

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.06.036

一种新型动单剪仪的研发与试验验证

邵生俊, 王 强, 吴飞洁

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘 要: 与动三轴仪和动扭剪仪相比较, 动单剪仪具有加载条件更接近实际地震作用, 且剪应力可以直接施加及剪应变可以直接量测等多方面的优点。然而, 现有的动单剪仪仍存在剪应力-应变不均匀、边界条件不稳定、潜在剪切面和试样尺寸效应等技术问题。在比较分析现有动单剪仪加载机构和应力-应变条件的基础上, 提出了一种新型立方体铰接机构动单剪仪的研制思路和加载原理。介绍了该仪器的压力室结构、加荷系统、量测系统和自动控制系统。利用有限差分程序模拟了 3 种不同单剪加载机构对土样剪应变分布的影响, 验证了新型单剪仪设计使土样中剪应变分布更加均匀。针对 2 种原状黄土开展了一系列不同试验条件下的循环单剪试验。测试结果表明, 该仪器的加载控制精准且量测信号可以较为真实有效地再现动荷载输入, 且竖向应变、剪应变、剪应力和循环周次之间的关系曲线很好地揭示了原状黄土的震陷特性及其变化规律。

关 键 词: 动单剪仪; 黄土; 循环单剪试验; 震陷

中图分类号: TU 415

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)06-1841-08

Development and test verification of a new cyclic simple shear apparatus

SHAO Sheng-jun, WANG Qiang, WU Fei-jie

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Compared with cyclic triaxial and torsion shear apparatuses, the cyclic simple shear apparatus has obvious advantages, e.g., simulating *in-situ* conditions under earthquakes, and directly applying shear stress and measuring shear strain. However, applications of current cyclic simple shear apparatuses are still limited due to technical problems, such as non-uniform shear stress or strain, boundary condition un-determined, potential shear plane, and size effect of specimen. In this study, a new cyclic simple shear apparatus with hinged structures for a cubical specimen was developed to resolve these problems. The design concept and loading principle were proposed by considering the loading mechanics and stress-strain condition of current simple shear apparatuses. Several main components of the apparatus were presented in detail, including pressure cell, loading system, measurement system and automatic control system. The shear strain distribution of soil specimen subjected to loading from three different loading devices was analyzed by the three-dimensional finite differential program, which proved that the shear strain distribution of soil specimen subjected to loading from the new simple shear apparatus were more uniform than the other two. Finally, a series of cyclic simple shear tests on intact loess specimens were conducted with this developed apparatus under different vertical pressures, water contents and shear strain amplitudes. The results show that the apparatus is reliable and accurate in loading control. The dynamic load input can be reproduced with the acquired data. The formation process of seismic subsidence of loess and the corresponding influencing law are revealed by the relationships between vertical strain, shear stress, shear strain and the number of loading cycles.

Keywords: cyclic simple shear apparatus; loess; cyclic simple shear test; seismic subsidence

1 引 言

在地震、交通和波浪等动荷作用下, 工程地基中的土体通常会受到纯剪状态的附加应力和主应力轴的旋转作用^[1-3]。通过土工测试仪器模拟土体的天

然应力状态, 进而研究土体在实际荷载条件下的强度及变形特性, 是指导并解决实际工程问题的重要依据^[4]。目前, 土动力学特性测试方面的仪器主要有动三轴仪、动扭剪仪和动单剪仪等仪器。动三轴仪是通过圆柱体试样 45° 斜面上的往复剪切作用模

收稿日期: 2015-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.11572245)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (11572245).

第一作者简介: 邵生俊, 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与黄土力学研究。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn

通讯作者: 王强, 男, 1983 年生, 博士研究生, 副研究员, 主要从事土动力学与岩土地震工程研究。E-mail: wangqiangbj@163.com

拟动荷作用,无法模拟主应力轴旋转^[5];动扭剪仪则是在空心圆柱形试样上同时施加竖向荷载和水平向往复扭剪作用,可以用于研究复杂应力条件下土的本构关系,但存在空心圆柱试样难于成样和剪应变不均匀等缺点^[6];动单剪仪可对试样同时施加竖向与水平向剪切荷载,其加载条件与实际工程场地所受到的地震作用更为接近,剪应力可以直接施加,且所产生的剪应变可以直接量测^[7]。动单剪仪在模拟地震作用方面具有其他仪器所不具备的显著优点,然而,现有动单剪仪的加载机构仍存在一些技术问题有待改进。

最早的单剪仪是 1936 年由瑞典皇家岩土所研制的叠环式单剪仪^[8]。其后,挪威岩土所的 Bjerrum 等于 1966 年在此基础上研发了一种采用螺旋加筋橡胶膜边界代替叠环加箍膜边界的单剪仪^[9]。相较于直剪仪,这两种单剪仪在保证剪应变的均匀性和避免出现预定的剪损面等方面都取得了很大的改进,但仍存在剪应力和剪应变不均匀、叠环间试样侧向变形、叠环位置存在潜在剪切面等缺点^[10-11]。另一种具有代表性的单剪仪是由剑桥大学的 Roscoe 于 1953 年提出的方框式单剪仪^[11],随后 Bufhu^[7]、Pickering^[12]和 Noel 等^[13]对该仪器结构进行了改进。这种单剪仪的加载机构可以更好地保证试样剪应力和剪应变的均匀性,但其 4 块刚性板之间的接触关系和边界条件却难以保持稳定,同时侧面板与土样之间也存在摩擦力的影响^[4]。针对现有单剪仪所存在的上述问题,本文首先分析了现有动单剪仪的加载应力条件,并提出了西安理工大学动单剪仪的研制思路和机构加载原理;然后,介绍了所研制伺服油缸驱动的立方体铰接机构动单剪仪的压力室结构、加荷系统、量测系统和自动控制系统,并利用有限差分程序 FLAC3D 数值模拟软件,研究了 3 种不同加载方式对土样剪应变分布的影响;最后针对 2 种原状黄土开展了一系列不同试验条件下的动力加载试验,并对试验结果开展了分析讨论。

2 加载应力条件及研制思路

地震波在水平场地传播的过程中,土体单元主要受两方面的荷载作用:一是由上覆荷载产生的围压作用,二是由剪切波产生的往复剪切作用。在模拟土体的围压作用方面,现有的单剪仪通常采用竖向直接加压模拟竖向应力,同时采用不同的侧限边界条件如叠环箍橡胶膜、加螺旋筋橡胶膜、刚性板或压力室模拟侧向应力边界^[8-9, 11, 14]。采用叠环箍橡

胶膜、加螺旋筋橡胶膜和压力室边界时,水平往复剪切力通过试样上、下底面与加载板之间的摩擦力施加,其加载应力条件如图 1(a)所示。由图可见,试样表面的正应力 σ 随着剪应变的发展会产生不均匀分布,且纯剪应力状态仅产生在试样的中心位置。采用刚性板边界时,剪切力 τ 则是通过相邻铰接面的相对转动而均匀施加到方形试样上,试样的正应力和剪应力分布则较为均匀,见图 1(b)。这两种加载模式具有各自的优缺点,但比较来看第 1 种加载模式在圆柱试样易于成样、孔隙水压力易于量测和试验易于操作方面具有优势;而第 2 种加载模式则在实现应力-应变均匀分布和减小试样尺寸效应方面具有优势。

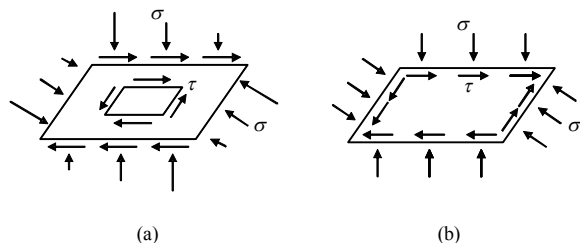


图 1 两种单剪试验条件下的土单元受力条件
Fig.1 Stress condition of a soil element within two simple shear apparatuses

基于对上述问题的分析,为了更为真实地模拟工程场地受到地震动作用时的土体应力条件,并实现应力和应变状态量的精确测量,本文提出了一种伺服油缸驱动的新型立方体铰接机构动单剪仪。该仪器采用边长为 7 cm 的立方体试样,其 4 块剪切面上均采用刚性板接触,而剪切面正交面上则采用铰接并行的密集排梁接触。其中被水平向驱动的底端刚性板与相邻的两块竖向刚性板采用铰接联结,而顶部提供竖向荷载的加压刚性板则与相邻两块刚性板仅保持形式上的铰接,即顶端刚性板与相邻竖向刚性板既可以产生相对转动,同时又可以产生竖向相对位移(见图 3)。由此,该仪器通过较大尺寸的立方体试样减小了试样的尺寸效应,通过剪切面上的刚性板接触保证了应变分布的均匀性,通过刚性板之间的铰接转动实现了剪应变的施加,通过剪切面正交面上的并行的密集铰接排梁接触,消除了试样与接触板之间的摩擦效应,通过顶端与侧向刚性板之间的脱离式类铰接接触,保证了它们之间的相对转动同时保证了顶端刚性板的竖向移动。

3 新型立方体铰接机构动单剪仪

新型立方体铰接机构动单剪仪包括压力室结

构、加荷系统、量测系统和自动控制系统，见图2。压力室结构是实现单剪应力条件的核心加载机构，动力加载系统是为压力室提供竖向和水平向往复剪切荷载的伺服油缸设备和液压驱动机构，量测与自动控制系统包括数据采集传感器装置和自动控制程序，详细介绍如下。

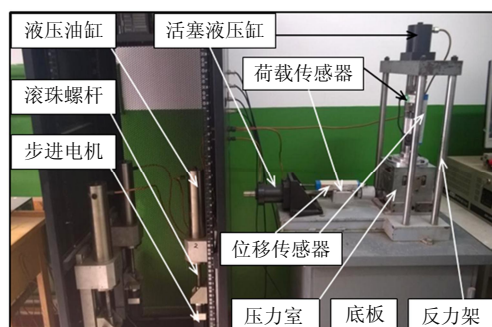
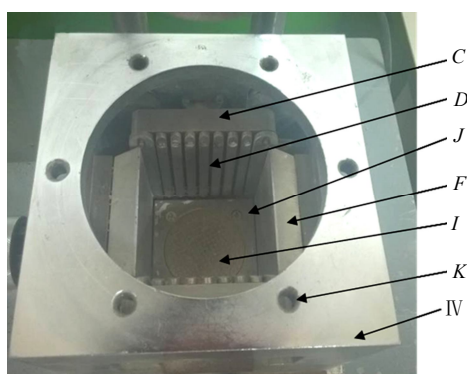
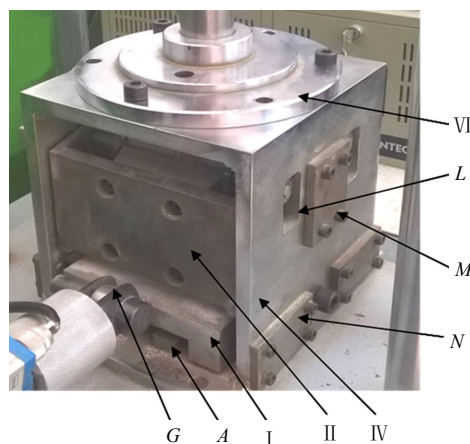


图2 动单剪仪器主体结构全视图

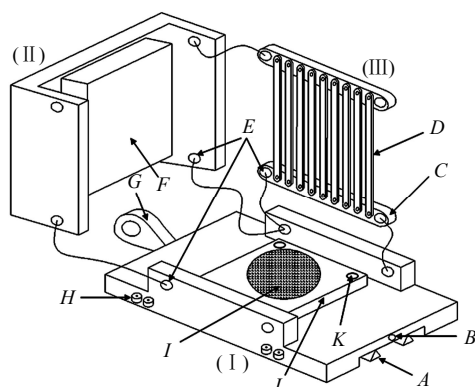
Fig.2 A general view of the simple shear apparatus



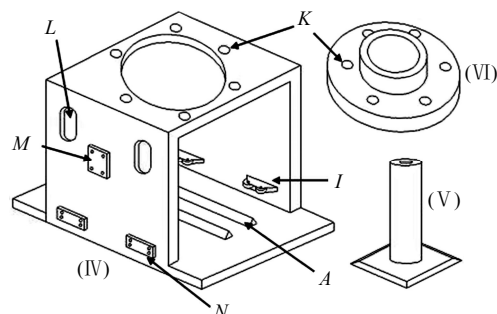
(a) 俯视图



(b) 全视图



(c) 示意图1



(d) 示意图2

图3 压力室结构

Fig.3 The structure of pressure chamber

(I) 水平向加载底板; (II) 侧限板支架; (III) 侧限隔条“板”; (IV) 反力框架; (V) 垂直向加载顶板; (VI) 侧限盖板, 其中, A 为水平向导轨、B 为进水孔、C 为横梁、D 为方形隔条、E 为铰接孔、F 为侧限板、G 为连接接头、H 为侧限滚轮、I 为透水石、J 为试样底座、K 为螺栓孔、L 为垂直向导洞、M 为横梁滚轮支座、N 为侧限滚轮支座

3.1 压力室结构

图3所示，压力室结构包括水平向加载底板、侧限板支架、侧限隔条板、反力框架、垂直向加载顶板、侧限盖板6部分。立方体试样的压力腔由1块方形试样底座、2块方形侧限板、2块侧限隔条板和1块方形垂直向加载顶板围成，它们分别位于立方体试样的底面、左、右侧对立面、前、后侧对立面和上面。方形试样底座通过4个螺栓孔固定在水平向加载底板上，其中嵌入有透水石。试样通过透水石与水平向加载底板的排水通道连通，由此可以实现排水条件控制和孔隙水压力的量测。侧限板通过4个螺栓固定在单方向开口的凹槽型侧限板支架上，侧限板支架则通过设置在侧耳部四角的4个铰接孔分别与水平向加载板以及侧限隔条板的横梁相铰接，见图3(c)中曲线连接。这种连接机构保证了侧限板与试样底座板之间既满足无缝接触，又可以产生相对转动。侧限隔条板的下部横梁与水平向加

载板相铰接,上部横梁与其两侧的侧限板支架相铰接。上部横梁两端通过滑轮铰接杆被限制在反力框架的垂直向导洞内,从而限制上部横梁的水平向运动。侧限隔条板的并排方形隔条与上、下部横梁相互铰接,从而使得上、下部横梁可以产生相对平行转动。垂直向加载顶板由方形板和加载轴承组成。其中,方形板置于正方体试样顶面,加载轴承通过侧限盖板与垂直向活塞液压缸的加压轴连接。侧限盖板经由 6 个螺栓孔被固定在反力框架上,通过限制垂直向加载顶板的水平向侧移,使其仅能沿竖向方向运动。

水平向加载底板与反力框架的底板通过两条平行的滑轮轨道接触,其侧面与固定在反力框架侧壁的 4 组滚轮接触。滑轮轨道对水平向加载板具有竖向限制作用,反力框架侧壁的滚轮在垂直于轨道方向的水平向上对加载板具有限制作用。当沿轨道方向的水平向推拉力作用于水平向加载板时,水平向加载板仅能产生沿轨道方向的往复直线运动。当水平向加载底板产生水平位移时,侧限板与侧限隔条板与水平向加载底板之间产生转动,上部横梁连动方形隔条和侧限板支架上端产生竖直向下的位移,垂直向加载顶板同步下移。侧限板与水平向加载底板和垂直向加载顶板之间的相对转动使得原有的正方形截面变为菱形截面,从而对试样产生推剪作用,保证了方形试样剪切变形的均匀性。

3.2 加荷系统

加荷系统由 3 组步进电机、滚珠丝杆和液压油缸构成的液压动力源以及 2 个活塞液压缸组成,见图 2。水平方向的活塞液压缸为双杆式,活塞两侧的液压油经由铜质油管分别与前述的两组液压动力源相连通。两组不同液压动力源之间可以实现同步

协调进、出油,从而可以实现双杆式活塞液压缸的活塞往复运动。相应地,该活塞杆联动水平向加载底板同步往复运动,进而可以对试样施加往复剪切荷载。垂直向的活塞液压缸为单杆式,经由铜质油管与另外一组液压动力源相连接。当垂直向活塞液压缸内的油压受压时,液压推动活塞杆联动的垂直向压力板对试样直接施压。由图 2 还可以看出,水平向活塞杆与水平向加载板之间以及垂直向活塞杆与垂直向加载板之间均设置有位移传感器和拉压力传感器。它们可以实时量测应力、应变数据并反馈于数据采集系统,并通过自动控制程序实现加载方式的应力控制和应变控制。

3.3 量测系统

静、动单剪仪通常考察水平向剪切力、水平向位移、垂直向压力、垂直向位移和孔隙水压力(针对饱和土)5 个状态变量,由此量测系统也相应地包括应力、应变和孔隙水压力量测。如上所述,该仪器的加载机构之间均为刚性接触,因此应力、应变可分别采用应变式荷载传感器和直线位移传感器直接量测。荷载传感器和位移传感器直接安装在液压活塞杆与加载板之间,同时配置了活动调节构件,见图 4。图 4 所示,荷载传感器的一端与活塞杆直接连接,另一端通过活动调节构件与试样加载板连接。活动调节构件由连接螺杆、套筒、接头、插头和插销组成,连接螺杆、套筒和连接接头之间采用螺纹连接,连接接头之间采用插销连接。其中,在活动调节构件位置固定之前,连接接头与连接套筒之间可以自由转动,由此可以调节活塞杆与加载板的间距。采用这种连接结构,便于水平和垂直向加载板、荷载和位移传感器的安装及初始位置调节。孔隙水压力的量测则通过安装在排水通道处的孔压传感器直接量测。

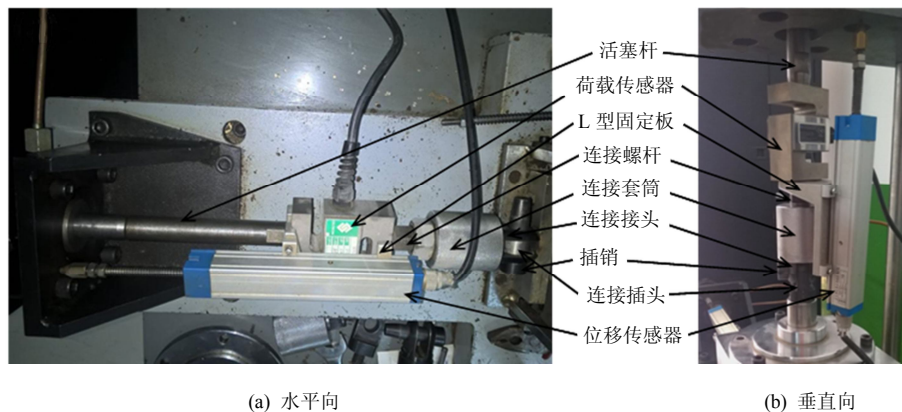


图 4 位移、荷载传感器安装图

Fig.4 Installation diagram of displacement and load transducers

3.4 自动控制系统

控制系统主要由电阻应变仪、应力应变传感器、微机控制系统和控制调节电路等组成。土体试样的应力和应变,均由其对应的荷载传感器和直线位移传感器采集并做相应地输出,输出作为反馈的信号与给定的信号采用闭环负反馈调节。传感器输出的信号经过放大电路放大后输入 PCB (printed circuit board) 卡中,计算机再对数据进行采集,然后以数据文件的形式保存在计算机里。试验数据采集及处理的全过程均由计算机自动完成控制。

4 不同单剪加载机构试样应力-应变分布的数值模拟

为了比较不同单剪机构的加载条件,本文应用有限差分程序 FLAC3D 模拟了土样在 3 种不同加载机构中的剪应变分布情况。模型 1 模拟叠环式单剪仪^[8],模型 2 模拟方框式单剪仪^[11],模型 3 模拟新型立方体铰接机构单剪仪。模型 1 试样为直径 60 mm,高 20 mm 的圆柱体,其顶、底面上加两块刚性板模拟上、下加载的刚性边界,试样侧壁加 1 组刚性圆环模拟橡皮膜外侧叠环。模型 2 和 3 试样均为边长 70 mm 的立方体。模型 2 试样的 6 面加 6 块刚性板模拟加载刚性边界,刚性板与试样之间加库仑模型接触面。模型 3 试样的上、下、左、右 4 面加 4 块刚性板,前、后两面加 2 块方形隔板条,刚性板与试样之间加库仑模型接触面。模型 1、2、3 取相同的计算参数,其中,土样的弹性模量和泊松比分别为 20 MPa 和 0.33,刚性板和刚性圆环的弹性模量和泊松比分别取为 200 GPa 和 0.25。土样表面的橡皮膜与刚性板和刚性圆环之间的摩擦接触采用库仑模型模拟,法相和切向刚度均取为 2 000 GPa,黏聚力为 0,摩擦角取为 15°。

模型 1 的计算步骤是:①对试样在上、下底面刚性板上分别施加正应力 $\sigma_{yy} = 150$ kPa,建立应力平衡;②对试样沿顶、底面刚性板的切向方向施加剪应力力偶 $\sigma_{yx} = 100$ kPa,建立应力平衡。模型 2 的计算步骤是:①对试样在垂直于 y 轴的两块刚性板上分别施加正应力 $\sigma_{yy} = 20$ kPa,建立应力平衡;②对试样施加两组 0~70 kPa 的渐变力偶,一组施加到垂直于 x 轴的两块刚性板上,另一组施加到垂直于 z 轴的两块刚性板上,建立应力平衡。模型 3 的计算步骤是:①对试样在垂直于 y 轴的两块方形隔板条上分别施加正应力 $\sigma_{yy} = 20$ kPa,建立应力平衡;②对试样施加两组 0~70 kPa 的渐变力偶,一组施加到垂直于 x 轴的两块刚性板上,另一组施加

到垂直于 z 轴的两块刚性板上,建立应力平衡。

图 5 给出了 3 种计算模型的剪应变分布等值线,图 5(a)、图 5(b)和图 5(c)分别对应模型 1、2、3。从图 5(a)可见,模型 1 的剪应变值沿试样高度方向大致可以分为 5 个取值区间,依次是顶面、中上部、中部、中下部和底面。试样顶面和底面的剪应变分布呈现出从近中心位置向外侧递增的趋势,同时在剪切方向上的试样边缘存在较为明显的局部效应。试样中上部和中下部区域的剪应变值大小一致,中部区域的剪应变值则相对较小。图 5(b)显示,模型 2 的剪应变值主要分布在区间 $2 \times 10^{-5} \sim 2.5 \times 10^{-5}$ 内。但由于前、后侧限板与试样之间的摩擦阻力作用,剪应变在试样前、后面的四周出现了明显的局部

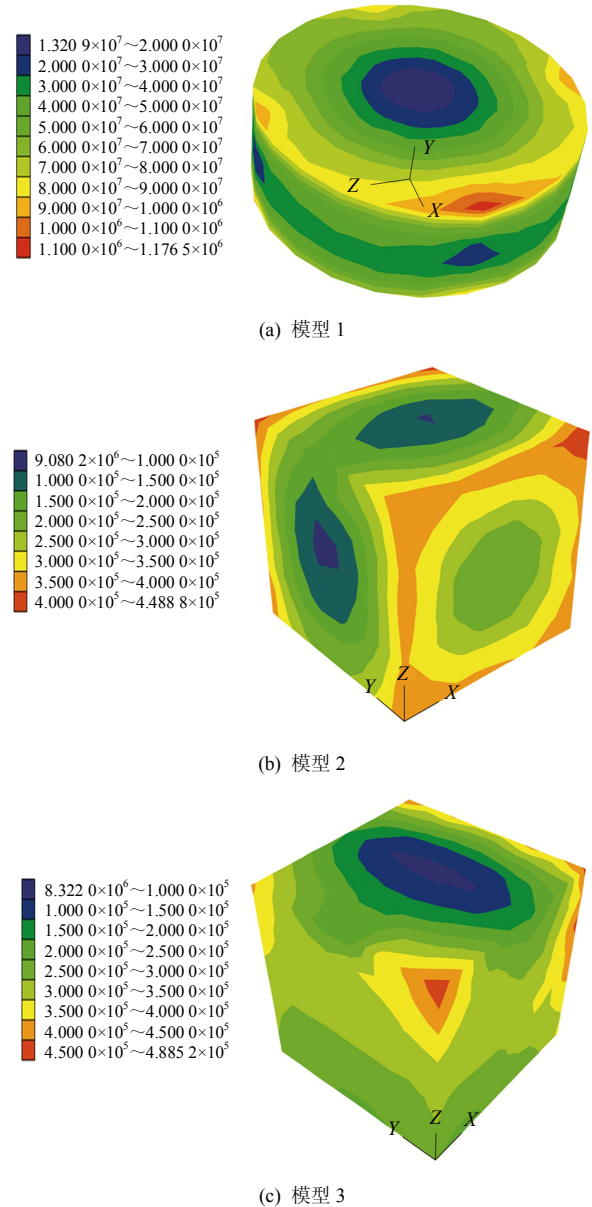


图 5 不同单剪加载机构条件下的试样剪应变等值线图
Fig.5 Contour of shear strain obtained by different simple shear apparatuses

增大效应。同时,在试样上、下、左、右面的中心位置存在剪应变的弱化区域。与模型 2 相比,模型 3 的剪应变值与模型 2 的剪应变值基本一致,主要分布在区间 $3 \times 10^{-5} \sim 3.5 \times 10^{-5}$ 内,仅在试样的角端部存在一定的局部效应,见图 5(c)。从数值模拟的结果比较来看,模型 3 的剪应变分布比在模型 1 和 2 更为均匀。

5 试验验证

5.1 试验条件

为考察该仪器在加载控制及量测方面的稳定性,本次试验采用竖向应力控制和水平向应变控制的加载方式分别对土样 I 和土样 II 两种原状黄土试样开展了不同含水率、竖向荷载和剪应变幅值条件下的单级和多级加载试验,详细加载工况见表 1。表中单级加载是指对同一试样施加某一级荷载至试验结束,多级加载是指对同一试样连续施加多级荷载至试验结束。土样 I 和土样 II 分别取自甘肃省定西市境内宝兰客运专线的安家庄隧道场地 24 m 埋深处和苏家川隧道场地 3 m 埋深处。经室内常规试验测定,土样 I 的干密度为 1.35 g/cm^3 ,孔隙比为 1.00,天然含水率为 12.1%,液限和塑限分别为 26.6 和 17.8;土样 II 的干密度为 1.22 g/cm^3 ,孔隙比为 1.21,天然含水率为 3.7%,液限和塑限分别为 26.9 和 19.2。

表 1 原状黄土单剪试验加载工况
Table 1 Cases of cyclic simple tests on intact loess specimens

试验 工况	试样	含水率 /%	竖向荷载 /kPa	加载 波形	半波幅值 /%	加载条件
工况 1	I	12.1	50	正弦波	0.15、0.4、 0.6、0.8、1	多级加载
工况 2	I	12.1	100	正弦波	0.15、0.4、 0.6、0.8、1	多级加载
工况 3	I	12.1	100	正弦波	0.6、1	单级加载
工况 4	II	3.7、8.1、 17.8、24.5	50	正弦波	0.5	单级加载

5.2 测试结果分析

图 6 是试验工况 1 时不同剪应变幅值条件下正弦波输入与输出的对比结果。由图可见,不同应变幅条件下加载输出与加载输入的波形均较为吻合,呈现出良好的正弦曲线形态。这表明仪器的加载控制精准且量测信号也可以较为真实有效地再现了动荷载输入。

图 7 是试验工况 3 时竖向应变和剪应变随加载周次变化的时程曲线。由图可知,竖向应变随加载

周次的增加呈现出递增趋势,且在加载初期增长较快,而后逐渐趋稳。这一方面反映了非饱和黄土在动荷载作用下的振密特性;另一方面反映了振密特性随土密实度增加而减弱的变化规律。黄土具有显著的大孔隙和弱胶结结构特征,在强震作用下通常表现出较强的震陷特性^[15-16]。由图可见,竖向应变在动荷载加载初期增幅较大,相较于后期的竖向应变发展表现出土体压密的突发性,即对应于黄土的震陷特性。侧限条件下,土样随着竖向应变的增长而变得密实,土颗粒之间的有效接触面积增大,土体表现出一定的振密压硬性。此时,土的滞回曲线随着加载周次的增加也变得陡峭,即滞回圈的割线斜率随加载周次逐渐增大,土体变硬。

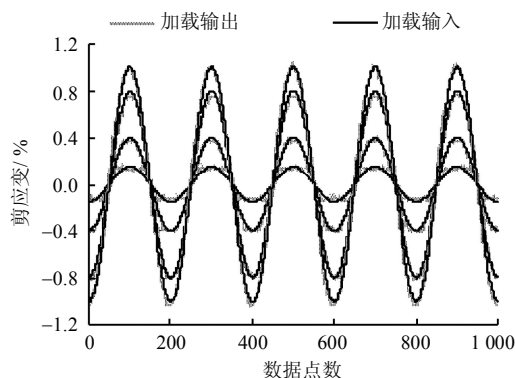


图 6 加载输入与输出时程对比
Fig.6 Comparison between the input and output of loading history

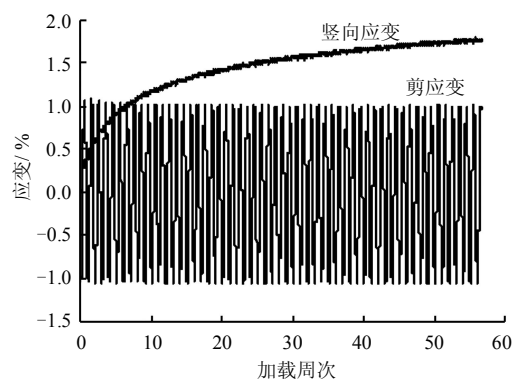


图 7 竖向应变与剪应变的时程曲线
Fig.7 Time history curves of vertical and shear strain

图 8 给出了试验工况 3 时等应变幅循环荷载条件下的滞回曲线,图 9 给出了相对应的动剪切模量随加载周次增加的变化曲线。图 8 中的滞回圈在最初几周较为平缓,随后逐渐变得陡峭且位置随加载周次的增加而趋稳。图 9 中的动剪切模量在动荷载加载的前 9 周呈现出较大的增长幅度,随后趋于不变。由此可见,图 8、9 中所示的试验结果很好地揭示了

土的振密压硬性。

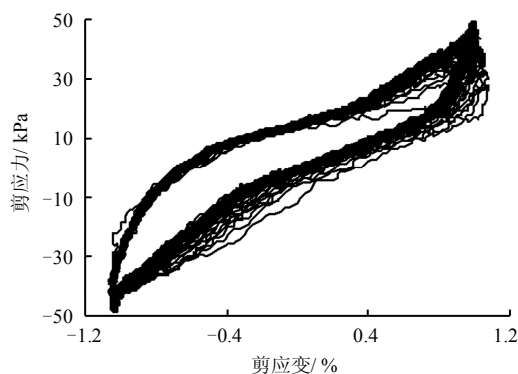


图8 等应变幅加载条件下的滞回曲线
Fig.8 Experimental shear stress-strain relationship under constant shear amplitude

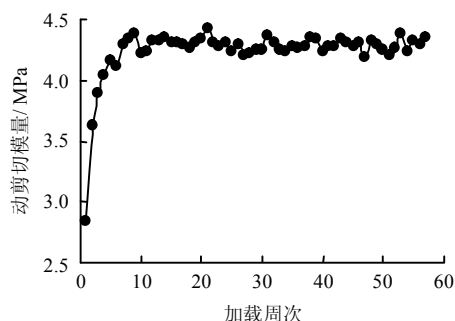


图9 动剪切模量随加载周次的变化曲线
Fig.9 Dynamic shear modulus versus loading number

图10给出了试验工况2、3时的试验结果,比较了单级和多级加载条件下竖向应变随振次增加的变化关系。由图10可见,动剪应变幅 γ_d 等于0.6%或1%的单级加载显然大于相同动剪应变幅多级加载所产生的竖向应变周增幅。这说明土的密实度对循环剪切作用下的竖向应变周增幅具有重要影响,密实度越大,则竖向应变的周增幅越小,反之则越大。

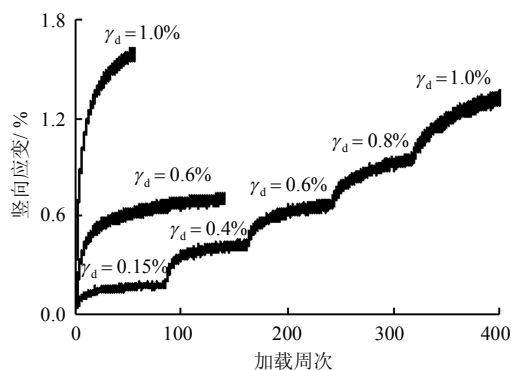


图10 单级与分级加载时竖向应变的时程曲线比较
Fig.10 Comparison of the time histories of vertical strain under single-level and multi-level loadings

黄土是一种典型的结构性土,存在显著的结构强度,同时具有很强的水敏性^[17]。因此,对于循环荷载作用下的黄土体,其竖向应变必然会受到含水率、动剪应变幅和加载周次的影响。图11给出了试验工况4的测试结果,从中可以看出,含水率对竖向应变的周增幅影响较为明显。随着含水率的增加,竖向应变的周增幅也随之增大,且最终的趋稳值也相应较大。含水率 w 为3.7%和8.1%时,该黄土体不具有震陷性,而 w 为17.8%和24.5%时则表现出震陷性。由此可见,对于一定动荷载条件下的特定黄土体,必然存在产生震陷的临界含水率。图12给出了试验工况2和3时不同剪应变幅条件下竖向应变随加载周次的关系曲线。由图可见,竖向应变的周增幅随着动剪应变幅的增加而增大,同时最终的趋稳值也相应变大。与含水率对竖向应变发展的影响规律类似,黄土震陷的产生存在临界动应力。由于黄土具有水敏性,其土颗粒之间的连接强度随着含水率的增加而降低。显然,含水率的增加使得土颗粒之间的联结易于破坏,土骨架易于失稳而产生较大幅度的竖向应变。类似地,动剪应变幅

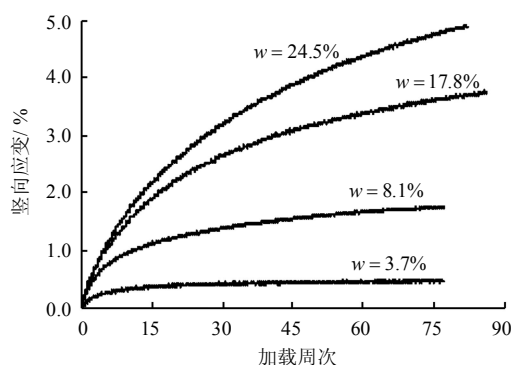


图11 不同含水率条件下的竖向应变时程曲线
Fig.11 Time histories of vertical strain under different water contents

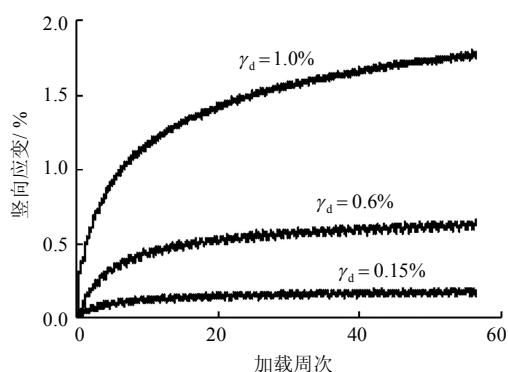


图12 不同剪应变幅条件下的竖向应变时程曲线
Fig.12 Time histories of vertical strain under different shear strain amplitudes

值的增加则会相应地增加对土颗粒之间联结的破坏作用,而使得竖向应变周增幅变大。图 11、12 很好地反映了含水率和动剪应变幅对竖向应变的影响规律。

6 结 论

(1) 本文分析了现有动单剪仪的加载机构和应力-应变条件,提出了一种新型立方体铰接机构动单剪仪的研制思路和加载机构原理,并详细介绍了所研制动单剪仪的压力室结构、加荷系统、量测系统和自动控制系统。该仪器通过采用立方体试样减小了试样的尺寸效应,通过剪切面上的刚性板接触保证了剪应力的均匀分布,通过剪切面正交面上并行的密集铰接排梁接触消除了试样与接触板之间的摩擦效应,通过顶端刚性板与侧向刚性板之间的脱离式类铰接接触保证了它们之间的相对转动和顶端刚性板的竖向移动。三维有限差分分析结果表明,土样在新型单剪仪的加载机构中剪应变分布比其他两种机构中的剪应变更加均匀。

(2) 针对 2 种原状黄土开展了一系列不同含水率、竖向荷载和动剪应变幅值等试验条件下的循环加载试验。试验结果表明,该仪器的加载控制精准且量测信号可以较为真实有效地再现动荷载输入。不同试验条件下竖向应变随循环周次增加的变化规律可以很好地反映黄土的动应力-应变特性。竖向应变随剪应变循环周次的增加而增加,而周增幅随着循环周次的增加而减小并最终趋于不变。竖线应变的周增幅和最终趋稳量与黄土的密实度、含水率和动剪切应变幅相关。密实度越大,竖向应变的周增幅则越小,反之越大。含水率或动剪应变幅越大,竖向应变的周增幅和最终趋稳值越大,反之越小。

参 考 文 献

- [1] STEWART J P, BRANDENBERG S J, SHAFIEE A. Laboratory evaluation of seismic failure mechanisms of levees on peat[R]. Los Angeles: University of California, 2013.
- [2] ANSELL P. Cyclic simple shear testing of granular material[D]. Nottingham: University of Nottingham, 1977.
- [3] RUTHERFORD C J. Development of a multi-directional direct simple shear testing device for characterization of the cyclic shear response of marine clays[D]. Texas: Texas A&M University, 2012.
- [4] 王锤琦, 孙广忠, 刘双光, 等. 岩土工程测试技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- WANG Zhong-qi, SUN Guang-zhong, LIU Shuang-guang, et al. Measuring and testing technique of geotechnical engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1986.
- [5] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- CHEN Guo-xing. Geotechnical earthquake engineering[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2007.
- [6] LI B, ZHANG S, GUTIERREZ M. A numerical DEM examination of torsional shear test[C]//Geo-Congress 2014. Atlanta: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [7] BUFHU M. Simple shear device for testing earthen materials and powders: American, 4854175[P]. 1989-08-08.
- [8] KJELLMAN J. Testing the shear strength of clay in Sweden[J]. *Geotechnique*, 1951, 2(3): 225—232.
- [9] BJERRUM L, LANDVA A. Direct simple-shear tests on a Norwegian quick clay[J]. *Geotechnique*, 1966, 16(1): 1—20.
- [10] GATTHIEU G. The boundary conditions in direct simple shear tests: Developments for peat testing at low normal stress[D]. Delft: Delft University of Technology, 2011.
- [11] 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 Conference Engineering. Zurich: Organizing Committee, 1953.
- [12] PICKERING D J. A simple shear machine for soil[D]. Manchester: Manchester University, 1943.
- [13] NOEL B, MICHAEL M. Development of a direct simple shear apparatus for peat[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2009, 32(2): 126—138.
- [14] KAMMERER A, HUNT C, RIEMER M. UC Berkeley geotechnical testing for the East Bay Crossing of the San Francisco-Oakland Bay bridge[R]. Los Angeles: University of California, 1999.
- [15] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- ZHANG Zhen-zhong. Earthquake disaster prediction of loess[M]. Beijing: Seismological Press, 1999.
- [16] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- WANG Lan-min. Loess dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 2003.
- [17] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3—13.
- XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(1): 3—13.