刘超,张建民.应力主轴往返旋转条件下砂土变形规律试验研究[J].地震工程学报,2017,39(1):0028-0031.doi:10.3969/j.issn. 1000-0844.2017.01.0028

LIU Chao, ZHANG Jian-min. Experimental Research on the Deformation of Sand under Principal Stress Back-and-forth Rotation [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1):0028-0031.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0028

应力主轴往返旋转条件下砂土变形规律试验研究。

刘 超1,张建民2

(1. 水电水利规划设计总院,北京 100120;

2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084)

摘要:在已有空心圆柱扭剪仪上开发新的控制模块,实现应力主轴以任意初始方向角开始并以任意 角度幅值进行往返旋转。在此基础上,对丰浦砂开展系列应力主轴往返旋转试验。试验结果表明: ①应力主轴往返旋转角度幅值和初始主应力方向角均对砂土变形有不可忽视的影响;②不同于应 力主轴连续循环旋转的情形,应力主轴往返旋转时砂土由于"楔入效应"可能出现体胀。

关键词:空心圆柱扭剪仪;应力主轴旋转;砂土;体积变形;试验

中图分类号:TU47 文献标志码:A 文章编号: 1000-0844(2017)01-0028-04 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.028

Experimental Research on the Deformation of Sand under Principal Stress Back-and-forth Rotation

LIU Chao¹, ZHANG Jian-min²

(1. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China;

2. The State Key Laboratory of Science on Water and Sand and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper develops a new control module for a hollow cylinder apparatus (HCA), which allows principal stress to rotate back-and-forth at any angle. A series of experiments on Toyoura sand are conducted. The results indicate that the effects of both the amplitude of the rotation angle and the initial direction of the principle stress on the deformation of sand should not be ignored. Furthermore, sand may expand when principal stress rotates back-and-forth due to the "wedging effect". However, this will not happen when principal stress rotates continuously.

Key words: hollow cylinder apparatus; principal stress rotation; sand; volume deformation; experiment

0 引言

岩土工程中,土体中某单元所经历的应力路径 一般较为复杂,不仅主应力大小有所变化,应力主轴 也往往发生旋转。许多研究者发现,应力主轴的旋 转对土的变形与主应力大小引起的变形处于同一个 数量级,因而不应被忽视[1-7]。

对应力主轴旋转问题进行试验研究的主要设备 是空心圆柱扭剪仪。在以往研究设计的应力路径 中,在实际工程中,土体在交通荷载、地震荷载、波浪 荷载作用下,其应力主轴往往以某个初始角度为中

① 收稿日期:2016-01-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51678346);水沙科学与水利水电工程国家重点实验室项目(2014-KY-03,2015-KY-03) 作者简介:刘 超(1986-),男,四川绵阳人,博士,工程师。E-mail;nickliu04@126.com。

心,进行有限角度的往返旋转。应力主轴一般是连 续旋转的,以往的试验研究中并未关注这种特殊而 重要的应力路径。另外,排水单元试验中的体变规 律对应着不排水情况下的孔压变化规律,对土的强 度和变形有重要影响,因而值得特别的关注。

为此,本文在已有的空心圆柱扭剪仪控制程序 中开发了应力主轴有限角度往返旋转的新控制模 块,采用标准丰浦砂为试验材料,以大主应力初始方 向角 a。、往返旋转角度幅值 a 为控制变量,进行一 系列纯应力主轴有限角度往返循环旋转的试验,探 讨这类应力路径下砂土的变形规律。

1 试验仪器、方法与应力应变计算

试验所采用的空心圆柱扭剪仪^[8]主要由压力 室、加载系统、控制系统以及数字采集系统等部分组 成。试样高度 H = 314 mm、内径 $D_i = 150 \text{ mm}$ 、外径 $D_o = 200 \text{ mm}$ 。该试验机可以加载的最大轴力为 2 kN,最大扭矩 400 N · m,最大内外围压为 800 kPa。

详细的试样制备、饱和以及加载过程与童朝 霞^[9]基本相同。在试验开始前测量试样饱和度,所 有试验测得的 B 值均大于 0.98,满足实验要求。

试验过程中,数据采集系统直接采集得到的物 理量包括轴力W、扭矩T、内围压P_i、外围亚P_o4个 荷载值,以及扭转角度θ、轴向变形z、内压力室体积 变化V_i和试样体积变化V4个变形量。利用后三个 测得的变形量可以计算得到试样的内外径变形量 u_i和u_o,再根据表1中给出的计算公式得到试样的 应力应变分量。表中r_o、r_i和r_d分别为试样外半 径、试样内半径以及加载杆半径。

表1 试样应力应变计算公式(文献[9])

Table 1	Formulas for	the calculation	of stresses and	strains of the specimens	(references	[9]])
---------	--------------	-----------------	-----------------	--------------------------	-------------	-----	----

	应力	应变
轴向	$\sigma_z = \frac{W}{\pi (r_o^2 - r_i^2)} + \frac{P_o(r_o^2 - r_d^2) - P_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}$	$\epsilon_z = rac{z}{H}$
环向	$\sigma_{ heta} = rac{P_{o}r_{o} - P_{i}r_{i}}{r_{o} - r_{i}}$	$arepsilon_{ heta} = -rac{u_{o} + u_{i}}{r_{o} + r_{i}}$
径向	$\sigma_r = rac{{P}_{o}r_{o} + {P}_{i}r_{i}}{r_{o} + r_{i}}$	$arepsilon_r = -rac{u_o-u_i}{r_o-r_i}$
切向	$\sigma_{z\theta} = \frac{T}{2} \left[\frac{3}{2\pi (r_o^3 - r_i^3)} + \frac{4(r_o^3 - r_i^3)}{3\pi (r_o^2 - r_i^2)(r_o^4 - r_i^4)} \right]$	$arepsilon_{z heta}=-rac{ heta(r_o^3-r_i^3)}{3H(r_o^2-r_i^2)}$

2 试验方案

试验中所用丰浦砂的主要物理参数如表 2 所列。

表 2 试验所用丰浦砂主要物理参数

Table 2	Main parameters	of Toyoura	sand used	in the tests
平均粒径	不均匀	最大孔隙	最小孔隙	土粒比重
D_{50}/mm	系数 C ₁	the max	the min	G_{*}

D_{50} / mm	东奴 Uu	L e max	L e min	G s
0.21	1.50	0.975	0.605	2.645
本文-	一共进行了	5 组试验	,如表 3 周	所列。表:

中所有试验的试样相对密度均为 70% \pm 2%,且试 验过程中均始终保持有效球应力 p' = 100 kPa、中 主应力系数 b = 0.5。

试验应力路径如图 1 所示,其中图 1(a)为 p'-q平面内的应力路径,图 1(b)为偏应力平面内的应力 路径。试验过程中,从初始的有效等压固结球应力 p'=30 kPa 的 O 点开始,等压固结至 p'=100 kPa 的 O'点后,在始终保持中主应力系数 b=0.5的情况 下,保持 p'不变,按照指定的初始主应力 方向角 a_0 ,在偏应力平面上从O'点定轴剪切至偏

表 3 试验方案

	Table 3 Experiment	al programs
试验	大主应力初始	往返旋转角度
编号	方向角 a ₀ /(°)	幅值 a/(°)
		10
		30
系列I	0	60
		90
		连续旋转
		10
중 포네 표	15	30
奈列 Ⅱ	15	60
		连续旋转
		10
▼ 万川 Ⅲ	20	30
<i>忝 곗</i> リ Ⅲ	30	60
		连续旋转
	60	10
系列IV		30
		连续旋转
		10
系列 V	75	30
		连续旋转

差应力($\sigma_1 - \sigma_3$)/2=50 kPa的A点。此时A点的



图 1 应力主轴有限角度往返旋转应力路径 Fig.1 Stress path of the back-and-forth rotation of principal stress

3 个主应力分别为 $\sigma_1' = 150 \text{ kPa}, \sigma_2' = 100 \text{ kPa}, \sigma_3' = 50 \text{ kPa}, 对应的广义剪应力 q = 86.6 \text{ kPa}. 然后,如图 1(b)所示,以 a 为角度幅值开始进行应力 主轴有限角度往返循环旋转试验, <math>A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow A$ 为一个循环周次。

3 试验结果及分析

为了对比应力主轴有限角度往返旋转条件下旋 转角度幅值对体应变规律的影响,将试验得到的体 应变曲线与应力主轴单向连续旋转条件下的体应变 进行对比,将对应的试验数据绘制到图 2 中。其中, 应力主轴连续旋转的试验结果来源于童朝霞^[9]。

从图 2(a)(试验系列 I)中可以发现:当应力主 轴往返旋转角度幅值 a = 30°时,在往返旋转的前几 个循环周次内,压缩体应变不断累积,累积速率逐渐 减小;到第 4 个循环周次时,压缩体应变的累积速率 减小到 0,压缩体应变达到最大值;在此之后,体应 变开始向膨胀的方向发展,压缩体应变逐渐减小;在



图 2 体应变与加载周次的关系(试验系列 [)

Fig.2 Relationship between volumetric strain and number of load cycles (test series I)

第 10 个周期时,体应变整体开始表现出体胀,并继 续向膨胀方向发展。而当应力主轴往返旋转角度幅 值 a=90°时,体应变也同 a=30°一样,表现出先体 缩再体胀的变化趋势。但其在前几个循环周次内的 压缩体应变累积速率相对更快,而在几个循环周次 之后出现的膨胀体应变累积速率相对更慢,特别是 在大约 10 个循环周次之后膨胀体应变的累积速率 基本减小至 0,体应变达到稳定。而此时的体应变 总体上仍然表现为压缩变形。

通过进一步对比图 2(a)中的各条曲线可知,应 力主轴有限角度往返旋转条件下的体应变规律与应 力主轴单向连续旋转条件下有很大区别。后者的压 缩体应变不断累积,且累积速率逐渐减小,压缩体应 变最终达到稳定,而前者则总是整体表现出先体缩 再体胀的变形规律。同时,在应力主轴有限角度往 返旋转条件下,往返旋转角度幅值 a 越大,则体应变 在前几个循环周次内的压缩变形累积越快,同时在 若干个循环周次之后的膨胀变形累积也越慢,而最 终表现出的体胀趋势更弱或者体缩趋势更明显。

图 2(b)~(e)也很清楚地表现出类似规律,但 在相同旋转幅值情况下,随着初始大主应力方向角 的增加,体胀趋势也逐渐减弱。

上述体应变的发展规律可以解释为:应力主轴 在以某个方向为中心不断的进行往返循环旋转过程 中,砂土颗粒也在不断地来回偏转和滑移。在前几 个循环周次内,土颗粒之间相对位置不断调整,孔隙 被压缩,表现为整体上土骨架体积的收缩;而随着循 环周次的增加,砂土颗粒的偏转和滑移对体应变的 变化影响逐渐显现出来。由于在加载过程中,径向 方向的应力大小和方向均始终保持不改变,因此试 样中的一个微元体处于平面应力状态,径向方向的 变形约束相对最小。于是在砂土颗粒跟随主应力方 向来回旋转而不断来回偏转、滑移的过程中,逐渐向 径向方向调整,使得该方向出现侧胀,也最终导致试 样体积出现膨胀的趋势。可以将砂土表现出来的这 种现象称为"楔入效应"。

需要指出的是,在应力主轴单向连续旋转试验 中,主应力方向始终朝着一个方向旋转,使得砂土颗 粒的偏转或滑移也在很大程度上向一个方向发展, 土颗粒之间的位置调整也不如来回偏转滑移情况下 的剧烈。因此,最终使得该条件下试样体积表现出 压缩变形。

在应力主轴有限角度往返旋转试验中,往返旋 转的角度幅值越大,应力路径越接近于应力主轴单 向连续旋转条件,砂土颗粒的来回偏转或滑移所导 致的试样体积变形相对于土颗粒朝一个方向偏转或 滑移所引起的体积变形就越少,"楔入效应"表现得 也越弱。因此试样最终表现出来的体应变规律也越 接近于单向连续旋转条件下的规律,即压缩体应变 更显著而膨胀体应变更弱。

4 结论

本文在已有的空心圆柱扭剪仪上通过开发新的 试验控制模块实现了应力主轴以任意初始方向角开 始并以任意角度幅值进行往返旋转。在此基础上, 对丰浦砂开展了系列应力主轴往返旋转试验,试验 结果表明:

(1)应力主轴往返旋转角度幅值和初始主应力 方向角均对砂土变形有不可忽视的影响;

(2)不同于应力主轴连续循环旋转的情形,应力 主轴往返旋转时砂土由于"楔入效应"可能出现体胀。

参考文献(References)

- [1] Ishihara K, Towhatai. Sand Response to Cyclic Rotation of Principal Stress Directions as Induced by Wave Loads[J].Soils and Foundations, 1983, 23(4):11-26.
- [2] Symes M, Gens A, Hight D W. Undrained Anisotropy and Principal Stress Rotation in Saturated Sand [J]. Geotechnique, 1984,34(1):11-27.
- [3] Miura K, Mirra S, Tokis. Deformation Behavior of Anisotropic Dense Sand under Principal Stress Axes Rotation[J]. Soils and Foundations, 1986, 26(1): 36-52.
- [4] Symes M J, Gens A, Hight D W.Drained Principal Stress Rotation in Saturated Sand[J].Geotechnique, 1988, 38(1): 59-81.
- [5] Zhang J M, Tong Z X, Yu Y L. Effects of Cyclic Rotation of Principal Stress Axes and Intermediate Principal Stress Parameter on the Deformation Behavior of Sands[C]//ASCE,2008.
- [6] Tong Z X, Yu Y L, Zhang J M, et al. Deformation Behavior of Sands Subjected to Cyclic Rotation of Principal Stress Axes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1196-1202.
- [7] Tong Z X,Zhang J M,YU Y L, et al.Drained Deformation Behavior of Anisotropic Sands During Cyclic Rotation of Principal Stress Axes[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(11): 1509-1518.
- [8] Yang Z X.Investigation of Fabric Anisotropic Effects on Granular Soil Behavior[D].Hangkong:Hongkong University of Science and Technology,2005.
- [9] 童朝霞.应力主轴循环旋转条件下砂土的变形规律与本构模型 研究[D]北京:清华大学,2008. TONG Zhao-xia.Research on Deformation Behavior and Constitutive Model of Sands under Cyclic Rotation of Principle Stress Axes [D].Beijing:Tsinghua University,2008.(in Chinese)