

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1493

土工袋界面动力特性的循环直剪试验研究

王柳江, 刘斯宏, 赵志杰, 沈超敏, 鲁 洋

(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 由于多层土工袋组合体袋子与袋子之间的非连续性, 将其作为低层建筑物的地基具有较好的减振消能效果, 但目前对土工袋界面动力特性的研究较少。为此, 利用大型直剪仪, 进行了土工袋界面和纯天然河砂的水平变幅循环剪切试验, 分析循环荷载作用下土工袋界面和纯天然河砂的剪应力、竖向位移、动剪切刚度以及等效阻尼比随剪切位移的变化规律, 探讨水平循环荷载作用下上、下土工袋的界面摩擦特性。结果表明, 土工袋界面初始剪切刚度、峰值剪应力和应变软化现象较纯天然河砂有所减弱, 但其滞回曲线更为饱满, Kondner-Zelasko模型能够较好地描述其骨干曲线; 除在较低竖向应力和较大剪切位移时表现出一定的剪胀性, 土工袋界面主要表现为剪缩性, 且总体剪缩量随着竖向压力、循环次数和剪切幅度的增加而增大, 但每一个循环中的竖向位移变化幅度较纯天然河砂明显减小; 相较于纯天然河砂, 土工袋界面的动剪切刚度减小, 等效阻尼比增大, 这进一步阐明了土工袋结构体减隔振机制。

关 键 词: 土工袋界面; 动力特性; 循环剪切试验; 阻尼比; 减隔振材料

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 06-1625-10

Experimental study on dynamic behaviour for soilbag interface using cyclic direct shearing test

WANG Liu-jiang, LIU Si-hong, ZHAO Zhi-jie, SHEN Chao-min, LU Yang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Since the layered soilbags is a congeries of individual soilbags, the discontinuous surface between the soilbags has the effect to reduce and absorb the vibration energy when it is used as foundation for low-rise building. However, the dynamic behaviour between soilbag interface was rarely studied so far. Using the large-scale direct shearing apparatus, the cyclic shearing tests were conducted on the soilbag interface and pure natural sand, and the variations of the shear stress, vertical displacement, dynamic shear stiffness, and equivalent damping ratio with shear displacement were compared. In addition, the interfacial frictional behaviour between the upper and lower soilbags was discussed. The results show that the initial shear stiffness, peak shear stress, and strain softening behaviour for soilbag interface are reduced compared to those of pure natural sand, but the shear stress-displacement loop is larger. The skeleton curve of soilbag interface can be better described using the Kondner-Zelasko model. For soilbag interface, an obvious contractive deformation is observed during cyclic shearing, while the dilatation is only observed under the low vertical stress and large shear displacement. The total contraction increases with increasing vertical stress, cyclic number and shear amplitude, and the change of vertical displacement within each cycle is smaller than that of pure natural sand. Additionally, the dynamic shear stiffness of soilbag interface is smaller than pure nature sand, but the equivalent damping ratio becomes larger, which indicates the advantage of soilbag structures to reduce vibration.

Keywords: soilbag interface; dynamic behaviour; cyclic shearing test; damping ratio; vibration reduction material

1 引 言

我国西部位于地壳运动板块交界处, 地质活动活跃, 属于地震高发区。在近期历次地震中, 普通

多层房屋建筑严重破坏, 因此, 寻找一种能应用于普通房屋建筑的廉价隔震方法非常必要^[1-2]。

Matsuoka^[3]、刘斯宏^[4-8]等研发了一种土工袋加固地基技术, 并应用于房屋地基、公路铁路路基、堤防、

收稿日期: 2020-10-07

修回日期: 2021-05-08

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2017YFE0128900); 中央高校基本科研业务费 (No.2017B624X14, No.B200205028)。

This work was supported by the National Key R&D Program of China(2017YFE0128900) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2017B624X14,B200205028).

第一作者简介: 王柳江, 男, 1985 年生, 博士, 副教授, 主要从事土石坝工程及地基处理技术方面的工作。E-mail: 15850514642@163.com

边坡加固及挡墙构筑等工程中。工程实践表明,土工袋具有很高的抗压强度,其不仅能有效地提高地基承载力,而且还具有良好的减振消能效果。近年来,由于土工袋的廉价性以及良好的减振消能效果,其引起了国内外学者的广泛关注。Matsuoka 等^[9]将土工袋垫层置于交通繁忙路段的道路路基中,监测到土工袋组合体能够有效吸收交通荷载引起的振动能量,减小交通荷载诱发的道路周围建筑物振动频率;Ye 等^[10]通过数值模拟研究了土工袋堆积体的阻尼效果,结果表明土工袋垫层离震动源越近,减振效果越好;Ding 等^[11]将土工砂袋作为公路垫层,通过模型试验发现其可以有效减小交通荷载引起的路基沉降以及峰值加速度,并研究了袋内材料、竖向应力、震动源频率及数量等对土工袋减振效果的影响;Sheng 等^[12]利用内装天然砂的多层土工袋组合体作为低层建筑物的隔震支座,结果表明,其不仅具有足够的承载力,还可以显著降低高铁行驶引起的环境振动对周围建筑物的影响;郑玉风等^[13]通过振动台试验,研究了土工袋加筋橡胶砂垫层作为刚性房屋的基底隔震垫层的减隔震效果,发现土工袋加筋橡胶砂垫层较纯砂垫层和橡胶砂垫层的隔震效应更好。此外,刘斯宏等^[14]还通过振动台试验,研究了土工袋挡墙在地震过程中的动力反应,发现土工袋挡墙可依靠自身变形耗散大量能量,是一种具有较好减震性能的柔性挡墙结构。

针对土工袋的减隔振机制及动力特性,Ansari 等^[15]首先通过有限元数值模拟初步探讨了土体与袋子材料接触摩擦特性对土工袋循环剪切作用下耗能规律的影响;王艳巧等^[16]基于离散单元法(DEM)建立了土工袋能量耗散方程,并分析了竖向循环加载过程中土工袋袋子张拉及袋内材料摩擦引起的耗能;刘斯宏^[17]、李玲君^[18]等通过水平循环剪切试验研究了土工袋组合体的动力特性,并进一步研究了土工袋尺寸、袋内材料及其含水率、竖向压力和水平剪应变对土工袋组合体减振消能效果的影响,研究表明,土工袋组合体具有可变的水平刚度和较大的阻尼比,且土工砂袋的具有较好的减隔振效果。然而,上述研究仅针对单个土工袋或整个土工袋组合体,并未考虑袋子之间的摩擦耗能。实际情况下,土工袋组合体袋子与袋子之间存在非连续性,袋子与袋子之间的界面摩擦将消耗很大一部分振动能。为此,考虑到循环荷载下袋体与袋体界面力学特性是土工袋减隔振结构设计和稳定性分析的重要依据,有必要对土工袋界面的动力特性进行深入研究。

循环直剪试验是研究加筋土中筋-土界面动力

特性的重要手段之一。Nye 等^[19]通过单调和循环直剪试验,研究了黏土与土工合成材料界面的剪切特性;Fox 等^[20]进行了一系列静力和动力直剪试验,对土工织物在动力作用下的损伤特性进行了研究;徐超等^[21]在大型多功能界面剪切仪上进行了土工格栅和标准砂界面的水平循环剪切试验,研究了循环荷载特征对界面剪切力和法向位移的影响;刘飞禹等^[22-24]通过循环直剪试验,研究了颗粒粒径、粒孔比、密实度、竖向应力、位移幅值等因素的循环剪切作用下,土工格栅-土界面的强度特性和体积变化行为;Wang 等^[25]讨论了不同颗粒粒径下土工格栅-土界面的循环剪切特性,并分析了界面的剪切刚度和阻尼比;Cen 等^[26]则研究了土工膜类型、竖向压力和水平加载速率等对土工膜-垫层界面动力特性的影响。综上所述,目前尚未有关于采用循环直剪试验研究土工袋界面动力特性的相关报道。

本文采用自主研发的大型直剪仪,开展土工袋界面的变幅循环剪切试验,研究其在水平循环荷载作用下,剪应力、竖向位移、动剪切模量以及等效阻尼比随剪切位移的变化规律。与此同时,进一步对袋内材料(纯天然河砂)开展对比试验,讨论土工袋界面的减振机制。本文试验结果对循环荷载下土工袋界面动力本构关系的研究具有重要意义。

2 试验条件

2.1 试验装置

本试验采用课题组自主研发的 ZJ-300 大型直剪仪^[27],由竖向加载系统、水平向剪切系统、上剪切盒、下剪切盒、数据采集系统组成,如图 1 所示。竖向加载系统由伺服电机、法向力作动器和控制器组成,法向力作动器安装在具有足够强度与刚性的自反力架上。作动器产生的法向力通过压杆施加于试样上,法向力由连接在压杆上的力传感器测量。该直剪仪的竖向力加载范围为 0~100 kN。上、下剪切盒的外部尺寸为 360 mm × 360 mm × 100 mm (长×宽×高),其内部试样仓直径为 300 mm。其中,在上、下剪切盒之间沿剪切方向的两侧边各设置滚柱排,以减小摩擦力。在剪切盒前后两侧各设置 2 块连接板,以固定上剪切盒,使其在剪切过程中保持固定。下剪切盒与底座间设置 1 排滚轮,以施加水平向剪切位移。水平向剪切位移通过水平拉压杆施加,其一侧与下剪切盒连接,另外一侧安装在自反力架侧边的伺服电机上。水平剪切力通过与水平拉压杆连接的力传感器量测。在下剪切盒剪切方向设置一个水平位移计,用以测量水平剪切位移,水

平伺服电机则根据水平剪切位移控制循环剪切方向。该水平伺服电机的剪切速率范围为 0.01~5.00 mm/min，最大循环次数为 500 次。通过设定每一循环下的最大剪切位移，可实现任意剪切幅度的剪切试验。此外，为量测试验过程中试样的剪缩、剪胀变形，在顶部加载板上对称安置 2 个竖向位移计。

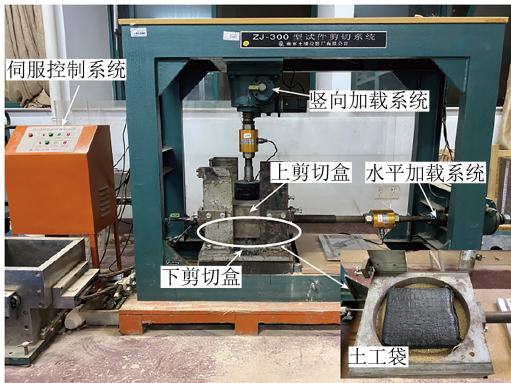


图 1 室内大型直剪仪
Fig.1 Large-scale direct shearing device

2.2 试验材料

试验采用的土工袋尺寸为 200 mm×200 mm×40 mm。所采用的土工编织袋原材料为聚丙烯(PP)，每平方米质量为 150 g，经向和纬向拉伸强度分别为 37.1、28.0 kN/m。袋装材料采用天然河砂，其级配曲线如图 2 所示。河砂最大粒径 $d_{\max} = 20$ mm，不均匀系数 $C_u = 4.03$ ，曲率系数 $C_c = 0.88$ ；最大、最小干密度分别为 1.87、1.62 g/cm³，内摩擦角 $\varphi = 35.4^\circ$ 。本试验中，每个土工袋装砂质量为 3.1 kg，土工袋压实后干密度约为 1.75 g/cm³。

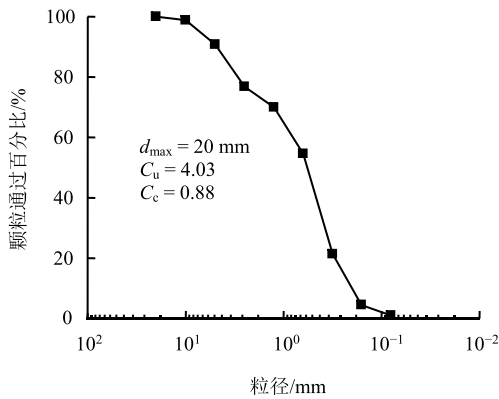


图 2 试验所采用天然河砂的级配曲线
Fig.2 Gradation curve of pure natural sand

2.3 试验方案

为研究土工袋界面动力特性，本文设计了如下

的试验方案：共开展 3 组循环剪切试验，竖向应力分别为 50、100、200 kPa，每组循环次数为 10 次。本试验采用单个试样的多级加载模式^[28]，即剪切幅度随循环次数递增，每一循环的剪切幅度分别为 0.2、0.6、1.0、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0、12.0、14.0 mm，如图 3 所示。需要说明的是，本次试验控制剪切速率为 2 mm/min，则水平循环荷载的单级加载频率变化范围为 0.000 6~0.041 6 Hz，属于低频荷载，此时加载频率对土体动剪切模量与应变关系曲线的影响基本可以忽略^[29]。

此外，为保证试验过程中沿袋体界面进行剪切，先在下剪切盒中填入厚度 30 mm 的河砂将下剪切框底面垫高，然后在上铺设土工袋，并通过竖向加载系统预压将其压实，保证下剪切盒中的袋体上表面与剪切面齐平，同时土工袋与下剪切盒内壁之间的空隙由河砂填充，保证袋体与下剪切盒间不发生相对位移。随后，在下剪切盒两侧凹槽中放入滚柱排并安装上剪切盒，将上剪切盒土工袋置于下剪切盒袋体上表面并压实，同样利用河砂填充土工袋与上剪切盒内壁之间的空隙。最后，在上剪切盒内分层填入两层河砂至指定高度，每层 30 mm。通过试验结束后对下剪切盒中袋体上表面高度进行测量，上述制样方法可基本保证上、下剪切盒中的袋体界面在剪切面上。需要说明的是，制样时上剪切盒与下剪切盒通过螺栓连接固定。

表 1 试验方案
Table 1 Test scheme

试验材料	剪切幅度/mm	竖向应力/kPa	剪切速率/(mm·min ⁻¹)	循环次数	控制干密度/(g·cm ⁻³)
土工袋界面	0.2→0.6→1.0→2.0→4.0→6.0→8.0→1.0→12.0→14.0	50	2.0	10	1.75
		100			
		200			
		50			
天然河砂		100			
		200			

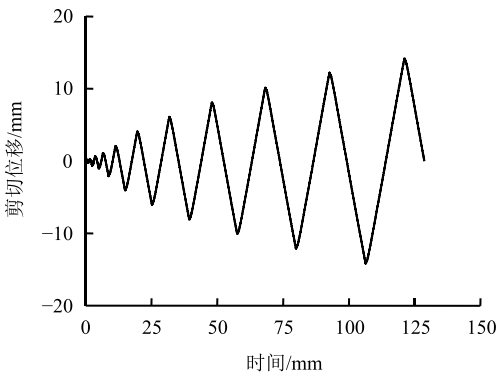
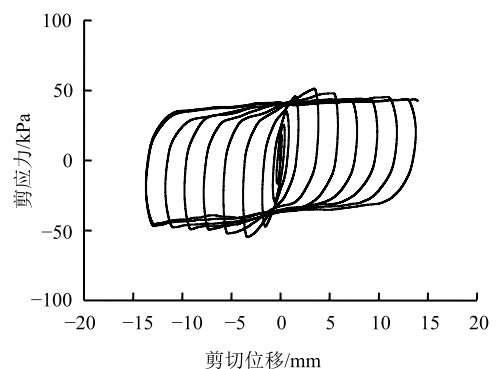


图 3 剪切位移时程曲线
Fig.3 Time-history curve of shear displacement

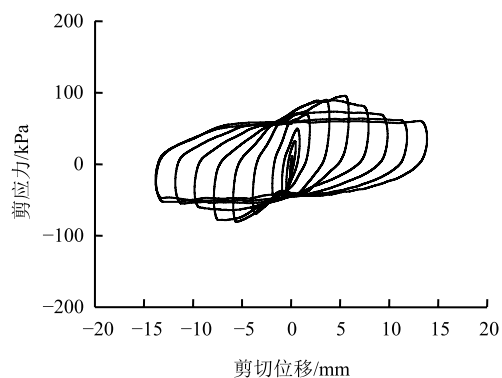
3 试验结果及分析

3.1 剪应力-剪切位移关系

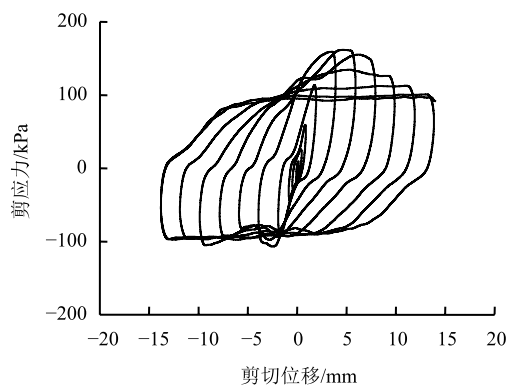
图 4、5 为竖向应力 50、100、200 kPa 下, 土工袋界面和纯天然河砂在变幅循环剪切过程中的剪应力-剪切位移关系曲线。从图中可以看出: ①不管是土工袋界面还是纯天然河砂, 剪应力在循环剪切过程中随剪切位移呈先增大后减小, 并逐渐趋于稳定的变化趋势, 且均有较为明显的应变软化现象, 但天然河砂的应变软化更为显著; ②在相同竖向荷载和剪切幅度下, 土工袋界面的剪切强度较纯天然



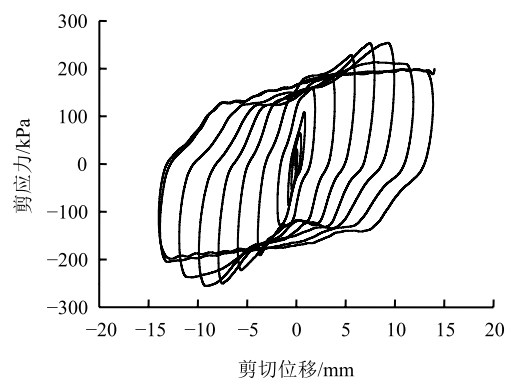
(a) $\sigma_v = 50 \text{ kPa}$



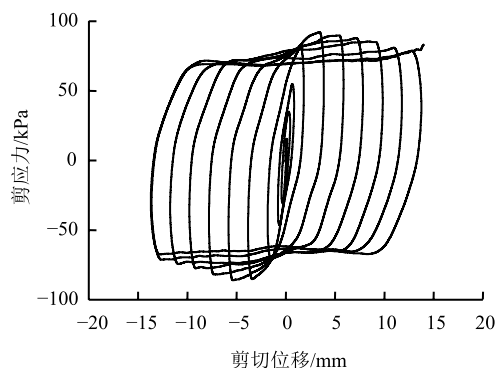
(a) $\sigma_v = 50 \text{ kPa}$



(b) $\sigma_v = 100 \text{ kPa}$



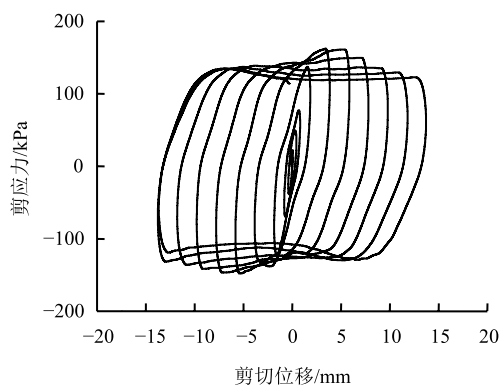
(b) $\sigma_v = 100 \text{ kPa}$



(c) $\sigma_v = 200 \text{ kPa}$

图 5 纯天然河砂剪应力-剪切位移关系曲线

Fig.5 Relationships between shear stress and shear displacement for pure natural sand



(c) $\sigma_v = 200 \text{ kPa}$

图 4 土工袋界面剪应力-剪切位移关系曲线
Fig.4 Relationships between shear stress and shear displacement for soilbag interface

河砂小, 同时滞回曲线最高点与最低点连线的斜率也相对较小, 即土工袋界面的动剪切刚度小于纯天然河砂; ③尽管纯天然河砂的动剪切刚度相对较高, 但土工袋界面的滞回曲线更加饱满, 表明土工袋界面之间的塑性变形能力较强, 土工袋界面摩擦具有较好的减振耗能效果; ④在不同剪切方向上, 土工袋界面在同一循环中的剪应力-剪切位移关系基本对称, 而对于纯天然河砂, 同一循环中的剪应力-剪切位移关系具有一定差异, 具体表现为沿初始剪

切方向的峰值剪应力较其反方向的稍高；⑤通过不同竖向应力下的剪切试验结果，可以发现土工袋界面与纯天然河砂的抗剪强度均随竖向应力增大而增大。综上所述，在相同竖向应力下，随着循环剪切位移幅值的增大，滞回曲线的斜率逐渐降低，但土工袋界面滞回曲线趋于饱满，说明循环剪切过程中，剪切位移幅值越大，土工袋层间的塑性变形越大，消耗能量越大，其减振消能效果越好。

基于上述剪应力-剪切位移曲线，图 6 给出了竖向应力 50、100、200 kPa 下，土工袋界面和纯天然

然河砂的骨干曲线。可以看到，土工袋界面和纯天然河砂的循环剪切强度均随着竖向应力的增大而增大；由于土工袋界面处砂子颗粒的嵌固、咬合作用减弱，土工袋界面的循环剪切强度较纯天然河砂有所减小；此外，除了土工袋界面处砂子颗粒的相互嵌固作用减弱之外，袋内砂子颗粒在袋子张力作用下，其翻滚、破碎、重排等结构性变化也有所减弱。因此，土工袋界面的应变软化现象较纯天然河砂也有所减弱。

为描述骨干曲线中剪应力与剪切位移之间的非线性关系，本文采用了 Kondner-Zelasko 模型，其表达式为^[30]

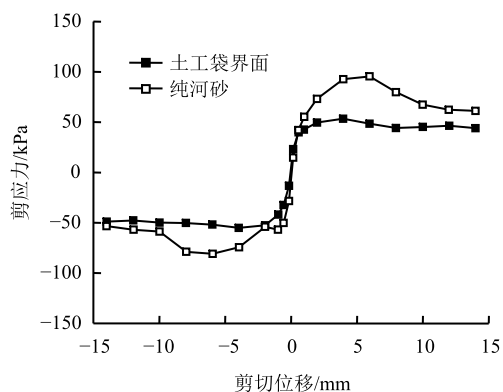
$$\tau = \frac{G_{\max} u}{1 + \alpha \left(\frac{G_{\max}}{\tau_{\max}} |u| \right)^{\beta}} \quad (1)$$

式中： τ 为剪应力； u 为剪切位移； $G_{\max}$ 为初始动剪切刚度； $\tau_{\max}$ 为最大动剪应力； α 和 β 为曲线拟合参数。

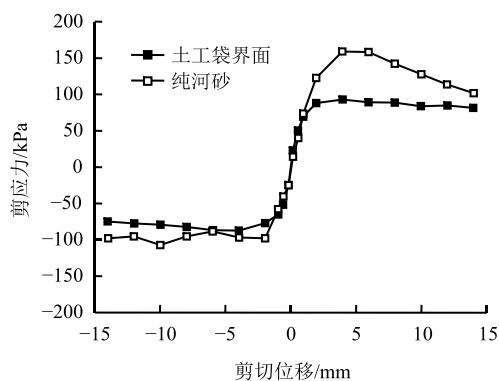
表 2 为模型拟合参数，图 7 为实测曲线与模型预测曲线的对比情况。可以看到，土工袋界面和纯天然河砂的初始动剪切刚度和最大动剪应力均随着竖向应力的增大而增大。其中，Kondner-Zelasko 模型能够较好地描述土工袋界面的骨干曲线，但对于天然河砂则相对较差。

表 2 模型拟合参数

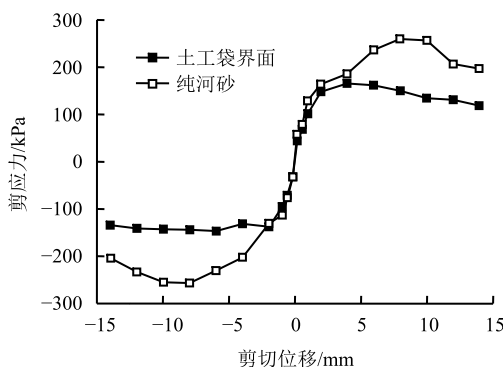
Table 2 Model fitting parameters					
试验材料	竖向应力 /kPa	$G_{\max}$ /($\text{kPa} \cdot \text{mm}^{-1}$)	$\tau_{\max}$ /kPa	α	β
土工袋界面	50	216.0	51.8	0.901	1.035
	100	244.8	90.1	0.921	1.031
	200	283.9	157.8	0.880	1.054
纯天然河砂	50	222.8	77.5	0.906	1.037
	100	225.0	133.9	1.233	0.943
	200	227.8	259.9	1.062	0.949



(a) $\sigma_v = 50 \text{ kPa}$



(b) $\sigma_v = 100 \text{ kPa}$

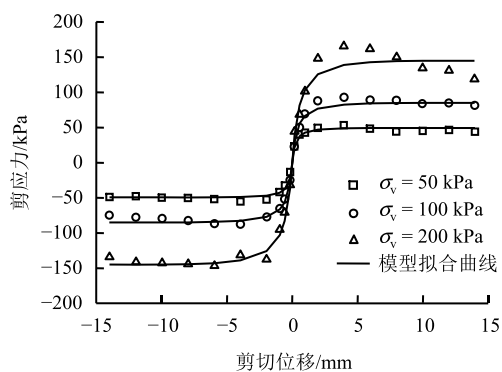


(c) $\sigma_v = 200 \text{ kPa}$

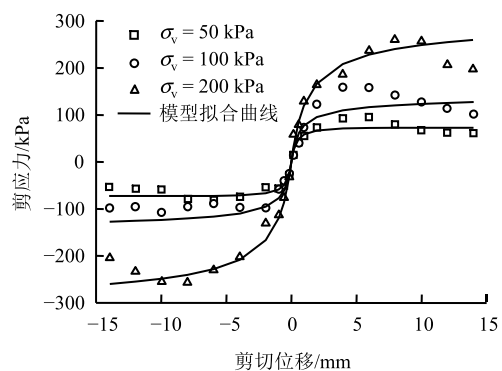
图 6 土工袋界面与纯天然河砂的骨干曲线对比情况
Fig.6 Comparison of backbone curve between soilbag interface and pure natural sand

3.2 法向位移

图 8、9 为不同竖向应力下，土工袋界面和纯天然河砂在变幅循环剪切过程中竖向位移与剪切位移关系曲线。定义竖向位移为正表示剪胀，反之表示剪缩。土工袋界面竖向位移意味着靠近界面的袋内土体产生体变。可以看到，土工袋界面的剪胀性较纯天然河砂减弱。土工袋界面主要表现为剪缩，在竖向应力较小时，随着剪切位移的增大，土工袋界面才产生一定的剪胀变形。值得注意的是，尽管土工袋界面在循环剪切过程中有一定的剪胀，但在每



(a) 土工袋界面



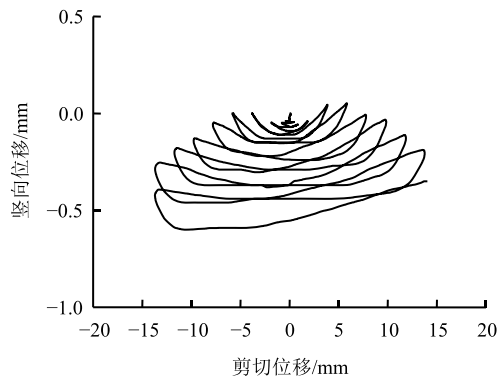
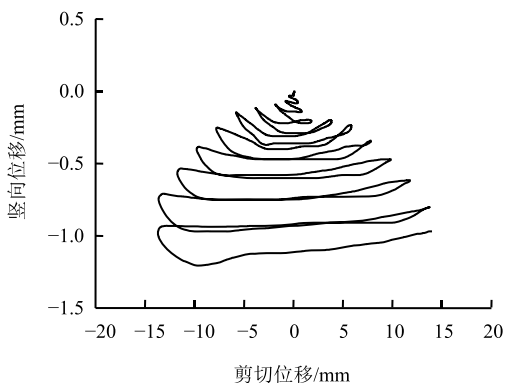
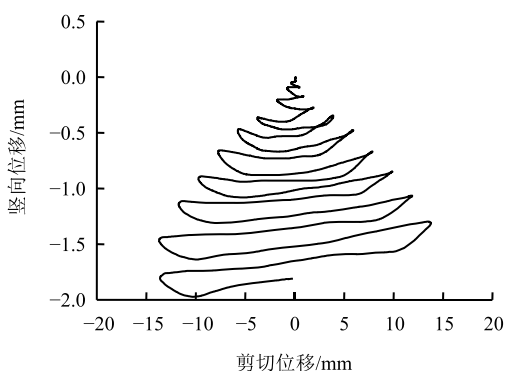
(b) 纯天然河砂

图7 土工袋界面与纯天然河砂骨干曲线实测值与模拟预测值对比情况

Fig.7 Comparison between measured and predicted backbone curves for both soilbag interface and pure natural sand

个循环结束后,均产生了不可逆的剪缩变形,且最终剪缩量随着竖向应力的增大而增大,说明随着竖向应力和剪切次数的增加,袋体内部颗粒的排列越来越紧密,颗粒间的孔隙越来越少。相比较而言,纯天然河砂主要表现为剪胀,即使在较小的剪切位移和较大的竖向应力时,其剪缩亦不明显;随着剪切幅度的增大,纯天然河砂表现出明显的剪胀性,每一循环下的最大剪胀量发生在最大剪切位移处;随着循环次数和剪切幅度的增加,纯天然河砂同样总体表现为剪缩变形,且总体剪缩量呈增大趋势,并未出现随循环剪切次数的增加而收敛的趋势,这与等幅循环剪切试验中观察到的竖向位移发展规律有所不同^[21-24]。

为进一步反映整体竖向位移在循环剪切作用下的发展规律,本文定义每一个循环达到最大正向和逆向剪切幅度时的竖向位移为该滞回圈的竖向位移。图10为不同竖向应力下土工袋界面和纯天然河砂竖向位移与剪切幅度的关系曲线。可以看到,在剪切幅度较小、竖向应力较大的情况下,土工袋界

(a) $\sigma_v = 50$ kPa(b) $\sigma_v = 100$ kPa(c) $\sigma_v = 200$ kPa图8 土工袋界面法向位移与剪切位移关系曲线
Fig.8 Relationships between vertical displacement and shear displacement for soilbag interface

面和纯天然河砂均表现为剪缩;对于土工袋界面,随剪切幅度的增大,仅在低竖向应力时表现为先剪胀再剪缩的变化趋势;而对于纯天然河砂,在50、100、200 kPa 竖向应力下其竖向位移均表现为先剪胀再剪缩的变化趋势。值得注意的是,天然河砂的剪胀量和剪缩量较土工袋界面更为明显,即土工袋界面竖向位移在每一个循环中的变化幅度较天然河砂小。这可能是由于土工袋的张力作用在一定程度上限制了袋内土体颗粒的滑移、翻滚、重排等结构性变化。

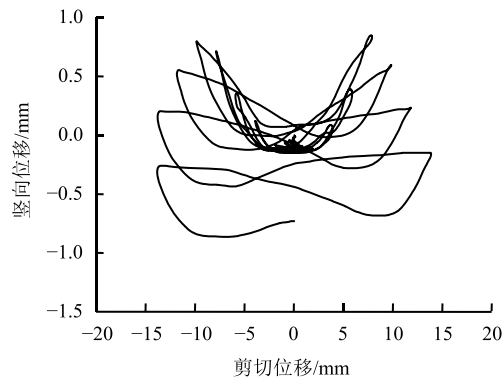
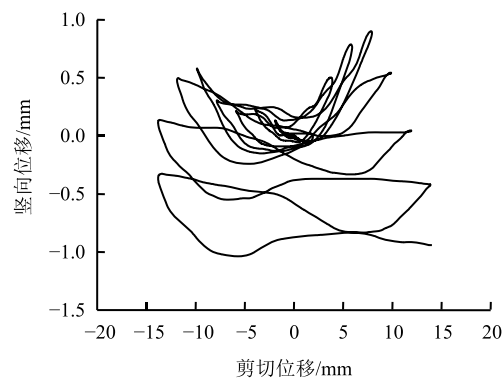
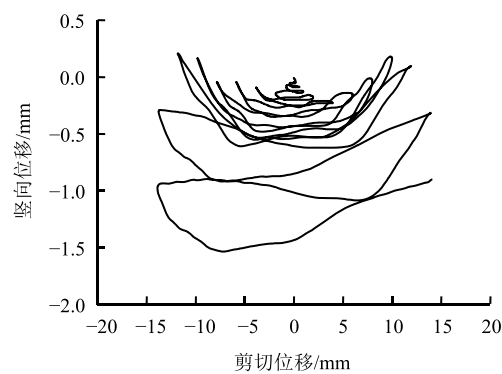
(a) $\sigma_v = 50 \text{ kPa}$ (b) $\sigma_v = 100 \text{ kPa}$ (c) $\sigma_v = 200 \text{ kPa}$

图9 纯天然河砂法向位移与剪切位移关系曲线

Fig.9 Relationships between vertical displacement and shear displacement for pure natural sand

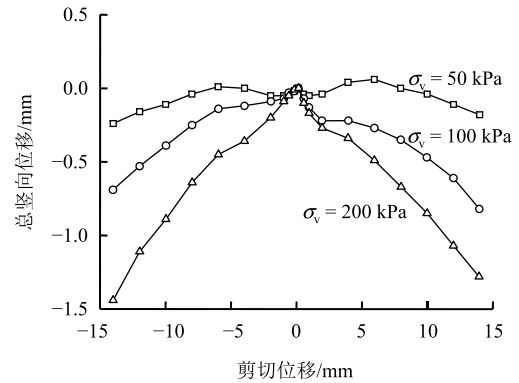
3.3 动剪切刚度与等效阻尼比

动剪切刚度和等效阻尼比是描述界面动力特性的两个基本参数。图11为典型滞回曲线，动剪切刚度和等效阻尼比可表示为^[25, 31]

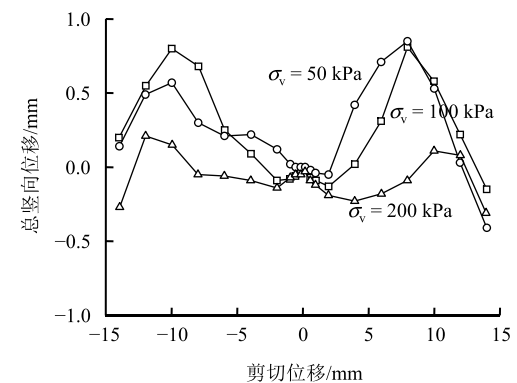
$$K = \frac{\tau_m^a + \tau_m^b}{2\Delta a} \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{2} \left(\frac{A}{4\pi A_1} + \frac{A}{4\pi A_2} \right) = \frac{A}{4\pi \Delta a} \left(\frac{1}{\tau_m^a} + \frac{1}{\tau_m^b} \right) \quad (3)$$

式中: K 为动剪切刚度; D 为等效阻尼比; τ_m^a 和 τ_m^b



(a) 土工袋界面



(b) 纯天然河砂

图10 不同竖向应力下竖向位移随剪切幅度的变化曲线

Fig.10 Variation of vertical displacement with shear amplitude under different vertical stresses

为每一循环对应正负剪切幅度对应的剪应力; Δa 为剪切幅度; A 为滞回圈包围的面积; A_1 和 A_2 为图11中定义的三角形面积。

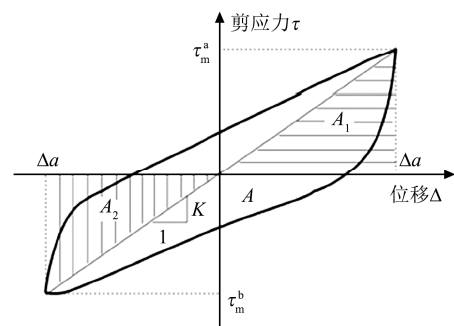


图11 典型滞回曲线

Fig.11 Typical hysteresis loop

图12为土工袋界面与纯天然河砂在50、100、200 kPa 竖向应力下动剪切刚度与剪切位移之间的关系曲线。可以看出, 土工袋界面与纯天然河砂的动剪切刚度均随剪切位移的增大而减小, 随竖向应力的增大而增大。其中, 纯天然河砂的动剪切刚度

略大于土工袋界面,与李玲君等^[18]之前针对土工袋组合体开展的等幅循环剪切试验结果一致。这主要是由于土工袋层间摩擦角取决于编织袋摩擦角和土工袋层间嵌固角^[32]。通常情况下,编织袋摩擦角小于袋内天然河砂的内摩擦角,且袋内材料为河砂时,土工袋层间的相互嵌固作用相对较弱。因此,土工袋界面动剪切刚度较天然河砂小。

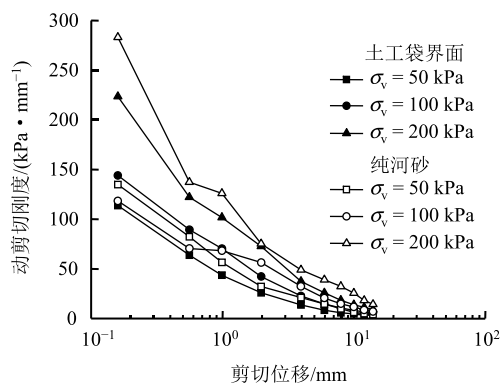


图 12 土工袋界面与纯天然河砂动剪切刚度-剪切位移关系曲线

Fig.12 Relationships between dynamic shear stiffness and shear displacement for both soilbag interface and pure natural sand

图 13 为土工袋界面与纯天然河砂在 50、100、200 kPa 竖向应力下等效阻尼比与剪切位移之间的关系曲线。可以看出,土工袋界面与纯天然河砂的等效阻尼比在整体上呈随剪切位移增大而增大,随竖向压力增大而减小的变化规律。其中,相对于动剪切刚度,等效阻尼比受竖向压力的影响较小。在剪切位移小于 1 mm 时,出现了等效阻尼比随剪切位移的增大而减小的现象,这可能是由于剪切位移

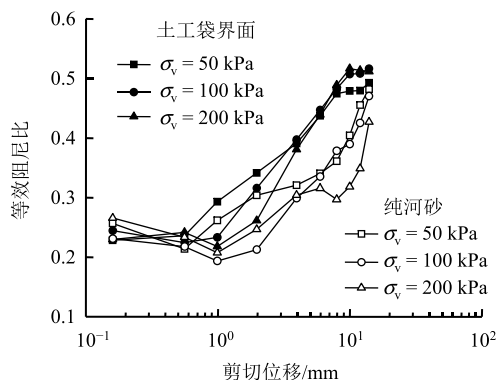


图 13 土工袋界面与纯天然河砂等效阻尼比-剪切位移关系曲线

Fig.13 Relationships between equivalent damping ratio and shear displacement for both soilbag interface and pure natural sand

较小时,试验扰动对数据处理影响较大所造成的。该现象仅出现在剪切位移较小时,并不影响等效阻尼比的整体变化规律。当剪切位移大于 1 mm 时,土工袋界面的等效阻尼比明显大于纯天然河砂,说明土工袋界面摩擦产生的减振耗能效果显著。

4 结 论

(1) 水平循环荷载作用下,土工袋界面和天然河砂的滞回圈面积、剪切模量以及峰值剪应力均随竖向应力的增大而增大。土工袋界面滞回圈较天然河砂更为饱满,但其初始剪切模量、峰值剪应力和应变软化较天然河砂有所减弱。Kondner-Zelasko 模型能够较好地描述土工袋界面的骨干曲线。

(2) 相较于天然河砂,土工袋界面主要表现为剪缩,仅在较低竖向应力和较大剪切位移时表现一定的剪胀性。随着循环次数和剪切幅度的增加,土工袋界面和天然河砂的总体竖向位移均表现为剪缩,且天然河砂后期剪缩量更为明显。尽管土工袋界面整体剪缩较大,但其竖向位移在每一个循环中的变化幅度较天然河砂小,可减小上部结构在地震过程中的竖向振动。

(3) 土工袋界面和天然河砂的动剪切刚度均随剪切位移的增大而减小,随竖向应力的增大而增大,其中土工袋界面的动剪切刚度较天然河砂明显减小。土工袋界面和天然河砂的等效阻尼比均随剪切位移的增大而增大,随竖向应力的增大而减小,土工袋界面的等效阻尼比较天然河砂明显增大,说明土工袋界面摩擦耗能显著。

参 考 文 献

- [1] RONALD L M, LINDSAY R J, TREVOR E K. The economics of seismic isolation in buildings[J]. *Earthquake Spectra*, 1990, 6(2): 245-263.
- [2] 曹万林, 戴祖远, 叶炜, 等. 村镇建筑低成本隔震技术研究现状与展望[J]. *自然灾害学报*, 2014, 23(6): 38-46. CAO Wan-lin, DAI Zu-yuan, YE Wei, et al. Research and prospect of low-cost isolation techniques for rural buildings[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(6): 38-46.
- [3] MATSUOKA H, LIU Si-hong. A new earth reinforcement method using soilbags[M]. London: Taylor & Francis Group, 2006: 55-61.
- [4] 刘斯宏, 汪易森. 土工袋加固地基原理及其工程应用[J]. *岩土工程技术*, 2007, 21(5): 221-225. LIU Si-hong, WANG Yi-sen. Reinforcement mechanism

- of soilbags and its applications[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 2007, 21(5): 221-225.
- [5] 刘斯宏, 松冈元. 土工袋加固地基新技术[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1665-1670.
- LIU Si-hong, MATSUOKA Hajime. A new earth reinforcement method by soilbags[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1665-1670.
- [6] LIU Si-hong, GAO Jun-jun, WANG Yan-xiao, et al. Experimental study on vibration reduction by using soilbags[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2014, 42(1): 52-62.
- [7] 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 Si-hong, WANG Yi-sen. Reinforcement mechanism of soilbags and its applications[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2007, 38(Suppl.1): 644-648.
- [8] 刘斯宏, 高军军, 王子健, 等. 土工袋技术在市政沟槽回填中的应用研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 765-771.
- LIU Si-hong, GAO Jun-jun, WANG Zi-jian, et al. Application of soilbags to urban trench backfill[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(3): 765-771.
- [9] MATSUOKA H, LIU S H, KADOTA H, et al. Reduction of road traffic-induced vibration by layered soilbags (Donow)[C]//INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. Honolulu: Institute of Noise Control Engineering, 2006, 62(2): 379-389.
- [10] YE B, MURAMATSU D, YE G L, et al. Numerical assessment of vibration damping effect of soilbags[J]. **Geosynthetics International**, 2011, 18(4): 159-168.
- [11] DING G, WU J, WANG J, et al. Effect of sand bags on vibration reduction in road subgrade[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2017, 100: 529-537.
- [12] SHENG T, BIAN X C, LIU D B, et al. Experimental study on the sandbag isolator of buildings for subway-induced vertical vibration and secondary air-borne noise[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2020, 48(4): 504-515.
- [13] 郑玉风, 刘方成, 张友良. 土工袋加筋橡胶砂垫层隔震效应试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(3): 73-83.
- ZHENG Yu-feng, LIU Fang-cheng, ZHANG You-liang. Experimental study on isolation effects of soilbags reinforced rubber-sand mixture cushion[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Dynamics**, 2019, 39(3): 73-83.
- [14] 刘斯宏, 贾凡, 陈笑林, 等. 砂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 Si-hong, JIA Fan, CHEN Xiao-lin, et al. Shaking table model test on a retaining wall of soilbags[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(Suppl.2): 4338-4347.
- [15] ANSARI Y, MERIFIELD R, YAMAMOTO H, et al. Numerical analysis of soilbags under compression and cyclic shear[J]. **Computers and Geotechnics**, 2011, 38(5): 659-668.
- [16] 王艳巧, 王丽娟. 土工袋减振与耗能的数值模拟[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 601-606.
- WANG Yan-qiao, WANG Li-juan. Numerical simulation of vibration reduction and energy dissipation of soilbags[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(2): 601-606.
- [17] 刘斯宏, 王艳巧, 金远征. 土工袋基础减振隔震试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(1): 87-90.
- LIU Si-hong, WANG Yan-qiao, JIN Yuan-zheng. Experimental study on vibration reduction and isolation of bases with soilbags[J]. **Advances in Science and Technology of Water Resources**, 2012, 32(1): 87-90.
- [18] 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 Ling-jun, LIU Si-hong, XU Xiao-dong, et al. Experimental study of effects of soil fills on dynamic characteristics parameters of soil-bags[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(1): 131-136.
- [19] NYE C J, FOX P J. Dynamic shear behavior of a needle punched geosynthetic clay liner[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(8): 973-983.
- [20] FOX P J, ROSS J D, SURA J M, et al. Geomembrane damage due to static and cyclic shearing over compacted gravelly sand[J]. **Geosynthetics International**, 2011, 18(5): 272-279.
- [21] 徐超, 陈洪帅, 石志龙, 等. 筋-土界面力学特性的水平循环剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1553-1559.
- XU Chao, CHEN Hong-shuai, SHI Zhi-long, et al. Research on the mechanical behavior of soil-reinforcement interface by horizontal cyclic shear test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(6): 1553-1559.
- [22] 刘飞禹, 林旭, 王军. 砂土颗粒级配对筋土界面抗剪特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2575-

- 2582.
- LIU Fei-yu, LIN Xu, WANG Jun. Influence of particle-size gradation on shear behavior of geosynthetics and sand interface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(12): 2575-2582.
- [23] 刘飞禹, 张端阳, 王军. 循环前后不同颗粒粒径下 sandwich 形加筋土筋土界面单调直剪特性[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24(3): 456-466.
- LIU Fei-yu, ZHANG Duan-yang, WANG Jun. Cyclic and post-cyclic direct shear behavior of sandwich reinforcement-soil interface under different sand particle sizes[J]. **Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)**, 2018, 24(3): 456-466.
- [24] 刘飞禹, 胡惠丽, 王军, 等. 粒孔比对筋-土界面循环剪切特性的影响[J]. 中国公路学报, 2019, 32(12): 115-122, 131.
- LIU Fei-yu, HU Hui-li, WANG Jun, et al. Influence of aperture ratio on cyclic shear behavior of geogrid-soil interface[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2019, 32(12): 115-122, 131.
- [25] WANG J, LIU F Y, WANG P, et al. Particle size effects on coarse soil-geogrid interface response in cyclic and post cyclic direct shear tests[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2016, 44(6): 854-861.
- [26] CEN W J, BAUER E, WEN L S, et al. Experimental investigations and constitutive modeling of cyclic interface shearing between HDPE geomembrane and sandy gravel[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2019, 47: 269-279.
- [27] 刘斯宏, 黄明坤, 王子健, 等. 破碎性堆石料单剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1503-1508.
- LIU Si-hong, HUANG Ming-kun, WANG Zi-jian, et al. Simple shear tests on breakable rockfill materials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(8): 1503-1508.
- [28] 吴孟桃, 刘方成, 陈巨龙, 等. 含水率对大应变下橡胶砂动剪模量和阻尼比的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 803-814.
- WU Meng-tao, LIU Fang-cheng, CHEN Ju-long, et al. Influence of water content on dynamic shear modulus and damping ratio of rubber-sand mixture under large strains[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(3): 803-814.
- [29] 冷建, 叶冠林, 刘学增, 等. 循环荷载对上海软土动力特性影响规律的试验研究[J]. 地震工程学报, 2015, 38(4): 1049-1052.
- LENG Jian, YE Guan-lin, LIU Xue-zeng, et al. Experimental study on the dynamic characteristics of Shanghai soft clay subjected to cyclic loading[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2015, 38(4): 1049-1052.
- [30] KONDNER R L, ZELASKO J S. A hyperbolic stress-strain formulation of sands[C]//Proceedings of 2nd Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Sao Paulo, Brazil: [s. n.], 1963: 289-324.
- [31] IDRISS I M, SEED H B. Seismic response of horizontal soil layers[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1968, 94(4): 1003-1031.
- [32] 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 Ke-wei, LIU Si-hong, LIAO Jie, et al. Experimental study on shearing characteristics of pebbles-filled soilbags[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(2): 477-484.