

# 主应力轴往复循环旋转下砂土的变形特性研究\*

扈萍<sup>1,2</sup>, 魏超<sup>1</sup>, 杨令强<sup>1</sup>, 张文龙<sup>1</sup>

(1. 济南大学 土木建筑学院 济南 250022; 2. 山东省城市地下工程支护及风险监控  
工程技术研究中心 济南 250022)

**摘要:**针对波浪、交通等动荷载下土体所受应力状态往往具有主应力轴循环旋转这一特性,本文对粉细砂进行了一系列主应力轴往复循环旋转应力路径下的空心圆柱扭剪试验,分析了粉细砂在主应力轴往复循环旋转条件下的基本变形规律,并重点研究了粉细砂的非共轴变形特性。通过试验发现,在主应力轴往复循环旋转的应力路径下,粉细砂会产生明显且随旋转次数增加逐渐累积的塑性变形;中主应力系数和循环起始角度对粉细砂轴向应变、剪切应变及体应变等的变化有着明显影响;主应力轴往复循环旋转过程中砂土的非共轴角不可忽略,其变化规律受循环起始角度的影响;主应力轴旋转方向相反时,对应于同一主应力方向角非共轴角会相差 $90^\circ$ 左右。

**关键词:**主应力轴往复循环旋转;粉细砂;非共轴;中主应力系数;循环起始角度

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)04-0955-07

## Deformation Behavior of Sands under Reciprocating Cyclic Principal Stress Rotation

Hu Ping<sup>1,2</sup>, Wei Chao<sup>1</sup>, Yang Lingqiang<sup>1</sup>, Zhang Wenlong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, P.R.China; 2. Engineering Technology Research Center on Urban Underground Engineering Support and Risk Monitoring of Shandong Province, Jinan 250022, P.R.China)

**Abstract:** A series of drained tests were conducted on fine sands with an automated hollow cylinder apparatus to investigate the influence of cyclic principal stress rotation induced by wave or traffic loads on soil's properties. Based on the experimental results, the basic deformation behaviour especially the non-coaxiality of fine sands are studied under cyclic principal stress rotation. It is found that the fine sands would produce obvious plastic deformation which would gradually accumulate with the increase of times of reciprocating cycle rotation. The axial strain, the shear strain and the volumetric strain would be greatly influenced by the intermediate principal stress coefficient and cyclic rotation starting angle; During the rotation of principal stress axes, the non-coaxial angles can not be ignored, which were greatly influenced by cyclic rotation starting angle. Meanwhile, the non-coaxial angle would have abrupt changes about  $90^\circ$  at the same angle of principal stress when the directions of principal stress rotation are opposite.

**Keywords:** reciprocating cyclic principal stress rotation; fine sands; non-coaxiality; intermediate principal stress coefficient; cyclic rotation starting angle

\* 收稿日期: 2018-02-01(修改稿)

作者简介: 扈萍(1980-), 女, 山东东营人, 博士, 副教授, 主要从事岩土本构理论的研究。

E-mail: pinghu2002@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51409120); 山东省高等学校优秀中青年骨干教师国际合作培养计划

## 0 引言

在地震、交通以及波浪等往复循环荷载作用下,土体的主应力轴往往会产生持续不断的旋转。主应力轴的旋转会使土体产生明显的塑性变形,从而造成塑性应变的增量方向与应力增量方向不一致,这就是所谓的非共轴现象。已有试验研究表明,这种非共轴特性的存在会使土体强度显著降低,宏观力学响应整体“变软”<sup>[1-4]</sup>,结果往往导致倾斜事故发生,甚至引起地基失稳,造成巨大的生命和财产的损失。

主应力轴旋转条件下的土体特性已经被人们所注意和重视,而砂土作为典型的天然颗粒材料,具有压硬性、剪胀性、各向异性等特殊力学性质<sup>[5]</sup>,在往复荷载等复杂应力路径下,土体的应力-应变关系尤为复杂。近年来,针对砂土涌现了大量的试验成果:Yang等<sup>[6-7]</sup>通过饱和砂土的循环三轴-扭剪耦合试验。发现主应力轴旋转能使砂土产生不容忽视的塑性变形,且变形受相对密实度、中主应力系数以及偏应力大小等因素的影响;童朝霞等<sup>[8]</sup>对日本丰浦砂进行了纯主应力轴循环旋转试验,发现中主应力系数对主应力轴旋转条件下砂土的变形特性有显著影响;于艺林<sup>[9]</sup>对饱和云母砂进行的主应力轴循环旋转试验表明,试样的体应变会随着中主应力系数的增大而增大;蔡燕燕等<sup>[10-11]</sup>通过 Portaway 砂的系列空心圆柱扭剪试验发现,影响砂土非共轴特性的因素很多,如试样的密实度、初始剪应力、加载应力路径以及颗粒的性质等;苏佳兴等<sup>[12]</sup>对福建标准干砂进行了主应力轴单向旋转试验,表明偏应力对于干砂非共轴变形特性的影响更甚于中主应力系数;孙奇<sup>[13]</sup>对南京砂进行了一系列主应力轴旋转试验,发现加载过程中试样的轴向应变表现出明显的循环效应和累积效应,并且循环扭剪应力比、围压和循环竖向应力比对累积应变的发展都有影响。

然而,总结这些试验成果可以发现,大部分试验采用的都是单纯的主应力轴旋转应力路径,对于更为复杂的往复循环旋转应力路径,却鲜少有砂土方面的研究成果。因此,本文采用空心圆柱扭剪仪,针对粉细砂进行了主应力轴往复循环旋转应力路径下的3组排水试验,分析了饱和粉细砂在主应力轴往复循环旋转条件下的基本变形规律,并重点研究了粉细砂的非共轴变形特性及其影响因素。

## 1 试验土样及方案

### 1.1 土样性质

试验土样为山东汶河粉细砂,通过对砂土进行相对密度试验,测得其最大干密度和最小干密度分别为  $1.89 \text{ g/cm}^3$  和  $1.42 \text{ g/cm}^3$ 。在本文试验中,经综合考虑制样时将粉细砂相对密实度控制为  $Dr = 65\%$ ,对应的粉细砂干密度  $\rho_d = 1.70 \text{ g/cm}^3$ 。

为避免试样沿径向产生的应力应变分布不均和端部约束效应以及尺寸效应等,结合试样制作的难易性和实用性,本文采用 Gens 等<sup>[14]</sup>和 Sayao 等<sup>[15]</sup>通过试验分析得出的空心圆柱试样最佳尺寸组合:  $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  (高度 $\times$ 外径 $\times$ 内径),厚度  $h = 20 \text{ mm}$ 。

同时,为使试样具有较高的均匀性,本次试验采用湿筛法制备空心圆柱试样。试验采用自然水头法和反压饱和法对试样进行饱和,经测定,试样的孔隙水压力系数  $B$  值都大于  $0.95$ ,符合饱和要求。

### 1.2 试验设备和参数

本文试验采用同济大学 5H 动态空心圆柱扭剪仪,对试样同时施加 4 个方向的外荷载,包括竖直方向的轴力  $W$ 、内侧围压  $p_i$ 、外侧围压  $p_o$  以及水平方向的环向扭矩  $T$ ,以实现平均主应力  $p$ 、偏应力  $q$ 、主应力方向角  $\alpha$  和中主应力系数  $b$  这 4 个控制变量。轴向荷载和内外围压的共同作用使空心圆柱柱壁上任一土单元产生竖向正应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ ,内外围压的作用使土单元产生环向正应力  $\sigma_\theta$  以及径向应力  $\sigma_r$ 、 $\sigma_z$ ,扭矩的作用则会使土单元产生剪应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  (如图 1 所示)。图中,  $H$  为试样高度;  $r_i$ 、 $r_o$  分别为变形前试样的内、外半径;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为大、中、小主应力。

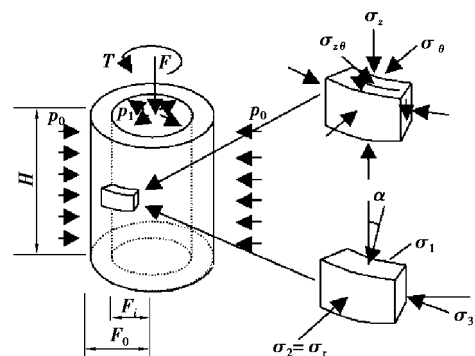


图1 空心圆柱试样的加载方式和应力状态

Fig. 1 Applied loads and stress components in a hollow cylindrical specimen

控制变量与各应力分量的映射关系及其涉及参数采用 Hight 等<sup>[16]</sup>提出的应力与应变公式进行计算,如表 1 所示。

表 1 试验涉及参数计算

Table 1 Test parameters for calculation	
轴向应力	$\sigma_z = \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{(P_o r_o^2 - P_i r_i^2)}{r_o^2 - r_i^2}$
径向应力	$\sigma_r = \frac{P_o r_o + P_i r_i}{r_o + r_i}$
环向应力	$\sigma_\theta = \frac{P_o r_o - P_i r_i}{r_o - r_i}$
剪切应力	$\tau_{z\theta} = \frac{3M_T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)}$
轴向应变	$\varepsilon_z = \frac{w}{H}$
径向应变	$\varepsilon_r = -\frac{u_o - u_i}{r_o - r_i}$
环向应变	$\varepsilon_\theta = -\frac{u_o + u_i}{r_o + r_i}$
剪切应变	$\gamma_{z\theta} = \frac{2\theta(r_o^3 - r_i^3)}{3H(r_o^2 - r_i^2)}$
体应变	$\varepsilon_v = \varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_\theta$
平均主应力	$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}(\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta)$
偏应力	$q = \sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + (2\tau_{z\theta})^2}$
中主应力系数	$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{\sigma_r - (\sigma_z + \sigma_\theta)/2 + \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2/4 + (\tau_{z\theta})^2}}{2\sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2/4 + (\tau_{z\theta})^2}}$
大主应力方向角	$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta}$

1.3 试验方案和应力路径

本文所进行的试验均为排水试验,其应力路径如图 2 所示。R1 和 R2 的应力路径为:主应力方向角在 0°~45°之间往复循环旋转 4 次(应力路径如图中 AB 所示),期间剪应力  $q$  保持为 25 kPa 不变,且 R1、R2 的中主应力系数  $b$  值分别为 0 和 0.5;R3 的应力路径为:首先将试样  $q$  增大到 5 kPa 保持不变,再将主应力方向角  $\alpha$  从 0°增加到 45°;然后继续增大  $q$  至 25 kPa,使主应力方向角在

45°~90°之间往复循环旋转 4 次,期间  $q$  保持为 25 kPa 不变(路径如图中 BC 所示)。加载时保持主应力方向角  $\alpha$  的增加速度为 1°/min,剪应力  $q$  保持为 1 kPa/min。通过 R1、R2 2 组试验可对比分析中主应力系数  $b$  值对粉细砂变形和非共轴特性的影响;通过 R2、R3 2 组试验可对比分析不同循环起始角度对粉细砂变形和非共轴特性的影响;综合 R1、R2 和 R3 3 组试验可分析主应力轴旋转方向对粉细砂非共轴特性的影响,如表 2 所示。

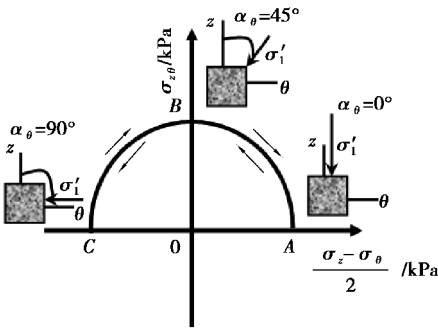


图 2 偏平面上的应力路径

Fig. 2 Stress path in deviatoric stress space

表 2 试验方案设计

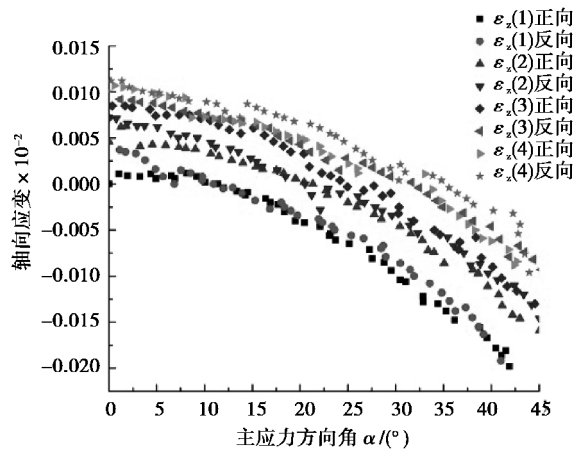
Table 2 Test programs					应力路径在图中的表示
试验	$P/\text{kPa}$	$q/\text{kPa}$	$b$	$\alpha_\theta/(\text{°})$	
R1	100	25	0	0~45(循环 4 次)	AB
R2	100	25	0.5	0~45(循环 4 次)	AB
R3	100	25	0.5	45~90(循环 4 次)	BC

2 试验结果分析

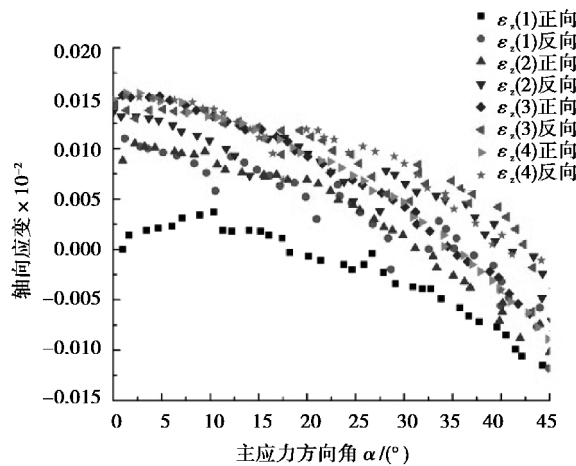
2.1 轴向应变  $\varepsilon_z$

图 3 所示为 3 种不同加载条件下轴向应变随主应力方向角的变化规律曲线。可以发现,在循环旋转初期,轴向应变通常表现为拉应变,而随着循环次数的增加,则开始表现出向压应变逐渐转化的趋势,且每一次往复循环旋转完成轴向应变并不能回到起点。这是因为主应力轴无旋转时试样的大主应力方向与轴向应力方向一致,因此,试样沿轴向的压缩性会比较小,而膨胀性比较大。而当主应力轴开始旋转时,作用在试样上的轴向应力减小,环向应力增大,这就使得试样沿竖直方向会产生较为明显的拉应变,而沿水平方向则产生较为明显的压应变。而伴随着主应力轴的每一次循环旋转,试

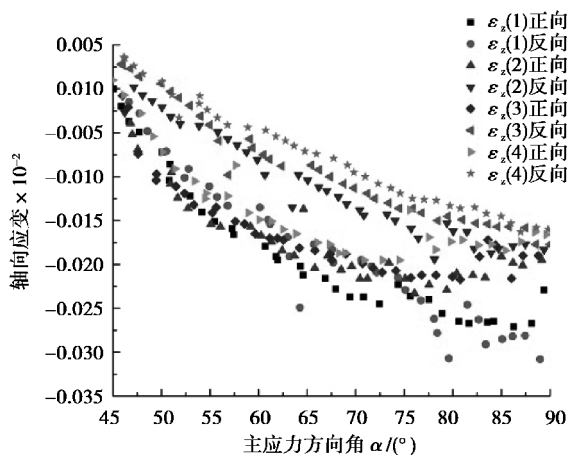
样轴向都会产生一定的塑性应变,且这种塑性应变会随着循环次数的增加逐渐向压应变累积,因此,轴向应变会表现出逐渐向压应变变化的趋势。



(a) 试验R1



(b) 试验R2



(c) 试验R3

图3 主应力方向角与轴向应变的关系曲线

Fig. 3 Curves of orientation angle of major principal stress vs. axial strain

对比图3(a)和(b)可知,主应力轴往复循环

旋转条件下轴向变形明显受中主应力系数的影响:当中主应力系数处于 $[0, 0.5]$ 区间时,随着中主应力系数的增加,试样最后达到的累计压缩变形也越大。对比图3(b)和(c)可知,循环旋转起始角度对轴向变形的影响也很显著:主应力方向角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 往复循环时,轴向应变 $\varepsilon_z$ 为压应变,粉细砂主要表现为压缩变形;而主应力方向角在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 之间往复循环时,轴向应变 $\varepsilon_z$ 为拉应变,粉细砂主要表现为拉伸变形。主应力方向角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 往复循环时,正向旋转时轴向应变变化速率随着方向角的增加逐渐增大,而主应力方向角在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 往复循环时,正向旋转时轴向应变变化速率随方向角增大逐渐减小,反向旋转则规律相反。

## 2.2 剪切应变 $\gamma_{z\theta}$

图4(a)~(c)为3组试验中剪切应变随主应力方向角变化的规律曲线。可以发现,旋转结束时剪切应变并没有回到初始状态,说明试样在主应力轴旋转过程中产生了不断累积的塑性变形。还可以看出,中主应力系数和循环旋转起始角度这2个因素都对剪切应变的发展有一定的影响。

由图4(a)和(b)可知,当中主应力系数 $b=0$ 和 $b=0.5$ 时,剪切应变均表现为正向应变。随着往复循环旋转次数的增加,这种正向应变也逐渐累积,并且中主应力系数越大,最终累积塑性应变也越大。

由图4(b)和(c)可以看出,不同循环起始角度下,粉细砂试样的剪切变形存在明显不同。当主应力方向角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间往复循环时,剪切应变为正应变,并且随着往复循环旋转次数的增加向正方向发展;而当主应力方向角在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 之间往复循环时,剪切应变为负应变,且随着往复循环旋转次数的增加向负方向发展。

## 2.3 体应变 $\varepsilon_v$

图5(a)~(c)为不同加载条件下粉细砂体应变 $\varepsilon_v$ 与主应力方向角的关系曲线。由图可见,在主应力轴往复循环旋转条件下,试样产生了明显的体胀,并且体应变 $\varepsilon_v$ 大致呈线性增加。随着往复循环次数的增多,体应变 $\varepsilon_v$ 也逐渐累积。

图5(a)和(b)为不同中主应力系数条件下体应变随主应力方向角变化的规律曲线。可以看出,当中主应力系数 $b=0$ 时,体应变 $\varepsilon_v$ 除第一次往复旋转时基本不变外,其余三次都在逐渐累积,并且累积速率不断加快;而当主应力系数 $b=0.5$ 时,体应变同样随着往复循环旋转次数的增加不断累



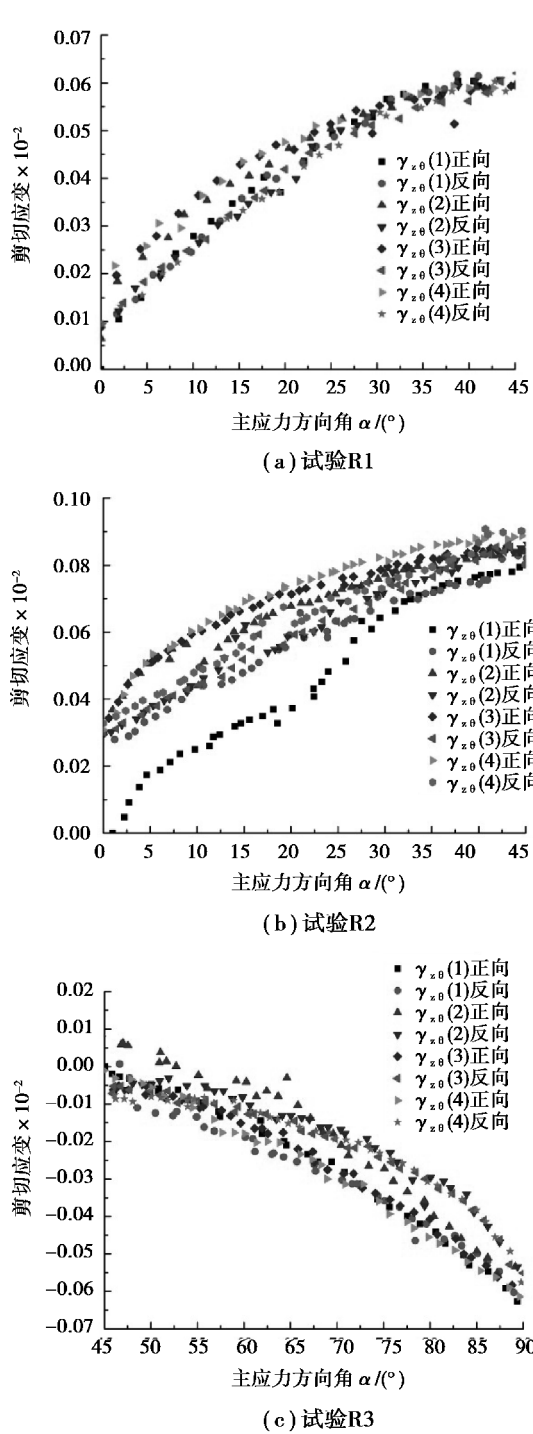


图4 主应力方向角与剪切应变的关系曲线

Fig. 4 Curves of orientation angle of major principal stress vs. shear strain

积,不同的是,累积速率在不断地减小。同时, $b=0$ 时粉细砂的最终体应变明显小于 $b=0.5$ 时的最终体应变。

图5(b)和(c)为不同循环起始角度下,粉细砂体应变 $\varepsilon_v$ 与主应力方向角之间的关系曲线。可以看出,循环起始角度为 $0^\circ$ 时,粉细砂最终体应变

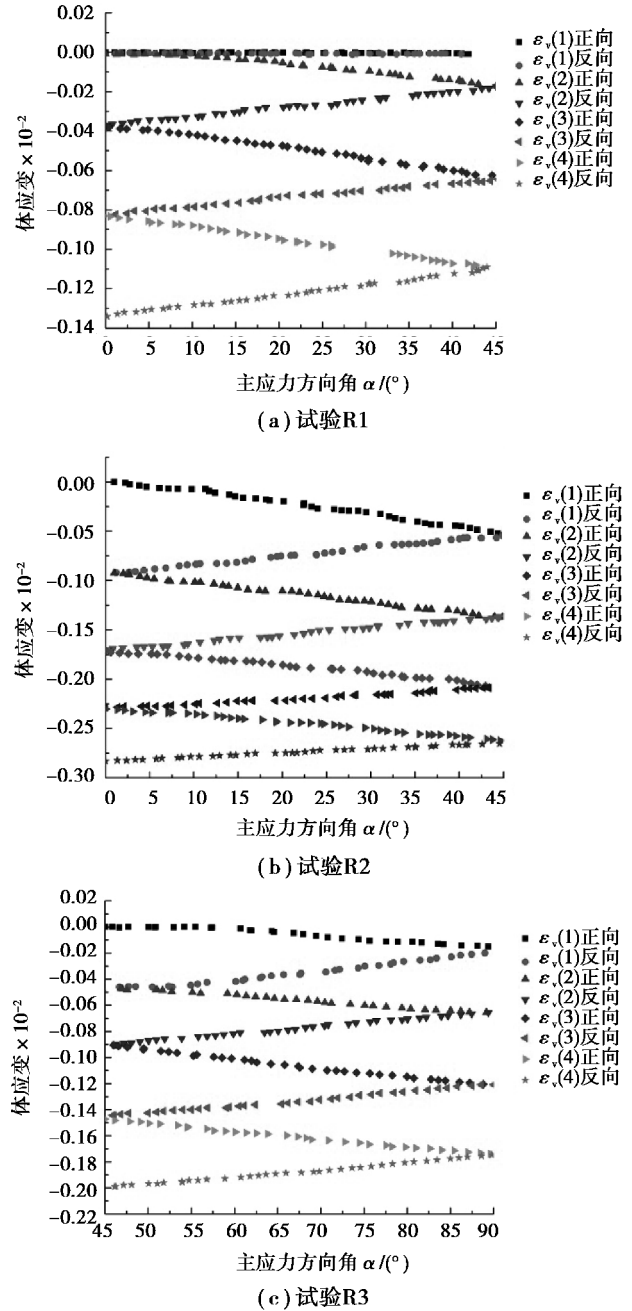


图5 主应方向角与体应变的关系曲线

Fig. 5 Curves of orientation angle of major principal stress vs. volumetric strain

明显大于循环起始角度为 $45^\circ$ 的情况。同时,随着循环次数的增加,主应力方向角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间往复循环时粉细砂体应变增量逐渐减小,而主应力方向角在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 之间往复循环时体应变增量则基本不变。

通过以上结果可以推测,由于中主应力系数反映的是径向方向约束的强弱,循环旋转角度的变化则决定了轴向应力和径向应力的变化趋势,因此这两者在一定程度上决定了试样的受压或者受拉状

态。而粉细砂具有明显的各向异性,受拉和受压状态下的变形特性差别很大,因此中主应力系数和循环旋转起始角度也就在一定程度上决定了粉细砂的变形特性。

#### 2.4 非共轴角 $\beta$

图 6 为非共轴角随着主应力方向角往复循环变化的规律曲线。由图可知,主应力轴往复循环旋转过程中粉细砂存在明显的非共轴角,且非共轴角随着主应力方向角的往复循环而不断进行着波动变化。总体来说,非共轴角会随着主应力方向角的增大而逐渐减小,同时还会随着往复循环次数的增加逐渐呈现出一定的变化规律性。整体来看,在主应力轴往复循环旋转过程中,中主应力系数对非共轴角的影响较小,这也与童朝霞等<sup>[8]</sup>得出的结论相似。

而对比图 6(b) 和 (c) 可以看出,不同循环旋转起始角度对非共轴角的影响则较大。主应力方向角在  $0^\circ \sim 45^\circ$  之间往复循环时,正向旋转时非共轴角波动较大,反向旋转时则相对较小。而当主应力方向角在  $45^\circ \sim 90^\circ$  之间往复循环时,无论正向旋转还是反向旋转非共轴角,都表现出了明显的波动,这种波动比主应力方向角在  $0^\circ \sim 45^\circ$  往复循环时更加复杂。可以推测,主应力方向角在  $0^\circ \sim 45^\circ$  往复循环时,粉细砂试样受压缩与扭剪耦合作用,而主应力方向角在  $45^\circ \sim 90^\circ$  往复循环时粉细砂试样受拉伸与扭剪耦合作用,由于粉细砂的各向异性特性,使得非共轴角在两种情况下表现出了明显的差异。

同时由图 6(a)、(b) 和 (c) 可以看出,当主应力轴旋转方向相反时,对应于同一主应力方向角非共轴角会产生  $90^\circ$  左右的突变。这是因为在主应力轴循环旋转的过程中,主应力增量方向会发生反向的变化,继而引起主应变增量方向的反向增长,使得主应变增量方向角产生突变,从而导致非共轴角也产生  $90^\circ$  左右的突变。

### 3 结论

通过空心圆柱扭剪仪,采用不同中主应力系数、循环旋转起始角度等参数的组合设置,进行了粉细砂的往复循环旋转试验,探讨了粉细砂在应力主轴往复循环旋转条件下的变形规律和非共轴变形特性,得到如下几点结论:

(1) 在主应力轴往复循环旋转应力路径下,粉细砂会产生较为明显且逐渐累积的塑性变形。中

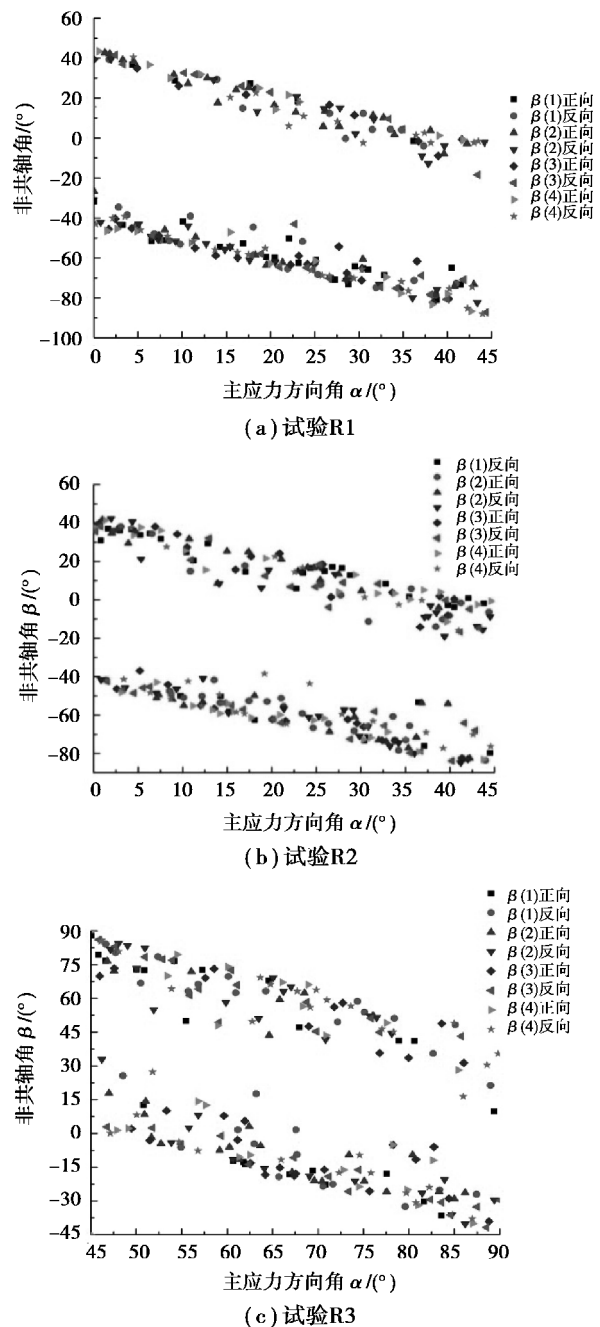


图 6 主应力方向角与非共轴角的关系曲线

Fig. 6 Curves of orientation angle of major principal stress vs. non-coaxial angle

主应力系数对粉细砂试样的轴向应变、剪切应变和体应变等都有着明显的影响。当中主应力系数处于  $[0, 0.5]$  区间时,随着中主应力系数的增大,轴向应变逐渐由拉应变向压应变转化,剪切应变和体应变则呈增大趋势。

(2) 循环起始角度对粉细砂变形也有明显影响。随着循环起始角度的增大,轴向应变表现出由压应变向拉应变转化的趋势,剪切应变则由正应变

逐渐过渡到负应变,并且随着循环旋转次数的增加,试样产生的塑性变形也逐渐积累。

(3)主应力轴往复循环旋转过程中,非共轴角的存在不可忽略。同时,非共轴角的变化会随着往复循环次数的增加逐渐表现出一定的规律性。循环起始角度对非共轴角的变化有明显的影响,起始角度大的情况下非共轴角的波动更为明显和复杂。同时,相同的主应力方向角下,正向和反向旋转时非共轴角会发生 $90^\circ$ 左右的突变,这说明粉细砂的非共轴性也受到主应力轴旋转方向的影响。

#### 参考文献(References)

- [1] Yu H S. Non-Coaxial theories of plasticity for granular materials [A]// The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics [C]. Goa, India, 2008: 361-378.
- [2] 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 Ruifu, Wang Hongjin, Zhou Jingxing. Dynamic strength of sand under cyclic rotation of principal stress directions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(1): 27-33. (in Chinese))
- [3] Yang Y, Yu H S. Application of a non-coaxial soil model in shallow foundations [J]. Geomechanics and Geoengineering, 2006, 1(2): 139-150.
- [4] Ishihara K, Towhata K. Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads [J]. Soils and Foundations, 1983, 23(4): 11-26.
- [5] 孔亮,苏强,王燕昌,等. 慢速往复荷载下砂土的细观力学与耗能机理探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(2): 268-300. (Kong Liang, Su Qiang, Wang Yanchang, et al. Mesoscopic mechanics and energy dissipation analysis of sand deformation under slow cyclic loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(2): 268-300.)
- [6] Yang Z X. Investigation of fabric anisotropic effects on granular soil behavior [D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2005.
- [7] Yang Z X, Li X S, Yang J. Undrained anisotropy and rotational shear in granular soil [J]. Geotechnique, 2007, 57(4): 371-384.
- [8] 童朝霞,张建民,于艺林,等. 中主应力系数对主应力轴循环旋转条件下砂土变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 946-952. (Tong Zhaoxia, Zhang Jianmin, Yu Yilin, et al. Effects of intermediate principal stress parameter on deformation behavior of sands under cyclic rotation of principal stress axes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6): 946-952. (in Chinese))
- [9] 于艺林. 考虑应力主轴旋转的各向异性砂土本构规律与数学模型 [D]. 北京: 清华大学, 2010. (Yu Yilin. Constitutive law and mathematical model of anisotropic sands under rotation of principal stress axes [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese))
- [10] Cai Y Y. An experimental study of non-coaxial soil behavior using hollow cylinder testing [D]. Nottingham: University of Nottingham, 2010.
- [11] 蔡燕燕,俞缙,余海岁,等. 考虑主应力轴旋转的砂土变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 417-424. (Cai Yanyan, Yu Jin, Yu Haisui, et al. Experimental study of deformation behavior of sand under rotation of principal stress axes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 417-424. (in Chinese))
- [12] 苏佳兴,蒋明镜,李立青,等. 偏应力比及中主应力系数对应力主轴偏转条件下干砂变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增1): 455-460. (Su Jiaxing, Jiang Mingjing, Li Liqing, et al. Effects of deviatoric stress ratio and intermediate stress parameter on deformation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Supp. 1): 455-460. (in Chinese))
- [13] 孙奇. 复杂应力路径下饱和砂土动力特性试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015. (Sun Qi. Experimental study on dynamic behaviour of saturated sand under complex stress paths [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese))
- [14] Gens A, Potts D M. Formulation of quasi-axisymmetric boundary value problems for finite element analysis [J]. Engineering Computations, 1984, 1(2): 144-150.
- [15] Sayao A, Vaid Y P. A critical assessment of stress non-uniformities in hollow cylinder test specimens [J]. Soils and Foundations, 1991, 31(1): 60-72.
- [16] Hight D W, Gens A, Symes M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils [J]. Geotechnique, 1983, 33(4): 355-383.