

循环次数对加筋橡胶砂动力特性影响试验研究

刘方成, 张云飞, 陈璐

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 将橡胶砂填入经过高强焊接的土工网状格室形成加筋橡胶砂, 通过大尺寸循环单剪试验研究加筋橡胶砂在4种竖向应力、5种位移幅值下的滞回曲线、动剪模量比和阻尼比随循环次数的变化规律。结果表明: 60次循环单剪中, 循环次数对低配比、低竖向应力橡胶砂的影响比较明显, 随着循环次数的增加材料吸收能量的能力减小, 减震效能逐渐下降, 塑性变形能力下降; 循环次数对小剪切加筋橡胶砂动剪模量有增加效应, 对大剪切应变的有略微减小效应; 当竖向应力较小时, 循环次数对动剪模量影响不稳定, 呈现波动性; 当竖向应力较小时, 阻尼比曲线达到稳定时需要的循环次数较少, 当竖向应力较大时, 阻尼比曲线达到稳定时需要的循环次数较多。

关键词: 循环次数; 橡胶砂; 土工格室加筋; 动剪模量; 阻尼比

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)03-0023-07

Experimental Study on the Influence of Cycle Numbers on Dynamic Properties of the Geo-Cell Reinforced Rubber-Sand Mixture

LIU Fangcheng, ZHANG Yunfei, CHEN Lu

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

Abstract: Reinforced rubber sand can be used to fill into the geotextile chamber with high strength welding. Large size cyclic shear tests have been conducted, thus working out the hysteretic curves, dynamic shear modulus curves and damping ratio curves of GCRSM under four vertical consolidation pressure and five different horizontal strain amplitude. Test results show that: In the 60 cycle single shears, there is an evident influence of cycle times on the rubber sand with a low ratio and low vertical consolidation pressure. With the increase of the cycle numbers, the ability of energy absorption and the efficiency of shock absorption of GCRSM is decreasing and the ability of plastic deformation is decreasing. The cycle numbers have an increasing effect on the shear modulus of small shear reinforced rubber sand and have a slightly decreasing effect on the large shear strain. When the vertical stress is relatively small, the effect of the cycle numbers on the dynamic shear modulus is unstable with a fluctuation. When the vertical consolidation pressure is relatively small, the number of cycles is smaller with a stable damping ratio curve. When the vertical consolidation pressure is large, the number of cycles is larger with a stable damping ratio curve.

Keywords: cycle number; rubber sand mixture; geo-cell reinforced; dynamic shear modulus; damping ratio

收稿日期: 2017-09-12

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, 博士, 主要从事土-结构动力相互作用方面的研究,
E-mail: 455211101@qq.com

1 研究背景

在土的室内动力特性试验中,为了测定土样在较大应变范围内的动力参数,通常在一个试样上由小到大分多级施加动应力。由于土的滞后性和变形累积特性,在试验中往复荷载下将产生不可恢复的残余变形,由加载历史造成的应变累积对测得的土动剪模量和阻尼比等重要参数是否有影响,吸引了较多学者的关注。

T. Wichtmann 等^[1]通过循环扭剪试验研究了小应变下细中砂动力特性受加载历史的影响,发现随着循环次数的增加,其最大动剪模量逐渐衰减,衰减率最大可达 10%; H. Nagase 等^[2]对日本有明地区海底黏土进行了浸出状态下的循环剪切试验,结果表明,黏土的剪切模量和动剪强度随循环次数的增加均显著减小。柏立懂^[3]利用共振柱试验研究了不同因素对砂土最大动剪模量的影响规律,发现砂土动剪模量受循环次数的影响存在一个临界值:低于该值时,随着循环次数的增加,最大动剪模量逐渐衰减;高于该值时,最大动剪模量随着循环次数的增加而增大。黄茂松等^[4]利用动三轴仪和弯曲元测试系统研究了饱和软黏土随循环次数变化的规律,建立了软化模型来描述长期循环荷载作用下饱和软黏土强度和刚度的弱化特性。尚守平、刘方成等^[5-6]对粉质黏土进行了多级加载循环单剪试验,引入动剪模量强化系数和阻尼比衰减系数,建立了考虑黏土累积应变影响的非线性土动力模型。周建等^[7]通过循环三轴仪研究了循环荷载作用下正常固结饱和黏土的软化情况,考虑循环应力比、超固结比、频率等的影响,建立了反映各影响因素下土体的软化模型。

橡胶砂(rubber sand mixture, RSM)是对由废旧橡胶轮胎颗粒与砂颗粒组成的混合物的统称。相比于纯砂,橡胶砂具有自重轻、弹性变形能力较强、剪切模量较低、阻尼较大等特点,已有研究结果表明,其可以被广泛应用于土木工程^[8-12]等领域中。针对橡胶砂作为隔震垫层时对上部结构稳定性的不利影响,课题组提出采用土工格室对橡胶砂进行加筋,利用土工格室的网兜效应提高垫层的抗剪强度,加强整体稳定性,并对不同配比下加筋橡胶砂(geo-cell reinforced rubber sand mixture, GCRSM)的动力特性进行了初步探索^[13]。

鉴于加载历史对土体材料动力特性的较大影响,本文应用自行研制的大型循环单剪仪对土工格室加筋橡胶砂的动力特性进行研究,考虑循环次数的影响,对加筋和非加筋橡胶砂的动剪模量和阻尼比进行

对比分析,以期能为土工格室加筋橡胶砂垫层相关的后续研究提供参考。

2 试验介绍

2.1 试验材料及制备

试验用砂为天然河砂,风干之后经过筛分试验和粒径分析可知:砂颗粒的堆积密度为 1.72 g/cm^3 ,砂颗粒的粒径范围为 $0 \sim 7 \text{ mm}$;废轮胎颗粒在专业轮胎分解商处采购得到,测得其堆积密度为 0.51 g/cm^3 ,其粒径范围为 $1.5 \sim 3.0 \text{ mm}$ 。试样加筋采用三维网状格室结构,经高强度焊接而成,其高度为 200 mm ,厚度为 1 mm 。

将烘干的河砂和风干的橡胶颗粒按照给定的质量比拌合均匀后分装入密封承土箱备用,采用砂雨法将试样分次均匀落入试模内并分层压实。不同配比橡胶砂的装样控制密度如表 1 所示,试验装置及试样如图 1 所示。

表 1 不同配比橡胶砂混合物的密度

Table 1 Mass densities of RSM with different proportion

配比 $R_c/\%$	$\rho_{d, \min}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\rho_{d, \max}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	相对密度 D_r	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
0	1.48	2.06	0.65	1.81
20	1.04	1.51	0.65	1.30
30	0.92	1.42	0.65	1.19



a) 试验装置



b) 试样填筑



c) 剪切试验



d) 剪切后的土工格室

图 1 大型循环剪切试验装置与试样

Fig. 1 Large scale cyclic shear tests device and its samples

2.2 试验方法

试验设备为课题组自行研制的大型循环单剪试验仪,试样直径为 700 mm ,高度为 200 mm 。本试验采用正弦波加载,剪切频率为 1 Hz 。竖向加载系统采用应力控制,将试验预定的竖向边界条件(考虑 $50, 100, 200, 300 \text{ kPa}$ 4 种竖向固结压力)通过加载顶板施加在试样上表面,待竖向加载稳定之后,启动水

平加载系统进行剪切试验。水平加载系统采用位移控制,并由小到大分5级施加剪应变,每级应变幅值下加载周数均为60次。试验过程中水平与竖向的位移与荷载均由传感器采集并传输到计算机。大型循环单剪试验工况如表2所示。

表2 大型循环单剪试验工况

Table 2 Large-scale cyclic shear test conditions

$R_d/\%$	竖向应力 p/kPa	加筋情况	位移幅值/mm	加载频率/Hz
0, 20, 30	50, 100, 200, 300	加筋, 无筋	2, 3, 4, 5, 6	1

3 试验结果

3.1 循环次数对滞回曲线的影响

图2、图3分别给出了配比为20%和30%土工格室加筋橡胶砂在4种竖向应力、5种位移幅值下的滞回曲线,图4给出了配比为20%、竖向应力为50 kPa加筋橡胶砂的滞回曲线放大图形。

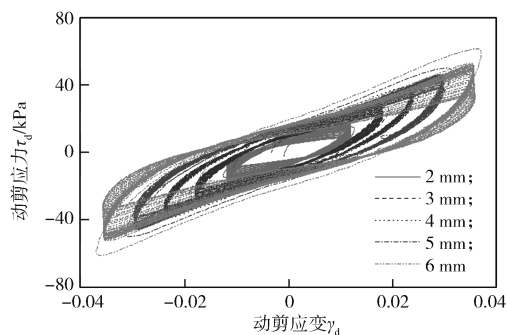
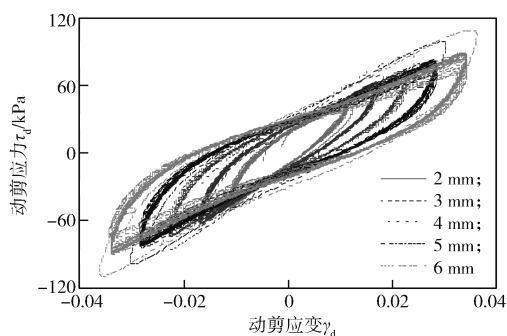
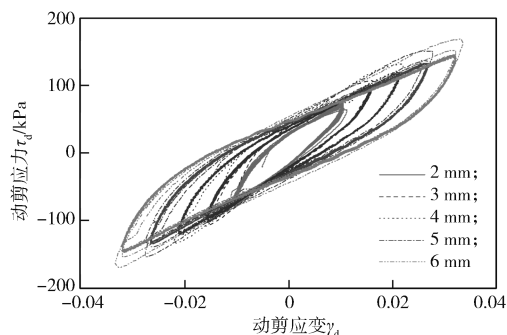
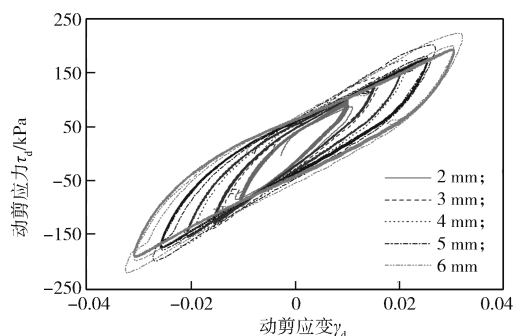
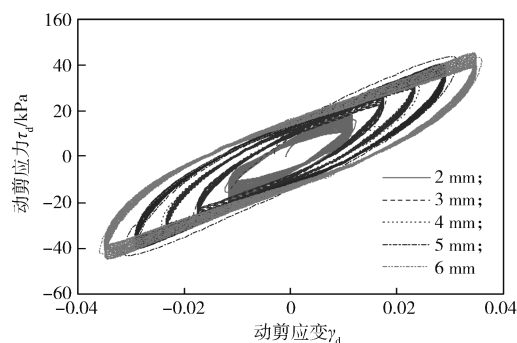
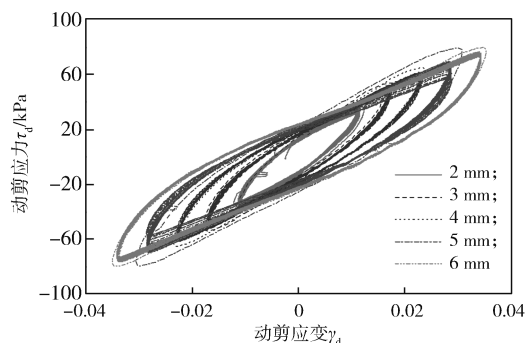
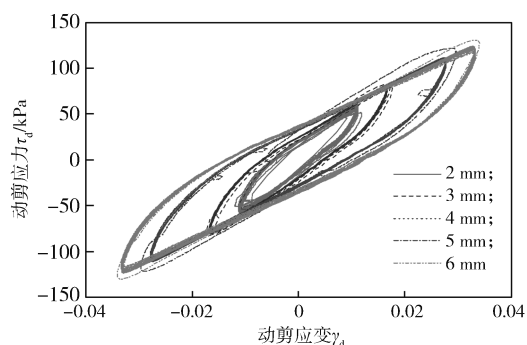
a) $p=50$ kPab) $p=100$ kPac) $p=200$ kPad) $p=300$ kPa

图2 配比为20%的加筋橡胶砂在4种不同竖向应力下的滞回曲线

Fig. 2 Hysteretic curves of 20% GCRSM under four different vertical consolidation pressures

a) $p=50$ kPab) $p=100$ kPac) $p=200$ kPa

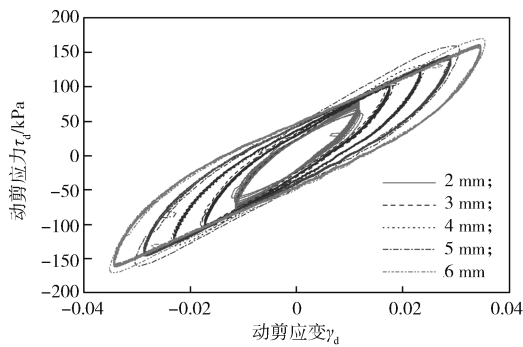
d) $p=300$ kPa

图3 配比为30%的加筋橡胶砂在4种不同竖向应力下的滞回曲线

Fig. 3 Hysteretic curves of 30% GCRSM under four different vertical consolidation pressures

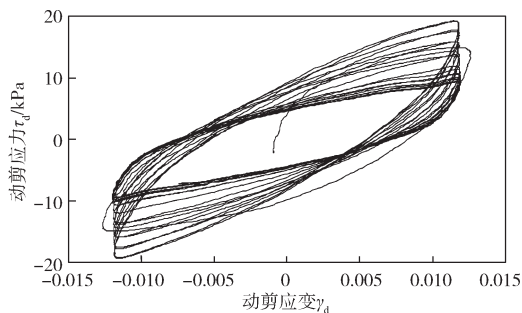


图4 配比为20%、竖向应力为50 kPa时的加筋橡胶砂滞回曲线放大图形

Fig. 4 Amplified hysteretic curves of 20% GCRSM under the vertical consolidation pressure of 50 kPa

以图2~4所示分析曲线为依据,对比不同位移幅值、不同配比、不同竖向应力工况滞回曲线可见:

1) 由图2a可见,相同配比、相同位移幅值、相同竖向压力时,滞回曲线“重影”越明显,说明循环次数对滞回曲线影响越大。

2) 从图2a~d可以看出,配比为20%、竖向应力为50 kPa时,滞回曲线随循环次数变化明显,当竖向应力不变,随着配比的增加,滞回曲线随循环次数变化越不明显,表明循环次数对耗能能力变化的影响减小。当配比不变时,随着竖向应力的增加,滞回曲线随循环次数变化越不明显。以上说明循环次数对小配比、小竖向应力橡胶砂混合物影响比较明显。

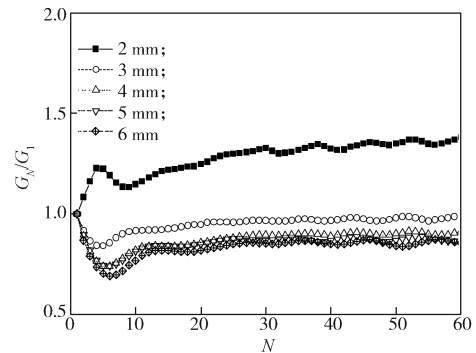
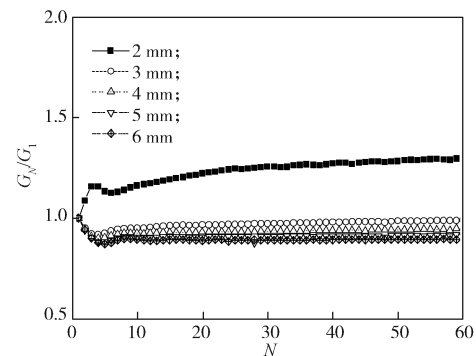
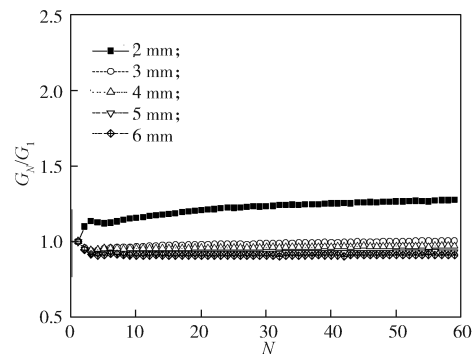
3) 由图2~3可以得到,小竖向应力时,橡胶砂之间空隙比较多,多次循环单剪后,经过颗粒间摩擦后的橡胶砂颗粒间孔隙减小,循环单剪类似“振动”砂砾呈现被“振实”“压实”,模量减小,滞回曲线由饱满状态转为捏扁形状,吸收能量降低。大竖向应力下,循环单剪使得颗粒之间去“棱角化”,橡胶砂颗粒之间更容易发生相对移动;同样的原理,模量减

小,耗能能力减弱,滞回曲线呈现扁平状态。

4) 由图4可以看出,随着循环次数的增多,对比每圈滞回曲线,滞回曲线由膨胀饱满的梭形状态逐渐转为捏拢平躺的干瘪状态,相同动剪应变对应的剪切应力也越来越小,说明随着循环次数的增加材料吸收能量的能力在减小,减震的效能也逐渐下降,塑性变形能力下降。每次加载过程中可以看出,斜率随荷载的增大而减小,且减小的程度加快。刚开始卸载时,恢复变形很小;荷载减小后曲线趋向平缓,恢复变形逐渐加快,恢复变形出现滞后现象。

3.2 循环次数对动剪模量的影响

图5给出了配比为20%和30%的橡胶砂在5种不同位移幅值、3种不同竖向应力下的 G_N/G_1 (第N次的动剪模量与第1次的动剪模量之比) 随循环次数N的变化曲线,取N=60作为研究对象。

a) $p=100$ kPa, $R_c=20\%$ b) $p=200$ kPa, $R_c=20\%$ c) $p=300$ kPa, $R_c=20\%$

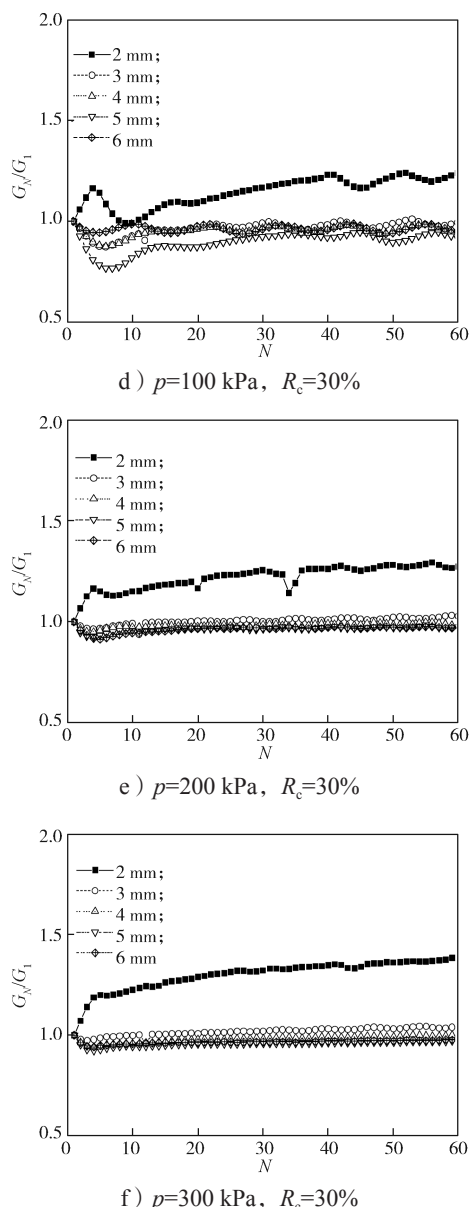


图5 配比为20%、30%橡胶砂在不同位移幅值及不同竖向应力下的 G_N/G_1 随循环次数的变化曲线

Fig. 5 G_N/G_1 curves of 20% and 30% GCRSM under different vertical consolidation pressures and different horizontal strain amplitudes with the change of the cyclic number

由图5可知, 当位移幅值为2 mm时, GCRSM的 G_N/G_1-N 曲线均处于竖向坐标1.0以上, 呈缓慢上升趋势, 即试样的动剪模量随着循环次数的增加而缓慢增大, 前20次影响比较明显, 以后则随着循环次数的增加动剪模量趋于稳定, 且刚开始前5次呈线性变化, 5次以后呈非线性变化, G_N/G_1-N 曲线受循环次数影响较大。当竖向应力为100 kPa时, 随着循环次数的增加曲线呈现稳定形, 出现“波浪”段。

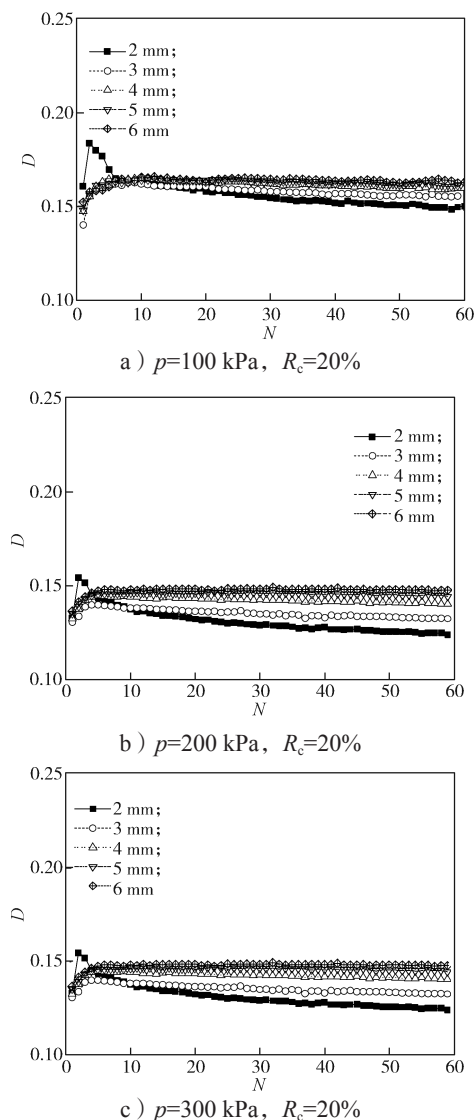
当位移幅值为3~6 mm时, GCRSM的 G_N/G_1-N 曲线均处于竖向坐标1.0以下, G_N/G_1 曲线随循环次数的增加呈递减特性, 曲线稳定且略微低于竖向坐标

1.0, G_N/G_1 曲线受循环次数影响较小, 非线性特征不明显, 与位移幅值为2 mm时 G_N/G_1-N 曲线走势呈现明显差异。由此可以得出: 循环次数对小位移剪切GCRSM动剪模量有增加效应; 对大剪切应变的有略微减小效应。当竖向应力较小时, 循环次数对动剪模量影响不稳定, 呈现波动性。

小位移剪切类似“震荡”作用, 使砂与砂、橡胶颗粒与橡胶颗粒、砂与橡胶颗粒之间发生小程度互相挤压和摩擦, 并没有去“棱角化”, 反而得到振实, 摩擦阻力增大, 咬合更加紧密, 所以抗剪强度增强, G_N/G_1-N 曲线走势呈现上升趋势。小竖向应力大位移、大竖向应力大位移情况下, 出现动摩擦效应加强, 颗粒之间去“棱角化”明显, 更容易剪切变形, 这是 G_N/G_1-N 曲线出现略微小于1.0的重要因素。

3.3 循环次数对阻尼比的影响

图6给出了配比为20%和30%橡胶砂在5种不同位移幅值、3种不同竖向应力下, 阻尼比 D 随循环次数 N 的变化曲线。



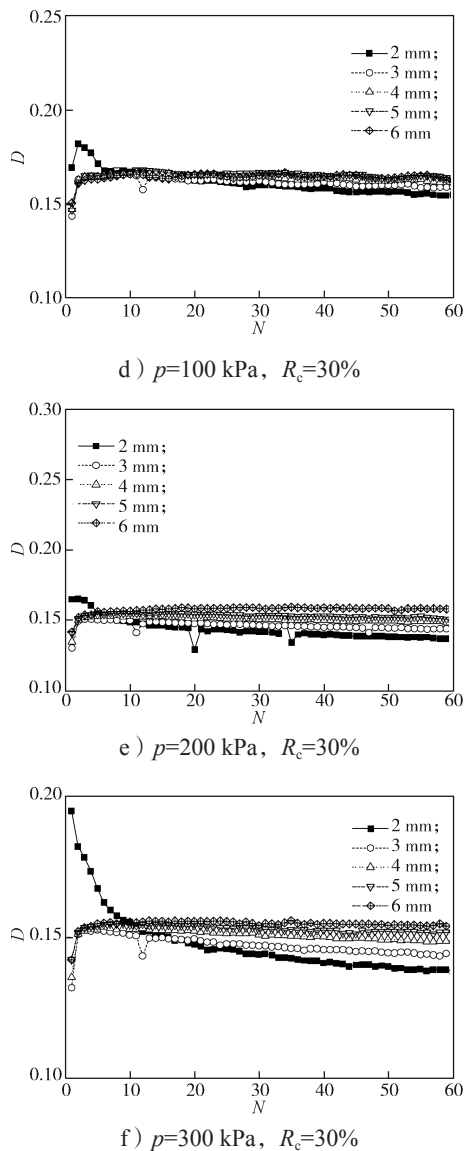


图6 2种配比、3种竖向应力下的橡胶砂阻尼比 D 随循环次数的变化曲线

Fig. 6 Damping ratio curves of the GCRSM under two different mass fractions and three different vertical consolidation pressures with the change of the cyclic number

由图6可知,位移幅值为2 mm时, $D-N$ 曲线随循环次数的增加明显呈现先上升后下降再趋于平稳的变化趋势,区别于位移幅值分别为3, 4, 5, 6 mm时曲线,后者 $D-N$ 曲线随循环次数的增加呈现非线性上升然后趋于平稳的变化趋势。由图可以看出循环次数为10~20, 曲线的阻尼比趋于稳定。由此可得:当竖向应力较小时, $D-N$ 曲线达到稳定要求的循环次数较小;当竖向应力较大时, $D-N$ 曲线达到稳定要求的循环次数较大。

当循环次数增加特别是当小位移幅值时,这种循环单剪类似“振动”将颗粒“振实”,颗粒之间通过棱角咬合紧密, GCRSM 动剪模量相应增加,耗能

能力相应减小,则阻尼比下降后趋于平稳,这与小位移幅值下循环次数对滞回曲线的影响机理相似。而位移幅值分别为3, 4, 5, 6 mm的大应变循环单剪,颗粒之间相互摩擦导致去“棱角化”,耗能能力增强,阻尼增大,故 $D-N$ 曲线呈现先上升后趋于平缓的变化趋势,这与大位移幅值下循环次数对滞回曲线的影响机理相似。而当竖向压力增大时,“振实”和“棱角化”效应增强, $D-N$ 曲线达到稳定要求时的循环次数较大。

4 结论

1) 相同配比、小竖向应力下,随着循环次数的增加,材料吸收能量的能力减小,减震的效能逐渐下降,塑性变形能力下降。相同配比较大竖向应力下,循环次数对材料动力特性的影响不明显。

2) 相同配比、大竖向应力下,滞回曲线随循环次数变化越不明显,循环次数对小配比、小竖向应力橡胶砂混合物影响比较明显,对大竖向应力橡胶砂影响不明显。

3) 循环次数对小位移剪切 GCRSM 动剪模量有增加效应,对大剪切应变的有略微减小效应。当竖向应力较小时,循环次数对动剪模量影响不稳定,呈现波动性。

4) 循环次数为10~20, 曲线的阻尼比趋于稳定。当竖向应力较小时, $D-N$ 曲线达到稳定要求的循环次数较小;当竖向应力较大时, $D-N$ 曲线达到稳定要求的循环次数较大。

参考文献:

- [1] WICHTMANN T, TRIANTAFYLIDIS T. Influence of a Cyclic and Dynamic Loading History on Dynamic Properties of Dry Sand, Part I: Cyclic and Dynamic Torsional Prestraining[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2004, 24(2): 127-147.
 - [2] NAGASE H, SHIMIZU K, HIRO-OKA A, et al. Earthquake-Induced Residual Deformation of Ariake Clay Deposits with Leaching[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2006, 26(2): 209-220.
 - [3] 柏立懂. 荷载历史对砂土最大剪切模量影响的共振柱试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2366-2374.
- BAI Lidong. Effects of Loading History on Maximum Shear Modulus of Sand by Resonant Column Tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2011, 30(11): 2366-2374.

- [4] 黄茂松, 李 帅. 长期往复荷载作用下近海饱和软黏土强度和刚度的弱化特性 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1491-1498.
HUANG Maosong, LI Shuai. Degradation of Stiffness and Strength of Offshore Saturated Soft Clay Under Long-Term Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1491-1498.
- [5] 尚守平, 刘方成, 杜运兴, 等. 应变累积对黏土动剪模量和阻尼比影响的试验研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 683-688.
SHANG Shouping, LIU Fangcheng, DU Yunxing, et al. Experimental Study on Effect of Shear Strain Accumulation on Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Clay Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 683-688.
- [6] 刘方成, 尚守平, 王海东. 循环荷载下黏土应变累积强化模型研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2457-2462.
LIU Fangcheng, SHANG Shouping, WANG Haidong. Study of Strain Accumulation Strengthened Model for Clay Under Cyclic Loadings[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2457-2462.
- [7] 周 建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究 [J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 75-78.
ZHOU Jian, GONG Xiaonan. Study on Strain Soften in Saturated Soft Clay Under Cyclic Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(5): 75-78.
- [8] LEE J, SALGADO R, BERNAL A, et al. Shredded Tires and Rubber-Sand as Lightweight Backfill[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(2): 132-141.
- [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] CHRIST M, PARK J B, HONG S S. Laboratory Observation of the Response of a Buried Pipeline to Freezing Rubber-Sand Backfill[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(9): 943-950.
- [11] TSANG H H, LO S H, XU X, et al. Seismic Isolation for Low-to-Medium-Rise Buildings Using Granulated Rubber-Soil Mixtures: Numerical Study[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(14): 2009-2024.
- [12] 陈 璐. 橡胶砂动力特性的循环单剪试验研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016.
CHEN Lu. Experimental Study on Cyclic Shear Test of Dynamic Characteristics of Rubber-Sand Mixture[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2016.
- [13] 刘方成, 吴孟桃, 陈巨龙, 等. 土工格室加筋对橡胶砂动力特性影响的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1616-1625.
LIU Fangcheng, WU Mengtao, CHEN Julong, et al. Experimental Study on Influence of Geo-Cell Reinforcing on Dynamic Properties of Rubber-Sand Mixtures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1616-1625.

(责任编辑: 申 剑)