Effect of granulated rubber-soil mixture on reducing retaining walls displacement under earthquake forces [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 94-96:3-17.
- [12] ANASTASIADIS A, SENETAKIS K, PITILAKIS K. Small-strain shear modulus and damping ratio of sand-rubber and gravel-rubber mixtures [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2012, 30(2):363-382.
- [13] 孔德森, 陈文杰, 贾腾, 等. 动荷载作用下RST轻质土变形特性的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(增刊2):874-878.
KONG Desen, CHEN Wenjie, JIA Teng, et al. Deformation characteristics of RST lightweight soils under dynamic loads [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35 (Suppl 2):874-878. (in Chinese)
- [14] 李晓雪, 庄海洋, 张沁源, 等. 橡胶颗粒土动剪模量与阻尼比的共振柱试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(2):265-271.
LI Xiaoxue, ZHUANG Haiyang, ZHANG Qinyuan, et al. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of rubber-sand mixed soil[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(2):265-271. (in Chinese)
- [15] MADHUSUDAN B R, BOOMINATHAN A, BANERJEE S. Factors affecting strength and stiffness of dry sand-rubber tire shred mixtures [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, 37(4):2763-2780.
- [16] 李丽华, 肖衡林, 唐辉明, 等. 轮胎颗粒混合土动力特性参数影响规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(2):359-364.
LI Lihua, XIAO Henglin, TANG Huiming, et al. Dynamic properties variation of tire shred-soil mixtures [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(2):359-364. (in Chinese)
- [17] 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*, 2019, 41(6):104-110.
ZHOU Enquan, WANG Qiong, LU Jianfei. Compressibility and shear properties of dry/saturated rubber sand [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41 (6) : 104-110. (in Chinese)
- [18] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves [J]. *Geotechnical Special Publication*, 1972, 98(7):667-692
- [19] KONDER R L. Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils [J]. *ASCE Soil Mechanics and Foundation Division Journal*, 1963, 89(1):115-143.
- [20] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京:科学出版社, 2007:143.
CHEN Guoxing. *Geotechnical earthquake engineering* [M]. Beijing:Science Press, 2007:143. (in Chinese)
- [21] MARTIN P P, SEED H B. One-dimensional dynamic ground response analyses [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1982, 108(7):935-952.