

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.02.014

土工袋单元体循环剪切特性试验

陈爽¹, 鲁洋^{1,2}, 刘斯宏¹, 方斌昕¹, 贾凡³, 张呈斌⁴

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 中国水利水电科学研究院结构材料研究所, 北京 100038; 4. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 330110)

摘要: 采用室内大型剪切系统通过变剪切应变幅值条件下土工袋单元体系列循环剪切试验, 研究了土工袋单元体的袋内材料填充率、竖向应力、剪切应变幅值等因素对其动力特性的影响。结果表明: 在竖向应力为 80 kPa 时, 袋内材料填充率越大土工袋减振效果越好, 综合考虑施工效率等因素, 建议采用 90% 作为土工袋单元体的最优填充率; 竖向应力越大土工袋单元体的动剪切模量越大, 水平剪切变形越大土工袋单元体的阻尼比越大; 扰动较小时土工袋具有保持自身稳定的能力, 扰动足够大时土工袋利用自身柔性提升阻尼, 大量耗散振动能量。
关键词: 土工袋单元体; 循环剪切; 填充率; 阻尼比; 动剪切模量
中图分类号: TU472.3⁺4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)02-0098-07

Experimental study on cyclic shear characteristics of single soilbag

CHEN Shuang¹, LU Yang^{1,2}, LIU Sihong¹, FANG Binxin¹, JIA Fan³, ZHANG Chengbin⁴

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Department of Structure and Materials, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
4. Power China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 330110, China)

Abstract: The effects of material filling rate, vertical stress, amplitude of shear strain and other factors on the dynamic characteristics of single soilbag were studied by the cyclic shear test of single soilbag under the condition of variable shear strain amplitude using a large indoor shear system. The results showed that when the vertical stress is 80 kPa, the greater the material filling rate, the better the damping effect of the single soilbag. Considering the construction efficiency and other factors, it is suggested that 90% should be used as the optimal filling ratio of the single soilbag. When the vertical stress is greater, the dynamic shear modulus of the single soilbag is large and the greater the horizontal shear displacement amplitudes, the greater the damping ratio of the single soilbag. In other word, when the disturbance is small, the single soilbag has the ability to maintain its own stability, while the disturbance is large enough, the single soilbag uses its own flexibility to lift the damping and dissipates a large amount of vibration energy.
Key words: single soilbag; cyclic shear; filling rate; damping ratio; dynamic shear modulus

近年来,土工袋作为一种新型加筋土材料,因具有抗压强度高^[1-3]、可就地取材、防冻胀性能好^[4]、经济环保^[5-6]等优点得到工程界的认可,已广泛应用于边坡^[7-8]、挡墙^[9]、公路路基^[10-11]、堤防^[12]及房屋基础^[13]等工程中。实践证明,土工袋结构不仅具有稳定的层间摩擦特性^[14-15],还具有良好的减振消能性能,若将其用于地震多发区村镇的减震防灾工程中,将具有广阔的应用前景。

在实际工程中,土工袋大多是采用竖直堆叠或交错堆叠形成组合体的布置方式。李玲君等^[16]采用室内大型直剪仪开展了一系列竖直堆叠土工袋的循环剪切试验,研究了袋内填充土体在不同粒径、级配和黏粒含量时对土工袋基础减振消能效果的影响,发现粒径和级配对土工袋减振消能效果影响不大。Wang 等^[17-18]

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0128900); 国家自然科学基金(52109123)
作者简介: 陈爽(1996—),男,硕士研究生,主要从事地基加固及基础减隔震等研究。E-mail: shuangchen@hhu.edu.cn
通信作者: 刘斯宏(1964—),教授,博士,主要从事土石坝、粒状体力学、地基加固等研究。E-mail: sihongliu@hhu.edu.cn
引用本文: 陈爽,鲁洋,刘斯宏,等. 土工袋单元体循环剪切特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):98-104.
CHEN Shuang, LU Yang, LIU Sihong, et al. Experimental study on cyclic shear characteristics of single soilbag [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(2):98-104.

采用激振试验对比分析了不同层数、不同排列方式对土工袋组合体竖向减振效果的影响,发现沿高度方向的加速度衰减主要集中于顶部 3 层土工袋内,且交错排列方式效果更好。刘斯宏等^[19-20]开展了一系列土工袋挡墙大型振动台模型试验,研究了实际地震波作用下土工袋挡墙的加速度放大系数、挡墙位移、墙后动土压力等因素的变化规律,印证了土工袋挡墙具有一定的柔性,在地震中可以表现出良好的抗震性能。可以发现,目前针对土工袋动力特性方面的研究主要集中在土工袋组合体结构上,对于土工袋单元体动力特性的研究较少。土工袋作为一种特殊的柔性加筋土材料,不仅其层间界面可以起到良好的阻尼耗能效果,其单元体自身也会通过剪切变形产生阻尼耗能效果。实际上,土工袋单元体是土工袋构筑物中的最小结构单元,其动力特性及减振耗能效果将直接影响土工袋组合体乃至整个构筑物的动力响应。因此,研究土工袋单元体的动力特性对于深入揭示土工袋组合体结构减振耗能作用机理至关重要。

本文采用室内大型剪切系统,通过变剪切应变幅值条件下土工袋单元体的系列循环剪切试验研究填充率、竖向应力、剪切应变幅值等因素对土工袋单元体基本动力参数的影响,以期对土工袋地基、挡墙等工程的抗震设计提供参考。

1 试验装置与试验材料

1.1 试验装置

试验在河海大学自主研制的室内大型剪切系统上进行,该系统主要由竖向加载系统、水平加载系统、量测系统及数据采集系统 4 部分组成,如图 1 所示。竖向加载系统主要由安装在反力架横梁上的竖向伺服作动器和加载板两部分组成,作动器通过加载板将竖向荷载均匀地施加到土工袋试件的上表面,在作动器和加载板之间设置滑轮装置,用来消除水平剪切过程中二者之间的摩擦力,加载系统可提供的最大竖向荷载为 30 kN。水平张拉系统由两侧的电机和柔性链条组成,试验过程中为保证水平剪切过程连续且稳定,设置电机驱动螺杆以 2 mm/min 的剪切速率同向移动,通过柔性链条拉动加载板做往复剪切运动。为防止剪切过程中土工袋上下表面与加载装置产生相对滑移,在加载板下表面和反力架底板处均粘贴强摩擦型砂纸。量测系统主要由安装在水平张拉系统上的 LTR-1 型拉压力传感器和安装在加载板上表面的 DTH-A-100 型位移传感器组成。数据采集装置为 UCAM-60B 型静态数据采集仪,水平拉力传感器和位移传感器均连接在该数据采集仪上进行试验数据的同步采集,采集频率为 2 Hz。

1.2 试验材料

试验材料为定制的方形土工编织袋,原材料为聚丙烯(PP),克重为 200 g/m²,尺寸为 0.4 m×0.4 m×0.125 m。通过抗拉强度试验测得编织袋经、纬向极限抗拉强度与伸长率的关系曲线如图 2 所示,其中,经、纬向极限抗拉强度分别为 47.36 kN/m 和 44.11 kN/m,经、纬向极限伸长率分别为 13.70% 和 15.98%。袋内填充材料为自然风干的天然河砂,不均匀系数为 4.034,曲率系数为 0.882,最大粒径为 4.75 mm,最大干密度为 1.871 g/cm³,最小干密度为 1.525 g/cm³,成型压实后袋内砂土的相对密度为 0.433,细度模数为 2.496,属于中密砂。河砂填充率将影响土工袋的成型尺寸,本文规定对于同一规格的土工编织袋,填入土料后,按照土工袋成型高度计算袋内材料填充率 δ ,并将土工袋成型高度 12.5 cm 定义为 100% 填充率,不同袋内材料填充率情况下的土工袋如图 3 所示。

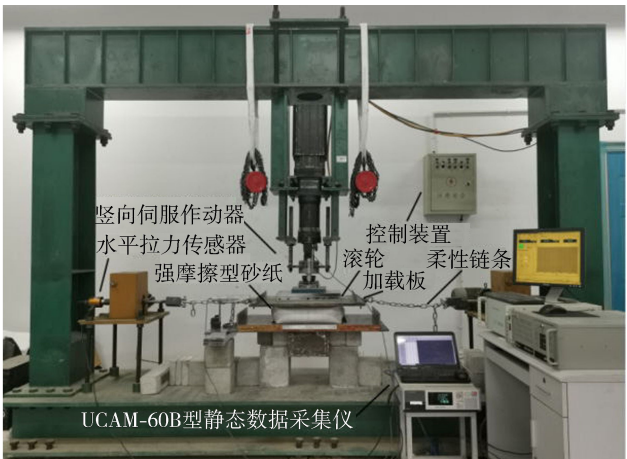


图 1 土工袋循环剪切试验装置
Fig.1 Cyclic shear test device for soilbags

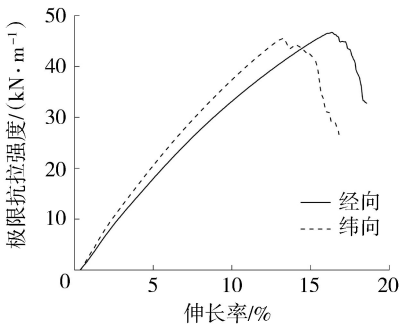


图 2 土工袋极限抗拉强度与伸长率关系曲线
Fig.2 Relationship between limit tensile strength and elongation of soilbags

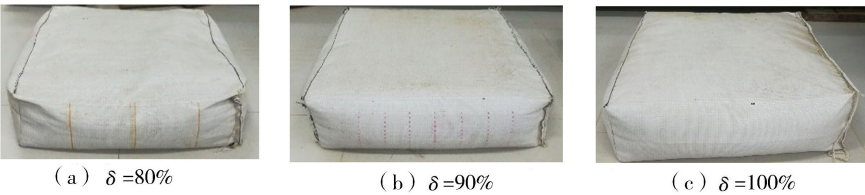


图3 不同袋内材料填充率情况下的土工袋

Fig.3 Photos of soilbag under different material filling rates

2 试验方案

本文试验的目的是研究袋内材料填充率 δ 、竖向应力 σ 和剪切应变幅值 γ 等因素对土工袋单元体动力特性的影响。试验分为3步:①先进行3种不同竖向应力作用下的土工袋单元体单调直剪试验,根据单调直剪试验过程中加载板发生滑移时峰值剪切应力对应的剪切应变确定循环剪切试验中剪切应变幅值的合理范围;②参考土工合成材料筋土界面循环剪切特性方面的相关研究^[21],进行同一竖向应力作用下3种不同袋内材料填充率的土工袋单元体循环剪切试验,研究填充率对土工袋动力参数的影响,并确定最优填充率;③在最优填充率的基础上,采用控制变量法,进行3种不同竖向应力作用下土工袋单元体变剪切应变幅值的循环剪切试验,以分析竖向应力和剪切应变幅值等因素对土工袋单元体动力特性的影响。具体试验工况如表1所示,循环剪切应变加载过程如图4所示。

表1 试验工况

Table 1 Testing conditions			
试验类型	σ/kPa	$\delta/\%$	$\gamma/\%$
单调直剪	40	90	
	80	90	
	160	90	
循环剪切	40	90	1、2、4、8
	80	80	1、2、4、8
	80	90	1、2、4、8
	80	100	1、2、4、8
	160	90	1、2、4、8

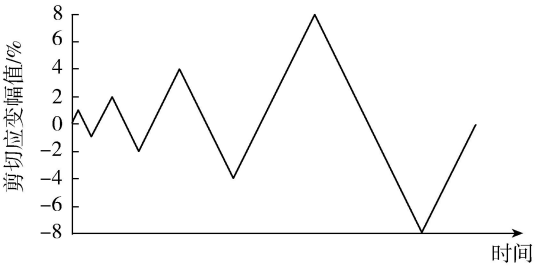


图4 循环剪切试验加载过程

Fig.4 Loading process of cyclic-shear test

3 试验结果与分析

图5为不同竖向应力作用下,河砂土工袋单元体单调直剪试验的结果。从图5可以看出,不同竖向应力作用下土工袋单元体剪切应力与剪切应变关系曲线呈现出相类的规律,即剪切应力随着剪切应变的增大而增大,而后逐渐趋于稳定。值得注意的是,当竖向应力为40 kPa时,剪切应变达到8%左右后剪切应力基本不再继续增大;而当竖向应力为160 kPa时,可以发现剪切应变达到10%以后,剪切应力仍有继续增大的趋势,但增幅逐渐变缓。

出现上述现象的原因主要是当竖向应力较小时,土工袋张力不能充分发挥出来,水平抗剪应力主要由袋体与袋内填料之间的摩擦力提供;当竖向应力增加到足够大时,袋体膨胀,土工袋的张力得到充分发挥,水平抗剪应力主要由袋体与袋内填料之间的摩擦力以及土工袋张力共同提供,并且在剪切过程中,随着剪切应变幅值的增大,编织袋的张力也在逐渐增大,所以当竖向应力为160 kPa时,单调直剪试验表现出剪切应力持续增大的现象。根据单调直剪试验结果,为了防止在进一步开展的循环剪切试验过程中土工袋单元体上下砂纸表面发生相对滑动,将循环剪切试验中的最大剪切应变幅值初步设定为8%。

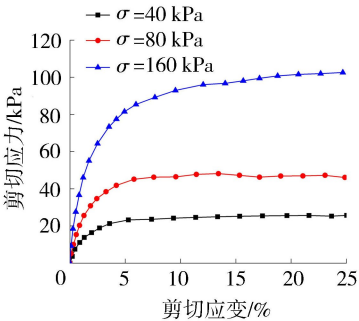


图5 土工袋单元体单调直剪试验结果

Fig.5 Results of monotonously direct shear tests of single soilbag

3.1 袋内材料填充率的影响

3.1.1 滞回圈和骨干曲线

图 6 为竖向应力为 80 kPa 时,不同袋内材料填充率情况下,土工袋单元体的应力-应变关系曲线。从不同袋内材料填充率的滞回曲线形态可以发现,袋内材料填充率越大,滞回曲线越饱满,其滞回耗能特征越好,说明袋内材料填充率对土工袋单元体动力特性具有较为明显的影响。

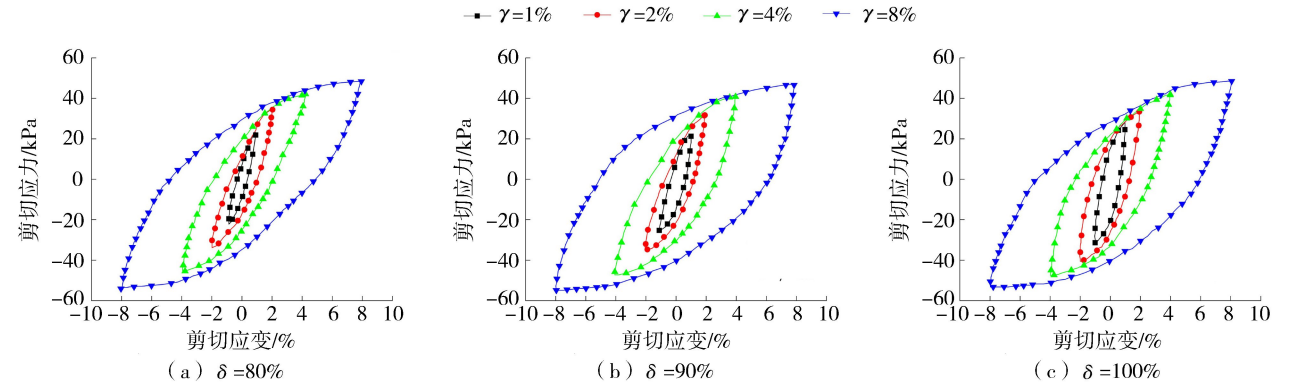


图 6 土工袋单元体应力-应变关系曲线($\sigma=80\text{ kPa}$)

Fig. 6 Stress-strain relation curve of single soilbag ($\sigma=80\text{ kPa}$)

图 7 为竖向应力为 80 kPa 时,不同袋内材料填充率情况下土工袋单元体峰值剪切应力随剪切应变幅值变化的关系曲线(骨干曲线),可以看出,袋内材料填充率分别为 80%、90% 和 100% 时,峰值剪切应力随剪切应变幅值变化的关系曲线基本重合,说明在循环剪切过程中,土工袋单元体峰值剪切应力受袋内材料填充率的影响较小。这主要是因为土工袋单元体的水平抗剪应力主要由袋体张力提供,袋内材料填充率的大小主要影响张力发挥的快慢,并不会影响峰值剪切应力的大小。值得注意的是,不同袋内材料填充率情况下,土工袋单元体峰值剪切应力在循环剪切初始阶段的增幅略有差别,主要表现为袋内材料填充率越大,在剪切初始阶段峰值剪切应力的增幅也越大,但当达到一定剪切应变时不同袋内材料填充率情况下的峰值剪切应力基本重合。主要原因可能是袋内材料饱满程度不同,导致土工袋张力发挥的快慢不同,袋内材料越饱满,在相同竖向应力作用下,土工袋越容易膨胀,张力发挥作用的速度也相对越快。

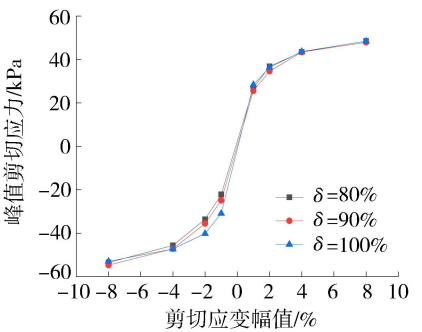


图 7 土工袋单元体骨干曲线($\sigma=80\text{ kPa}$)

Fig. 7 Backbone curve of single soilbag ($\sigma=80\text{ kPa}$)

3.1.2 动力参数

动剪切模量 G 和阻尼比 λ 是土工袋结构动力设计及其安全性能评价中需要考虑的 2 个关键参数,其中,动剪切模量反映结构在动荷载作用下抵抗变形的能力,动剪切模量越大表明结构保持自身稳定的性能越好;阻尼比反映结构在周期性动荷载作用下的减振消能效果。为了达到良好的减振效果,结构必须具备足够的阻尼比,并且阻尼比越大表明结构的减振消能性能越好。

图 8 为竖向应力为 80 kPa 时,不同剪切应变幅值条件下,土工袋单元体动力参数随袋内材料填充率变化的关系曲线。从图 8(a)可知,在相同剪切应变幅值条件下,土工袋单元体阻尼比随着袋内材料填充率的提高呈现出增长的趋势,说明袋内材料填充率越大,即装填得越饱满,土工袋单元体的减振消能效果越好。值得注意的是,当剪切应变幅值小于 4% 时,此时剪切应变幅度较小,随着袋内材料填充率的提高,阻尼比均表现为增长的规律,并且剪切应变幅值越大,土工袋单元体的阻尼比越高;当剪切应变幅值达到 8% 时,此时剪切应变幅度较大,随着袋内材料填充率的提高,阻尼比并不是持续增大,而是表现为先增大而后略有降低的趋势。出现上述现象的主要原因是随着袋内材料填充率的提高,袋内材料的颗粒增多,颗粒之间的总耗能增大,所以表现为阻尼比随着袋内材料填充率的提高而增大。但是,当袋内材料填充率达到 100% 时,由于袋内材料充填过多,在竖向荷载作用下,张力迅速发挥作用,在袋体约束产生的“附加黏聚力”作用下土工袋的整体柔性反而有所减弱,在一定程度上限制了袋体在水平方向的活动范围,此时土工袋只能在较小应变幅值

范围内表现出良好的阻尼特性。

由图 8(b) 可以看出,当剪切应变幅值较小时,动剪切模量基本不随袋内材料填充率的增大而变化;当剪切应变幅值较大时,动剪切模量随着袋内材料填充率的增大略有提高。总体来看,袋内材料填充率对土工袋单元体动剪切模量的影响不明显。

在实际工程中,从加固的角度看,土工袋多以交错层叠的形式进行布置,较高的袋内材料填充率可以保证同层相邻两个土工袋之间形成缝隙,堆筑土工袋组合体结构时,上层土工袋的一部分可以嵌入到下层土工袋袋间的缝隙中形成稳固的层间嵌固作用,以达到增强层间抗滑稳定性的目的,有效保证土工袋结构的整体性^[22]。值得注意的是,在实际施工过程中如果袋内材料填充率太高则会大大降低土工袋的封口效率。综合考虑上述因素,本文建议选取 90% 作为土工袋单元体的最优填充率。该参数是在竖向应力为 80 kPa 时给出的建议值,是否在其他竖向应力作用时具有普遍适用性,还有待后续试验进一步验证。

3.2 竖向应力的影响

3.2.1 滞回圈和骨干曲线

图 9 为袋内材料填充率为 90% 时,不同竖向应力作用下土工袋单元体的应力-应变关系曲线,可以看出,随着竖向应力的增大,滞回圈主对角线的倾角越来越大,动剪切模量也随之增大。

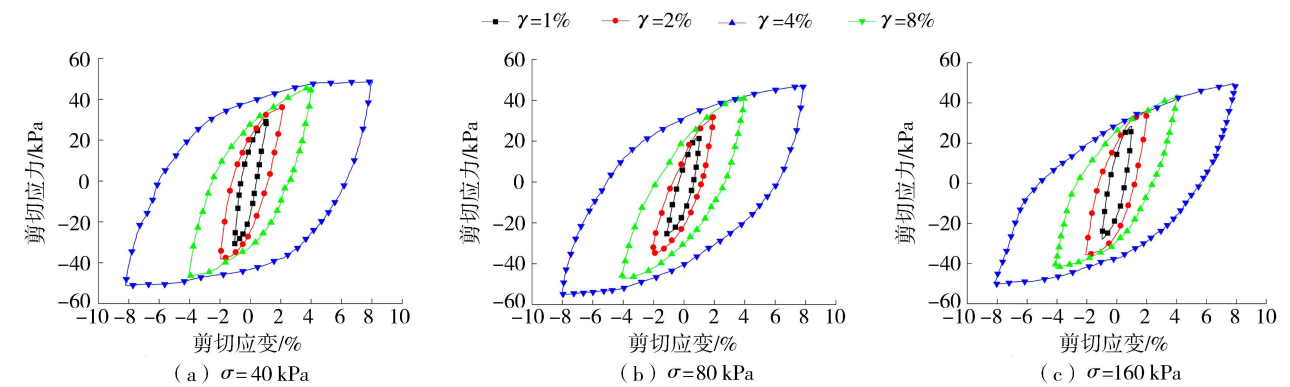


图 9 土工袋单元体应力-应变关系曲线(δ=90%)
Fig. 9 Stress-strain relation curve of single soilbag (δ=90%)

图 10 为袋内材料填充率为 90% 时,不同竖向应力作用下土工袋单元体峰值剪切应力随剪切应变幅值变化的关系曲线,可以发现,曲线基本围绕原点呈中心对称分布。当剪切应变幅值较小时,峰值剪切应力迅速增大,随着剪切应变幅值的增大,峰值剪切应力的增长趋势逐渐趋于缓慢,这表明当剪切应变幅值较大时,土工袋单元体可以达到相对稳定的应力状态。

3.2.2 动力参数

图 11 为袋内材料填充率为 90% 时,不同剪切应变幅值条件下,土工袋单元体动力参数随竖向应力变化的关系曲线。由图 11(a) 可知,随着竖向应力的增大,土工袋单元体的阻尼比整体呈现出略有减小的趋势,其中当剪切应变幅值小于 4% 时,这种减小的趋势并不明显。这可能是因为当剪切应变较小时,土工袋表面张力可以很好地发挥作用,将内部土体紧紧地束缚,此时竖向应力的大小对阻尼比的影响并不明显。当剪切应变较大时,竖向应力越大,袋体表

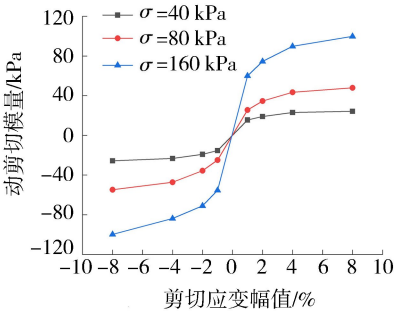


图 10 土工袋单元体骨干曲线(δ=90%)
Fig. 10 Backbone curves of single soilbag (δ=90%)

面张力发挥越明显,土工袋整体性越好,阻尼效果也相对较小。

从图 11(b)可知,在相同剪切应变幅值条件下,土工袋单元体动剪切模量均随竖向应力的增大而增大;在相同竖向应力作用下,随着剪切应变幅值的增大,土工袋单元体的动剪切模量减小。说明土工袋具有可变的动剪切模量。

3.3 剪切应变幅值的影响

图 12 为袋内材料填充率为 90% 时,不同竖向应力作用下土工袋单元体动力参数随剪切应变幅值变化的关系曲线。从图 12(a)可知,在不同竖向应力作用下,随着循环剪切应变幅值的增大,土工袋单元体的阻尼比均逐渐增大,说明水平方向剪切变形越大土工袋单元体的减振效果越好。这可能是因为当剪切应变幅值增大时,维持土工袋整体稳定性的表面张力被破坏,土工袋整体发生剪切变形,在往复剪切过程中,由于编织袋经丝和纬丝的张弛作用以及袋内土体颗粒之间的摩擦作用而大量耗能。

从图 12(b)可知,在相同竖向应力作用下,随着剪切应变幅值的增大,土工袋单元体的动剪切模量均逐渐衰减。此外还可以发现当剪切变形相同时,作用在土工袋上的竖向应力越大,土工袋单元体的动剪切模量也越大,说明土工袋具有可变的动剪切模量。这可能是因为当地震扰动较小时,土工袋整体变形较小,袋体表面张力充分发挥作用,可以有效保证上部结构不产生较大的滑移;当地震扰动较大时,袋内土体发生剪切破坏,同时编织袋的经丝和纬丝持续张弛变形,袋体不能保持稳定的表面张力,但由于编织袋对土体的束缚作用,此时土工袋整体仍具有一定的动剪切模量以保持上部结构的稳定。

4 结 论

- a. 土工袋单元体的减振耗能特性受袋内材料填充率的影响,在竖向应力为 80 kPa 时,袋内材料填充率越大,土工袋减振耗能效果越好。综合考虑实际施工过程中,袋内材料填充率过大会降低土工袋封口效率等因素,建议土工袋单元体最优填充率为 90%。该建议值是否在其他竖向应力作用时具有普遍适用性,还有待后续试验进一步研究。
- b. 在循环剪切过程中,土工袋单元体的峰值剪切应力主要受竖向应力和剪切应变幅值的影响,基本不受袋内材料填充率的影响。即峰值剪切应力随竖向应力的增大而增大,随剪切应变幅值的增大而增大,当剪切应变幅值增大到一定程度时峰值剪切应力逐渐趋于稳定。
- c. 土工袋单元体具有可变的阻尼比和动剪切模量,是一种良好的减振耗能材料。在一定范围内,水平剪切变形越大,土工袋单元体阻尼比越大;竖向应力越大,土工袋单元体动剪切模量越大。

参考文献:

[1] JIA F,LIU S H,SHEN C M,et al. Predicting strength of soilbags under cyclic compression[J]. Geosynthetics International,2020, 27(6) :646-654.

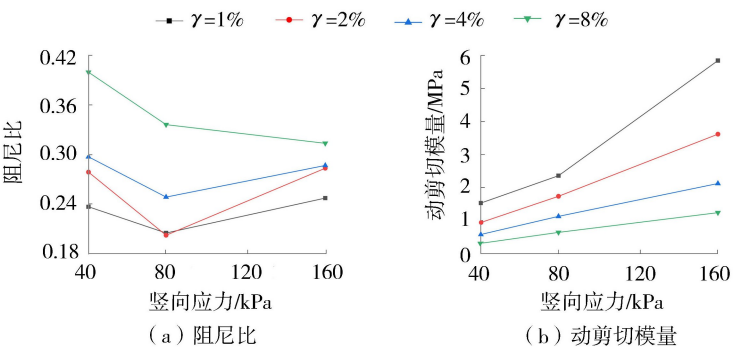


图 11 土工袋动力参数随竖向应力变化关系曲线($\delta=90\%$)
Fig. 11 Variation curves of dynamic parameters of soilbag with vertical stress ($\delta=90\%$)

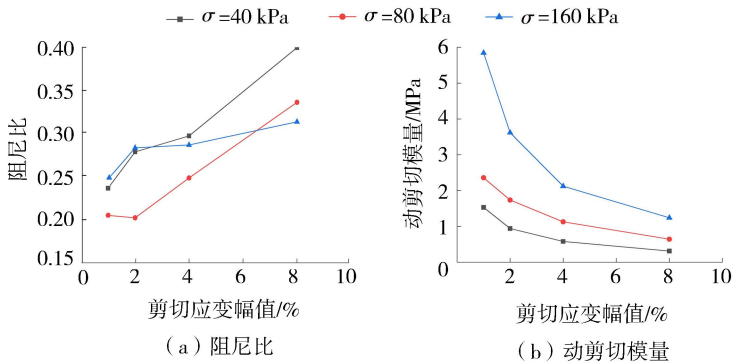


图 12 土工袋动力参数随剪切应变幅值变化关系曲线($\delta=90\%$)
Fig. 12 Variation curves of dynamic parameters of soilbag with amplitude of shear strain ($\delta=90\%$)

- [2] WANG L J, LIU S H, LIAO J, et al. Field load tests and modelling of soft foundation reinforced by soilbags[J]. *Geosynthetics International*, 2019, 26(6): 580-591.
- [3] 李卓, 范光亚, 刘斯宏, 等. 土工袋防渠道冻胀水-热-力耦合数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 408-417. (LI Zhuo, FAN Guangya, LIU Sihong, et al. Moisture-heat-stress coupled numerical simulation of soilbags preventing the frost heaving of channel[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(5): 408-417. (in Chinese))
- [4] LI Z, LIU S H, WANG L J, et al. Experimental study on the effect of frost heave prevention using soilbags[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 85: 109-116.
- [5] 刘斯宏, 汪易森. 土工袋技术及其应用前景[J]. 水利学报, 2007, 38(增刊1): 644-648. (LIU Sihong, WANG Yisen. Reinforcement mechanism of soilbags and its applications[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(Sup1): 644-648. (in Chinese))
- [6] 高军军, 刘斯宏, 王柳江. 竖向荷载下土工袋的有限元数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 524-528. (GAO Junjun, LIU Sihong, WANG Liujiang. Numerical simulation of a soilbag under vertical loads by FEM [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(6): 524-528. (in Chinese))
- [7] LIU S H, LU Y, WENG L P, et al. Field study of treatment for expansive soil/rock channel slope with soilbags[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(4): 283-292.
- [8] HUANG C C, MATSUSHIMA K, MOHRI Y, et al. Analysis of sand slopes stabilized with facing of soil bags with extended reinforcement strips[J]. *Geosynthetics International*, 2008, 15(4): 232-245.
- [9] WANG L J, LIU S H, ZHOU B. Experimental study on the inclusion of soilbags in retaining walls constructed in expansive soils [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(1): 89-96.
- [10] MATSUOKA H, LIU S H. A new earth reinforcement method using soilbags [M]. London: Taylor & Francis/Balkema, 2006: 23-25.
- [11] LIU S H, LIAO J, BONG T T, et al. Repeated loading of soilbag-reinforced road subgrade[J]. *Geosynthetics International*, 2021, 28(2): 113-124.
- [12] LUCA M, BARBARA Z, NUNZIO D N, et al. Sand bag barriers for coastal protection along the Emilia Romagna littoral, Northern Adriatic Sea, Italy[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 29(4): 370-380.
- [13] MATSUOKA H, LIU S H. New earth reinforcement method by soilbags ("Donow") [J]. *Soils and Foundations*, 2003, 43, (6): 173-188.
- [14] 刘斯宏, 樊科伟, 陈笑林, 等. 土工袋层间摩擦特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1874-1880. (LIU Sihong, FAN Kewei, CHEN Xiaolin, et al. Experimental studies on interface friction characteristics of soilbags [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(10): 1874-1880. (in Chinese))
- [15] FAN K W, LIU S H, WENG L P, et al. Sliding stability analysis of a retaining wall constructed by soilbags[J]. *Géotechnique Letters*, 2019, 9(3): 211-217.
- [16] 李玲君, 刘斯宏, 徐小东, 等. 袋内材料对土工袋动力特性参数影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 131-136. (LI Lingjun, LIU Sihong, XU Xiaodong, et al. Experimental study of effects of soil fills on dynamic characteristics parameters of soilbags [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(1): 131-136. (in Chinese))
- [17] WANG Y Q, LI X, LIU K, et al. Experiments and DEM analysis on vibration reduction of soilbags [J]. *Geosynthetics International*, 2019, 26(5): 551-562.
- [18] LIU S H, GAO J J, WANG Y Q, et al. Experimental study on vibration reduction by using soilbags [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42(1): 52-62.
- [19] 刘斯宏, 贾凡, 陈笑林, 等. 土工袋挡墙振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊2): 4338-4347. (LIU Sihong, JIA Fan, CHEN Xiaolin, et al. Shaking table model test on a retaining wall of soilbags [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(Sup2): 4338-4347. (in Chinese))
- [20] LIU S H, JIA F, CHEN X L, et al. Experimental study on seismic response of soilbags-built retaining wall [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, 48(5): 603-613.
- [21] 刘飞禹, 王攀, 王军, 等. 颗粒粒径对格栅-土界面静、动力直剪特性的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 150-156. (LIU Feiyu, WANG Pan, WANG Jun, et al. Influence of soil particle size on monotonic and cyclic direct shear behaviors of geogrid-soil interface [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(1): 150-156. (in Chinese))
- [22] FAN K W, LIU S H, HELEN Y P, et al. Effect of infilled materials and arrangements on shear characteristics of stacked soilbags [J]. *Geosynthetics International*, 2020, 27(6): 662-670.