

文章编号:1007-9629(2021)03-0597-09

饱和橡胶颗粒-砂混合料的动力学特性

庄海洋^{1,2}, 刘启菲¹, 吴 琪¹, 李晓雪¹, 陈国兴¹

(1. 南京工业大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 将废旧轮胎加工粉碎后与砂混合制成橡胶颗粒-砂混合料, 并对其进行了循环三轴试验研究。结果表明: 随着橡胶掺量(w_R)的增大, 橡胶颗粒-砂混合料破坏振次(N_f)呈先减小后增大的趋势, 在循环应力比不同的条件下, N_f 达到最小值所需的橡胶掺量有所差异; 随着橡胶掺量的增大, 橡胶颗粒-砂混合料双幅剪应变幅值与循环振次比的关系曲线由突变增长型慢慢过渡到线性增长型; 当 $w_R = 0\% \sim 20\%$ 时, 橡胶颗粒-砂混合料的动力学特性与纯砂相似; 当 $w_R = 30\% \sim 50\%$ 时, 随着橡胶掺量的增大, 橡胶颗粒-砂混合料的动力学特性由砂土向橡胶颗粒逐步转变; 当橡胶掺量超过 70% 时, 橡胶颗粒-砂混合料的动力学特性与纯橡胶颗粒一致。

关键词: 橡胶颗粒-砂混合料; 动三轴试验; 动强度; 滞回圈; 能量耗散

中图分类号: TU521.1

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.021

Dynamic Behavior of Saturated Rubber Particle-Sand Mixture

ZHUANG Haiyang^{1,2}, LIU Qi-fei¹, WU Qi¹, LI Xiao-xue¹, CHEN Guo-xing¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Mixture containing rubber particle from wasted tire and sand was prepared and a series of cyclic triaxial tests were conducted. The results show that with the increase of rubber content(w_R), the failure vibration(N_f) increases at first then decreases. Also, the rubber content corresponding to the failure vibration differs from different cyclic stress ratios. When rubber content increases, the curves of the relationship between the double-shear strain amplitude and the cyclic vibration ratio gradually transform from abrupt growth type to linear growth type. Meanwhile, it is found that rubber content has a significant effect on the main dynamic characteristics of mixtures. When $w_R = 0\% - 20\%$, the rubber particle-sand mixture is similar to pure sand. With $w_R = 30\% - 50\%$, the dynamic characteristics of mixture gradually change from sand to rubber particles as rubber content increases. When rubber content exceeds 70%, the characteristics of the mixture are consistent with pure rubber particles. Based on the basic theory of micro-soil dynamics and the characteristics of energy dissipation, the experimental phenomena and their laws are preliminarily explained.

Key words: rubber particle-sand mixture; cyclic triaxial test; dynamic strength; hysteresis loop; cumulative energy dissipation

随着经济的发展, 汽车轮胎的磨损及汽车的更新换代迅速增加, 废旧轮胎累积量越来越大。由于其

难分解且易燃, 如果处理不当则会造成环境污染。将废旧轮胎研磨粉碎后与砂混合而成的橡胶颗粒土,

收稿日期: 2019-11-26; 修订日期: 2020-01-09

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2020711); 江苏省“六大人才高峰”资助计划(JZ-2018-022); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX19_0879)

第一作者: 庄海洋(1978—), 男, 江苏宿迁人, 南京工业大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zhuang7802@163.com

不仅具有密度轻、恢复变形能力显著、耗能大等特点^[1],而且可以作为轻质替代材料应用于路基、挡土墙的回填,以及桥头码头的隔振等^[2-3].砂土液化特性研究多数偏重于常规类型土,对饱和橡胶颗粒土的液化特性研究较少.

要想清晰地了解土体液化破坏过程,自然离不开土工试验^[4-6].Seed等^[7]在研究液化问题时大量使用了动三轴试验数据. Edinçiler等^[8]、Anbazhagan等^[9]亦利用室内试验探究了橡胶颗粒土的动力特性. Nakhaei等^[10]对饱和橡胶颗粒土混合物进行了一系列固结不排水动三轴试验,提出了能预测不同橡胶掺量下混合物在不同围压和小剪切应变幅值条件下的动态特性模型. Senetakis等^[11]、Anastasiadis等^[12]通过室内试验研究了不同橡胶掺量下橡胶颗粒土的动力特性. 李博等^[13]借助循环三轴试验仪分析了橡胶粉末掺量和橡胶粉末粒径对橡胶土抗液化强度的影响. Panjamani等^[14]探讨了橡胶颗粒土的抗剪强度、耗能特性和刚度的变化规律,发现其主要受橡胶粒径、含量、正应力和围压的影响. 吴延辉等^[15]论证了砂与橡胶颗粒符合隔震装置的需求. 陈辉^[16]借助直剪试验和动三轴试验探讨了橡胶颗粒土抗剪强度的变化规律及影响因素. 熊伟等^[17]通过振动台试验探究了橡胶砂隔振系统的相关性能,发现橡胶砂隔振系统能够很好地减小上部结构加速度响应.

已有研究多涉及饱和砂土的液化特性,而对饱和橡胶颗粒土的液化特性的系统研究相对不足. 鉴于此,本文利用动三轴试验仪系统探究饱和橡胶颗粒-砂混合料在循环荷载下的动力学响应,结合混合料液化时所表现出来的力学特征,选取应变作为液化判别标准,并从液化强度、剪切应变、滞回圈和能量耗散等角度,考察不同橡胶掺量、不同相对密实度以及不同粒径条件下橡胶颗粒-砂混合料的液化特性,旨在为橡胶颗粒-砂混合料的相关工程应用提供科学依据和合理的参数.

1 试验原理和设备

采用 GDS 动三轴试验系统进行不排水循环三轴试验. 围压和反压的加载和测量由标准的压力/体积控制器完成,压强最大可达 1 MPa. 可独立控制轴向力,进行静/动态加载,可施加最大 10 kN、频率为 2 Hz 的动态荷载. 轴向力传感器位于试样顶部,轴向位移传感器位于试样底部,在试样底部施加反压,在试样顶部测量超静孔隙水压力(Δu).

2 试验方案

2.1 试验材料

选用废旧轮胎粉碎而成的橡胶颗粒与福建砂混合获得橡胶颗粒-砂混合料,橡胶粒径(d_R)取 1~2 mm、2~3 mm、3~4 mm 以及 4~6 mm,砂粒径为 0.075~0.25 mm. 图 1 为橡胶颗粒与福建砂的级配曲线. 将各粒径橡胶颗粒与福建砂混合获得对应的橡胶颗粒-砂混合料,分别编号为 M_{1-2} 、 M_{2-3} 、 M_{3-4} 、 M_{4-6} . 表 1 为橡胶颗粒-砂混合料的基本物理性能. 其中 w_R 为橡胶掺量(质量分数,文中涉及的掺量、含水率等除特别说明外均为质量分数), d_{10} 、 d_{50} 分别表示小于该粒径的颗粒质量占总颗粒质量的 10% 和 50%, ρ_{dmin} 为最小干密度, ρ_{dmax} 为最大干密度, C_c 为曲率系数, C_u 为不均匀系数.

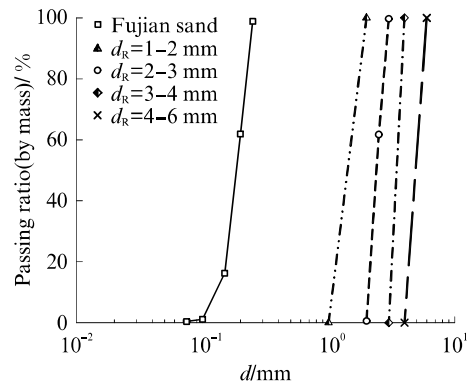


图 1 橡胶颗粒与福建砂的级配曲线
Fig. 1 Gradation curves of rubber particle and Fujian sand

表 1 橡胶颗粒-砂混合料的基本物理性能
Table 1 Basic physical properties of rubber particle-sand mixtures

Mixture No.	d_R / mm	w_R / %	d_{10} / mm	d_{50} / mm	C_c	C_u	$\rho_{dmax} / (g \cdot cm^{-3})$	$\rho_{dmin} / (g \cdot cm^{-3})$
M_{1-2}	1-2	20	0.14	0.20	0.99	1.59	1.638	1.305
		40	0.15	0.23	0.23	6.67	1.647	1.238
		0	0.13	0.19	1.05	1.48	1.575	1.346
		10	0.13	0.19	1.03	1.57	1.592	1.333
		20	0.14	0.20	1.00	1.59	1.611	1.346
M_{2-3}	2-3	30	0.14	0.21	0.96	1.62	1.642	1.320
		40	0.15	0.23	0.23	6.63	1.643	1.238
		50	0.15	1.12	0.12	13.96	1.666	1.226
		70	0.17	2.22	0.75	13.96	1.457	1.049
M_{3-4}	3-4	20	0.14	0.20	1.00	1.60	1.607	1.289
		40	0.15	0.23	0.08	20.05	1.613	1.186
M_{4-6}	4-6	20	0.14	0.20	1.02	1.61	1.595	1.214
		40	0.15	0.23	0.06	26.26	1.591	1.083

2.2 试样制备

试样为 $\phi 50 \times 100$ mm 的实心圆柱. 湿击法多用于砂、粉砂或粉土试样的制备,且该方法可以较好地控制试样的孔隙比(e),同时也能获得较大的 e 值范围^[18]. 因此,本次试验采用湿击法制样. 通过多次测试,发现当试样含水率为 5% 时,既能使得制备的试样均匀性较好,又可以有效地控制孔隙比,故选择 5% 的制样含水率. 整个试样共分 4 层制作,每层所需橡胶颗粒和福建砂的质量按级配单独配制.

试样的饱和和处理分为 3 步:(1)通 15 min 的 CO_2 以除去试样中空气.(2)从试样底部到顶部通无气水,直到顶部没有气体排出.(3)进行分级反压饱和. 测定试样分级反压饱和后的孔压系数(B),若 $B > 0.95$,即认为试样达到饱和^[19]. 饱和完成的试样进行均等固结. 初始有效围压(σ'_{3c})为 100 kPa.

2.3 试验方案

(1)对试样 M_{2-3} 施加 3 个循环应力比(CSR)的循环轴向荷载,探讨 CSR 及 w_R 对橡胶颗粒-砂混合料液化特性的影响.

(2)控制 $w_R = 0\%、20\%、50\%$ 的试样 M_{2-3} 相对密实度(D_r)分别为 35%、50%、60%,研究 D_r 对混合料液化特性的影响.

(3)分别对试样 M_{1-2} 、 M_{3-4} 、 M_{1-6} 施加相同 CSR 的循环轴向荷载,研究 d_R 增大引起的混合料液化特性的变化. 综合考虑 w_R 、 D_r 及 d_R 的不排水循环三轴试验工况见表 2. 试验采用正弦波加载,加载频率

表 2 不排水循环三轴试验工况

Table 2 Cases for undrained cyclic triaxial test

Sample No.	$w_R/\%$	d_R/mm	$D_r/\%$	CSR
R-S1	0	2-3	50	0.135, 0.150, 0.165
R-S2	10	2-3	50	0.135, 0.150, 0.165
R-S3	20	2-3	50	0.135, 0.150, 0.165
R-S4	30	2-3	50	0.135, 0.150, 0.165
R-S5	40	2-3	50	0.135, 0.150, 0.165
R-S6	50	2-3	50	0.135, 0.150, 0.165
R-S7	70	2-3	50	0.135, 0.150, 0.165
R-S8	0	2-3	35	0.150
R-S9	0	2-3	60	0.150
R-S10	20	2-3	35	0.150
R-S11	20	2-3	60	0.150
R-S12	50	2-3	35	0.150
R-S13	50	2-3	60	0.150
R-S14	20	1-2	50	0.150
R-S15	20	3-4	50	0.150
R-S16	20	4-6	50	0.150
R-S17	40	1-2	50	0.150
R-S18	40	3-4	50	0.150
R-S19	40	4-6	50	0.150

为 1 Hz. 当轴向循环应力幅值为双幅轴向应力(σ_d)时,施加于试样的循环应力比 CSR 定义为^[20]:

$$\text{CSR} = \sigma_d / 2\sigma'_{3c} \quad (1)$$

3 结果与分析

3.1 典型试验结果与液化判别

为了全面了解纯砂颗粒($w_R = 0\%$)与纯橡胶颗粒($w_R = 100\%$)的力学特性,在开展循环三轴试验前,首先对颗粒进行了一系列不排水剪切试验. 考虑到与液化特性试验结果保持可比性,控制初始有效围压为 100 kPa, $D_r = 50\%$,对应的偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)-轴向应变(ϵ)曲线如图 2 所示. 由图 2 可见,纯砂颗粒与纯橡胶颗粒在不排水条件下都呈现出先剪缩后剪胀的趋势,与之对应的峰值强度分别为 451、98 kPa.

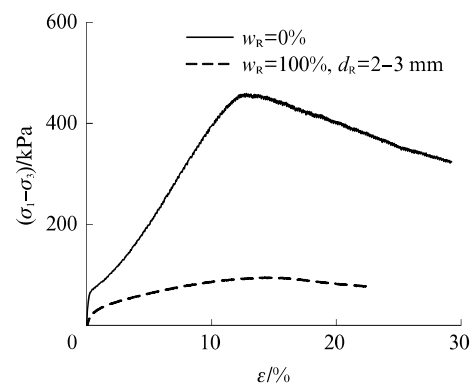


图 2 纯砂和纯橡胶颗粒的应力-应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of sand and rubber particle

对于土体液化机理的认识,通常有 2 种观点:

(1)从应力状态出发分析土体液化,液化标志着土体的有效应力为零,土体不再具有抗剪能力^[21]. (2)土体液化表现为过量的变形或应变,使土体呈现出具有液体性态的流动破坏^[22]. 由于对液化机理认识的不同,这使得饱和土体不排水循环三轴试验的液化判别标准有 2 种. 一是孔压标准^[23]:在循环荷载作用下试样的 Δu 达到 σ'_{3c} 作为液化判别标准,即孔压比($R_u = \Delta u / \sigma'_{3c}$)达到 1. 二是变形标准^[18]:在循环荷载作用下试样的单幅轴向应变(ϵ_s)达到 2%~3% 或双幅轴向应变(ϵ_d)达到 5% 作为液化判别标准.

图 3、4 为试样 M_{2-3} 的典型试验结果. 由图 3、4 可见:橡胶颗粒-砂混合料孔压比 R_u 和双幅轴向应变(ϵ)随振次(N)的发展规律随着 w_R 的增加而转变;当 $w_R = 0\% \sim 20\%$ 时,在前几个振次 R_u 迅速增大,随着 N 的增大, R_u 增速趋于平稳,最后又急剧增加,呈现快—平稳—急剧的增长模式;当 $R_u < 0.8$

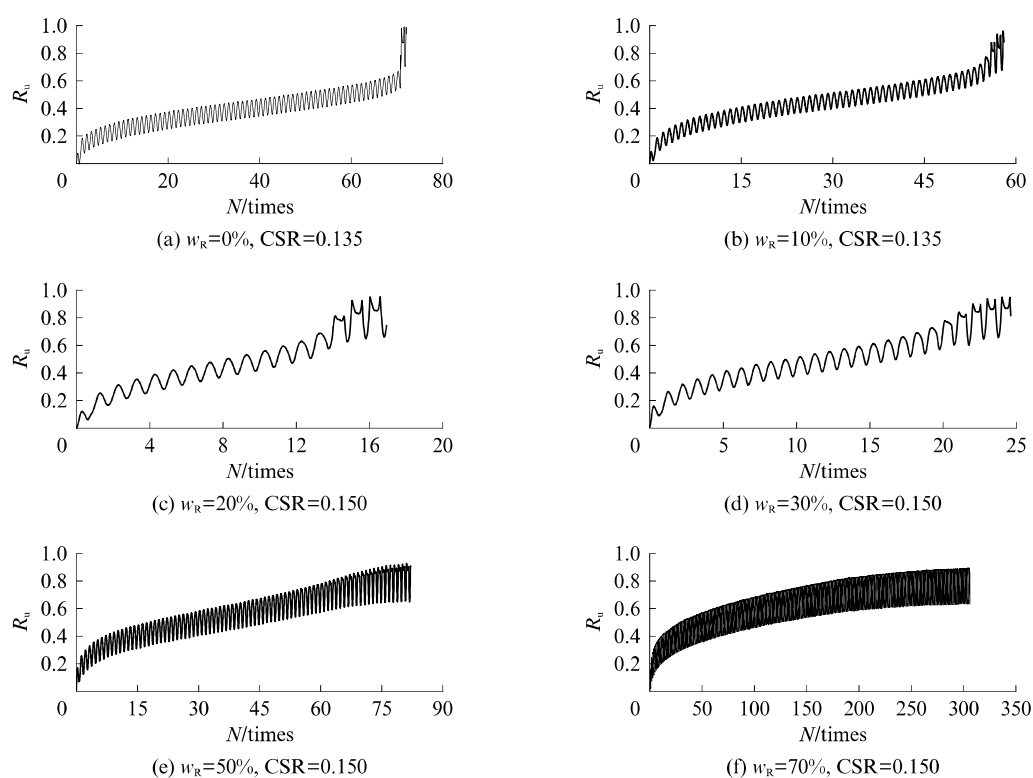


图3 橡胶颗粒-砂混合料的孔压比发展

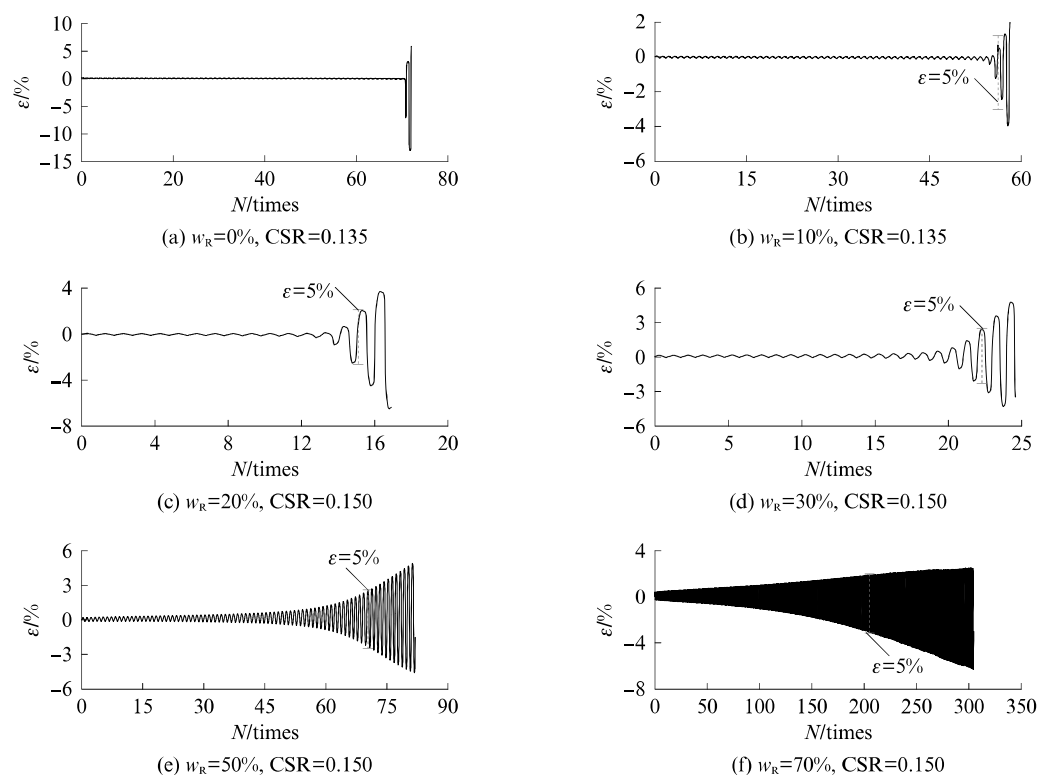
Fig. 3 Development of pore pressure rate for rubber particle-sand mixture ($D_r=50\%$)

图4 橡胶颗粒-砂混合料的轴向应变发展

Fig. 4 Development of axial strain for rubber particle-sand mixture ($D_r=50\%$)

时, ϵ_d 保持不变且接近于 0, 当 $R_u > 0.8$ 时, ϵ_d 在极少的振次下迅速增大, 当 $R_u = 1.0$ 时, ϵ_d 超过 5%, 这与典型的饱和砂土液化现象基本一致; 当 $w_R = 30\% \sim 50\%$ 时, R_u 随振次的增大呈现“快—平稳—快”的增长模式, 当 R_u 超过 0.6 后, ϵ_d 随振次增加而逐渐增大, 最终超过 5%; 当 $w_R = 70\%$ 时, R_u 随振次的增大呈现“快—平稳”的增长模式, 且增长速率逐渐降低, 最终 R_u 稳定在 0.8 左右, ϵ_d 在循环应力施加初期就随 N 的增加逐渐增大并最终超过 5%, 基本上混合料表现出与纯橡胶一致的力学特性. 因此, 通过上述分析可以认为, 当橡胶颗粒掺量较小时(本文小于 50%), 可将 $\epsilon_d = 5\%$ 作为橡胶颗粒-砂混合料的破坏判别标准. 当橡胶掺量较大时, 因橡胶颗粒的弹性变形较大, 导致混合料破坏时的应变标准明显大于 5%.

3.2 动强度分析

图 5 为试样 M_{2-3} 的破坏振次 (N_f) 与橡胶掺量的关系. 由图 5 可见, 随着 w_R 的增加, 橡胶颗粒-砂混合料的 N_f 呈先减小后增大的趋势. 这是因为: (1) 当 w_R 较小时, 橡胶颗粒-砂混合料的骨架仍由砂粒组成, 橡胶颗粒分散于砂颗粒之间. 由于其掺量较低, 因此橡胶颗粒互相无接触, 此时的橡胶颗粒不仅无法起到恢复变形的作用, 还削弱了土颗粒骨架之间的接触, 因此相对于纯砂其更易破坏. (2) 随着 w_R 继续增加, 橡胶颗粒间开始接触, 逐渐形成有效骨架, 在循环荷载作用下, 因橡胶颗粒具有很好的可恢复弹性变形, 使得橡胶颗粒土的残余体应变累积缓慢, 因此其抗液化能力逐渐提升. 值得关注的是, 当 $CSR = 0.135$ 时, N_f 达到最小值时所对应的 $w_R = 40\%$, 而当 $CSR = 0.150$ 或 0.165 时, N_f 达到最小值时所对应的 $w_R = 10\%$. 从微观角度来判断, 产生该差异的主要原因是: 当 CSR 较小时, 橡胶颗粒开始参与力链传递所需的 w_R 较大, 而当 CSR 较大时, 仅仅需要 $w_R = 10\%$, 橡胶颗粒即参与力链传递, 上述机理解释还有必要通过微观分析方法加以验证.

为了探讨橡胶颗粒粒径对橡胶颗粒-砂混合料抗液化强度的影响, 图 6 给出了试样 M_{2-3} 中橡胶颗粒平均粒径 (d_{50-R}) 与破坏振次的关系. 由图 6 可见, 随着 d_{50-R} 的增大, N_f 总体上呈增大趋势. 主要原因为: 当 d_{50-R} 较小时, 单个橡胶颗粒的回弹能力有限, 且更为分散, 从而使得混合料较容易液化; 随着 d_{50-R} 的增大, 单个橡胶颗粒能够提供有效的回弹变形能力, 提高了试样的抗剪切变形能力, 从而增强了橡胶颗粒-砂混合料的抗液化强度. 值得注意的是, 试样

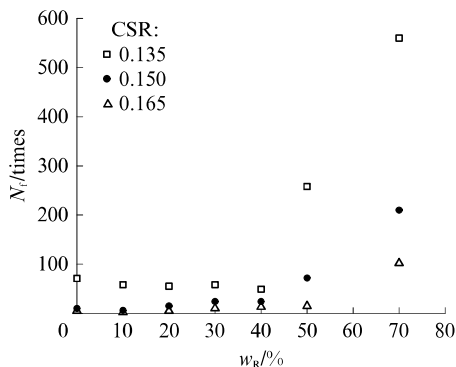


图 5 M_{2-3} 的破坏振次与橡胶掺量的关系

Fig. 5 Relationship between failure cycle and rubber content of M_{2-3}

M_{2-3} 与 M_{3-4} 的 N_f 较为接近, 可能是因为这 2 种橡胶颗粒粒径较为接近且跨度较小, 因此有着相似的试验结果.

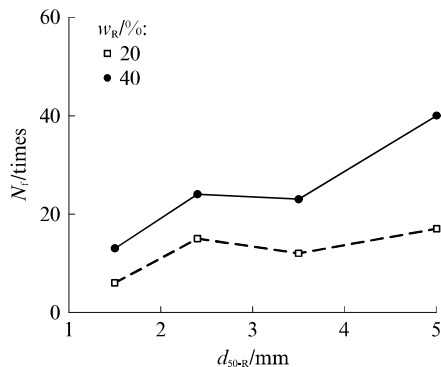


图 6 M_{2-3} 的破坏振次与橡胶颗粒平均粒径的关系

Fig. 6 Relationship between failure cycle and mean grain size of M_{2-3}

图 7 为试样 M_{2-3} 的破坏振次随相对密度 (D_r) 和橡胶掺量变化的规律. 由图 7 可见: 与已有的砂土试验结果一致, M_{2-3} 的 N_f 随 D_r 的增大而增大. 此外, 随着 w_R 的增大, D_r 对 N_f 的影响逐渐削弱. 分析认为: 当 w_R 较小时, 橡胶颗粒-砂混合料的力学特性更

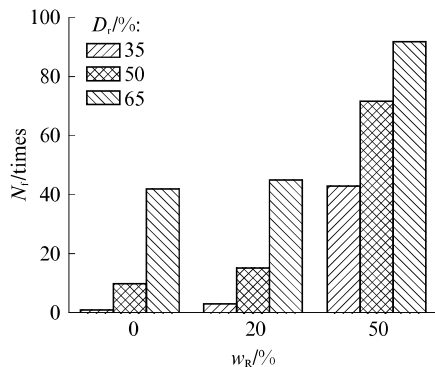


图 7 M_{2-3} 的破坏振次与相对密度的关系

Fig. 7 Relationship between failure cycle and relative density of M_{2-3}

接近于纯砂,颗粒骨架会随 D_r 的提升而增强;而当 w_R 增加时,由于橡胶颗粒具有易变形的特性,无论 D_r 高低,在相同固结压力作用下,都会趋向于同一密实状态,从而导致对 D_r 对 N_f 的影响减弱。

3.3 橡胶颗粒-砂混合料的应变分析

图8为橡胶颗粒-砂混合料双幅轴向应变幅值(ϵ_{dmax})与循环振次比(N/N_f)的关系曲线。由图8可见:在各试验条件下, ϵ_{dmax} 都随 N/N_f 的增加而增大,但其增加速率有显著差异;当 N/N_f 相同时, ϵ_{dmax} 随 w_R 的增加而增大。这是由于橡胶颗粒具有模量低、易变形的特性,当 w_R 增加时,土体更易发生变形。由图8(a)可见:当 $w_R=0\% \sim 20\%$ 时,在 N/N_f 小于0.8时, ϵ_{dmax} 增长缓慢且趋近于0,而当 N/N_f 超过0.8时, ϵ_{dmax} 在较少振次内迅速增大并超过5%,这与典型的砂土轴向变形发展规律基本一致;当 $w_R=30\% \sim 50\%$ 时, ϵ_{dmax} 随 N/N_f 的增长速率逐

渐增大,且 w_R 增加会显著降低该增长速率,此时,橡胶颗粒-砂混合料的变形特性从类砂土向类橡胶颗粒转变;当 $w_R=70\%$ 时, ϵ_{dmax} 随 N/N_f 的呈线性增大,橡胶颗粒-砂混合料的变形能力显著高于其他工况,且加载初始阶段便存在1%量级的 ϵ_{dmax} ,这表明当 w_R 超过70%后,橡胶颗粒-砂混合料骨架由橡胶颗粒控制,砂颗粒基本不参与力链传递。图8(b)给出了 D_r 对 $w_R=50\%$ 的试样 M_{2-3} ϵ_{dmax} 发展规律的影响。当 N/N_f 为定值时,橡胶颗粒-砂混合料的 ϵ_{dmax} 随 D_r 的降低而增大,且 ϵ_{dmax} 随 N/N_f 的增长速率也随 D_r 的增大而降低,产生该现象的原因是:随着 D_r 的增大,橡胶颗粒-砂混合料更加密实,颗粒接触面积增大,从而增大混合料的抗变形能力。图8(c)描述了橡胶粒径 d_R 对橡胶颗粒-砂混合料 ϵ_{dmax} 发展规律的影响,随着 d_R 的增大, ϵ_{dmax} 减小。此外,试样 M_{2-3} 和 M_{3-4} 的 ϵ_{dmax} 基本一致。

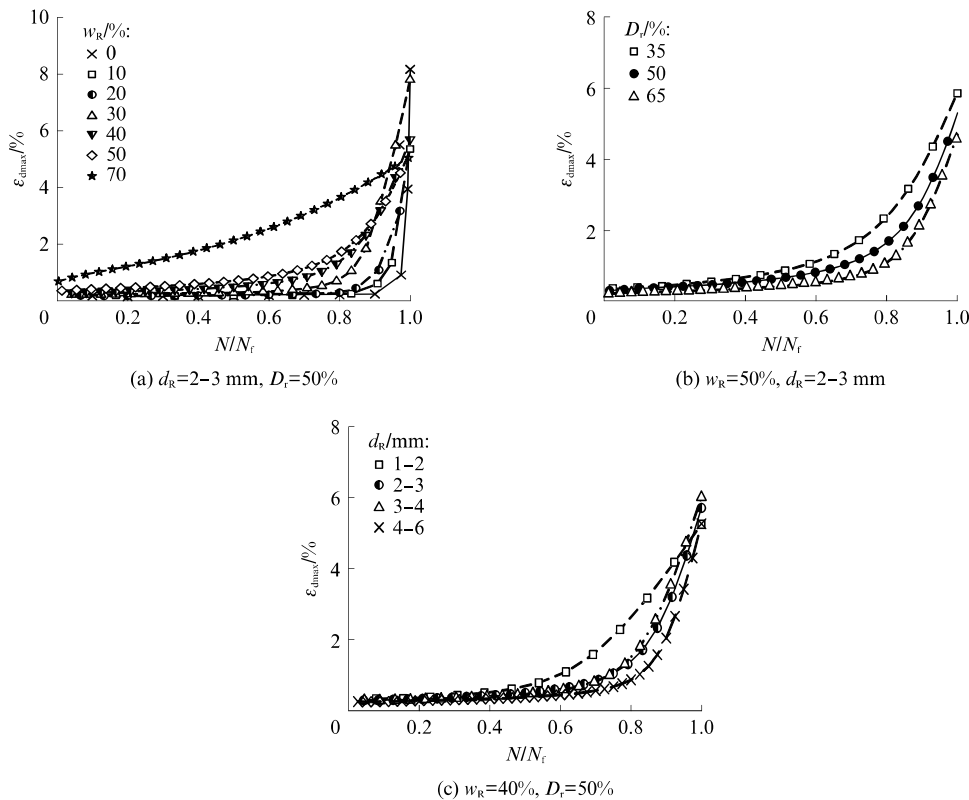


图8 橡胶颗粒-砂混合料的双幅轴向应变幅值与循环振次比关系

Fig. 8 Relationship between double-axial strain amplitude and relative density of rubber particle-sand mixture

3.4 橡胶颗粒-砂混合料滞回耗能特性分析

滞回圈(应力-应变曲线)不仅描述了橡胶颗粒-砂混合料的应力-应变关系,还可由此计算出模量、阻尼比等重要的动力学参数。图9为 w_R 对橡胶颗粒-砂混合料应力-应变关系曲线的影响。由图9可见:当 ϵ_{dmax} 相同时, w_R 越大,橡胶颗粒-砂混合料的

滞回圈越规整狭长,拉、压应力产生的应变越对称,这表示混合料有着较好的弹性变形恢复能力;当 w_R 较低时,滞回圈出现较为明显的不对称性。此外,随着 w_R 的降低,橡胶颗粒-砂混合料滞回圈面积逐渐增大,这意味着橡胶颗粒-砂混合料吸收了更多的能量。相反, w_R 较高的橡胶颗粒-砂混合料滞回圈面积

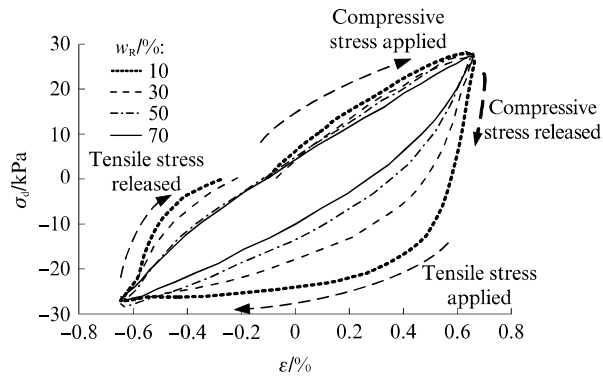


图9 相同应力-应变下的滞回圈对比
Fig. 9 Contrast of hysteretic cycles under the same stress-strain

较少,说明该振次吸收的能量较少,即该振次对橡胶颗粒-砂混合料的破坏作用更小。

Figueroa 等^[24]提出用滞回圈面积的大小来表征土单元的能量耗散,将加载过程中所有能量耗散相加,即得到土单元在液化时总的能量耗散。图10为循环荷载作用下试样 M₂₋₃ 的累积能量耗散(W)。由图10可见:当 $w_R=0\% \sim 20\%$ 时,不同 CSR 作用下试样 M₂₋₃ 在各 ϵ_{dmax} 水平下的 W 基本一致;当 w_R 超过 30% 时,不同 CSR 作用下试样 M₂₋₃ 在各 ϵ_{dmax} 水平下的 W 有所差异,且该差异随 w_R 的增加逐渐增大。这是因为随着 w_R 的增大,橡胶颗粒-砂混合料的弹性恢复变形能力逐渐增大,从而使得达到指定 ϵ_{dmax} 水平所需的 W 随 CSR 变化越显著。

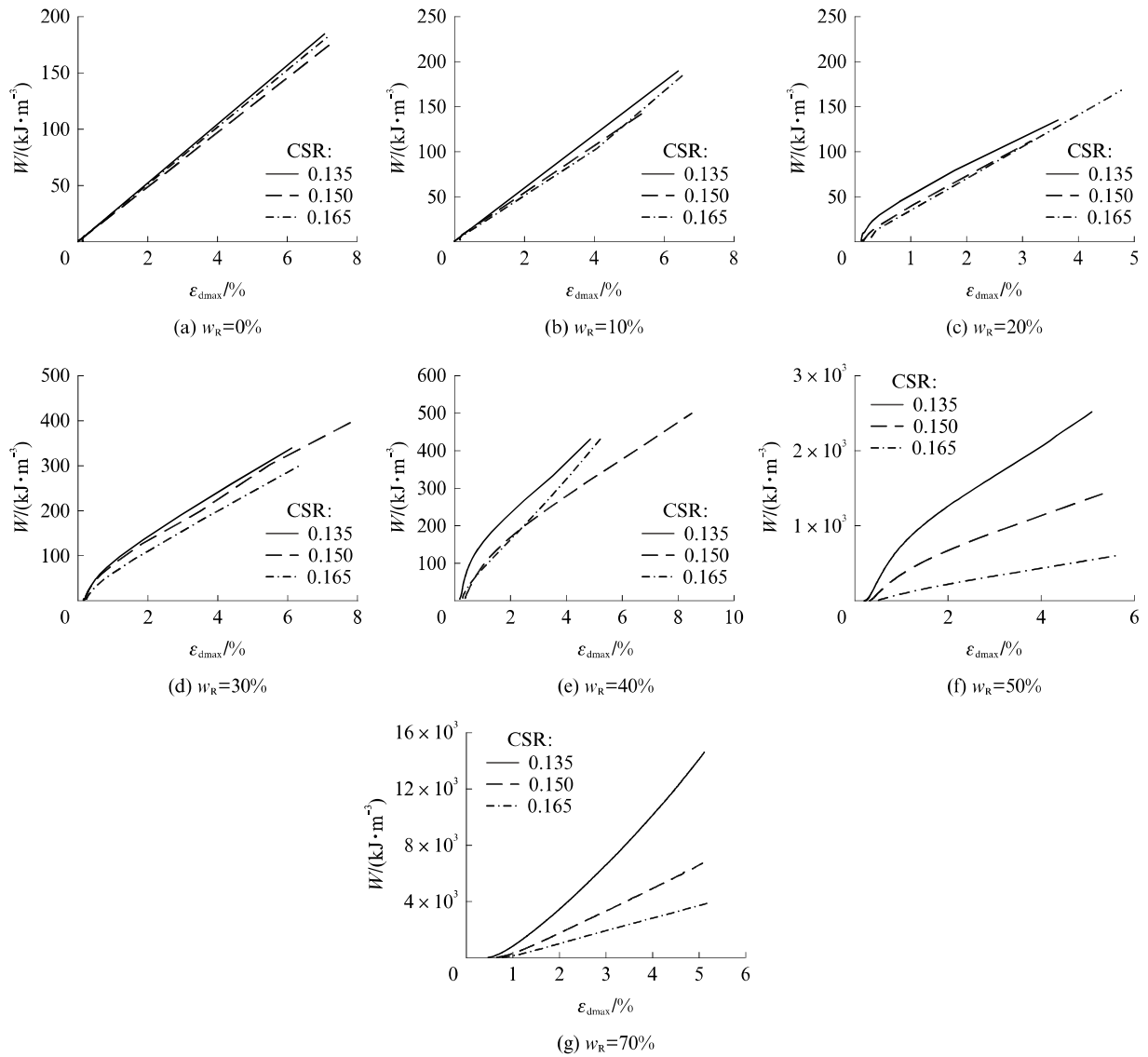


图10 不同工况下 M₂₋₃ 试样的累积能量耗散
Fig. 10 Cumulative energy dissipation of M₂₋₃ under different conditions ($D_r=50\%$)

图 11 为各 CSR 作用下试样 M_{2-3} 达到破坏标准所需的累积能量耗散(W_f)与橡胶掺量的关系。由图 11 可见:当 CSR 相同时, W_f 随 w_R 的增大呈非线性增大, w_R 越大, W_f 的增大速率越大;当 $w_R=0\% \sim 20\%$ 时,各 CSR 作用下的 W_f 基本一致;当 w_R 大于 30% 时,各 CSR 作用下的 W_f 开始产生明显差异,且 CSR 越大, W_f 的差异越明显。

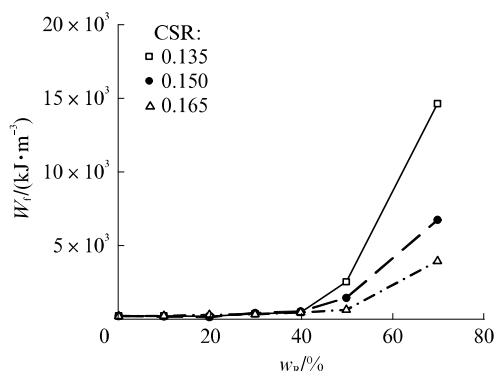


图 11 试样 M_{2-3} 达到破坏标准所需能量与橡胶含量的关系
Fig. 11 Cumulative energy required to causing failure criteria versus rubber content of M_{2-3}

结合图 3、4、8(a)、11 可知,当 $w_R=0\% \sim 20\%$ 时,橡胶颗粒-砂混合料表现出来的主要动力学特性与纯砂相似,即可认为其动力学特性主要由砂土结构决定;当 $w_R=30\% \sim 50\%$ 时,随 w_R 的增大,橡胶颗粒-砂混合料的力学特性由砂土向橡胶颗粒转变;当 w_R 超过 70% 时,橡胶颗粒-砂混合料的力学特性与纯橡胶颗粒一致,此时力学特性主要由橡胶颗粒结构决定。

4 结论

(1)随着橡胶掺量 w_R 的增加,橡胶颗粒-砂混合料呈现不同的孔压和应变增长规律,总体上当 w_R 较少(小于 50%)时,可以将双幅轴向应变 $\epsilon_d=5\%$ 作为橡胶颗粒-砂混合料的破坏判别标准。 w_R 较大时,橡胶颗粒-砂混合料破坏对应的应变判别标准明显大于 5% 。

(2)橡胶颗粒-砂混合料破坏振次(N_f)随着 w_R 的增大呈现先减小后增大的趋势。循环应力比不同时, N_f 达到最小值所需的 w_R 有所差异。其他条件一致时, N_f 随相对密实度(D_r)及橡胶粒径(d_R)的增大而增大。双幅轴向应变幅值(ϵ_{dmax})随循环振次比(N/N_f)的增大而增大,随着 w_R 的增大, ϵ_{dmax} 与 N/N_f 的相关性从强非线性向线性转变,且当 N/N_f 为定值时, w_R 的增大、 D_r 及 d_R 的减小都会引起 ϵ_{dmax} 增大。

(3)橡胶颗粒-砂混合料达到破坏标准所需的累积能量耗散(W_f)随 w_R 的增大呈非线性增大, w_R 越大, W_f 的增大速率越大。此外,当 $w_R=0\% \sim 20\%$ 时,各 CSR 作用下橡胶颗粒-砂混合料的 W_f 基本一致;当 w_R 大于 30% 时,各 CSR 作用下橡胶颗粒-砂混合料的 W_f 开始产生明显差异,且 CSR 越大, W_f 的差异越明显。

(4)当 $w_R=0\% \sim 20\%$ 时,橡胶颗粒-砂混合料表现出来的主要动力学特性与纯砂相似;当 $w_R=30\% \sim 50\%$ 时,随着 w_R 的增大,橡胶颗粒-砂混合料的动力学特性由砂土向橡胶颗粒转变;当 w_R 超过 70% 时,橡胶颗粒-砂混合料表现出的动力学特性与纯橡胶颗粒一致。

参考文献:

- [1] ZORNBERG J, CABRAL A, VIRATJANDR C. Behaviour of tire shred-sand mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(2): 227-241.
- [2] AYDILEK A H, MADDEN E T, DEMIRKAN M M. Field evaluation of a leachate collection system constructed with scrap tires[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(8): 990-1000.
- [3] EDIL T B, BOSSCHER P J. Engineering properties of tire chips and soil mixtures[J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17(4): 453-464.
- [4] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
LI Guangxin. Higher soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [5] 殷宗泽. 土力学学科发展的现状与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(1): 1-5.
YIN Zongze. Current situation and prospects of the development of soil mechanics[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 1999, 27(1): 1-5. (in Chinese)
- [6] 谢定义. 21 世纪土力学的思考[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 111-114.
XIE Dingyi. Reflections on soil mechanics in the 21st century [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 111-114. (in Chinese)
- [7] SEED B, LEE K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, 1966, 92(6): 105-134.
- [8] EDINCLILER A, CABALAR A F, CEVIK A. Modelling dynamic behavior of sand-waste tires mixtures using neural networks and neuro-fuzzy[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2013, 17(8): 720-741.
- [9] ANBAZHAGAN P, MAMASHA M. 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.
- [10] NAKHAEI A, MARANDI S M, SANI KERMANI S, et al.

- Dynamic properties of granular soils mixed with granulated rubber[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 43:124-132.
- [11] SENETAKIS K, ANASTASIADIS A, PITILAKIS K. Dynamic properties of dry sand/rubber(SRM) and gravel/rubber(GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 33(1):38-53.
- [12] ANASTASIADIS A, SENETAKIS K, PITILAKIS K. Dynamic behavior of sand/rubber mixtures. Part I: Effect of rubber content and duration of confinement on small-strain shear modulus and damping ratio[J]. *Journal of ASTM International*, 2008, 9(2):1-19.
- [13] 李博,黄茂松.掺有橡胶粉末砂土液化特性的动三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(5):1343-1349.
- LI Bo, HUANG Maosong. Dynamic triaxial test study on liquefaction characteristics of sand mixed with rubber powder[J]. *Geotechnique*, 2017, 38(5):1343-1349. (in Chinese)
- [14] PANJAMANI A, MANOHAR D R. Shear strength characteristics and static response of sand-tire crumb mixtures for seismic isolation[C] // ICSBE-2012: International Conference on Sustainable Built Environment. Kandy: [s. n.], 2012: <http://dl.lib.uom.lk/bitstream/handle/123/8919/SBE-12-4>.
- [15] 吴延辉,李玉荣,施建波.砂与橡胶粒复合隔震装置分析研究[J]. *四川建筑*, 2013(1):54-55, 57.
- WU Yanhui, LI Yurong, SHI Jianbo. Study of granulated rubber-sand mixed isolation device[J]. *Sichuan Architecture*, 2013(1):54-55, 57. (in Chinese)
- [16] 陈辉.废旧轮胎碎片混合土土工特性研究[D]. 武汉:湖北工业大学, 2014.
- CHEN Hui. Study on geotechnical characteristics of waste tire debris mixed soil[D]. Wuhan: University of Technology, 2104. (in Chinese)
- [17] 熊伟,曾庆豪,尚守平,等.新型岩土隔震系统试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2010(增刊2):39-45.
- XIONG Wei, ZENG Qinghao, SHANG Shouping, et al. Experimental research on new geotechnical isolation system[J]. *Journal of Building Structures*, 2010(Suppl 2):39-45. (in Chinese)
- [18] ISHIHARA K. Liquefaction and flow failure during earthquakes[J]. *Geotechnique*, 1993, 43(3):351-451.
- [19] SKEMPTON A W. The pore-pressure coefficients A and B[J]. *Geotechnique*, 1954, 4(4):143-147.
- [20] 张克绪.饱和砂土液化应力条件[J]. *地震工程与工程振动*, 1984, 4(1):99-109.
- ZHANG Kexu. Stress condition inducing liquefaction of saturated sand[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1984, 4(1):99-109. (in Chinese)
- [21] SEED H B, IDRISS I M, ARANGO I. Evaluation of liquefaction potential using field performance data[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, 109(3):458-482.
- [22] CASAGRANDE A. Liquefaction and cyclic deformation of sands: a critical review[C] // Fifth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Buenos Aires: Argentine Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1975:80-133.
- [23] SEED H B, LEE K L. Liquefaction of saturated sand during cyclic loading[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 1966, 92(6):105-134.
- [24] FIGUEROA J L, SAADA A S, LIANG L, et al. Evaluation of soil liquefaction by energy principles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(9):1554-1569.