

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.01.012

不同袋内材料对土工袋单元体静动力剪切特性的影响

陈爽¹,刘斯宏²,鲁洋²,方斌昕²,贾凡³,张呈斌⁴

(1. 中水北方勘测设计研究有限责任公司,天津 300222; 2. 河海大学水利水电学院,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: 为了进一步研究不同袋内填充材料对土工袋单元体在静动力作用下剪切特性的影响,采用室内大型剪切系统对不同袋内填充材料土工袋单元体进行了一系列单剪试验和循环剪切试验。结果表明:土工袋单元体表现出的剪切变形规律基本符合摩尔-库仑屈服准则,其抗剪强度主要由土工袋表面张力和袋内土体颗粒之间的摩擦力共同提供;不同袋内填充材料对土工袋单元体的剪切变形特性有一定的影响,相对于壤土土工袋、碎石土工袋,天然河砂土工袋单元体的抗剪强度、阻尼耗能效果与抵抗变形的能力均相对更好,因此从抗剪强度及减振耗能特性的角度看,实际减隔震工程中采用河砂装填是一个较好的选择。

关键词: 土工袋单元体;填充材料;剪切变形;单剪试验;循环剪切试验

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)01-0090-09

Influence of different filling materials on monotonic and cyclic direct shear behaviors of single soilbag

CHEN Shuang¹, LIU Sihong², LU Yang², FANG Binxin², JIA Fan³, ZHANG Chengbin⁴

(1. China Water Resources Bei Fang Investigation, Design and Research Co. Ltd., Tianjin 300222, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower 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: In order to further investigate the static and dynamic characteristics of single soilbag filled with different materials, a series of simple shear tests and cyclic shear tests were performed through a large indoor shear apparatus. The test results show that the shear behavior of single soilbag follows the Mohr-Coulomb failure criterion basically, and its shear-resistant properties is mainly provided by the surface tension of the soilbag and the friction between soil particles in the soilbag. Different filling materials have a certain influence on the shear characteristics of single soilbag. By comparing the static and dynamic characteristics of single soilbag filled with river sand, loam and gravel respectively, it can be found that the single soilbag filled with river sand has the best shear performance, vibration and energy reduction effect, and deformation resistance ability. Therefore, it's a good choice to use river sand as a common building material for loading in practical earthquake isolation engineering, from the perspective of shear resistance, vibration reduction and energy dissipation characteristics of single soilbag.

Key words: single soilbag; filling materials; shear deformation; monotonic direct shear test; cyclic shear test

土工袋作为一种新型“柔性”加筋土材料,因其具有抗压强度高^[1-3]、可就地取材、防冻胀性能好^[4-5]、经济环保^[6-7]等优势被广泛应用到边坡、挡墙、公路路基等^[8-10]工程中。结构体在静、动力作用下的剪切变形特性是保证其稳定性和安全性的重要指标^[11-12]。目前,国内外已有很多学者对土工袋组合体结构的静动力特性进行了研究。

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,助理工程师,硕士,主要从事水工结构设计研究。E-mail:shuangchen@hhu.edu.cn

通信作者: 鲁洋(1991—),男,副研究员,博士,主要从事水工岩土和土工合成材料研究。E-mail:luy@hhu.edu.cn

引用本文: 陈爽,刘斯宏,鲁洋,等.不同袋内材料对土工袋单元体静动力剪切特性的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):90-98.

CHEN Shuang, LIU Sihong, LU Yang, et al. Influence of different filling materials on monotonic and cyclic direct shear behaviors of single soilbag[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1): 90-98.

土工袋静力剪切特性方面,刘斯宏等^[13-14]研究发现层间界面抗剪强度与袋体间的摩擦、袋内材料粒径大小及排列方式等因素有关,层间等效摩擦系数与土工袋自身变形密切相关。樊科伟等^[15]通过一系列直剪试验研究了咬合、嵌固作用对由 8 个袋装石土工袋组成的组合体结构层间界面剪切力学强度和破坏形式的影响。Krahn 等^[16]通过大型直剪仪确定了 6 个土工袋平铺后形成的界面与草皮、碎石之间的剪切特征和摩擦系数。Matsushima 等^[17]通过一系列直剪试验研究了水平和倾斜角度下竖向堆叠 3 个土工袋的破坏模式。

土工袋动力剪切特性方面,陈爽等^[18]进行了错缝堆叠土工袋组合体层间界面的循环剪切特性试验,发现错缝堆叠形式下土工袋上下层间会形成良好的嵌固作用,使其在循环剪切过程中表现出与叠层橡胶支座相类似的可恢复性。李玲君等^[19]采用室内大型直剪仪开展了一系列竖直堆叠 4 个土工袋的循环剪切试验,探究了袋内填充土体的粒径、级配和黏粒含量等因素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具有一定的影响。

综上,目前针对土工袋静动力特性方面的研究主要集中在多个袋子堆叠的土工袋组合体结构上,对于土工袋单元体静动力特性方面的研究还十分有限^[20]。实际上,土工袋组合体结构在剪切过程中不仅产生层间滑动破坏,每个土工袋自身也会发生剪切变形破坏。值得注意的是单元体是土工袋组合体结构中的最小结构单元,其剪切破坏特征将对整个组合体结构的安全性和稳定性造成直接影响。

本文采用室内大型剪切系统,分别对不同袋内填充材料土工袋单元体开展一系列单剪试验和循环剪切试验,研究不同袋内填充材料的土工袋单元体在静力、动力作用下的剪切变形特性,以期对土工袋地基、挡墙等实际工程的设计提供参考。

1 试验装置与材料

1.1 试验装置

试验装置选用河海大学自主研制的室内大型剪切系统,该系统主要由竖向加载系统、水平张拉系统、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样的上表面,在作动器和加载板之间设置滚轮装置,用来消除水平循环剪切过程中装置之间摩擦力对试验结果的干扰。水平张拉系统由两侧的水平拉力装置和柔性链条组成,在试验时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 的剪切速率匀速移动。单剪试验时,驱动一侧的电机通过柔性链条拉动加载板进行单向剪切;循环剪切试验时,同时驱动两侧电机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上与土工袋接触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。数据采集系统为 UCAM-60B 型静态数据采集仪,采集频率为 2 Hz。

1.2 试验材料

试验过程中选用定制的方形土工编织袋,原材料为聚丙烯(PP),密度为 200 g/m²。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如图 2 所示。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 15.98% 和 13.70%。试验采用的 3 种不同袋内填充材料分别为自然风干的天然河砂、壤土、建筑碎石(图 3),其级配曲线如图 4 所

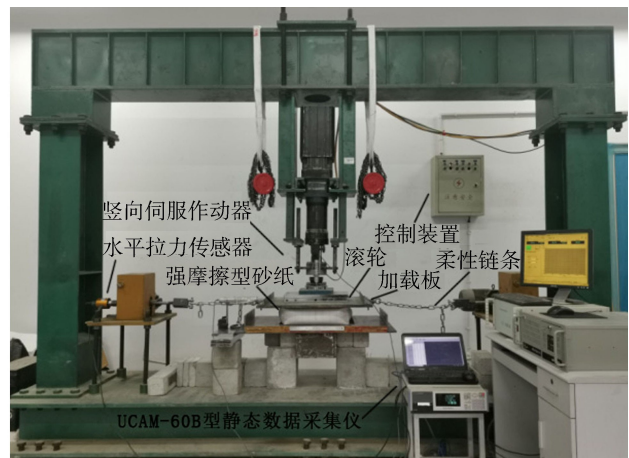


图 1 土工袋室内大型剪切系统

Fig. 1 Large-scale direct shear apparatus for soilbag

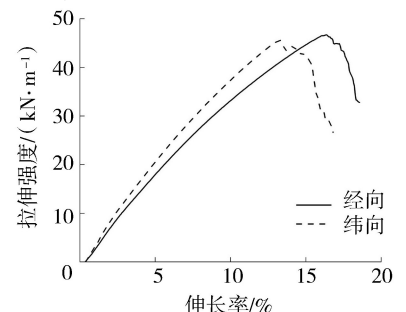


图 2 编织袋拉伸强度与伸长率关系曲线

Fig. 2 Relationship between tensile strength and elongation of woven bags

示。天然河砂的细度模数为 2.733,属于中砂,不均匀系数为 2.979,曲率系数为 0.871;壤土(剪后)是指壤土土工袋经过循环剪切试验之后袋内土体的级配曲线;碎石的粒径主要分布在 10~20 mm。为了方便,将装填以上 3 种材料的土工袋分别简称为“河砂土工袋”“壤土土工袋”和“碎石土工袋”。

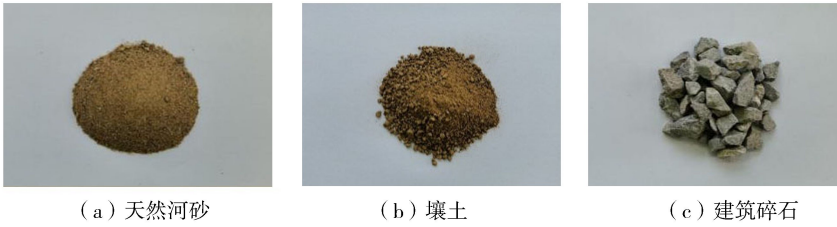


图3 不同袋内填充材料

Fig.3 Different filling materials in soilbag

2 试验方案

a. 对河砂土工袋、壤土土工袋和碎石土工袋单元体分别进行法向应力 σ 为 40 kPa、80 kPa、160 kPa 的单调直剪试验,研究不同袋内填充材料对土工袋单元体在静力作用下单调直剪特性的影响,并根据单调直剪试验中加载板发生滑移时所对应的极限剪切应变确定后续循环直剪试验中剪切应变幅值的合理范围。

b. 对 3 种不同袋内填充材料土工袋单元体进行法向应力 $\sigma = 80$ kPa,剪切应变幅值 γ 分别为 2%、4%、8%、16% 的变剪切应变幅值的循环直剪试验。

c. 针对河砂土工袋单元体开展不同法向应力 ($\sigma = 40$ kPa、80 kPa、160 kPa) 作用下的循环直剪试验,研究法向应力对其动力特性的影响。

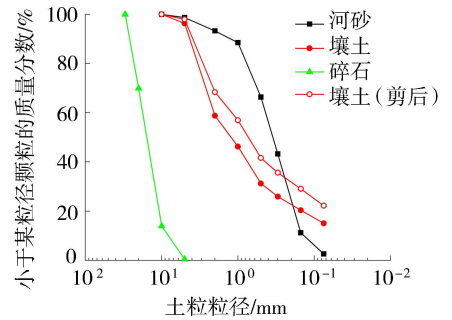


图4 不同袋内填充材料级配曲线

Fig.4 Gradation curves of different filling materials within soilbag

3 试验结果与分析

3.1 单剪试验

3.1.1 不同袋内填充材料条件下单剪试验

由图 5 可知,3 种不同法向应力作用下,不同袋内填充材料土工袋单元体的剪切应力均随法向应力的增大而增大,当剪切应变达到一定程度时,剪切应力增幅减小并逐渐趋于平缓。这主要是因为土工袋单元体属于“柔性”加筋土材料,当其上下表面同时受到方向相反的剪切应力作用时,土工袋单元体会沿水平方向发生一定程度的整体剪切变形。在该过程中,袋内土体自身的抗剪切能力与“土工袋与加载板的摩阻力”相互博弈。当袋内土体抗剪切能力大于摩阻力时,土工袋与加载板之间发生滑动,此时便达到了土工袋单元体的

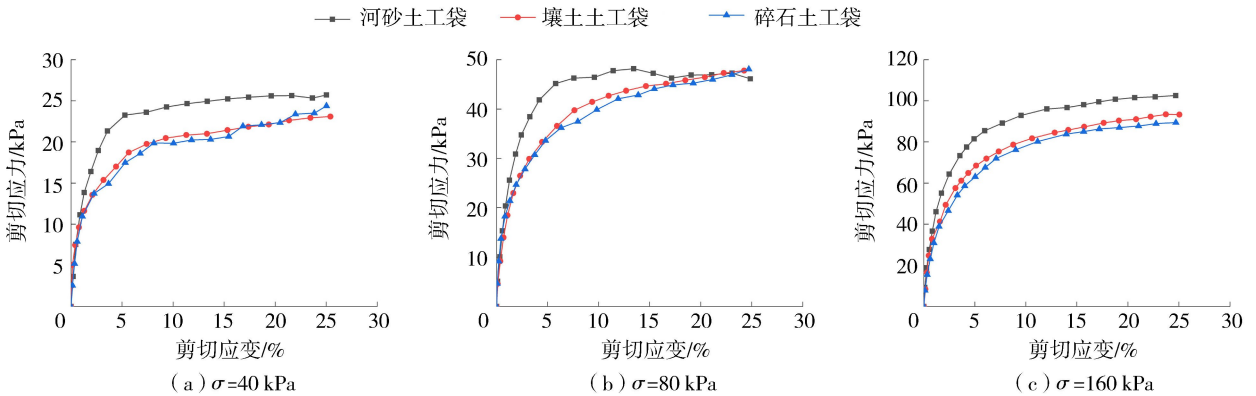


图5 不同袋内材料土工袋单元体单剪试验结果

Fig.5 Results of monotone direct shear test of single soilbag filled with different filling materials

最大剪切强度。在不同法向应力作用下,壤土土工袋单元体和碎石土工袋单元体剪切应力-剪切应变关系曲线均基本重合,其中壤土土工袋单元体的剪切应力要略大于碎石土工袋单元体。河砂土工袋单元体的剪切应力均大于另外 2 种填充材料土工袋单元体,并且在土工袋单元体单剪试验过程中,随着剪切应变的增大,河砂土工袋单元体剪切应力-剪切应变关系曲线前期增幅相对较快。这表明随着剪切应变的增大,河砂土工袋单元体会率先达到相对更大的抗剪强度。这主要是因为循环剪切过程中,与壤土和建筑碎石这 2 种袋内材料相比,天然河砂更容易从编织袋缝隙中逃逸到土工袋和加载板之间,进而增大了摩阻力。

3.1.2 静荷载作用下土工袋单元体抗剪强度曲线

由图 6 可知,不同袋内填充材料土工袋单元体的剪切应力均表现为随着水平剪切应变增大而增大的规律,并且在前期增幅较大,当剪切到一定程度时,剪切应力的增大幅度开始逐渐趋于缓慢。为了防止在进一步开展的土工袋单元体循环剪切试验中出现由于剪切应变过大导致土工袋单元体与加载板以及装置底板粘贴的砂纸之间发生相对滑动的情况,同时综合考虑 3 种袋内填充材料土工袋单元体在不同法向应力下的单剪试验结果,本文土工袋单元体循环剪切试验中的最大剪切应变幅值设定为 16%。

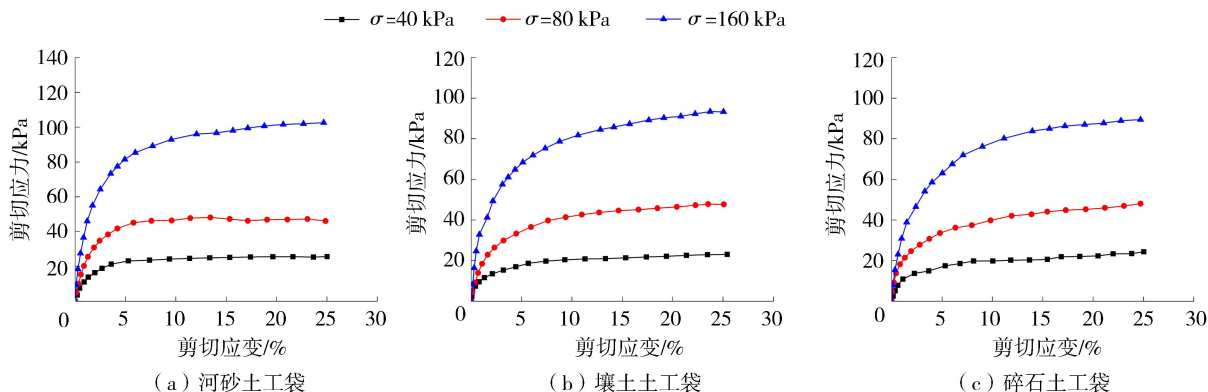


图 6 不同法向应力作用下土工袋单元体单剪试验结果

Fig. 6 Results of monotone direct shear test of single soilbag under different vertical stresses

图 7 为 3 种不同法向应力 ($\sigma = 40 \text{ kPa}$ 、 80 kPa 、 160 kPa) 作用下,不同袋内填充材料土工袋单元体峰值剪切强度的包络曲线,其中 R^2 为包络曲线方程的相关系数, τ 为剪切应力。由图 7 可知,在 3 种袋内填充材料土工袋单元体的单剪试验过程中,法向应力与峰值剪切强度均呈现出良好的线性相关性,这种关系可以近似使用摩尔-库仑准则: $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ 进行描述,其中 c 、 φ 分别为单剪试验过程中土工袋单元体整体表现出的类黏聚力和类内摩擦角。通过线性拟合得到,河砂土工袋、壤土土工袋、碎石土工袋单元体的类内摩擦角 φ 分别为 31.11° 、 28.46° 、 27.95° 。河砂土工袋单元体相对于其他 2 种袋内填充材料土工袋单元体来说,其自身表现出的抗剪性能相对更优。

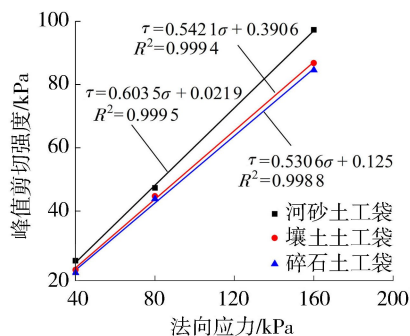


图 7 单剪试验中峰值剪切应力包络曲线

Fig. 7 Envelopes of peak shear stress from monotonic direct shear tests

3.2 循环剪切试验

动剪切模量 G 和等效阻尼比 λ 是研究土工袋单元体动力特性及其安全性能评价时需要考虑的 2 个关键参数。 G 是反映结构在动荷载作用下抵抗变形的能力, G 越大表明结构保持自身稳定的性能越好。 λ 是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 λ , λ 越大结构的减振消能效果越好。

根据图 8 中的剪切应力峰值和相应的剪切应变幅值,可通过式(1)计算土工袋单元体的 G 和 λ 。

$$G = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad \lambda = \frac{A_L}{\pi S_{\Delta abc}} \quad (1)$$

式中: τ_c 、 γ_c 分别为滞回圈顶点的剪切应力和剪切应变; A_L 为滞回圈的面积; $S_{\Delta abc}$ 为三角形 abc 的面积。

3.2.1 不同袋内填充材料的影响

从图 9 滞回曲线的形态可以发现,3 种袋内填充材料土工袋单元体滞回圈的饱满程度不同,其中河砂土

工袋单元体的滞回曲线最为饱满,说明袋内填充材料对土工袋单元体的滞回耗能特征具有一定的影响。

由图 10 可知,3 种袋内填充材料土工袋单元体的骨干曲线基本重合。在相同剪切应变幅值条件下,河砂土工袋单元体的峰值剪切应力基本均大于其他 2 种填充材料土工袋。值得注意的是,当剪切应变幅值达到一定程度时,河砂土工袋单元体的骨干曲线沿剪切应变幅值正方向略有下降,与其单剪试验中的规律相似。

图 11 为法向应力为 80 kPa 时,3 种不同袋内填充材料土工袋单元体动力参数随剪切应变幅值变化的关系曲线。由图 11(a)可知,随着剪切应变幅值的增大,等效阻尼比均逐渐增大。在 4 种不同剪切应变幅值($\gamma=2\%$ 、 4% 、 8% 、 16%)条件下,河砂土工袋单元体的等效阻尼

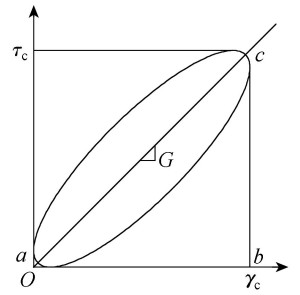


图 8 循环剪切试验理想滞回圈示意图
Fig. 8 Schematic diagram of ideal hysteresis loop in cyclic shear test

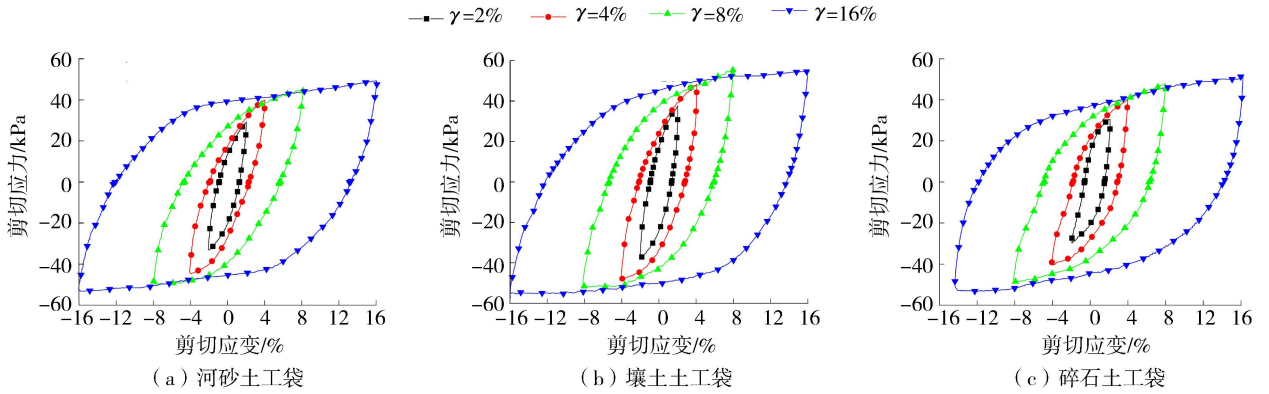


图 9 不同袋内填充材料土工袋单元体单剪试验结果 ($\sigma=80\text{ kPa}$)

Fig. 9 Results of monotone direct shear test of single soilbag filled with different filling materials under $\sigma=80\text{ kPa}$

比均最大,而壤土土工袋单元体的等效阻尼比均最小。说明,袋内填充材料对土工袋单元体减振消能特性具有一定的影响。河砂土工袋单元体的减振消能效果最好,而壤土土工袋单元体的减振消能效果则相对较弱。出现这一现象的主要原因是,自然风干的天然河砂所具有的流动性最好,将其装入编织袋后形成的河砂土工袋表现出的“柔性”也最佳。在水平剪切应力的往复作用下,袋内土体颗粒之间相对稳定的应力状态不断被破坏,土体颗粒发生大范围的无规则流动。在循环剪切过程中,土体颗粒之间相互摩擦,大量耗散能量。而编织袋对土体颗粒的包裹作用,有效保证了其流动性不会对土工袋单元体整体的结构稳定性造成影响。

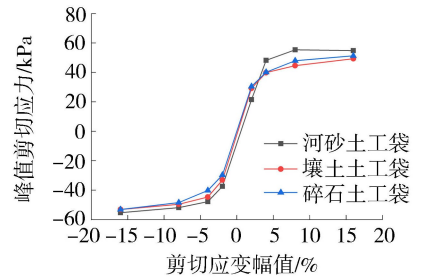


图 10 不同袋内填充材料土工袋的骨干曲线 ($\sigma=80\text{ kPa}$)

Fig. 10 Backbone curves of single soilbag filled with different filling materials under $\sigma=80\text{ kPa}$

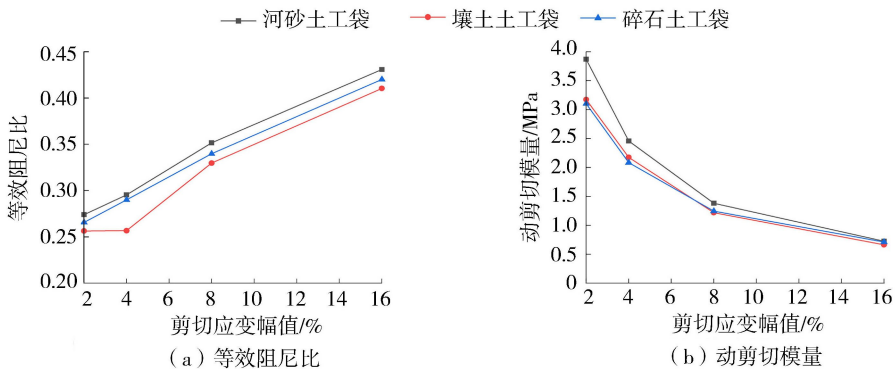


图 11 不同袋内填充材料土工袋单元体动力参数 ($\sigma=80\text{ kPa}$)

Fig. 11 Dynamic parameters of single soilbag filled with different filling materials under $\sigma=80\text{ kPa}$

由图 11(b)可知,随着剪切应变幅值的增大,3 种袋内填充材料土工袋单元体的动剪切模量均减小,并逐渐趋于平稳。在相同剪切应变幅值条件下,河砂土工袋单元体的动剪切模量均最大,壤土土工袋和碎石土工袋单元体的动剪切模量基本相等且均相对较小。这表明在水平剪切应力的往复作用下,河砂土工袋单元体抵抗水平剪切变形的能力相对最强。这是因为在法向应力作用下,河砂颗粒因其良好的流动性可以充满整个袋内空间,使土工袋整体达到密实程度较高的稳定应力状态,进而可以有效抵抗水平剪切变形;碎石土工袋中各颗粒之间存在较大孔隙,在水平剪切应力作用下,其相对稳定的应力状态容易被破坏;壤土土工袋在法向应力作用后,部分大的团聚土颗粒容易被压碎(图 4),颗粒间的密实程度有所提高,但因其流动性较差不能充满整个袋内空间,导致编织袋边角仍存在张力未发挥的区域,降低了其初始状态下抵抗水平变形的能力。

剪胀性和剪缩性是指试样在循环剪切过程中体积膨胀或缩小的性质,是研究土工合成材料筋土界面循环剪切特性时的一个重要因变量^[21]。本文定义竖向累计位移表示的是在水平剪切应力作用下,加载板每完成一次完整循环后回到初始位置时,土工袋单元体竖向位移的累计值。竖向位移为正表示剪胀,反之表示剪缩。由图 12 可知,在循环剪切过程中,3 种袋内填充材料的土工袋单元体均表现出剪缩规律,即随着水平剪切应变的增大,竖向位移均表现为负值。

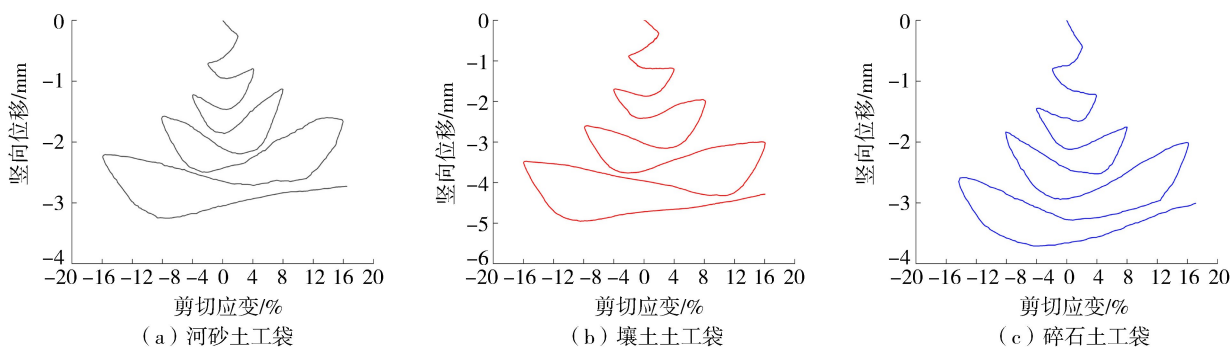


图 12 竖向位移-剪切应变关系曲线 ($\sigma=80\text{ kPa}$)

Fig. 12 Relationship curves between vertical displacement and shear strain under $\sigma=80\text{ kPa}$

由图 13 可知,不同袋内填充材料情况下的土工袋单元体在循环剪切过程中均表现为竖向累计位移随着剪切应变幅值增大而增大的规律。其中,在相同剪切应变幅值条件下,壤土土工袋竖向累计位移最大,河砂土工袋竖向累计位移最小。出现这一现象的主要原因是河砂土工袋的竖向位移是由于颗粒间的孔隙减小所致;而壤土土工袋的竖向位移不仅仅是颗粒间孔隙减小所致,还有个重要的原因是部分大的壤土团聚颗粒在法向应力和水平循环剪切应力的共同作用下被压碎所致。从图 4 中也可以发现,壤土土工袋在经过循环剪切试验前后袋内土体小于各级粒径颗粒的含量均在初始基础上有所增加。

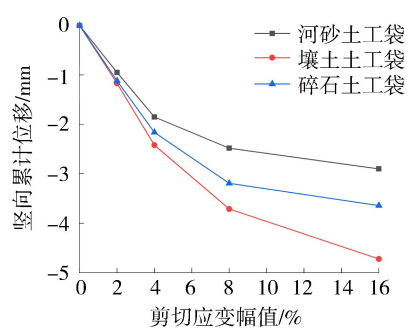


图 13 竖向累计位移随剪切应变幅值变化的关系曲线

Fig. 13 Relationship curves between vertical cumulative displacement and shear strain amplitude

综上,河砂土工袋单元体所表现出的剪切变形特性、动力特性以及竖向变形稳定性均相对更优,因此,在后续讨论不同法向应力和不同剪切应变幅值 2 种试验因素时,仅以河砂土工袋单元体为例。

3.2.2 不同法向应力的影响

随着法向应力的增大,不同剪切应变条件下滞回圈主对角线与横轴的夹角均表现为逐渐增大的趋势(图 14),根据动剪切模量计算公式的物理意义可知,动剪切模量随着该夹角的增大而增大。这表明,在剪切过程中,随着法向应力的逐渐增大土工袋单元体整体表现出一定程度的压硬性。

由图 15 可知,不同法向应力作用下骨干曲线均基本围绕坐标原点呈中心对称分布。随着剪切应变幅值的增大,河砂土工袋峰值剪切应力也不断增大,当剪切应变幅值增大到一定程度时,峰值剪切应力增幅减小且数值逐渐趋于平缓,土工袋单元体整体达到最大抗剪强度状态。

由图 16(a)可知,随着法向应力的增大,不同剪切应变幅值条件下的河砂土工袋单元体的等效阻尼比均不断减小。这主要是因为随着法向应力的增大,袋子表面张力增大,袋内砂土也逐渐变得密实,由于土工袋

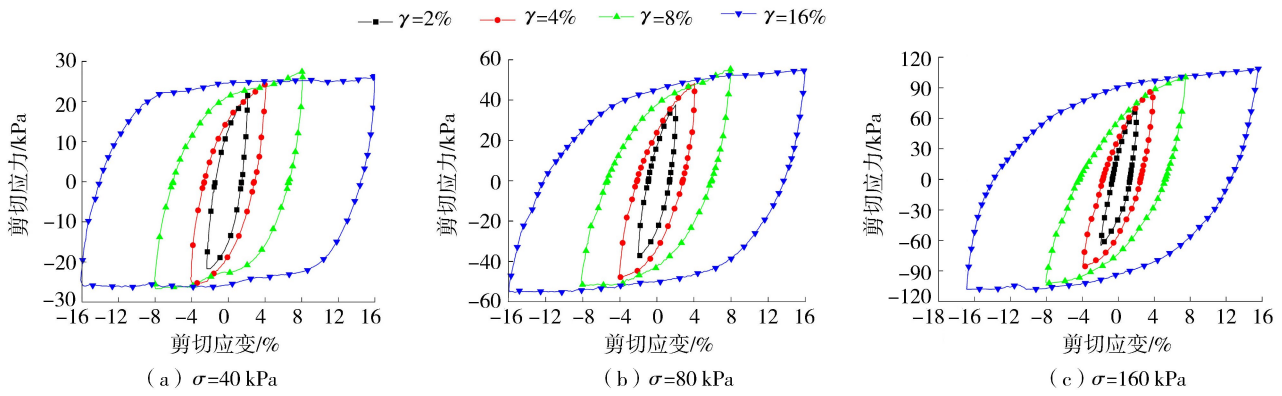


图 14 不同法向应力作用下河砂土工袋单元体应力-应变关系曲线

Fig. 14 Stress-strain relation curves of single soilbag filled with sand under different vertical stress

整体的“压硬性”,等效阻尼比呈现减小的趋势。

由图 16(b)可知,随着法向应力的增大,不同剪切应变幅值条件下的河砂土工袋单元体的动剪切模量均逐渐增大。这主要是因为,在循环剪切试验过程中,随着法向应力的增大,河砂土工袋单元体内部土体颗粒逐渐被压缩得密实,袋子张力发挥得也越来越充分,土工袋整体强度显著增强,其抵抗水平剪切变形的能力也得到大大提高。

3.2.3 不同剪切应变幅值的影响

由图 17(a)可知,随着剪切应变幅值的不断增大,不同法向应力作用下河砂土工袋单元体的等效阻尼比均不断增大。这主要是因为土工袋单元体属于柔性加筋土材料,在法向应力作用下,袋体

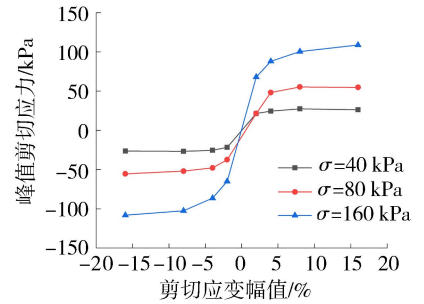


图 15 不同法向应力作用下的骨干曲线
Fig. 15 Backbone curves of soilbag under different vertical stresses

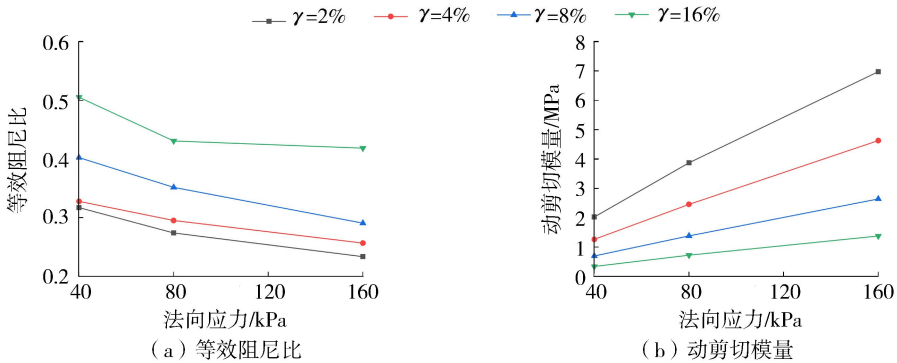


图 16 不同法向应力作用下河砂土工袋单元体的动力参数

Fig. 16 Dynamic parameters of single soilbag filled with sand under different vertical stresses

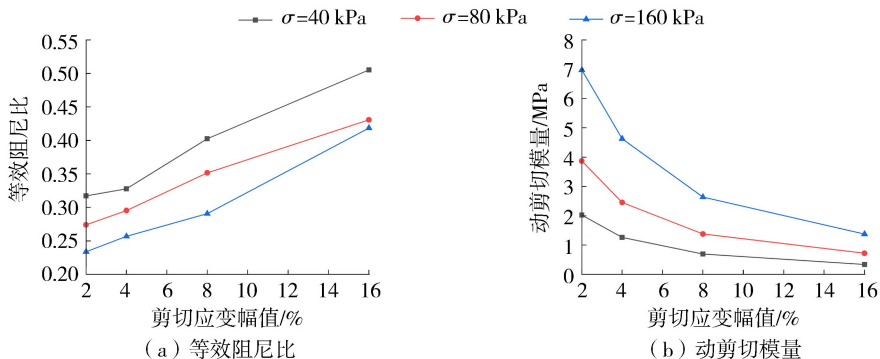


图 17 不同剪切应变幅值条件下河砂土工袋单元体的动力参数

Fig. 17 Dynamic parameters of single soilbag filled with sand under different shear strain amplitudes

获得一定的表面张力。当水平剪切应力持续作用在土工袋单元体上时,随着剪切应变幅值的增大,袋体表面的张力也在原有基础上不断增大。在循环剪切试验过程中,正是由于袋子表面之间的往复张拉作用大量消耗了循环剪切作用所带来的能量,与此同时袋内的砂土颗粒也在袋子表面张力的作用下相互之间摩擦耗能,并且水平剪切应变的幅值越大,能量消耗得也越大。

由图 17(b)可知,随着剪切应变幅值的增大,不同法向应力作用下的河砂土工袋单元体的动剪切模量均表现为不断减小的规律,并且这种减小的趋势逐渐趋于平缓。这主要是因为循环剪切试验过程中,水平剪切应力破坏了土工袋单元体原有稳定的应力状态,随着剪切应变幅值的逐渐增大,袋内砂土颗粒之间的相对位置也在其表面张力的作用下不断发生改变,动剪切模量因此有所降低。

4 结 论

a. 对河砂、壤土、碎石土工袋单元体自身进行了一系列单剪试验,发现 3 种土工袋单元体的法向应力与峰值剪切应力均呈现出良好的线性相关性,基本符合摩尔-库仑屈服准则,且土工袋单元体的抗剪强度主要由袋子表面张力及袋内土体颗粒之间的摩擦共同提供。通过比较三者的抗剪强度规律,发现河砂土工袋单元体的抗剪强度相比更优。

b. 不同袋内填充材料对土工袋单元体的动力特性有一定的影响。通过比较河砂、壤土、碎石土工袋单元体在循环剪切试验中动力参数的变化规律可以发现,河砂土工袋的减振消能效果最好,其抵抗水平剪切变形的能力也最强,且在循环剪切过程中,其竖向累计位移也最小。

c. 随着法向应力的增大,河砂土工袋单元体柔性减弱刚性增强,其阻尼消能效果有所降低,但其抵抗水平变形的能力大大提高;随着水平剪切应变的增大,其通过柔性变形达到耗能效果,但刚性有所降低。在实际工程中优先选用建筑砂料作为袋内填充材料,这样不仅能充分利用常用的建筑材料,所形成土工袋单元体抗剪强度和减振消能效果也相对更好。

参考文献:

- [1] LIU Sihong, JIA Fan, SHEN Chaomin, et al. Strength characteristics of soilbags under inclined loads [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46(1): 1-10.
- [2] JIA Fan, LIU Sihong, SHEN Chaomin, et al. Predicting strength of soilbags under cyclic compression [J]. *Geosynthetics International*, 2020, 27(6): 646-654.
- [3] WANG Liujiang, LIU Sihong, LIAO Jie, et al. Field load tests and modelling of soft foundation reinforced by soilbags [J]. *Geosynthetics International*, 2019, 26(6): 580-591.
- [4] LI Zhuo, LIU Sihong, WANG Liujiang, et al. Experimental study on the effect of frost heave prevention using soilbags [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 85: 109-116.
- [5] 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))
- [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] 刘斯宏, 汪易森. 土工袋技术及其应用前景 [J]. 水利学报, 2007(增刊 1): 644-648. (LIU Sihong, WANG Yisen. Reinforcement mechanism of soilbags and its applications [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007 (Sup1): 644-648. (in Chinese))
- [8] LIU Sihong, LU Yang, WENG Liping, et al. Field study of treatment for expansive soil/rock channel slope with soilbags [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(4): 283-292.
- [9] WANG Liujiang, LIU Sihong, ZHOU Bin. Experimental study on the inclusion of soilbags in retaining walls constructed in expansive soils [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(1): 89-96.
- [10] LIU Sihong, LIAO Jie, BONG T T, et al. Repeated loading of soilbag-reinforced road subgrade [J]. *Geosynthetics International*, 2021, 28(2): 113-124.
- [11] 朱俊高, 汪森, 黄维, 等. 钢-土接触面位移与强度特性直剪试验 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 265-271.

- (ZHU Jungao, WANG Miao, HUANG Wei, et al. Experimental study on displacement and strength behavior of interface between soil and steel using direct shear test[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(3):265-271. (in Chinese))
- [12] 贺林林, 冯楚杰, 杨柳, 等. 颗粒排列角度对砂土剪切特性的影响试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5):447-454. (HE Linlin, FENG Chujie, YANG Liu, et al. Experimental study of influence of particle arrangement angle on shear properties of sand[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(5):447-454. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 刘斯宏, 薛向华, 樊科伟, 等. 土工袋柔性挡墙位移模式及土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12):2267-2273. (LIU Sihong, XUE Xianghua, FAN Kewei, et al. Earth pressure and deformation mode of a retaining wall constructed with soilbags[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12):2267-2273. (in Chinese))
- [15] 樊科伟, 刘斯宏, 廖洁, 等. 袋装石土工袋剪切力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2):477-484. (FAN Kewei, LIU Sihong, LIAO Jie, et al. Experimental studies on shearing characteristics of the pebbles-filled soilbags[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2):477-484. (in Chinese))
- [16] KRAHN T, BLATZ J, ALFARO M, et al. Large-scale interface shear testing of sandbag dyke materials[J]. Geosynthetics International, 2007, 14(2):119-126.
- [17] MATSUSHIMA K, AQIL U, MOHRI Y, et al. Shear strength and deformation characteristics of geosynthetic soilbags stacked horizontal and inclined[J]. Geosynthetics International, 2008, 15(2):119-135.
- [18] 陈爽, 贾凡, 刘斯宏, 等. 错缝堆叠土工袋层间界面的循环剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊1):2945-2953. (CHEN Shuang, JIA Fan, LIU Sihong, et al. Experiments on the cyclic shear behavior of the interface between staggered stacking soilbags[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(Sup1):2945-2953. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 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. (in Chinese))
- [21] CEN Weijun, WANG H, YU L, et al. Response of high-density polyethylene geomembrane-sand interfaces under cyclic shear loading[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(2):04019166.

(收稿日期:2022-02-10 编辑:刘晓艳)