

文章编号: 1000-7598 (2010) 01-0314-07

GDS 空心圆柱仪动力试验能力探讨

黄 博, 丁 浩, 陈云敏, 赵 宇

(浙江大学 岩土工程研究所/软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310027)

摘 要: 为更好地模拟多向应力和主应力轴旋转等复杂应力路径, 与英国 GDS 公司合作研发了能施加轴向和扭矩动载的空心圆柱仪。文中介绍了该仪器的工作原理和性能, 分析对比了其与传统单向动三轴仪试验结果, 并探讨该空心圆柱仪所完成的 5 组典型动力荷载及一组不规则随机波动力试验能力。动力加荷时, 通过调整设定刚度参数, 实测波形与设定波形误差较小。该仪器能很好地模拟地震、波浪和交通荷载引起的应力, 为研究复杂应力状态下土体动力本构关系提供了很好的工具。

关 键 词: 动力试验, 空心圆柱扭剪仪, 动应力路径

中图分类号: TU 411.8

文献标识码: A

Preliminary study of dynamic testing performance of hollow cylinder apparatus

HUANG Bo, DING Hao, CHEN Yun-min, ZHAO Yu

(MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Institute of Geotechnical Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To simulate the complicated stress path, such as multi-directional stress and principal stress axis rotation induced by earthquake shaking, ocean wave or traffic loading, a hollow cylinder apparatus (HCA) with dynamic triaxial and torsional shear capability was designed cooperatively with GDS company. The working principle of the apparatus is introduced. Comparisons of the test results are made between the traditional dynamic triaxial device and the hollow cylinder apparatus. Five series dynamic stress paths and a seismic record are designed and applied to evaluate the performing of the new apparatus. The deviation from the specified loading stress would be minimized as a suitable parameter, which could be adjusted in the software, is chosen. The testing results show that the HCA is a good instrument to investigate dynamic constitutive model under complex stress conditions.

Key words: dynamic soil tests; hollow cylinder apparatus; dynamic stress path

1 引 言

土体性状受到应力路径的影响, 理想状态下只有室内试验条件完全模拟真实加载过程, 才能反应土体的真实响应, 在动力条件下尤其如此。最常见的几种动力荷载, 如地震荷载、交通荷载、波浪荷载等都是涉及到多向应力和主应力轴旋转的复杂应力路径, 这就要求了解土体在复杂应力条件下的响应规律, 从而建立考虑多种复杂因素的更科学的本构模型。解决该问题离不开先进的土工试验设备和现代测试技术。传统的土工试验中, 动三轴仪只能通过施加动偏应力在试样 45° 斜面上模拟地震水

平向剪切作用, 动扭剪仪只能通过施加扭矩来模拟纯剪时的应力状态, 而难以模拟更复杂的动应力路径, 无法满足现代工程的需要。

空心圆柱仪是目前可以实现包括主应力轴旋转在内的多种复杂应力条件的最先进的土工试验设备。空心圆柱仪 (以下简称 HCA) 因试样为薄壁空心圆柱形而得名。早在 1936 年, Cooling 和 Smith 就对空心圆柱土样进行了扭剪试验, 这也是扭剪三轴试验的前身。20 世纪 60 年代, Broms 等利用静力扭剪三轴试验研究了主应力轴方向旋转和中主应力大小对黏土抗剪强度的影响。80 年代 Hight 等^[1]对之前的 HCA 进行了总结, 开发了新型 HCA, 探

收稿日期: 2008-10-07

基金项目: 地震行业科研专项基金 (No. 200808022); 国家自然科学基金 (No. 50708095); 国家重点基础研究发展计划 (No. 2007CB714203) 资助。
第一作者简介: 黄博, 女, 1973 年生, 副教授, 硕士生导师, 主要从事实验土力学及土动力学的教学与研究, E-mail: cehuangbo@zju.edu.cn

讨论了试样尺寸和端部效应对试样的应力、应变不均匀性的影响,最后确定了内径为 203 mm,外径为 254 mm,高 254 mm 的试样尺寸以获得较好的应力、应变均匀性,使试样中部的“有效区域”免受端部效应影响。Ishihara 和 Towhata^[2]在日本诚研舍制造的空心圆柱扭剪仪的基础上增加了竖向加载系统,模拟波浪荷载,试样内径为 60 mm、外径为 100 mm、高 104 mm,仪器加载速率较为缓慢(文献中为 0.08 Hz);Tatsuoka 等^[3]后来改用高 200 mm 试样以减小端部效应。Macky 和 Saada^[4]在改造的 HCA(试样内径为 51 mm,外径为 71 mm,高 127 mm)上研究了大应变下各向异性黏土的动力特性,提出了不同的大主应力偏转角下 $G/G_{\max}$ 与应变的变化关系。Shibuya^[5]为东京大学开发了伺服系统和自动数据采集装置,使 HCA 能实现更加复杂的应力路径试验。20 世纪 90 年代后更注重从测试硬件和试验手段上提升 HCA 测试精度,Vaid 等^[6]研制了新的 HCA,重新探讨了应力沿试样壁的不均匀性问题,划出应力空间中的“No Go”区域,将应力不均匀控制在允许范围内,从而确定内径为 102 mm,外径为 152 mm,高 302 mm 的试样尺寸。Crockford 和 Sousa^[7]探讨了快速、精确制备空心圆柱黏土样的技巧,并开发了能加快位移传感器数据采集速度的装置。1994 年,Frost 和 Drnevich^[8]对比了不同尺寸、不同制样方式的试验结果,提出了空心圆柱样标准化问题。Abrantes 和 Penumadu^[9]利用 MTS 加载框架,TestWare—SX 控制系统研发了自己的 HCA。2003 年,O’Kelly 和 Naughton^[10]开发的 HCA 可以在复杂应力条件下,精确测量应变从 10^{-5} 量级开始到破坏过程中试样应力和孔压变化,进行了一系列砂土各向异性的研究。

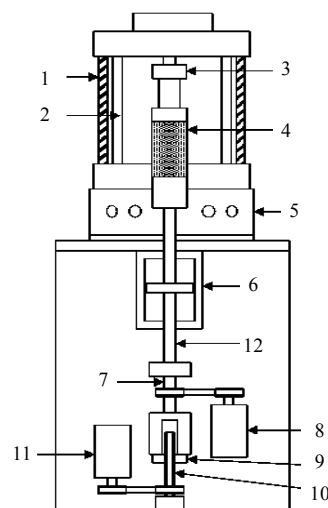
在国内,1986 年中国水利水电科学研究院的张震夏等研制成功了我国第一台 HCA。1991 年,西安理工大学与中国水利水电科学研究院仪器所合作,完成了通过控制轴力和扭矩进行主应力轴旋转的试验^[11]。1993 年,南京航空航天大学的颜国正^[12]为研究土壤和农村建筑复合材料的本构关系,研制了可控制轴力及扭矩加载的 HCA,加载精度可控制在 5 kPa 以内,但其仪器开发成功后,未见进一步的成果。总体来说,该设备国内尚无定型产品,制作经验也不成熟,自制的 HCA 在协调性、稳定性、控制和量测精度等方面都存在不同程度的问题。清华大学在美国引进的扭剪共振柱仪上增加

了轴向循环加载和测试系统,并进行了波浪荷载的模拟^[13]。河海大学、大连理工大学分别与日本圆井株式会社、诚研舍株式会社合作研制开发了 HCA^[14-15],能进行垂直振动、扭剪振动。

在“211 工程”重点学科建设计划的支持下,浙江大学岩土所经广泛调查研究和反复论证、多方比选,与英国 GDS 公司合作,确定了 HCA 的具体技术指标,成功地研制开发了 5 Hz 动态空心圆柱扭剪仪。本文就该套仪器的动力试验性能进行初步探讨和评价。

2 GDS 空心圆柱仪工作原理及功能介绍

浙江大学与 GDS 公司联合开发的 HCA 由计算机操控,可精确独立控制轴力、竖向位移、扭矩、转角、内、外压力及反压,并实现轴力和扭矩的动力施加(也可用应变控制)。HCA 主要包括压力室和激振器,如图 1 所示。压力室通过 3 根连接压力室顶盖和底座的大直径金属杆来获得支撑刚度,压力室的仓体采用有机玻璃制造,最高可以承受 1 700 kPa 的压力。压力室顶端刚接水下荷重轴力/扭矩双出力传感器。采用重锤平衡马达系统控制压力室升降。试样底座可更换,分 2 种尺寸,分别用于大(内径/外径为 160 mm/200 mm,高 400 mm)、小(内径/外径为 60 mm/100 mm,高 200 mm)2 种尺寸的试样。



1—压力室有机玻璃罩,2—支撑金属杆,3—水下荷重传感器,4—试样,5—压力室底座,6—导杆平衡室,7—花键轴,8—扭矩控制直流伺服马达,9—球状螺母,10—滚珠丝杠,11—轴向控制直流伺服马达,12—导杆

图 1 GDS 空心圆柱仪示意图
Fig.1 Schematic diagram of GDS hollow cylinder apparatus

研发的 HCA 仪器动力系统采用电机控制, 低于 10 Hz 加载频率时可以得到比液压和气压控制方式更好的输出精度。它通过 2 台大功率无刷直流伺服马达分别控制轴向荷载(位移)和扭矩(转角), 利用高强材料零间隙齿咬合皮带、滚珠丝杠、球状螺母进行传动。2 台马达可以带动球状螺母的轴向移动, 再通过导杆传递到导杆上, 最终由导杆穿过平衡室伸入压力室中, 带动底座运动。平衡室的作用是通过调节、补偿压力室内水流, 最大限度地保证在轴向动力加载过程中围压不产生波动, 也不会因压力室内围压的变化在导杆上产生力的作用。传感器数据的读取则通过专门设计的高速数据采集控制卡来实现。

空心圆柱试样中外压、内压和反压的控制通过 GDS 高级压力/体变控制器 (2 MPa/1 000 mL) 来实现, 孔压通过连接到试样底座的外部孔压传感器量测, 压力的量测精度可达 2 kPa, 体积量测精度可达 2.5 mm^3 。

3 单向循环振动试验结果对比

为探讨及验证新仪器的动力试验性能, 在严格控制试验条件的情况下, 在本实验室的一台美国 SBEL 公司进口的单向动三轴仪 HX-100 和 GDS 空心圆柱仪上进行了福建标准砂比较试验。HX-100 动力系统为气压控制式, 激振力作用于试样顶端, 试样为圆柱形, 直径为 39.1 mm、高 80 mm。GDS 空心圆柱仪动力系统为电机控制式, 激振力作用于试样底部, 采用小尺寸空心圆柱试样。由于功能限制, 只进行了轴向振动下不排水动三轴试验对比。

试验土样是筛除 2 mm 以上颗粒的福建标准砂, 物性指标见表 1, 颗分曲线如图 2 所示。采用水中砂雨法制样, 控制相对密度相同 ($D_r=40\%$ 左右), 并施加 100~400 kPa 反压, 确保孔隙压力系数 $B \geq 0.97$ 。几组动力试验的试样均在 100 kPa 的有效围压下固结。固结完成后, 在试样轴向施加动应力直至破坏, 振动波形均采用正弦波, 循环荷载频率为 1 Hz。

表 1 福建标准砂物性

Table 1 Physical properties of Fujian standard sand

名称	土粒相对密度	孔隙比和相对密度			颗粒尺寸分布			
		$e_{\max}$	$e_{\min}$	$D_r/\%$	D_{10}	D_{50}	D_{90}	C_u
福建标准砂	2.65	0.788	0.432	36~44	0.13	0.34	0.80	3.1

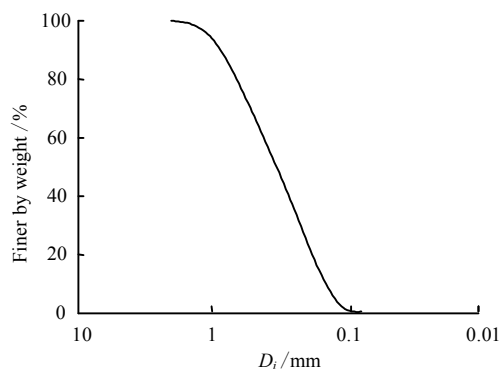


图 2 试验用土颗粒级配曲线

Fig.2 Grain size distribution of tested soil

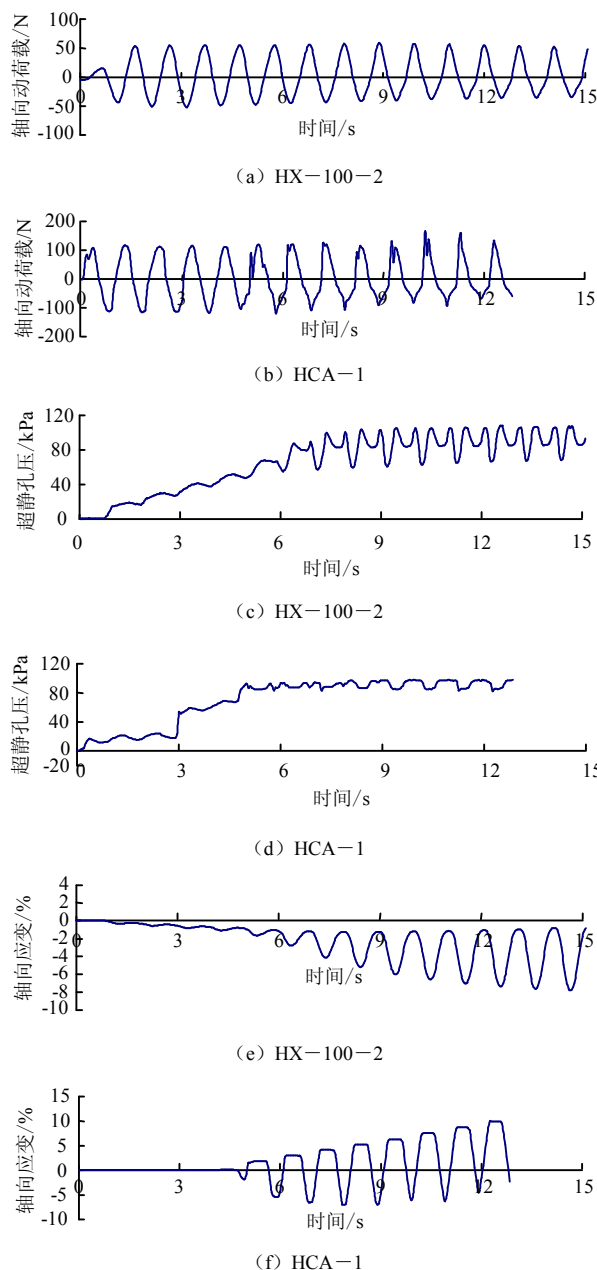


图 3 HX-100 与 HCA 标准砂循环三轴试验典型时程曲线
Fig.3 Typical record of tested sand in cyclic triaxial tests (comparisons between HX-100 and HCA)

对比试验中各试样参数的初始密度、固结体变、固结后密度和相对密度等见表 2。2 组试验中为控制固结度相同，HX-100 试样固结 1 h，排水量在 1 mL 左右；HCA 上试样固结 6.25 h，固结体变在 9~9.8 mL 左右。试样固结后相对密度控制在 $(40\pm 5)\%$ 以内。图 3 给出了动应力比相近的试样的轴向动力荷载、孔压和轴向应变的时程曲线。从图中可见，轴向动力施加过程中，HX-100 初始几次循环时施加力较小，通过后期的伺服反馈逐渐达到规定值，土样破坏后力逐渐衰减。HCA 在开始就有较好的控制精度，土样破坏后力有一定变异。2 套仪器中土样孔压的发展模式较为接近：开始阶段均随着振次逐渐增加，并在某一时刻出现陡增现象，随后达到稳定，在初始固结压力 100 kPa 附近振动。HX-100 试样孔压峰值间出现明显的“凹坑”，这种振动液化试验后期出现的孔压“凹坑”现象，曾有许

多学者报道^[16]，是试样在“前期的累积剪缩（孔隙水压力上升）和后期的加载剪胀和卸载剪缩交替作用下”^[17]形成的饱和砂土循环活动性表征，也被认为是瞬时液化的标志。而 HCA 试样孔压峰值阶段则比较平缓，虽然也有一定波动，但没有出现 HX-100 试样中孔压震荡现象，这可能是因为试样较大，加载剪胀现象不明显所致。从变形发展模式来看，由于前者为顶部激振，传力杆与试样帽之间存在真空吸力，易在土样中形成拉伸变形，而后者拉压变形较为均匀，因此两者的应变模式有区别。表 2 中还给出了初始液化标准和双幅应变达到 5 % 破坏标准下土样的破坏振次，虽然分别从孔压和变形的角度定义土体破坏标准，但对于试验所用标准砂，这两种液化标准得到的破坏振次非常接近，从图 4 对 2 台仪器的动强度结果对比来看，也相差不多。

表 2 HX-100 及 HCA 循环三轴试验条件汇总
Table 2 Test conditions of cyclic triaxial tests (comparison between HX-100 and HCA)

试样编号	固结前干密度 /(g/cm ³)	体变 /cm ³	固结后干密度 /(g/cm ³)	相对密度 /%	轴向动荷载幅值 /N	动剪应力比	破坏振次	
							初始液化 5 % 双幅应变	
HX-100-1	1.591	0.9	1.606	38.7	62.916	0.255	3	3
HX-100-2	1.611	0.8	1.625	44.1	52.949	0.217	9	12
HX-100-3	1.585	0.8	1.598	36.5	46.697	0.190	12	14
HX-100-4	1.583	0.7	1.594	35.1	50.862	0.206	1 014	1 015
HCA-1	1.596	9	1.610	40.0	125.876	0.222	5	6
HCA-2	1.596	9.7	1.611	40.3	99.634	0.185	49	49
HCA-3	1.602	9.8	1.617	42.0	108.791	0.174	380	379

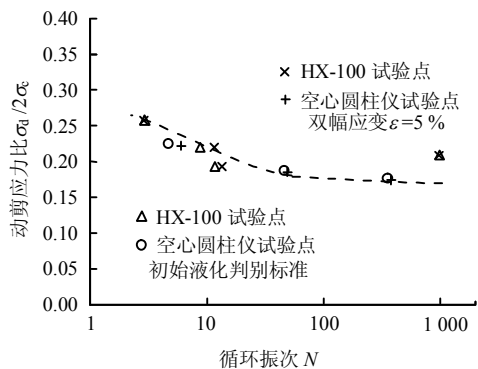


图 4 不同液化判别标准下 2 台仪器标准砂动强度结果对比
Fig.4 Dynamic strength of tested sand on two apparatus (different failure criteria)

4 不同动应力路径的实现能力

GDS 公司空心圆柱仪可以通过轴力和扭矩循

环变载组合，实现包括主应力轴旋转在内的多种复杂应力状态。为考察 HCA 加载精度及多向振动的耦合性能，本文完成了 5 种典型的动应力路径，如图 5 所示。本文仅就设定荷载与实际施加荷载进行对比，结果见表 3~7。从误差分析来看，扭矩控制比轴向力控制精度高；轴向力控制绝对偏差较小，但当施加轴力幅值小时，如循环椭圆扭剪（表 5）时较小的偏差也会引起较大的相对误差。从工作原理可以看出，仪器实际是通过高精度解码器将力的信号变换成位移信号进行动力控制的，因此，对显然更容易实现的位移/转角控制方式不做验证。如图 5 所示，不同加载模式下试样实测动应力路径与设计路径相差无几，仪器加载可以满足多向动力组合的试验需要。

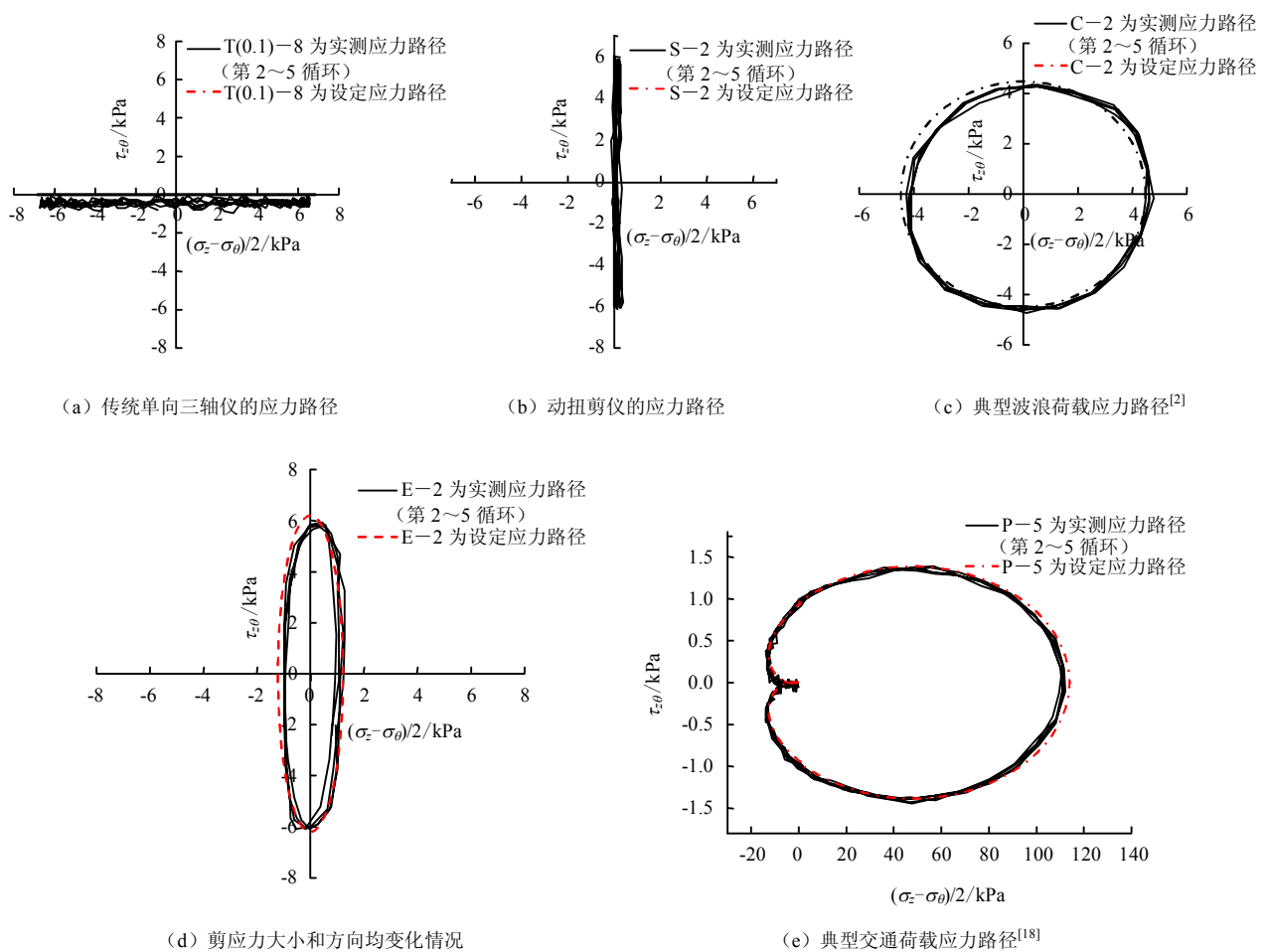


图 5 典型试样实际施加应力路径与设定应力路径对比

Fig.5 Comparisons between measured stress paths and target ones of typical samples

表 3 循环三轴 (0.1 Hz) 实测荷载与设定荷载差异对比
Table 3 Differences between measured load and target load (0.1 Hz cyclic triaxial test)

编号	设定轴力/N	实测轴力/N	误差/%
T(0.1)-1	77	74.05	-3.83
T(0.1)-2	70	67.46	-3.63
T(0.1)-3	62	61.24	-1.23
T(0.1)-4	59	58.31	-1.16
T(0.1)-5	59	58.41	-1.00
T(0.1)-6	56	54.35	-2.94
T(0.1)-7	56	54.80	-2.15
T(0.1)-8	70	65.86	-5.92
T(0.1)-9	45	43.88	-2.49

表 4 循环扭剪实测荷载与设定荷载差异对比
Table 4 Differences between measured load and target load (cyclic torsional shear test)

编号	设定扭矩/(N·m)	实测扭矩/(N·m)	误差/%
S-1	1.515	1.488	-1.80
S-2	1.217	1.2078	0.81
S-3	0.901	0.904	-0.28

表 5 循环椭圆扭剪实测荷载与设定荷载差异对比
Table 5 Differences between measured load and target load (cyclic ellipse shear test)

编号	设定扭矩/(N·m)	实测扭矩/(N·m)	扭矩误差/%	设定轴向荷载/N	实测轴向荷载/N	轴向荷载误差/%
E-1	1.226	1.220	-0.52	12	11.25	-6.24
E-2	0.916	0.924	0.91	9	8.18	-9.10

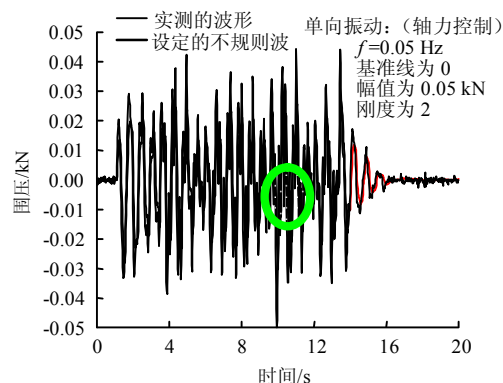
表 6 循环圆扭剪实测荷载与设定荷载差异对比
Table 6 Differences between measured load and target load (cyclic circular shear test)

编号	设定扭矩/(N·m)	实测扭矩/(N·m)	扭矩误差/%	设定轴向荷载/N	实测轴向荷载/N	轴向荷载误差/%
C-1	1.510	1.479	-2.03	74	72.25	-2.36
C-2	1.176	1.150	-2.20	58	56.35	-2.84
C-3	0.893	0.890	-0.37	44	42.79	-2.74
C-4	0.597	0.603	1.08	29	28.63	-1.27
C-5	0.506	0.526	3.89	25	24.97	-0.13

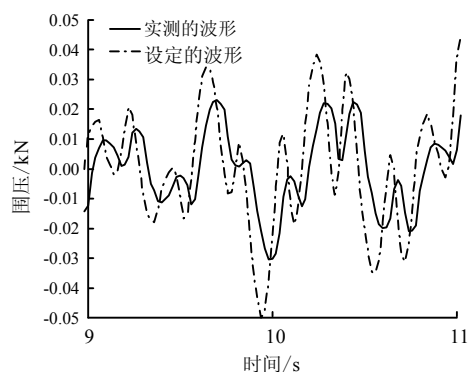
表 7 循环心型扭剪实测荷载与设定荷载差异对比
Table 7 Differences between measured load and target load (Traffic load test)

编号	设定扭矩 /(N·m)	实测扭矩 /(N·m)	扭矩误差 /%	设定轴向 荷载/N	实测轴向 荷载/N	轴向荷载 误差/%
P-1	1.215	1.137	-6.45	99	97.8	-1.21
P-2	1.573	1.515	-3.66	127	123.6	-2.68
P-3	1.016	1.028	1.21	83	81.1	-2.29
P-4	1.332	1.353	1.58	109	107.4	-1.47
P-5	1.388	1.371	-1.22	114	111.2	-2.46

另一方面,动力荷载并非总是规则的,地震作用下产生的震动力具有明显的随机性。利用 HCA 中轴向和扭矩不同变载组合及波形自定义功能,可以模拟地震动作用引起的复杂应力路径。为此,还进行了不规则波试验,试验时采用橡皮样,输入波采用 VELACS 模型 1 的地震波形^[19],作用时长 20 s。图 6(a)为试样“刚度”(控制软件中可由使用者选择的调节参数)设为 2 时实测轴力与设定值的对比。从图 6(b)的放大图中可以看到实测值无论是幅值还是相位均与设定值存在很明显的差别。



(a) 刚度参数为 2 实测轴力与设定值对比图

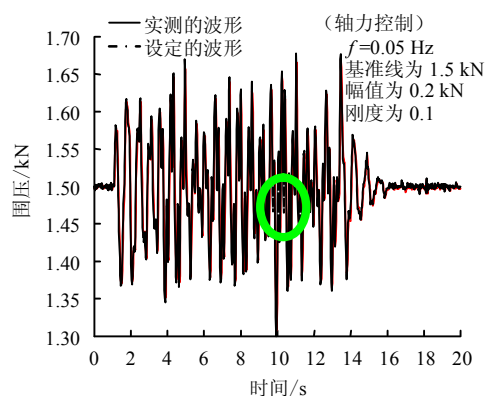


(b) 图 (a) 的局部放大图

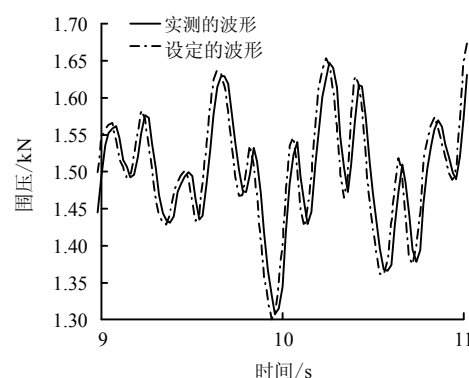
图 6 实际施加的轴力与设定的轴力的对比(刚度参数为 2)
Fig. 6 Comparisons between measured load and target ones (Seismic loading test when stiffness parameter equals to 2)

但当试样“刚度”调整为 0.1 时,图 7(b) 的放大图中可以看出轴力的幅值基本上都能达到设定

值,但整条记录曲线比设定曲线稍微滞后一点。通过对试验记录进行分析发现该延时在整个记录中保持不变,为 0.02 s。这应该是仪器从发送命令到执行命令造成的延时。通过两个信号的相关系数来分析实测值与设定值的差异^[20],求得两者相关系数为 0.92,表明实测值与设定值相关性很好。通过以上分析,当采用橡皮样时,无论是位移控制还是力控制,实际荷载均能较好地与设定荷载相吻合。但应注意的是,如果采用黏土样或是砂样,由于土体非线性性质,表现为应变软化或应变硬化,在进行这种不规则波的动力试验时,加载效果肯定不如橡皮样。另外需要指出的是,在进行力控制的试验时,试样刚度的选取尤为重要(位移控制试验时无需选择刚度),而影响刚度的因素较多,如土样类型、加载波形、加载频率、应力条件等,若刚度选择不当则不能很好模拟设计波形,每次动力试验前应先进性刚度调试,只有通过摸索才能摸清其规律,进而确保试验精确度。



(a) 刚度参数为 0.1 时实测轴力与设定值对比图



(b) 图 (a) 的局部放大图

图 7 实际施加的轴力与设定的轴力的对比
(刚度参数为 0.1)

Fig.7 Comparisons between measured load and target ones(seismic loading test when stiffness parameter equals to 0.1)

5 结 论

(1) 与英国 GDS 公司合作研发的动态空心圆柱扭剪仪可以在 5 Hz 频率范围内进行轴向荷载和扭矩的耦合动态作用, 除可以完成动三轴仪、动扭剪仪的试验功能外, 还可以实现包括主应力轴连续旋转、不规则任意波加载在内的多种复杂应力路径。

(2) 通过与其它动三轴仪动力试验对比发现, 二者孔压规律、动强度结果相近, HCA 的轴向动力施加更为精准, 但由于动力控制原理和激振部位不同, 两者变形规律有一定差异。

(3) 仪器对具有规则波形的动力试验, 均能达到较好的模拟结果, 荷载频率越低, 加载精度越高; 对不规则波的动力试验, “刚度”参数的选择尤为重要, 通过调整该参数可以得到较好的模拟效果。

(4) 本次研发的仪器的加载性能优良, 动力荷载误差控制较好, 达到国际先进水平, 为研究复杂应力状态下土体动力本构关系提供了有力的工具。进一步的研究和探索工作还需要积累更多的试验资料。

参 考 文 献

- [1] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J. Development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils[J]. **Geotechnique**, 1983, 33(4): 355—383.
- [2] ISHIHARA K, TOWHATA I. Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads[J]. **Soils and Foundations**, 1983, 23(4): 11—16.
- [3] TATSUOKA F, SONODA S, HARA K, et al. Failure and deformation of sand in torsional shear[J]. **Soils and Foundations**, 1986, 26(4): 79—97.
- [4] MACKY T A, SAADA A S. Dynamics of anisotropic clays under large strains[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1984, 110(4): 487—504.
- [5] SHIBUYA S. Servo system for hollow cylinder testing of soils[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1988, 11(2): 109—118.
- [6] VAID Y P, SAYAO A, HOU E, et al. Generalized stress-path-dependent soil behaviour with a new hollow cylinder torsional apparatus[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1990, 27(5): 601—616.
- [7] CROCKFORD W W, SOUSA J. Hollow cylinder specimen preparation: cohesive materials[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1992, 15(3): 271—276.
- [8] FROST J D, DRNEVICH V P. Towards standardization of torsional shear testing[C]//Proceedings of the Symposium on Dynamic Geotechnical Testing II. San Francisco: ASTM, 1994: 276—287.
- [9] ABRANTES A E, PENUMADU D. Axial-torsional testing system for clay with local strain measurement[J]. **Transportation Research Record**, 1998, 1614: 24—32.
- [10] O'KELLY B, NAUGHTON P. Development of a new hollow cylinder apparatus for generalised stress path testing[J]. **Ground Engineering**, 2003, 36(7): 26—28.
- [11] 姚仰平, 谢定义. 振动拉压扭剪三轴仪及其试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 1996, 28(2): 129—133.
YAO Yang-ping, XIE Ding-yi. Extension-compression and torsion vibrating triaxial apparatus and experimental investigation[J]. **Journal of Xi'an University of Architecture & Technology**, 1996, 28(2): 129—133.
- [12] 颜国正, 许广庚, 张德骏. 空心圆柱土壤试样试验仪及应力路径自校正预报控制技术研究[J]. 农业工程学报, 1994, 10(2): 23—28.
YAN Guo-zheng, XU Guang-geng, ZHANG De-jun. Research on a hollow cylinder specimen apparatus and self-tuning and predicting control technique of stress paths[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 1994, 10(2): 23—28.
- [13] 沈瑞福, 王洪瑾, 周景星. 动主应力轴连续旋转下砂土的动强度[J]. 水利学报, 1996, (1): 27—33.
SHEN Rui-fu, WANG Hong-jin, ZHOU Jing-xing. Dynamic strength of sand under cyclic rotation of principal stress direction[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1996, (1): 27—33.
- [14] 刘汉龙, 周云东, 高玉峰, 等. 多功能静动三轴仪研制及在液化后大变形中的应用[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 27(5): 48—51.
LIU Han-long, ZHOU Yun-dong, GAO Yu-feng, et al. Design of static-dynamic dual purpose triaxial compression test apparatus and its application to the study of earthquake-induced large deformation[J]. **Dam Observation and Geotechnical Tests**, 2001, 27(5): 48—51.
- [15] 栾茂田, 郭莹, 李木国, 等. 土工静力—动力液压三轴—扭转多功能剪切仪研发及应用[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(5): 670—675.
LUAN Mao-tian, GUO Ying, LI Mu-guo, et al. Development and application of soil static and dynamic universal triaxial and torsional shear apparatus[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2003, 43(5): 670—675.
- [16] SEED H B, LEE K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1966, SM6, 105—134.
- [17] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [18] POWRIE W, YANG L A, CLAYTON C R I. Stress changes in the ground below ballasted railway track during train passage[J]. **Journal of Rail and Rapid Transit**, 2007, 221(2): 247—261.
- [19] ELGAMAL A, YANG Z, PARRA E. Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2002, 22(4): 259—271.
- [20] 徐守时. 信号与系统—理论、方法和应用[M]. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 2003.