

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.11.037

一种大型循环单剪试验装置研究

刘方成¹, 陈巨龙¹, 王海东², 任东滨¹, 陈 璐¹

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 循环单剪试验被认为是研究地震场地中土体动力特性最合适的方法。为减小尺寸效应影响及解决工程中广泛存在的加筋土及粗颗粒土动力特性测试问题, 研究大尺寸循环单剪试验方法具有重要意义。基于此, 介绍了一种大型循环单剪试验装置, 采用竖向线性滑动轨道约束上加板板和采用水平滑动轨道约束下加板板, 确保前者仅发生竖向平动, 后者仅发生水平平动, 采用层叠的、带层间橡胶膜、分离式 4 点支撑的钢筋环构成的柔性剪切箱为试验提供侧向边界约束, 确保了对单剪土样加载边界条件的真实模拟。针对土工格室加筋橡胶砂的测试结果表明: 大型循环单剪试验装置得到的土动应力-动应变关系较好地反映了土在循环荷载作用下的滞回性、非线性和棘轮特性, 大型循环单剪试验装置得到的 $G_d - g_a$ 和 $D - g_a$ 曲线变化规律与常规尺寸试验基本一致, 证明其具有可行性; 大尺寸试验得到的动剪模量特性与常规尺寸试验之间的差异, 与单剪试验尺寸效应结论相符; 试验中阻尼比特性受尺寸效应影响的规律性不明显。

关 键 词: 循环单剪; 大尺寸试验; 土动力特性; 土工格室加筋; 橡胶砂

中图分类号: TU 411.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 11-3336-11

Development of a large-scale cyclic simple shear test apparatus

LIU Fang-cheng¹, CHEN Ju-long¹, WANG Hai-dong², REN Dong-bin¹, CHEN Lu¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: Cyclic simple shear test (CSST) is one of the most appreciative methods for studying the dynamic characteristics of soil in earthquake site. To minimize the size effect in the experiment and to monitor the dynamic properties of fiber-reinforced and coarse-grained soils, a testing system called large-scale CSST apparatus is developed. In the developed equipment, the vertical loading plate at the top of the specimen is constrained by a series of vertical linear guides so that it can translate vertically, the horizontal loading plate at the bottom of the specimen is constrained by a series of horizontal linear guides so that it can only translate horizontally, and the shearing box containing specimen is formed by laminated steel rings which are interlayered at four discrete bearing ears with rubber membrane. These features of the equipment ensure proper boundary conditions of the soil specimen during testing similar with soil element in seismic site. The developed CSST equipment is used to perform experiments on geo-cell reinforced rubber sand mixtures. It is shown that the relationship between the dynamic stress and dynamic strain of the specimen exhibits typical hysteresis, nonlinearity and ratchet characteristics, and the $G_d - g_a$ curves and $D - g_a$ curves gained from large-scale CSST show similar characteristics as those gained from normal size CSST, implying that the device works well; the differences of the dynamic shear modulus properties between results of large-scale and normal size CSSTs coincide with size effects of CSST; no obvious regularity of size effect on damping ratio is observed from the tests.

Keywords: cyclic simple shear; large-scale test; soil dynamics; geo-cell reinforcement; rubber soil mixture (RSM)

1 引 言

岩土在动力循环荷载(地震、波浪、交通)作用下,表现出滞回性和非线性特点,而动剪模量和阻尼比是描述上述动力特性的重要参数。目前,

对于土体动力特性的测试技术主要有共振柱、动三轴和循环单剪试验等。一般而言,共振柱试验适用于测试小应变范围内($10^{-6} \sim 10^{-4}$)土的动力特性,动三轴和循环单剪试验适用于测试较大应变范围内($10^{-4} \sim 10^{-1}$)。循环单剪试验被公认为在实验

收稿日期: 2016-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51108177); 湖南省自然科学基金(No. 10JJ4040)。

This work was supported by the National Science Foundation of China (51108177) and the Natural Science Foundation of Hunan Province (10JJ4040).

第一作者简介: 刘方成,男,1978年生,博士,副教授,主要从事土动力特性、土-结构动力相互作用及岩土抗震方面的研究。E-mail: 455211101@qq.com

室内模拟地震作用下土单元应力-应变行为(见图 1)的一种较为适宜的途径,它能够真实地模拟土体在场地中的应力-应变状态,可以直接得到土的动剪模量,而无需像动三轴试验一样由土体动弹性模量、泊松比换算得到,试验结果更为可靠,因为土的泊松比本身难以确定。

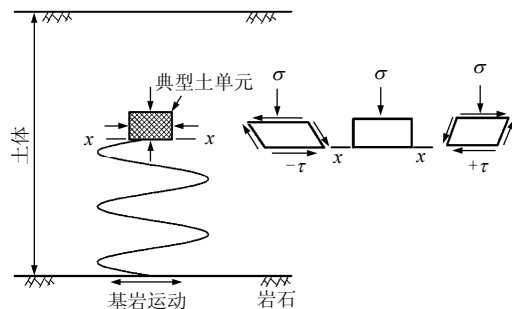


图 1 地震作用下土体中的应力状态

Fig.1 Stress state of soil under seismic action

目前,通用的循环单剪仪有两种:一种是柔性式单剪仪,由挪威岩土工程研究所和瑞典岩土工程研究所分别首先研制^[1-2](瑞典土工研究所采用叠迭的薄环来限制试件的侧向变形,简称 SGI 型,挪威土工研究所则采用加筋橡皮膜限制试件的侧向变形,简称 NGI 型),试件截面为圆形,如图 2 所示;另一种是刚性式单剪仪,由剑桥大学发明^[3],采用刚性竖向边界和矩形横截面试件,如图 3 所示。关于循环单剪仪对土动力特性测试的适用性,相关学者进行了一系列深入的研究^[4-7]。已有研究表明,试样尺寸是影响循环单剪试验结果可靠性的一个重要影响因素。当试样尺寸较小时,截面上的剪应力分布非常不均匀,且由此得到的动剪模量随高径比增大而减小,阻尼比随高径比增大而增大;当试样尺寸增大到某一临界值、横截面上剪切应力分布一致率达到 85%以上时,剪切模量和阻尼比才不再受尺寸大小因素的影响^[8]。Amer 等^[8]经过大量研究建议该临界最小尺寸直径为 20.32 cm,高度为 2.54 cm。但目前广泛应用的常规循环单剪仪(如 GDS、WFI 等著名公司的产品)试样尺寸均小于该临界值。

从岩土工程试验技术本身的发展来看,大尺寸土工试验的应用,可以使岩土试样的局部缺陷、取样扰动等不可避免的随机因素的影响程度尽可能降低,可以使试验更宏观化,在同样的仪器精度下,提高试验成果的精度和可靠度。因此,土工试验大型化是土工测试技术的发展趋势之一。国外在这方面的的工作已早有开展。Swaja^[9]早在 1972 年就建议了大型筒剪仪(剑桥型,试件尺寸 0.61 m×0.61 m×

0.51 m)的使用。Dealba 等^[10]利用振动台大型循环单剪试验研究了砂土的液化特性,试样尺寸为 2 300 mm×1 100 mm×300 mm。Fishman 等^[11]利用振动台设计了一个能对砂土进行循环剪切试验的装置,其试样尺寸达到 4 270 mm×910 mm×1 220 mm。近年来,国内众多专家学者对于大型室内试验及试验仪器研制方面做了多研究。张莎莎等^[12]设计研制了将冻融循环试验与剪切试验相结合的大型粗粒盐渍土冻融循环剪切试验装置。李鹏等^[13]采用大型高压三轴仪进行了一系列试验。赵联桢等^[14]研制了大型多功能冻土与结构接触面循环剪切设备。彭华娟^[15]进行了室内大型与小型剪切试验对比。

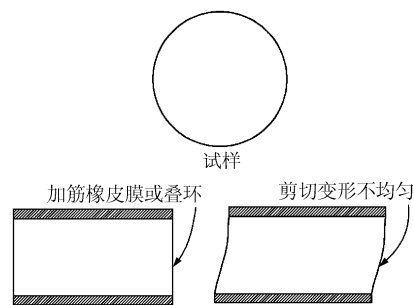


图 2 NGI/SGI 型单剪仪(柔性侧限)

Fig.2 NGI/SGI simple shear apparatus (flexible lateral confine)

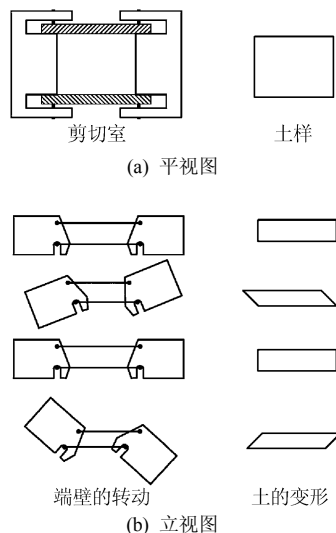


图 3 剑桥型单剪仪(刚性侧限)

Fig.3 Cambridge simple shear apparatus (rigid lateral confine)

随着岩土工程实践与理论研究范围的扩展,粗颗粒土、加筋土、砾石、矿渣等土类日益成为重要的研究对象。当需要对这些粗颗粒土或加筋土的动特性进行测试时,目前常规尺寸的试验仪器显然无法满足要求,也迫切需要研制大型的循环单剪试

验设备来解决实际问题。

尽管人们已经认识到大型土工试验的重要性的必要性,但有关大型循环单剪试验的研究还非常少见,已有的类似装置也大多为结合振动台而使用的剪切箱^[16-19],这类试验虽然可以直接模拟地震动的效应,但难以直接控制剪切时的剪应变幅值、竖向压力、剪切频率等关键参数,对于深入开展特定类型土的动力特性研究而言还远远不够。因此,开展大尺寸的循环单剪试验研究非常有必要。

基于以上情况,本文在大型循环单剪试验研制方面进行了探索,设计制作了一种大型循环单剪试验装置,并应用该装置对土工格室加筋橡胶砂进行了循环剪切试验测试,对其适用性进行了分析。本文研究有望为大型土工动力测试设备的开发应用提供参考,亦为加筋土和粗粒土动力特性的研究提供借鉴。

2 大型循环单剪试验装置研究

2.1 循环单剪试验原理

地震时自由场地中土体任意一点的应力-应变状态(见图1)的主要特点为:①试样始终在 K_0 固结状态下发生水平剪切变形;②试样在循环剪切过程中可发生由剪胀或剪缩而引起的竖向变形(对于非饱和试样),或者保持常体积剪切(对于饱和试样);③根据成层场地假设,在循环剪切过程中试样顶面始终保持水平。理想的循环剪切试验装置必须要能对试样施加上述变形控制。

剑桥型单剪仪(见图3)能保证第①点和第③点,刚性侧向边界能保证沿试样高度的剪切变形均匀发生,但其不足之处在于既不能实现常体积剪切,也不能保证试样在固结压力不变的情况下发生自由竖向变形。

典型的SGI/NGI型单剪仪主要构造如图4、5所示。这类单剪仪在机构运动方式上将水平和竖向运动分开控制,与水平作动器连接的承载板只能沿水平方向发生运动,与竖向作动器连接的加载板则在竖向导轨的约束下只能发生竖直运动,试样上、下表面分别与水平和竖向运动承载板紧密接触并产生相对位移,从而发生剪切变形。竖向运动承载板可实现常固结压力下试样的自由竖向变形,或通过锁定其竖向位置以实现常体积剪切。SGI型和NGI型单剪仪的差别,在于对试样侧向边界的限制(确保试样处于 K_0 固结状态)方法不同,前者通过层叠的薄铜环限制(见图4),后者则通过环状钢丝加筋橡胶膜予以限制(见图5)。

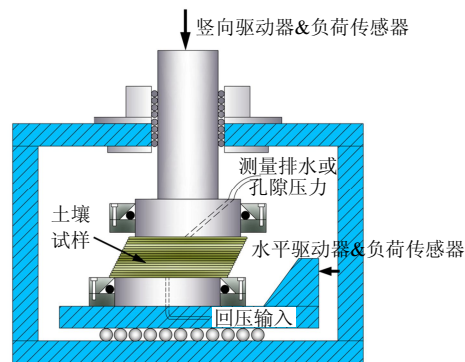


图4 SGI型单剪仪示意图(Jafarzadeh等^[20])

Fig.4 Schematic diagram of SGI simple shear apparatus (Adopted from Jafarzadeh, et al^[20])

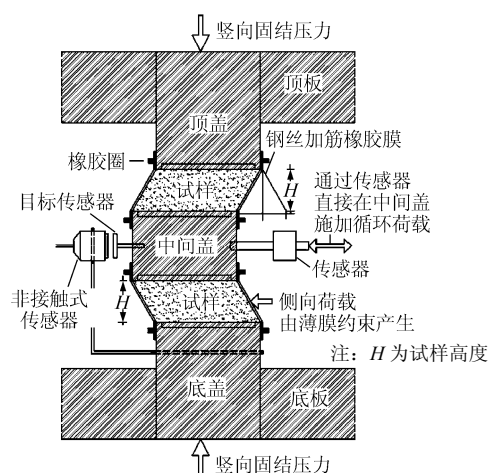


图5 NGI型单剪仪(双试样)示意图(Vucetic等^[21])

Fig.5 Schematic diagram of NGI simple shear apparatus (Adopted from Vucetic et al.^[21])

2.2 大尺寸试样竖向变形条件的实现

如前所述,循环单剪试样在竖向的变形条件为:可发生竖向均匀压缩或膨胀变形,试样上表面处不能有转角变形。竖向变形条件由竖向加载板予以约束。如图6所示,竖向加载板给试样施加竖向压力的同时也承受试样的水平剪切反作用力,该反作用力使得竖向加载板有绕水平轴转动的趋势。为保证试样上表面水平并且不发生非均匀压缩变形,竖向加载板的侧向滑动约束边界必须为其提供如图6中所示抵抗扭矩 T ,同时刚度必须足够大。对于常规循环单剪试验装置而言,试样尺寸通常较小(直径约为70 mm,高度约为20 mm^[20-21]),试样剪切产生的扭转力矩比较小,竖向加载板侧向边界刚度尚容易保证。随着试样尺寸增大(如本文试样尺寸直径为700 mm、高度为200 mm),试样剪切产生的扭转力矩也成倍增加,此时如何确保竖向加载板既能沿竖向自由发生位移,又具有足够大的抗竖直平面内扭转刚度,是进行大型循环单剪试验的关键条

件之一。

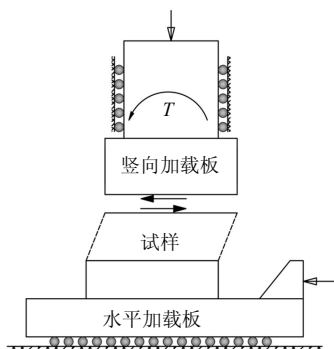


图 6 竖向加载板扭矩示意图

Fig.6 Schematic diagram of torque of vertical loading cell

本文设计了如图 7 所示的大型循环单剪试验装置，在该装置中，通过底座和竖直平面内刚性框架组合成类似于图 4 所示的刚性外框架以为水平和竖向荷载的施加提供自反力。为保证大尺寸土样的竖向变形条件，设置了如图 8 所示的环抱式双横梁竖向加载板。该竖向加载板在水平面内由两片平行的刚性横梁连接而成，在横梁外端处设置高承载线性竖向滑块，滑块环抱在竖向刚性立柱的竖向导轨上。两片刚性横梁上滑块所受的力与横梁水平距离的乘积，就形成抵抗试样水平剪切反力所产生的扭转趋势的扭矩。只要滑块的数量和横梁水平间距足够，就能确保竖向加载板在竖向平面内既能发生自由平移变形而又不会发生转动变形。

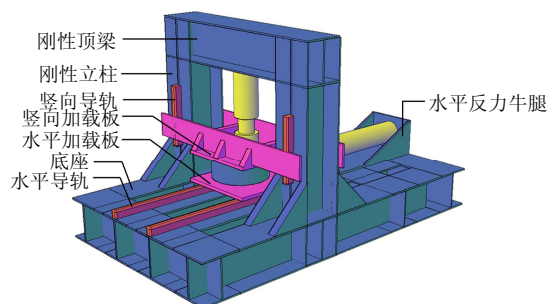


图 7 大型循环单剪试验装置示意图

Fig.7 Schematics of large-scale cyclic simple shear test apparatus

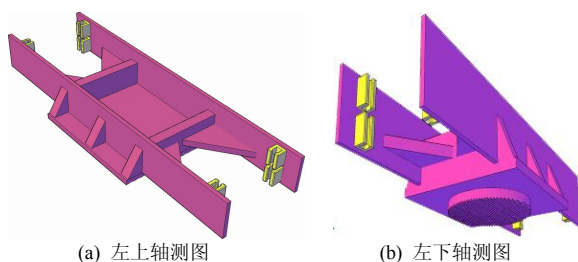


图 8 竖向加载板

Fig.8 Vertical loading shaft

2.3 大尺寸试样侧向约束边界条件的实现

随着试样尺寸的增大，试样侧向约束边界实施难度增大，为此研究者们专门进行了适用于土动力试验和振动台土-结构动力相互作用试验的剪切箱研究^[16-18]。但此类剪切箱构造上较为复杂，在单纯的土样剪切试验中不易实施，且其自重过大，在循环剪切中由于剪切箱自身惯性力而引起的误差较大是其无法避免的缺陷。作者针对大尺寸土试样侧向边界约束进行了相关的研究尝试。前期主要采用了两种方式。方式 1：采用与常规尺寸 SGI 边界相似的方法，将铜环按比例放大成内径为 700 mm、厚为 20 mm 的钢环，通过钢环层叠（在钢环之间涂抹润滑油）的方式对试样进行侧向约束（如图 9 所示）；方式 2：采用 NGI 型边界，用钢环加筋橡胶膜对土样施加侧向约束，钢环由直径为 6 mm 的高强钢丝制成，内径为 700 mm，间距为 20 mm（如图 10 所示）。以上两种方式均存在不足，方式 1 中层叠的钢环具有自立性能，形成稳定的盛土箱，便于进行土样填筑装样，但钢环自重较大、上下层钢环接触面过大导致层间剪切摩阻力大，限制了土样的自由剪切变形；方式 2 中钢环加筋橡胶膜不具备自立性，使得土样装样困难，同时加筋钢环与橡胶膜之间由于接触面积小、连接强度难以保证，在剪切过程中容易发生加筋环脱落、橡胶膜破损现象。

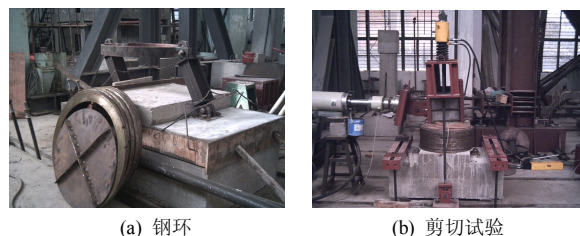


图 9 用层叠钢环为土样提供侧向约束

Fig.9 Using laminated steel rings as lateral restraint



图 10 用钢丝加筋橡胶膜为土样提供侧向约束

Fig.10 Using steel wire reinforced rubber membrane as lateral restraint

为解决上述问题，本文提出了一种介于 SGI 型和 NGI 型之间的剪切土箱对土样进行侧向约束：剪切土箱由层叠钢环加内衬橡胶膜组成，钢环由高强

钢丝制成,在钢环外缘等距设置4个托耳;托耳为夹层构造,中间为厚度与钢丝直径相同的钢板,上、下表面为薄层橡胶垫片(为确保夹层结构的稳定,实际试验时可在外面再套上O型橡胶薄环),如图11所示。该剪切箱具有以下优点:①高强钢丝直径较小,钢环自重轻,从而在循环剪切过程中钢环惯性力的影响降低;②上、下层钢环间通过托耳支撑,能形成稳定的土箱,便于装样;③上、下层钢环间仅在托耳处接触,且托耳间有橡胶垫层,土箱层间剪切刚度小,对土样剪切影响变形影响小。

本文试验所用钢环为用直径为6 mm的钢筋做成,内径为700 mm,环间间距为10 mm,通过改变钢环叠放层数可实现试样高度0~500 mm可调。

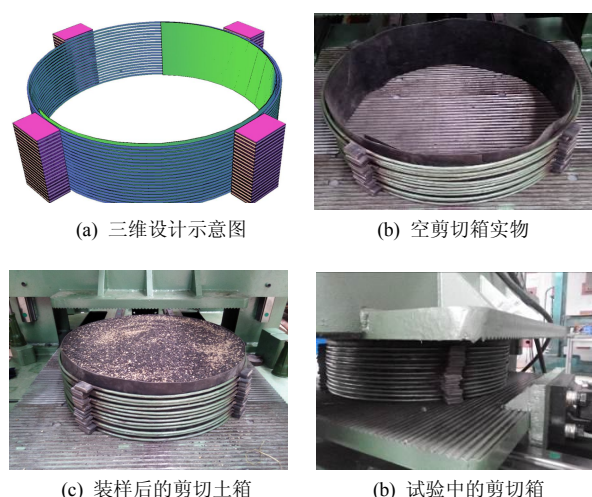


图11 本文设计的大尺寸剪切土箱
Fig.11 Large-scale shear box designed in this paper

2.4 试验装置主要特点

- (1) 装置体系受力自平衡,不需外部反力;
- (2) 加载板上设置垂直于剪切方向的刻痕,增大了加载板与土样之间的摩擦力;
- (3) 支撑水平加载板的水平内嵌式线性导轨足够长,在将水平加载板推至导轨末端后可获得足够的工作空间,方便土样装卸;
- (4) 水平和竖向加载板分别连接伺服作动器,独立控制、同步采集。

3 土工格室加筋橡胶砂动力特性测试

已有研究表明,橡胶砂(废旧橡胶轮胎颗粒与砂的混合物)是一种优良的耗能减震填料,而土工格室是一种应用广泛的三维加筋材料,将橡胶砂填入土工格室形成的土工格室加筋橡胶砂垫层,既具有很好的整体性和竖向承载能力,同时也能作为隔离震动的土工垫层,有望应用于工程实践。而对加

筋橡胶砂的动力特性展开研究,是研究并推广其应用的前提。由于土工格室的尺寸较大,常规土动力试验难以对土工格室加筋橡胶砂这种复合垫层材料的动力特性进行研究。本文应用上述研制的大型循环单剪试验装置,对加筋橡胶砂的动力特性开展探索性研究,作为对比,同时进行了相同情况下无筋橡胶砂的动力特性研究。

3.1 试验简介

3.1.1 试验材料

试验采用的砂为天然河沙,颗粒粒径范围为0~7 mm,堆积密度为 1.72 g/cm^3 。废轮胎颗粒是从专业分解废旧橡胶轮胎的厂家购买得到,粒径范围为1.5~3.0 mm,堆积密度为 0.51 g/cm^3 。两种材料在风干状态下按一定比例进行混合,得到橡胶颗粒-砂混合物(以下简称橡胶砂),橡胶砂配合比指橡胶颗粒质量占总质量的比例。本文仅给出了配合比为30%的情况。

用于加筋的土工格室为高强焊接三维土工格室,格室高度为200 mm,焊点间距为400 mm,格室片厚度为1 mm。根据剪切箱的尺寸大小,裁剪具有9个完整格室的格室片段放入剪切箱,分层填入橡胶砂并压实,使各格室充分展开。装样中的土工格室加筋橡胶砂试样和剪切试验完成后土工格室变形情况如图12所示。可见土工格室在循环剪切荷载作用下发生严重皱褶而未破坏,其对试样耗能有积极贡献。



图12 加筋橡胶砂试样
Fig.12 Specimen of geo-cell reinforced rubber sand mixture for testing

3.1.2 试验工况

本次试验中,试样尺寸直径为700 mm,高度为200 mm(由于土工格室的高度为200 mm),剪切箱由20个剪切环迭叠组成。为得到加筋橡胶砂在较大应变幅值范围上的动力特性,采用分级循环加载的方法进行试验,即在同一试样上,按应变幅值从小到大依次进行多级加载,每一级幅值下循环60次。已有研究表明,这种多级循环加载的试验方法对于动力特性的测试是可行的^[22]。加载形式为等幅正弦波(见图13),频率为1 Hz,各级荷载下位移

幅值如表 1 所示。在水平剪切过程中，竖向固结压力保持不变，共考虑了 50、100、200、300 kPa 等 4 种固结压力情况。

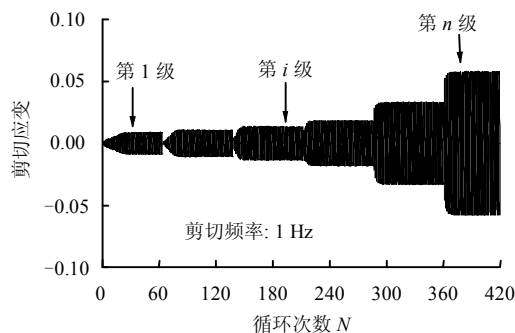


图 13 循环剪切加载形式

Fig.13 Loading type used in cyclic shear tests

表 1 荷载分级 (以应变控制)

Table 1 Loading grade (controlled by shear strain)

荷载 级别	应变幅值 / $\times 10^{-3}$	位移幅值 / mm	荷载 级别	应变幅值 / $\times 10^{-3}$	位移幅值 / mm
1	1.0	2	6	3.5	7
2	1.5	3	7	4.0	8
3	2.0	4	8	4.5	9
4	2.5	5	9	5.0	10
5	3.0	6			

3.1.3 试验步骤

(1) 首先将水平加载板与水平作动器连接脱开，然后开动竖向作动器将加载顶板上升一定高度，人工将水平加载板推出至水平轨道末端，进行装样作业；(2) 装样完毕后，人工将水平加载板推回与水平作动器连接，开动水平作动器，微调作动器位置进行上、下加载板对中；(3) 施加竖向固结压力；(4) 启动水平加载系统，按设定好的剪切速率、剪切位移、剪切次数进行循环剪切；(5) 试验过程中，水平位移、水平荷载、竖向荷载、竖向位移都由各自的传感器采集传输到计算机；(6) 剪切完成后，关闭水平和竖向加载系统，提升加载顶板，推出水平加载板，记录试样剪切破坏情况，卸除试样。

3.2 试验结果

3.2.1 土动力特性参数

土在动力循环荷载作用下表现出滞回性、非线性以及变形累积性（棘轮现象）。滞回性即应力相对于应变的滞后性，在循环荷载作用下往往形成滞回曲线。图 14 为土的理想滞回曲线示意图，图中 (γ_a, τ_a) 、 $(-\gamma_a, -\tau_a)$ 分别为滞回曲线的正负顶点，两者的连线代表了土体的动剪切模量 (G_d)，滞回曲线的饱满程度则代表了土的阻尼比 (D) 大小。动剪模量和阻尼比的具体定义为

$$G_d = \tau_a / \gamma_a \quad (1)$$

$$D = A_{\text{Loop}} / (\pi A_T) \quad (2)$$

式中： G_d 为动剪模量； D 为阻尼比； τ_a 、 γ_a 分别为滞回曲线的剪应力幅值和剪应变幅值； A_{Loop} 为滞回曲线所围的面积； A_T 为滞回曲线顶点连线下所示虚线三角形的面积。

土的非线性则表现为动剪模量 G_d 随着滞回曲线应变幅值 γ_a 的变化而衰减，阻尼比 D 也随着滞回曲线应变幅值 γ_a 的变化而变化。土的棘轮现象，在应力控制的循环加载下表现为变形的不断累积，而在应变控制的循环加载下，则表现为应力随着循环加载次数的衰化。合理的循环剪切试验，应该能全面反映土的上述动力特性。

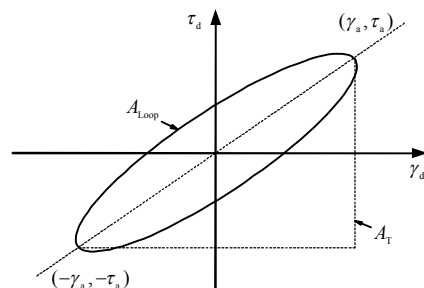


图 14 理想土动应力-动应变滞回曲线

Fig.14 Idealized hysteresis loop between dynamic strain and dynamic stress

3.2.2 滞回曲线

图 15 给出了由大型循环单剪试验装置测得的橡胶含量为 30% 的土工格室加筋橡胶砂试样在竖向压力为 100 kPa、水平剪切位移幅值为 ± 2 mm 时的试验滞回曲线。图 15(a) 为循环 60 次所有滞回曲线的情况，图 15(b) 给出了第 1、2、5、10、20、30、40、50 圈滞回曲线的情况。

可见，试验滞回曲线较好地反映了土的动应力-应变关系特性：初始加载时应力-应变关系沿着骨架曲线上升，在后续循环加载中，应力-应变关系形成滞回曲线，在应变幅值一定的情形下，滞回曲线顶点连线的斜率（等效动剪模量）随着循环次数的增加而逐渐衰减，衰减的速率随加载次数的增加而逐渐降低，滞回曲线趋于稳定。

图 16 进一步给出了试验得到的土工格室加筋、非加筋 30% 配比橡胶砂在不同竖向固结压力下，各级加载位移幅值所得到的剪应力-剪应变滞回曲线，图中左列为非加筋橡胶砂（图中标记为 RSM, rubber sand mixture）的结果，右列为加筋橡胶砂（图中标记为 GCRSM, geo-cell reinforced rubber sand mixture）的结果。

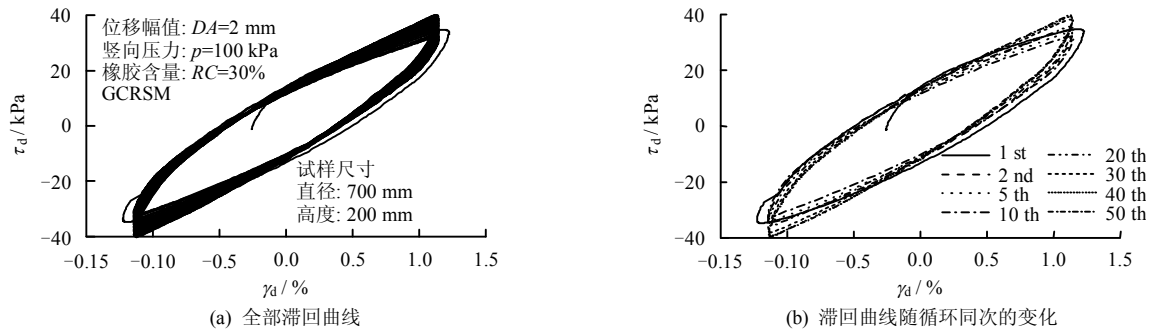


图 15 大型循环单剪试验得到的典型试验滞回曲线 (GCRSM, RC30, $DA=2$ mm)

Fig.15 Typical tested hysteresis loops by large-scale cyclic simple shear apparatus (GCRSM, RC30, $DA=2$ mm)

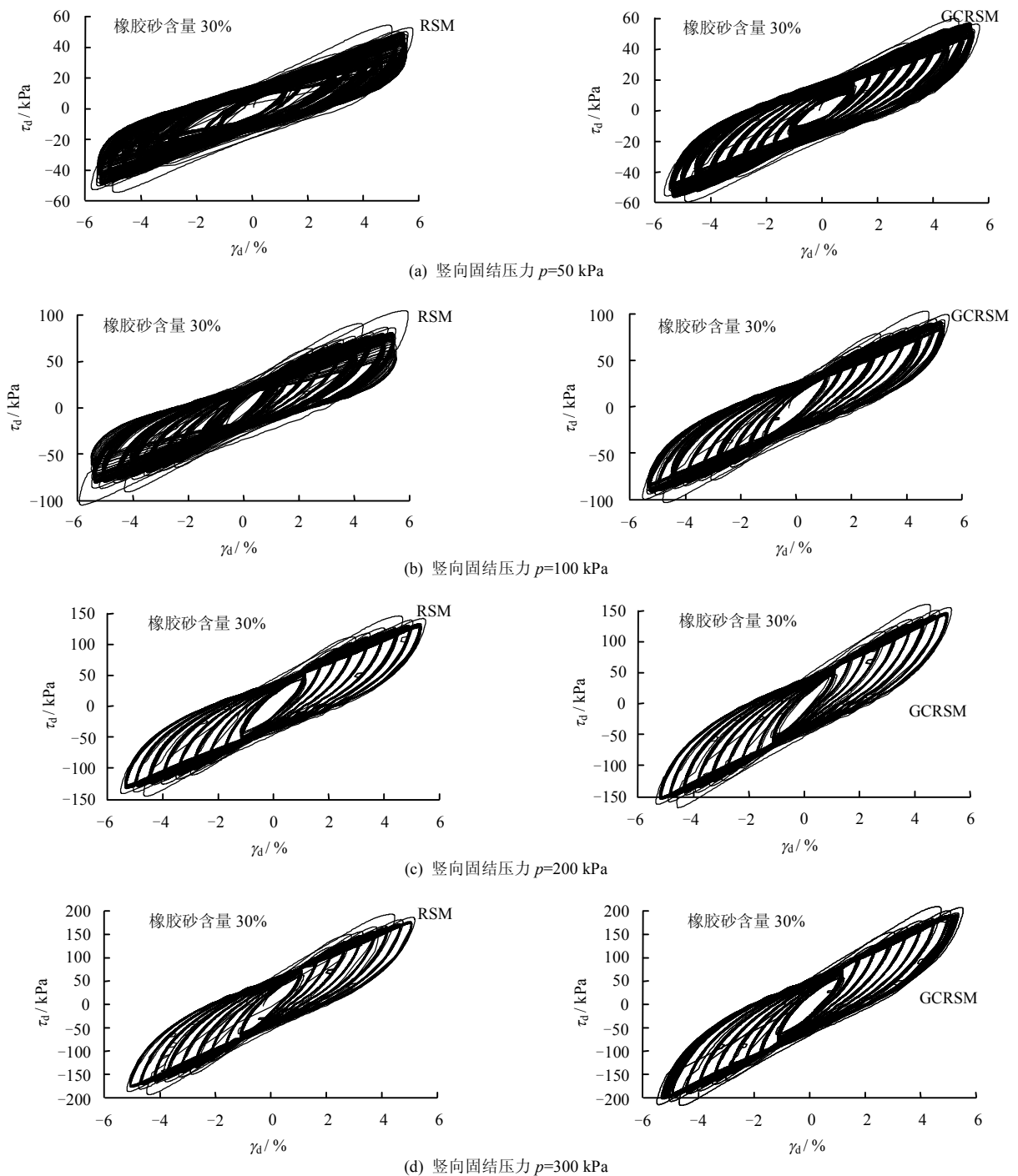


图 16 加筋与非加筋橡胶砂大尺寸试样循环单剪试验滞回圈对比

Fig.16 Comparisons of hysteresis loops between RSM and geo-cell reinforced RSM tested by large size cyclic simple shear test

由图 16 可以看出：（1）随着剪应变幅值的增大，滞回曲线顶点连线的斜率逐渐降低，滞回曲线所包围的面积逐渐增大，表现出动剪模量和阻尼比均随着剪应变幅值而非线性变化的特性；（2）各级剪应变幅值下的第 1 个滞回圈往往最大，随着加载次数的增加，滞回曲线斜率逐渐降低并最终趋于稳定；（3）随着竖向固结压力的增大，滞回曲线斜率增大，且滞回曲线受循环加载次数的影响降低；（4）比较加筋橡胶砂和非加筋橡胶砂的滞回曲线，可见两者

在试验所涉及的应变幅值范围内的总体变化规律并无明显差异。

3.2.3 动剪模量和阻尼比

根据滞回曲线，由式（1）、（2）分别可算得动剪模量和阻尼比这两个参数。图 17 给出了橡胶含量为 30% 的加筋和非加筋橡胶砂在 4 种不同竖向压力（50、100、200、300 kPa）下动剪模量和阻尼比随剪应变幅值变化的曲线。由图可见：（1）随着动剪应变幅值的增加，动剪模量逐渐降低，表现出非

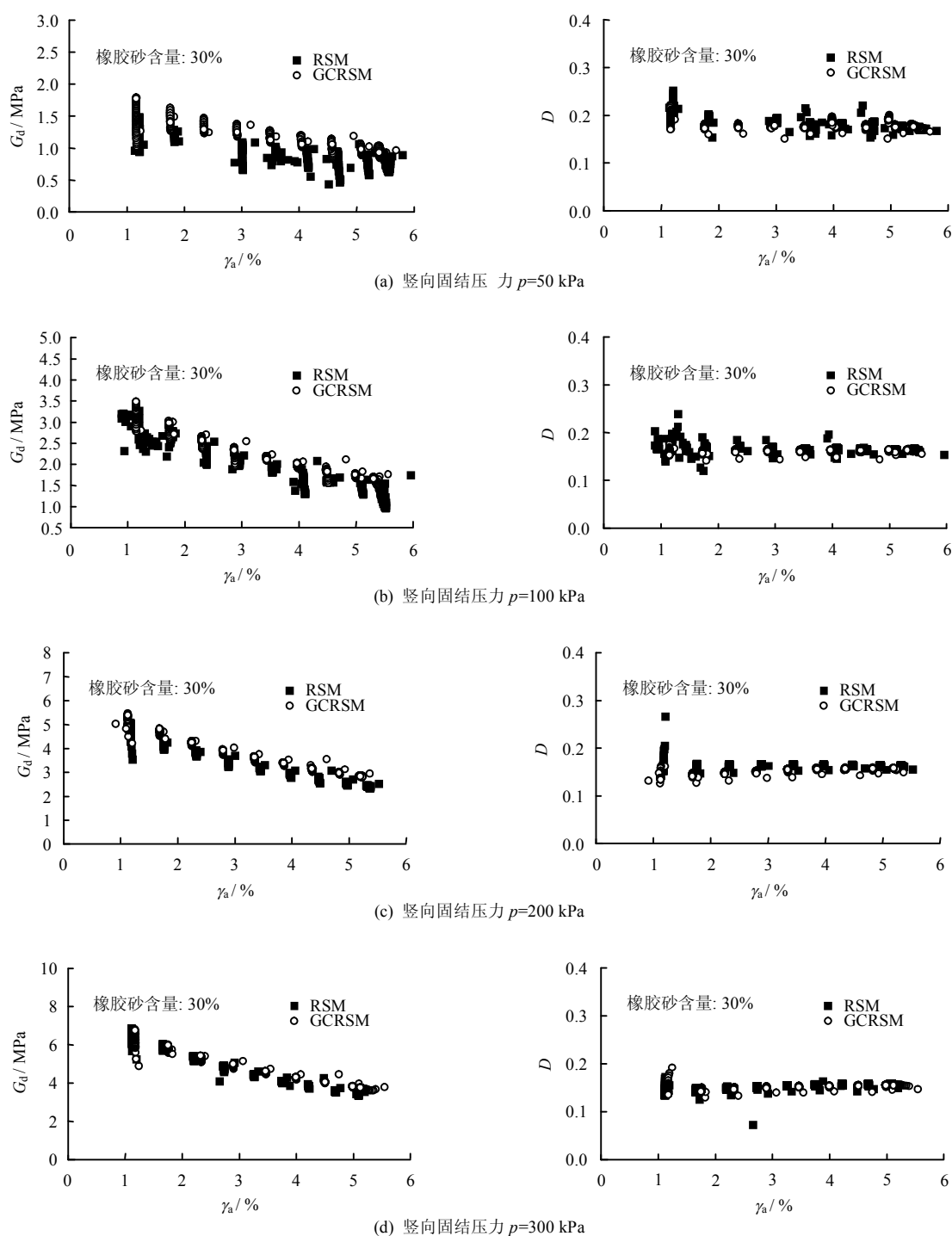


图 17 大型循环单剪试验得到的加筋与非加筋橡胶砂 $G_d - \gamma_a$ 、 $D - \gamma_a$ 曲线

Fig.17 Tested $G_d - \gamma_a$, $D - \gamma_a$ curves of RSM and GCRSM by large scale cyclic simple shear apparatus

线性变化特性；(2) 在同一级应变幅值下，动剪模量随着循环加载次数的不同而发生较大的变化，且第1级荷载下变化最为显著；(3) 随着竖向压力的增大，动剪模量增大，动剪模量随循环加载次数而变化的幅度降低；(4) 橡胶砂在较小的应变幅值时即表现出较大的阻尼比，且随应变幅值的变化不明显，在第1级荷载作用下，阻尼比随循环次数变化的幅度较大，之后则基本不受循环次数的影响，竖向压力增大使得阻尼比略有下降；(5) 比较加筋橡胶砂和非加筋橡胶砂的动剪模量和阻尼比，两者基本无显著差异。

3.2.4 与常规尺寸循环单剪试验对比

图18给出了本文对30%橡胶砂在100、300 kPa竖向固结压力下得到的动力特性试验结果与文献[23]用常规尺寸循环单剪试验得到的橡胶砂动力特性对比情况。其中，图18(a)为动剪模量 $G_d-\gamma_a$ 试验曲线对比，图18(b)为阻尼比 $D-\gamma_a$ 试验曲线对比。需要说明的是，文献[23]试验所用橡胶颗粒和砂颗粒材料与本文相同。

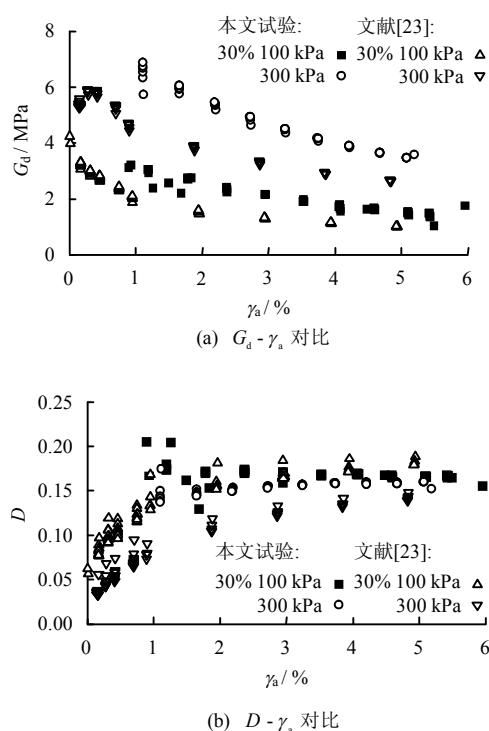


图18 30%橡胶砂大尺寸和常规尺寸循环单剪试验结果对比

Fig.18 Comparisons of single shear test results of large-scale and conventional scale of 30% RSM

由图18可见：(1) 大尺寸循环单剪试验得到

的橡胶砂动剪模量 $G_d-\gamma_a$ 曲线与阻尼比 $D-\gamma_a$ 曲线随剪应变幅值和固结压力的变化规律与常规尺寸试验得到曲线一致， $G_d-\gamma_a$ 曲线均为非线性下降且随固结压力增大而升高， $D-\gamma_a$ 曲线为非线性上升且随固结压力增大而降低；(2) 相同含量和固结压力下，大尺寸循环单剪试验得到的动剪模量曲线比常规尺寸试验得到的高，固结压力越大，大尺寸试验比常规尺寸试验增加得越多；(3) 在100 kPa固结压力下，大尺寸循环单剪试验得到的阻尼比曲线相比于常规尺寸试验得到的阻尼比曲线略低，在300 kPa固结压力下则相反，考虑土体阻尼比自身的离散性，大尺寸与常规尺寸试验阻尼比基本吻合。

总体而言，本文大尺寸循环单剪试验结果与常规尺寸试验结果具有较好的一致性，其与常规尺寸试验的动剪模量结果差异现象与文献[8]关于尺寸效应的研究结论“小尺寸循环单剪试样由于尺寸效应可能低估土的动剪模量”相符。

4 结论

(1) 研制了一种大型循环单剪试验装置，采用竖向线性滑动轨道约束竖向加载板和采用水平滑动轨道约束水平加载板，确保前者仅发生竖向平动，后者仅发生水平平动，真实模拟地震场地中土层的应力及变形状态。

(2) 采用层叠的、带层间橡胶膜、分离式4点支撑的钢筋环构成的柔性剪切箱为试验提供侧向边界约束，剪切箱自重轻（相对于大尺寸土样自重而言可忽略不计），在动力循环荷载作用下对试样本身运动影响小，确保了对单剪土样加载边界条件的真实模拟。

(3) 针对土工格室加筋和非加筋橡胶砂的测试结果表明，大型循环单剪试验装置得到的土动应力-动应变关系较好地反映了土在循环荷载作用下的滞回性、非线性和棘轮特性。

(4) 与常规尺寸循环单剪试验结果对比表明，大尺寸试验得到的动剪模量特性与常规尺寸试验之间的差异，与已有关于单剪试验尺寸效应的研究结论相符。

(5) 阻尼比特性受尺寸效应影响的规律性不明显。

参考文献

[1] KJELLMAN W. Testing the shear strength of clay in

- Sweden[J]. **Geotechnique**, 1951, 2(3): 225—232.
- [2] BJERRUM L, LANDVA A. Direct simple-shear tests on a Norwegian quick clay[J]. **Geotechnique**, 1966, 16(1): 1—20.
- [3] ROSCOE K H. An apparatus for the application of simple shear to soil samples[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. London: [s. n.], 1953, 3(1): 186—191.
- [4] HVORSLEV M J, KAUFMAN R I. Torsion shear apparatus and testing procedures[R]. Mississippi: USAE Waterways Experiment Station, 1952.
- [5] PEACOCK W H, SEED H B. Sand liquefaction under cyclic loading simple shear conditions[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1968, 94(3): 689—708.
- [6] SILVER M L, SEED H B. Volume changes in sand during cyclic loading[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, 1971, 97(SM9): 1171—1185.
- [7] FINN W D L, PICKERING D J, BRANSBY P L. Sand liquefaction in triaxial and simple shear tests[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1971, 97(4): 639—659.
- [8] AMER M I, KOVACS W D, AGGOUR M S. Cyclic simple shear size effects[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1987, 113(7): 693—707.
- [9] SWAJA. Soil behaviour under earthquake loading conditions[R]. USA: USA Tomic Commission, 1972.
- [10] DEALBA P, SEED H B, CHAN C K. Sand liquefaction in large scale-simple shear tests[J]. **Journal of the Geotechnical Division, ASCE**, 1976, 102 (GT 9): 909—926.
- [11] FISHMAN K L, MANDER J B, RICHARDS R, et al. Laboratory study of seismic free-field response of sand[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 1995, 14(1): 33—43.
- [12] 张莎莎, 杨晓华. 粗粒盐渍土大型冻融循环剪切试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(3): 11—16.
- ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua. Large shear test on coarse saline soil with freeze-thaw cycle[J]. **Journal of Chang'an University, (Natural Science Edition)**, 2012, 113(3): 11—16.
- [13] 李鹏, 李振, 刘金禹. 粗粒料的大型高压三轴湿化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 231—234.
- LI Peng, LI Zhen, LIU Jin-yu. Shaking test study of coarse aggregate under high triaxial stress condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 231—234.
- [14] 赵联桢, 杨平, 王海波. 大型多功能冻土-结构接触面循环直剪系统研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 707—713.
- ZHAO Lian-zhen, YANG Ping, WANG Hai-bo. Development and application of large-scale multifunctional frozen soil-structure Interface cycle-shearing system[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(4): 707—713.
- [15] 彭华娟. 浅谈土工试验中室内大型剪切与小型剪切试验[J]. 广西水利水电, 2000, 4: 44—47.
- PENG Hua-juan. Study on large-scale and small-scale shear test in the indoor soil test[J]. **Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering**, 2000, 4: 44—47.
- [16] 史晓军, 陈隽, 李杰. 层状双向剪切模型箱的设计及振动台试验验证[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 254—261.
- SHI Xiao-jun, CHEN Jun, LI Jie. Design and verification of dual-direction shear laminar box for shaking table test[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2009, 5(2): 254—261.
- [17] 孙海峰, 景立平, 王宁伟, 等. 振动台多功能层叠剪切箱研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2498—2506.
- SUN Hai-feng, JING Li-ping, WANG Ning-wei, et al. Development of multifunctional laminar shear container for shaking table test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(12): 2498—2506.
- [18] 陈国兴, 王志华, 左熹, 等. 振动台试验叠层剪切型土箱的研制[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 89—97.
- CHEN Guo-xing, WANG Zhi-hua, ZUO Xi, et al. Development of laminar shear soil container for shaking table tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(1): 89—97.
- [19] 陈国兴, 陈苏, 左熹, 等. 软土地地铁车站结构地震反应特性振动台模型试验[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 331—342.
- CHEN Guo-xing, CHEN Su, ZUO Xi, et al. Shaking table test on seismic response of subway station structure in soft ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 37(2): 331—

342.

- [20] JAFARZADEH F, SADEGHI H. Experimental study on dynamic properties of sand with emphasis on the degree of saturation[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2012, 32: 26—41.
- [21] VUCETIC M, LANZO G, DOROUDIAN M. Damping at small strains in cyclic simple shear test[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 1998, 124(7): 585—594.
- [22] 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.

 上接第 3308 页

- [8] FEHLER M, ROBERTS P, FAIRBANKS T. A temporal change in coda wave attenuation observed during an eruption of Mount St. Helens[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)**, 1988, 93(B5): 4367—4373.
- [9] GRÊT A, SNIEDER R, ÖZBAY U. Monitoring in situ stress changes in a mining environment with coda wave interferometry[J]. **Geophysical Journal International**, 2006, 167(2): 504—508.
- [10] SNIEDER R. Coda wave interferometry and the equilibration of energy in elastic media[J]. **Physical Review E**, 2002, 66(4): 046615.
- [11] SNIEDER R. The theory of coda wave interferometry [J]. **Pure and Applied Geophysics**, 2006, 163(2—31): 455—473.
- [12] SNIEDER R, GRÊT A, DOUMA H, et al. Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity[J]. **Science**, 2002, 295(5563): 2253—2255.
- [13] GRÊT A, SNIEDER R, SCALES J. Time - lapse monitoring of rock properties with coda wave interferometry[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)**, 2006, 111(B3): 1581—1600.
- [14] LAROSE E, HALL S. Monitoring stress related velocity variation in concrete with a 2×10^{-5} relative resolution using diffuse ultrasound[J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 2009, 125(4): 1853—1856.
- [15] 富鸿, 曾昭发. 利用尾波干涉检测介质微变化的超声波模型试验[J]. **中国地球物理**, 2008. 230—231.
- FU Hong, Ultrasonic model test on detecting the slight change using of coda wave interferometry[J]. **Chinese Geophysics**, 2008. 230—231.
- [16] 宋丽莉, 葛洪魁, 郭志伟, 等. 利用多次散射波监测介质性质变化的试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(4): 713—722.
- SONG Li-li, GE Hong-ku, GUO Zhi-wei, et al. Experimental study of variation of media properties monitoring using multiple scattering waves[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(4): 713—722.
- [17] 宋丽莉, 葛洪魁, 梁天成, 等. 小应力扰动下岩石弹性波速变化的波形检测[J]. **中国石油大学学报: 自然科学版**, 2012, 36(4): 60—65.
- SONG Li-li, GE Hong-ku, LIANG Tian-cheng, et al. Waveform detection of elastic wave velocity changes in rock under small stress perturbations[J]. **Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)**, 2012, 36(4): 60—65.
- [18] SNIEDER R. Elastic coda wave interferometry, a new tool for the instrumented oilfield[J]. **SEG Technical Program Expanded Abstracts**, 1949, 21(1): 1650.
- [19] JIA X P, LAURENT J, KHIDAS Y, et al. Sound scattering in dense granular media[J]. **Chinese Science Bulletin**, 2009, 54(23): 4327—4336.
- [20] CANAL J. Cracks in porous rocks: Tiny defects, strong effects[J]. **Digital Library Home**, 2009, 172: 116—124.
- [21] KACHANOV M. Elastic solids with many cracks and related problems[J]. **Advances in Applied Mechanics**, 1993, 30(114): 259—445.