

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

苏佳兴^{1,2}, 蒋明镜^{1,2}, 李立青^{1,2}, 吴晓峰^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 采用同济大学的动态空心圆柱扭剪仪对福建标准砂干样进行了两个系列主应力轴单向旋转试验, 研究了偏应力比与中主应力系数对主应力轴旋转条件下干砂变形特性及非共轴特性的影响。系列 I 保持平均应力和中主应力系数不变, 进行不同偏应力比下的旋转试验; 系列 II 保持平均应力和偏应力不变, 进行改变中主应力系数的主应力轴旋转试验。结果表明: 偏应力比与中主应力系数对干砂变形特性均有显著的影响。

关键词: 主应力轴旋转; 中主应力系数; 偏应力比; 变形特性; 非共轴特性; 干砂

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S1-0448-06

作者简介: 苏佳兴(1989-), 男, 北京人, 主要从事砂土宏观试验方面的研究。E-mail: 0401s_5211@sina.com。

Effects of deviatoric stress ratio and intermediate stress parameter on deformation behaviors of dry sands under principal stress rotation

SU Jia-xing^{1,2}, JIANG Ming-jing^{1,2}, LI Li-qing^{1,2}, WU Xiao-feng^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Two groups of tests of unidirectional rotation of the principal stresses are conducted on dry Fujian standard sand by means of the dynamic hollow cylinder apparatus at Tongji University. The investigation highlights the influences of deviatoric stress ratio and intermediate stress parameter on deformation behaviors and non-coaxiality of dry sands. The mean stress and intermediate stress parameter are maintained as constant with a variation of deviatoric stress ratios in one test group, while the mean stress and deviatoric stress are maintained as constant with a variation of intermediate stress parameters in the other test group. The experimental results show that the deviatoric stress ratio and intermediate stress parameter have significant influences on deformation behaviors of dry sands.

Key words: principal stress rotation; intermediate stress parameter; deviatoric stress ratio; deformation behavior; non-coaxiality; dry sand

0 引 言

在岩土工程领域内, 地基土应力状态常常十分复杂, Ishihara^[1]指出土体受到诸如交通、地震、波浪荷载作用时, 不仅主应力幅值会随时间发生变化, 应力主轴也产生旋转, 传统的直剪试验和三轴试验都很难真实模拟相应的应力路径。随着空心圆柱扭剪仪的发明和改进, 关于主应力轴旋转条件下土体特性的研究有了飞跃的发展。

很多试验结果(Arthur 等^[2]、Ishihara 和 Towhata^[3]、Miura 等^[4])表明, 主应力轴旋转会造成塑性应变显著地累积, 在不排水条件下, 即使剪应力水平恒定, 孔

压也会持续增长直至发生破坏。Wijewickreme 和 Vaid^[5]指出, 在相同主应力比条件下, 主应力轴的旋转使剪应变随着大主应力方向角 α 的增加而增大, 当发展到一定程度后增长趋于平缓。Sivathayalan 和 Vaid^[6]还提出主应力轴旋转会造成砂土的应变软化现象。另外, Pradel 等^[7]研究表明在主应力轴旋转条件下, 塑性主应变增量方向与应力增量方向相互独立, 即表现出土的非共轴特性。非共轴特性的存在会导致土体宏观力

基金项目: 国家自然科学基金项目(10972158); 国家杰出青年基金项目(51025932); 博士点基金(20100072110048)

收稿日期: 2011-04-26

学响应“变软”;若忽略这一特性而采用传统塑性理论进行工程设计,实际工程将偏不安全^[8],因此研究应力主轴偏转情况下土体的变形及非共轴特性有着重要的理论意义和工程价值。

本文旨在从宏观试验入手研究砂土的变形与非共轴特性,为今后采用微观定量分析与宏观试验相结合揭示砂土非共轴特性的微观机理的前期工作。本文采用同济大学的动态空心圆柱扭剪仪对福建平潭标准砂干样进行了两个系列的主应力轴单向旋转试验,系列 I 保持平均应力 p 和中主应力系数 b 不变,进行不同偏应力比 q/p 的旋转试验;系列 II 保持平均应力 p 和偏应力 q 不变,而中主应力系数 b 不同,进行主应力轴旋转试验。本文着重研究了主应力轴旋转条件下砂土应变分量的特点、偏应力比及中主应力系数对于其非共轴特性的影响。

1 试验方案介绍

1.1 试验仪器介绍及试样制备

试验仪器采用英国GDS仪器设备有限公司研制的动态空心圆柱扭剪仪(简称HCA)。该设备可对空心试样施加独立控制的外压 p_o 和内压 p_i ,轴力 W 和扭矩 M_T ,试样受荷状态如图1所示,可以实现大主应力和小主应力在垂直于试样径向平面内(一般情况下径向应力为中主应力)旋转的复杂应力路径。典型单元体的受力情况如图2,扭矩 M_T 在单元体中产生剪应力 $\tau_{z\theta}$,内外侧压力 p_i, p_o 产生平均环向应力 σ_θ 和平均径向应力 σ_r ,在轴向力 W 及内外侧压力 p_i, p_o 共同作用下产生平均轴向应力 σ_z 。

同济大学动态空心圆柱扭剪仪的试样尺寸:外径 $D = 100 \text{ mm}$,内径 $d = 60 \text{ mm}$,高度 $H = 200 \text{ mm}$,厚度 $h = 20 \text{ mm}$ 。试样为取自中国福建平潭的标准砂,比重 $G = 2.643$,相对密实度 $D_r = 0.53$,密度为 $\rho = 1.53 \text{ g/cm}^3$,其粒径分布见表1,试样的密实度 $D_r = 0.53 \pm 0.02$,属中密状态。

表1 福建标准砂粒径分布

Table 1 Particle size distribution of Fujian standard sand

粒径/mm	0.075	0.1	0.25	0.5	1.0	2.0
小于某粒径的质 量百分比/%	0	0.24	6.56	57.32	95.83	100

为便于今后的离散元数值模拟与本文试验结果对比分析,拟采用干砂进行试验。空心圆柱试样分5层制备,根据分层欠压法与冰冻法相结合生成的均匀实心圆柱样确定每层的高度,而后采用砂雨法与插捣法相结合制备相对均匀的空心圆柱试样。试样制备完毕,

施加20 kPa的负压使其站立,装入压力室施加30 kPa压力后撤除负压。详细制样过程见文献[9]。

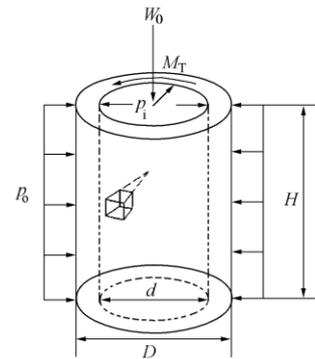


图1 空心圆柱试样的荷载状态

Fig. 1 Loading condition of hollow cylinder specimen

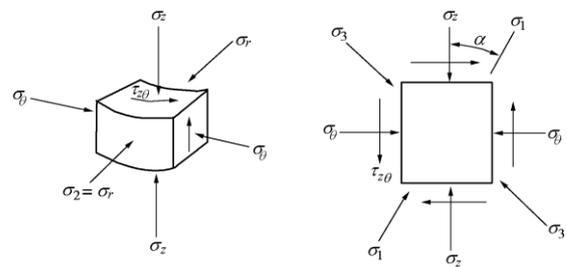


图2 典型单元体的应力状态

Fig. 2 Stress condition on a typical element of hollow cylinder specimen

1.2 试验加载方案

试验加载过程中先采用 GDS 控制系统中的高级加载模块使试样达到指定状态,稳定 15 min,再用应力路径加载模块进行大主应力方向旋转的剪切试验,即剪切过程中保持 p, q, b 恒定,连续改变 α 。其中

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (1)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3, \quad (2)$$

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (3)$$

共进行两个系列试验:

系列 I: p, b 保持恒定,不同偏应力比 q/p 情况下,大主应力方向连续旋转。试验加载方案见表 2。

表2 试验系列 I 加载方案

Table 2 Loading program of test series I

试验 编号	p/kPa	b	偏应力 比 q/p	初始大主应 力方向 $\alpha_0/(^\circ)$	大主应力方 向旋转的范 围 $\alpha/(^\circ)$
101			0.430	0	0~90
102	100	0.5	0.592	0	0~90
103			0.866	0	0~90

系列II: $p, p/q$ 恒定,不同中主应力系数 b 下,主

应力轴旋转。加载方案见表3。

表3 试验系列II加载方案

试验编号	p/kPa	b	偏应力比 q/p	初始大主应力方向 $\alpha_0/(\text{°})$	大主应力方向旋转的范围 $\alpha/(\text{°})$
201		0.2			
202	100	0.5	0.430	75	75~ -75
203		0.9			
204		1.1			

大主应力方向的旋转速度利用下式确定:

$$\alpha = \alpha_0 + \omega t, \quad (4)$$

式中角速度 $\omega = 0.1(\text{°}/\text{s})$ 。在确定初始大主应力方向 α_0 时, 为了防止空心圆柱试样上的应力应变不均匀性过大, 本文采用Gutierrez^[10]提出的控制方法, 即内外压比例由 $0.75 \leq p_i/p_o \leq 1.3$ 控制, 在较低的应力水平下, 主应力轴旋转可以实现 α 从 0° 变化到 90° 。另外系列II中, 大主应力方向角不选择在范围 90° 变化到 -90° 内, 是因为从 $\alpha = 90^\circ$ 开始加载时, α 会在 90° 与 -90° 两个方向来回跳动, 导致试验无法进行。还需指出, 试验204中 $b=1.1$ 是为了研究中主应力 σ_2 作为大主应力时干砂变形情况。

2 试验结果分析

2.1 应变分量随应力主轴旋转的变化

系列I中, 不同偏应力比下砂土应变分量与大主应力方向角的关系曲线如图3(a)~(d)所示。图中正号表示压应变, 负号表示拉应变。

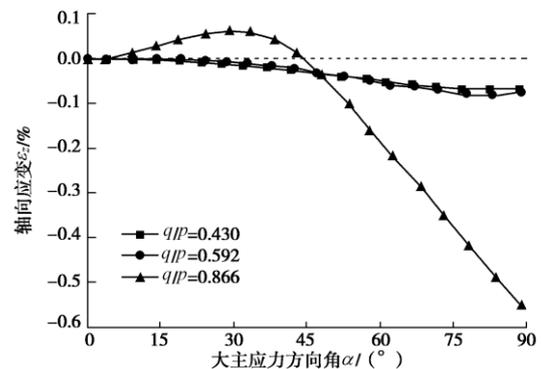
由图3(a)可知, 主应力轴旋转产生的轴向应变 ε_z 主要为拉应变, 且随偏应力比的增大拉应变呈增加趋势。在偏应力比 $q/p = 0.430, 0.592$ 时, 轴向应变在加载过程中并没有明显的增加, 在 $\alpha = 65^\circ$ 之后, 应变变化更加平缓。而偏应力比 $q/p = 0.866$ 时, 在主应力轴旋转的初始阶段, 轴向应变 ε_z 表现为压应变, 且随大主应力方向角的增大而增大, 但在大主应力方向为 30° 左右时, 轴向应变开始反向发展, 在 45° 以后, 轴向应变为拉应变且呈逐步增大趋势。

由图3(b)曲线可以发现: 主应力轴单向旋转条件下径向应变 ε_r 是压应变还是拉应变取决于偏应力比的大小。当 q/p 为 $0.430, 0.592$ 时, ε_r 主要为拉应变, 且在偏应力比为 0.592 时, 相同大主应力方向下的应变较偏应力比为 0.430 时小; 当 $q/p = 0.866$ 时, ε_r 主要表现为压应变。由此可见, 随着偏应力比 q/p 的增大, 应变有从拉应变变为压应变的趋势。可以推断, 随着偏应力比的增大, ε_r 从拉应变过渡为压应变, 且压应变的幅值也逐渐增大。此结论还有待于今后试验的验证。即 $q/p \in [0.430, 0.592]$ 时, 主应力轴旋转产生的径向应

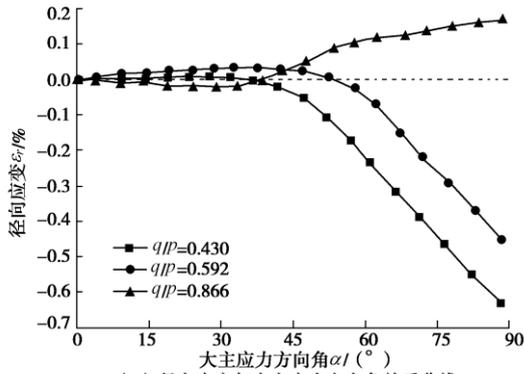
变 ε_r 为拉应变, q/p 大于 0.592 的某个区间内, 径向应变 ε_r 为压应变。笔者近期将进一步进行 $q/p > 0.866$ 的试验来验证此推断的可靠性。

由图3(c)可以看出, 环向应变主要体现为压应变, 随着大主应力轴旋转角度的增大, 环向应变 ε_θ 逐渐增大, 并且大主应力方向在 30° 左右时, ε_θ 有加速发展的趋势。在 $q/p = 0.866$ 时, 在主应力轴旋转的初始阶段, 环向应变表现为拉应变, 且随大主应力方向角的增大而发展, 但在大主应力方向为 30° 左右时, 环向应变开始反向发展, 在 45° 以后, 环向应变为压应变且逐步发展增大。这与轴向应变 ε_z 的发展正好反向, 轴向应变 ε_z 为拉应变, 环向应变 ε_θ 为压应变。这种现象可以认为是制样过程中, 在试样高度方向的重力及插捣作用, 使试样具有初始的各向异性, 竖直方向上的压缩性较小而在径向方向压缩性较大。所以, 在主应力轴旋转过程中, 环向应力 σ_θ 增大且为压应力, 这种应力状态使环向的压缩性充分发挥, 则环向应变 ε_θ 为压应变, 同时, 轴向膨胀变形, 所以应变 ε_z 为拉应变。

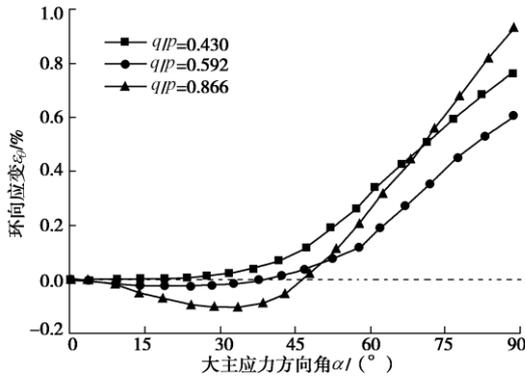
从图3(d)可以得出, 剪切应变 $\gamma_{z\theta}$ 均为压应变, 随着主应力轴的旋转, 先增大后减小, 在 $\alpha = 50^\circ \sim 60^\circ$ 时, 应变发展达到峰值, 而后减小。应力主轴旋转 90° 后, 并未完全回到初始状态, 可能是试样具有初始各向异性。随着偏应力比 q/p 的增大, 应变幅值也相应增大, 最终的应变状态与初始状态差别也相应增大。



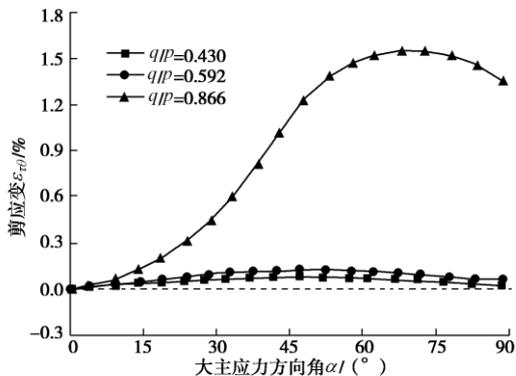
(a) 轴向应变与大主应力方向角关系曲线



(b) 径向应变与大主应力方向角关系曲线



(c) 环向应变与大主应力方向角关系曲线



(d) 剪切应变与大主应力方向角关系曲线

图 3 系列 I 试验应变分量与大主应力方向角的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between direction of major principal stress and strain components of test series I

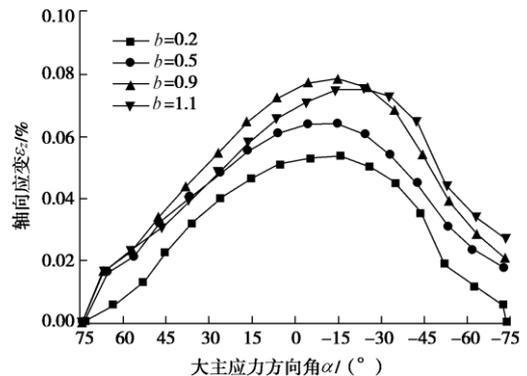
系列 II 中, 不同中主应力系数 b 下砂土的应变分量与主应力轴方向角的关系曲线如图 4 (a) ~ (d) 所示。

图 4 (a) 表明, 轴向应变 ϵ_z 主要为压应变, 且主应力轴旋转过程中, 应变先增大后减小, 在 $\alpha=0^\circ$ 的时候达到峰值, 且在 $\alpha=0^\circ$ 轴两侧基本呈对称分布。 b 值较小且大主应力方向相同时, 轴向应变 ϵ_z 随着 b 值增加而增大, 但 $b=1.1$ 时却又减小。这表明 b 为大于 0.9 的某个值时, 轴向应变又会减小。

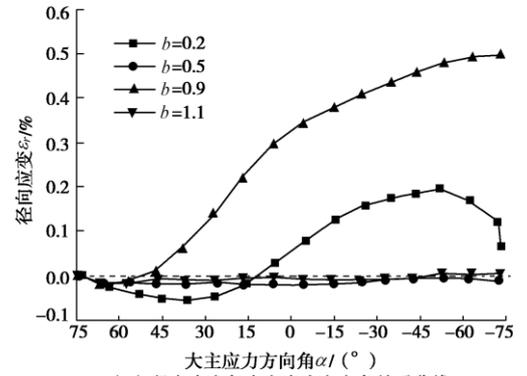
图 4 (b), (c) 显示, 径向应变 ϵ_r 与环向应变 ϵ_θ 的发展趋势相似, 但径向应变主要为压应变, 环向应变主要为拉应变。中主应力系数 $b=0.2, 0.9$ 时变形

较大, 总体而言在区间 $[75^\circ, -75^\circ]$, 随着主应力轴的旋转, 应变逐渐增大。

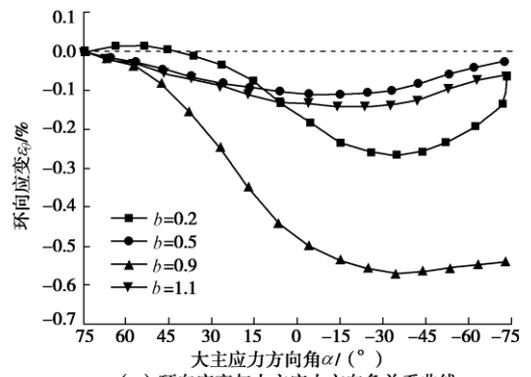
图 4 (d) 中, 剪切应变 $\gamma_{z\theta}$ 在主应力旋转过程中有相似的趋势, 均按类似于 $y = -\sin x$ 型曲线变化。在 $\alpha \in [75^\circ, 0^\circ]$ 之间应变体现为压应变, $\alpha = 45^\circ$ 时, 压应变达到最大。在 $\alpha \in [-75^\circ, 0^\circ]$ 之间应变体现为拉应变, 在 $\alpha = -45^\circ$ 时, 拉应变达到最大。进一步分析可知, $\alpha \in [75^\circ, 0^\circ]$ 范围内 b 值对于应变的影响较小, 而 $\alpha \in [-75^\circ, 0^\circ]$ 范围内 $b=1.1$ 时, 应变变化趋势更加陡峭, 且峰值较其它 b 值条件下要大。



(a) 轴向应变与大主应力方向角关系曲线



(b) 径向应变与大主应力方向角关系曲线



(c) 环向应变与大主应力方向角关系曲线

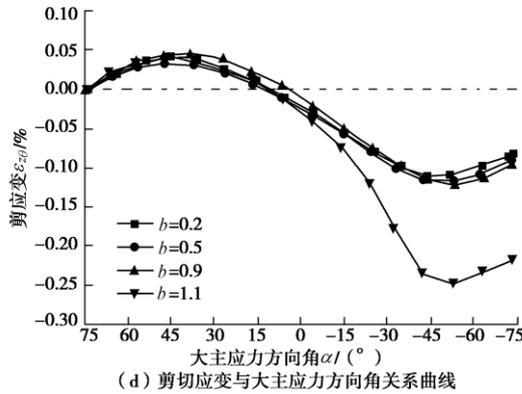


图4 系列II 试验应变分量与大主应力方向角的关系曲线
Fig. 4 Relationship curves between direction of major principal stress and strain components of test series II

2.2 应力主轴旋转对非共轴特性的影响

系列 I 中, 不同偏应力比 q/p 下砂土主应力轴旋转过程中非共轴情况如图 5 所示。图 5 中应力空间的坐标轴定义为

$$X = \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_\theta), \quad (5)$$

$$Y = \tau_{z\theta} \quad (6)$$

应变增量 $(d\varepsilon_z - d\varepsilon_\theta)$ 和 $2d\gamma_{z\theta}$ 叠加在 $X-Y$ 空间的应力路径上。Gutierrez^[10]指出, 总应变与塑性应变几乎一致, 弹性应变可以忽略。图 5 中实线圆弧即为 $X-Y$ 空间下的应力路径, 有向箭头即为大主应变增量方向。为了避免不同偏应力比 q/p 下应变增量相差较大, 在图上难以清晰显示, 图 5 中应变增量向量仅取单位长度, 在此我们只考虑应变增量方向的变化。

大主应变增量方向角^[10]

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2d\gamma_{z\theta}}{d\varepsilon_z - d\varepsilon_\theta}\right) \quad (7)$$

大主应力方向即图 2 中 σ_1 与 z 轴的夹角

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta}\right) \quad (8)$$

从图 5 可以看出, 各个应力水平下的应力路径大致为同心圆的圆弧段, 且圆弧的圆心稍偏向 X 坐标轴的正方向。这与 Miura^[4]的试验结果相吻合, 是试样的初始各向异性所导致的。在大主应力轴旋转过程中, 各应力水平下大主应变增量方向与大主应力方向均有很大的角度偏差, 且大主应变增量方向基本介于大主应力方向与大主应力增量方向之间; 在开始的一段时间内这种非共轴性更强, 大主应变增量方向偏离大主应力方向更大, 这与 Gutierrez^[10]描述的现象一致。进一步分析可知, 在低应力水平下大主应变增量方向与大主应力方向的偏差较为明显, 随着强度发挥程度的增加, 大主应变增量方向愈加趋向于大主应力方向, 说明随着强度水平的发挥, 干砂的非共轴特性逐渐减

弱。

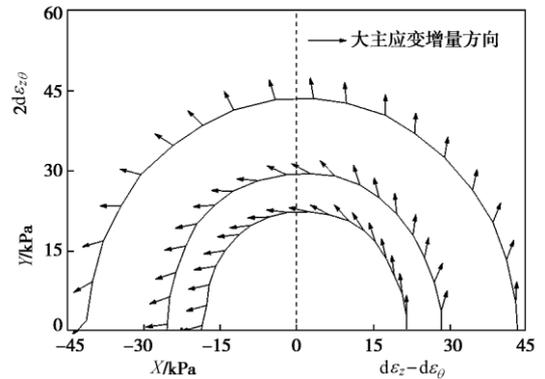


图5 系列 I 试验主应力旋转应力路径上应变增量方向
Fig. 5 Strain increment direction superimposed on stress path for principal stress rotation of test series I

图 6 为在不同中主应力条件下主应力轴旋转过程中的非共轴情况, 根据文献[11]的描述可定量地用非共轴角来反映非共轴特性, 非共轴角 β 的定义为

$$\beta = \bar{\alpha} - \alpha \quad (9)$$

由图 6 可以看出, 在不同的中主应力系数条件下, 非共轴特性明显, 非共轴角 β 基本介于范围 $[-10^\circ, -60^\circ]$ 内, 变化规律基本一致。各曲线均有两个明显的峰值, 开始时非共轴角随着主应力轴的旋转逐渐增大, 且增长速度很快, 在 $\alpha = 40^\circ$ 时, 达到第一个峰值, 之后又逐渐下降; 在 $\alpha = -40^\circ$ 左右时, 非共轴性急剧增加, 在 $\alpha = -50^\circ$ 时达到第二个峰值后下降。

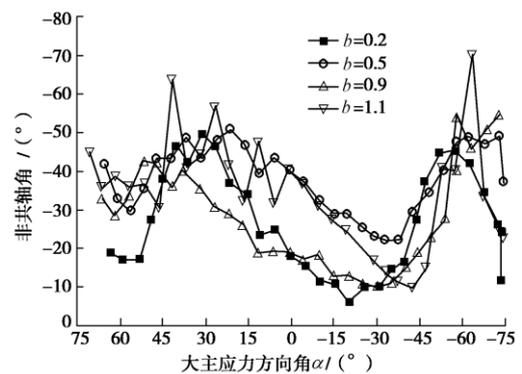


图6 系列II 非共轴角 β 与大主应力方向角 α 关系曲线
Fig. 6 Relationship curves between non-coaxial angle β and direction of major principal stress α of test series II

3 结 论

采用同济大学动态空心圆柱扭剪仪对福建平潭标准砂干样进行了两个系列的主应力轴旋转试验, 系列 I 保持平均应力 p 和中主应力系数 b 不变, 改变偏应力比 q/p 进行主应力轴旋转试验, 系列 II 为中主应力系数 b 不同, 保持平均应力 p 和偏应力 q 不变进行主

应力轴旋转试验。主要结论如下:

(1) 主应力轴单向旋转条件下, 偏应力比 q/p 对干砂的变形特性有显著的影响。

(2) 主应力轴旋转过程中非共轴特性明显, 且大主应变增量方向基本介于大主应力方向与大主应力增量方向之间; 随着偏应力比 q/p 的增大, 这种非共轴性逐渐减弱。

(3) 中主应力系数 b 对干砂的变形有显著的影响, 且 $b>0.9$ 时的变形趋势与 $b<0.9$ 时有很大的不同。

(4) 在不同中主应力系数 b , 主应力轴旋转条件下, 砂土的非共轴角随主应力轴旋转变化趋势基本一致。

本文初步分析了偏应力比 q/p 与中主应力系数 b 对砂土变形特性的影响, 为今后对其性能的进一步研究打下基础。应当指出, 文中偏应力比取值较小, 且没有考虑主应力轴旋转过程中砂土可能发生破坏的情况, 近期将进一步完善上述试验。

致谢: 同济大学刘芳博士在论文修改过程中提供很多帮助和支持, 在此表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] ISHIHARA K. Soil response in cyclic loading induced by earthquakes, traffic and waves[C]// Proceedings of the 7th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Haifa, Israel: International Academic Publishers, 1983.
- [2] ARTHUR J R F, CHUA K S, DUNSTAN T, et al. Principal stress rotation: A missing parameter [J]. Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, 1980, **106**(4): 418-433.
- [3] ISHIHARA K, TOWHATA I. Sand response to cyclic rotation of principal stress direction as induced by wave loads [J]. Soils and Foundations, 1983, **23**(4): 11 - 26.
- [4] MIURA K, MIURA S, TOKI S. Deformation prediction for anisotropic sand during the rotation of the principal stress axes [J]. Soils and Foundations, 1986, **26**(3): 42 - 56.
- [5] WIJEWICKREME D, VAID Y P. Behaviour of loose sand under simultaneous increase in stress ratio and principal stress rotation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, **30**(6): 953 - 964.
- [6] SIVATHAYALAN S, VAID Y P. Influence of generalized initial state and principal stress rotation on the undrained response of sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**: 63 - 76.
- [7] PRADEL D, ISHIHARA K M. Yielding and flow of sand under principal axes rotation[J]. Soils and Foundations, 1990, **30**(1): 87 - 89.
- [8] YU H S, YUAN X. The importance of accounting for non-coaxial behavior in modeling soil-structure interaction[C]// Prediction, Analysis and Design in Geomechanical Applications. Bologna: Partenon Editore, 2005: 709 - 718.
- [9] 蒋明镜, 李立青, 苏佳兴, 等. 制备 TJ-1 模拟月壤空心圆柱均匀试样的新方法[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(增刊). (JIANG Ming-jing, LI Li-qing, SU Jia-xing, et al. A new preparation method of HCA sample of TJ-1 lunar soil simulant[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(S0). (in Chinese))
- [10] GUTIERREZ M, ISHIHARA K, TOWHATA I. Flow theory for sand during rotation of principal stress direction[J]. Soils and Foundations, 1991, **31**(4): 121 - 132.
- [11] 童朝霞, 张建民, 于艺林, 等. 中主应力系数对应力主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 Zhao-xia, ZHANG Jian-min, YU Yi-lin, 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))
- [12] 史宏彦, 白琳. 平面应变条件下土的非共轴变形特性[J]. 广东工业大学学报, 2007(3): 84 - 87. (SHI Hong-yan, Bai Lin. Non-coaxial behavior of soil under plane strain conditions[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2007(3): 84 - 87. (in Chinese))
- [13] 沈扬, 周建, 龚晓南. 主应力轴旋转对土体性状影响的试验进展研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(7): 1408 - 1416. (SHEN Yang, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Experimental progress research on influence of principal stress rotation on soils' characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(7): 1408 - 1416. (in Chinese))

(本文责编 明经平)