

应力旋转对同济一号模拟月壤变形特性的影响

蒋明镜^{1,2}, 李立青^{1,2,3}, 刘芳^{1,2}, 王闯⁴

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

3. 河南省交通科学技术研究院有限公司, 河南 郑州 450006; 4. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要: 登月成功后月球车辆的行驶以及月球基地的建设均涉及到主应力轴旋转问题, 为此采用空心圆柱扭剪仪进行了两个系列的主应力轴旋转试验, 以研究中主应力系数和平均应力对主应力轴旋转条件下同济一号(TJ-1)模拟月壤变形及非共轴特性的影响。试验系列 I 中保持平均应力、偏应力比不变, 进行了不同中主应力系数的主应力轴旋转试验; 系列 II 则是保持偏应力比、中主应力系数不变, 进行了不同平均应力下的主应力轴旋转试验。结果表明中主应力系数、平均应力均对主应力轴旋转过程中 TJ-1 模拟月壤的变形特性影响显著。着重分析了中主应力系数、平均应力对 TJ-1 模拟月壤在主应力轴旋转过程中各应变分量、体变的发展趋势以及非共轴特性的影响, 以期登月成功后与月壤相关工程的设计提供参考。

关键词: 同济一号模拟月壤; 中主应力系数; 平均应力; 变形特性; 非共轴

中图分类号: TU411

文献标志码: A

Deformation Behavior of TJ-1 Lunar Soil Simulant Under Principal Stress Rotation

JIANG Mingjing^{1,2}, LI Liqing^{1,2,3}, LIU Fang^{1,2}, WANG Chuang⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Henan Transportation Research Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450006, China; 4. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The principal stress rotation will be involved in these activities such as establishing lunar bases, exploring mineral resource and operating vehicles on Moon surface. Two sets of tests were performed using the hollow cylinder apparatus (HCA) at Tongji University, China to investigate the effects of principal stress rotation on the deformation

behavior and non-coaxiality of dry TJ-1 lunar soil simulant. One set of tests enabled pure principal stress rotation at different constant levels of the intermediate stress parameter, while the deviatoric stress ratio and the intermediate stress parameter were maintained as constant with a variation of mean stress in the other set. The test results show that the intermediate stress parameter and mean stress have significant influence on deformation behavior of TJ-1 lunar soil simulant under the principal stress rotation. Their effects on the development of strain components and the volumetric strain, and the non-coaxiality of TJ-1 lunar soil simulant were studied.

Key words: TJ-1 lunar soil simulant; intermediate stress parameter; mean stress; deformation behavior; non-coaxiality

目前, 以月球软着陆探测与自动巡视勘察为目标的月球探测二期工程^[1]正在进行。未来登月成功后月球车辆的行驶、月球基地建设过程中相应的基坑开挖及基础受力均与主应力轴旋转有关。已有成果表明, 在交通、地震、波浪荷载作用下以及基坑开挖时, 主应力幅值随时间变化, 主应力轴也发生偏转; 且即使其他应力参量不变, 主应力轴的纯旋转也会使土体产生明显的塑性变形, 对于某些土而言甚至会发生破坏^[2-10]。因此对月壤在主应力轴旋转情况下变形特性的研究对于月球基地的建设乃至月球能源的开发利用均有重要意义, 然而目前此类研究尚未见报道。考虑到真实月壤样品极其珍贵, 采用与月壤物理力学性能相近的模拟月壤进行间接研究是目前切实可行的办法之一。笔者在郑永春^[11]等调查基础上已成功研制出力学性能与月球表面月海区域月壤相近的同济一号模拟月壤(简称 TJ-1 模拟月壤)^[12-13], 为通过室内试验间接研究月壤在主应力轴

收稿日期: 2011-12-20

基金项目: 国家杰出青年基金(51025932); 国家自然科学基金(10972158, 51179128); 上海市优秀学术带头人计划(11XD1405200)

第一作者: 蒋明镜(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为天然结构性粘土、砂土、非饱和土、太空土和深海能源土的宏观试验、微观试验、本构模型和数值分析以及土体渐进破坏分析。E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn

旋转时的变形特性提供了试验基础。

根据文献[14]可将月壤及模拟月壤归类为砂性土。砂性土在主应力轴旋转方面的研究成果多是在中主应力系数 $b=0.5$ 条件下得到的,仅部分学者研究了主应力轴旋转条件下 b 值对土体变形特性的影响^[9-10];且主应力轴旋转条件下砂性土变形性能的研究一般以饱和样为对象,干砂性能的研究尚未见报道。由文献[15]中的试验及数值模拟结果可知,不同重力场下土体经历相同应力路径时其变形特性是相似的,为此本文拟在地球重力场下以干燥 TJ-1 模拟月壤为原材料,采用空心圆柱扭剪仪进行两个系列的主应力轴旋转试验,以研究主应力轴旋转条件下平均应力 p 、中主应力系数 b 对 TJ-1 模拟月壤的变形特性及非共轴性能的影响。

1 TJ-1 模拟月壤

TJ-1 模拟月壤是在郑永春^[12]等调查基础上以吉林省靖宇县境内的红色火山灰为原材料,经过烘干、粉碎、筛分,在部分真实月壤样品的级配曲线范围,通过级配调整、力学测试获得符合目标力学指标的级配方案。TJ-1 模拟月壤的主要物理力学指标如下:有效粒径 $d_{10}=20\ \mu\text{m}$;中值粒径 $d_{50}=260\ \mu\text{m}$;不均匀系数 $C_u=21.5$;曲率系数 $C_c=0.92$;相对密度为 2.72 ;含水率小于 1% ;孔隙比为 1.0 时,密度为 $1.36\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,内摩擦角为 47.6° ,黏聚力为 $0.86\ \text{kPa}$;法向压力范围为 $12.5\sim 100\ \text{kPa}$ 时压缩指数为 0.086 。TJ-1 模拟月壤的物理力学参数与月球表面月海区域 $0\sim 30\ \text{cm}$ 深度月壤的相应参数最佳估计值的符合情况见表 1。符合情况采用符合度表示,即若该参数在相应估计值上、下限范围之内其符合度为 100% ,否则采用该参数与最接近的上限或下限的比值表示。以 TJ-1 模拟月壤的力学性能作为主要控制指标,若符合度超过 95% ,即可认为该项指标满足要求。分析表 1 并结合文献[12]可知,TJ-1 模拟月壤的主要力学特性基本在月球表面月海区域 $0\sim 30$

cm 深度月壤相应参数的最佳估计值范围之内;与国内外其他模拟月壤相比,TJ-1 模拟月壤具有级配更加稳定,较大孔隙比时抗剪强度高的特点,可用于模拟月球表面月壤的力学特性。

2 试验条件

试验所用仪器为 GDS(Global Digital Systems)空心圆柱扭剪仪,文献[16]已对该设备进行详细描述,在此仅简要介绍。空心圆柱扭剪仪主要由 4 部分组成(图 1),即压力室及伺服控制系统、围压(包括反压)系统、数据控制及采集系统、计算机控制系统;对于砂性土试样还需真空装置,在试样装入压力室的过程中施加一定的负压,使其自行站立。可通过内外室压力、扭矩以及轴力的组合实现土体不同应力路径的加载。图 2、图 3 为空心圆柱试样的加载参数及薄壁单元体上的应力状态示意图。

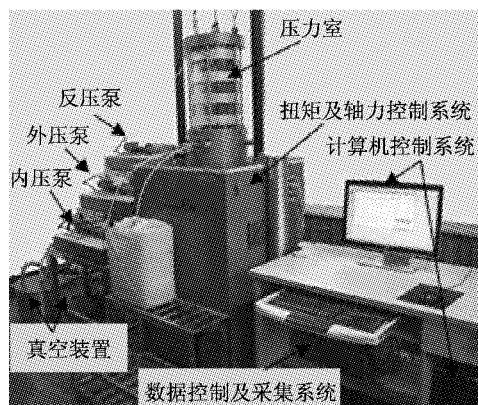


图 1 GDS 空心圆柱扭剪仪

Fig.1 Dynamic hollow cylinder apparatus at Tongji University

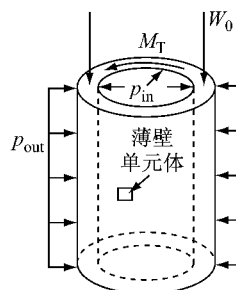


图 2 空心圆柱试样的荷载施加情况

Fig.2 Loading condition of hollow cylinder sample

空心圆柱试样相对密度 $D_r=53\%\pm 2\%$,对应于月球表面月海区域 $0\sim 30\ \text{cm}$ 深度时的密实程度。试样分 5 层制备,首先利用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

表 1 TJ-1 模拟月壤部分物理力学参数与相应的最佳估计值

Tab.1 Comparison between TJ-1 and best estimate values

| 项目 | 密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 孔隙比 | 内摩擦 角/ $(^\circ)$ | 黏聚力/ kPa | 压缩 指数 |
|----------------|--|-------------|----------------------|---------------|-----------------|
| 最佳 估计值 | 1.55~ 1.65 | 0.9~ 1.0 | 44~47 | 0.74~ 1.10 | 0.010~ 0.110 |
| TJ-1 模拟 月壤值 | 1.36 | 1.0 | 47.6 | 0.86 | 0.086 |
| 符合度/ $\%$ | 87.7 | 100.0 | 98.7 | 100.0 | 100.0 |

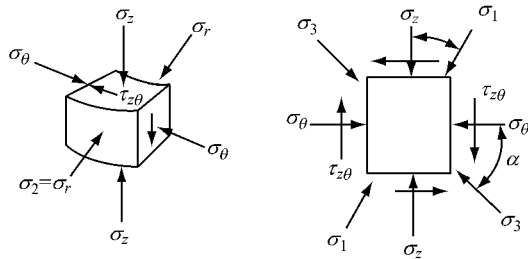


图3 典型单元体的应力分布

Fig.3 State of stress in the specimen

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,制作方法已在文献[17]中描述,试样的可重复性已进行验证^[17-18]. 试验中 TJ-1 模拟月壤空心圆柱试样达到设定的应力状态固结 30 min 后,采用空心圆柱扭剪仪加载系统中的应力路径加载模块进行主应力轴旋转试验. 应力路径模块由平均应力 p 、偏应力 q 、中主应力系数 b 、主应力方向 α 等参量控制,可在内、外压允许范围内通过改变上述参量实现不同的加载方式. 各参量表达式如下:

$$p = 1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1)$$

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

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

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta}\right) \quad (4)$$

此外,还涉及到反映 TJ-1 模拟月壤强度发挥程度的偏应力比,即

$$\eta = q/p \quad (5)$$

本文共进行两个系列的试验. 试验系列 I 为中主应力系数 b 不同情况下主应力轴的旋转试验,即对一个试样,保持平均应力 p 、偏应力 q 不变,主应力方向以 $\omega = 0.1(^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 速度在 $75^{\circ} \sim -75^{\circ}$ 旋转;对于不同试样则进行不同 b 值的主应力轴旋转试验,以研究中主应力系数 b 对 TJ-1 模拟月壤各应变分量及非共轴现象发展的影响. 系列 I 进行了 $p = 100$ kPa, $q = 43$ kPa, b 值分别为 0.2, 0.5, 0.9 的主应力轴在 $75^{\circ} \sim -75^{\circ}$ 旋转试验. 系列 II 为平均应力系列的主应力轴旋转试验,即对一个试样,加载过程中保持 p, η, b 不变,主应力方向以 $\omega = 0.1(^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 速度在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 旋转;对于不同试样则给定不同的平均应力进行主应力轴旋转试验,以研究平均应力对 TJ-1 模拟月壤变形特性的影响. 系列 II 进行了 $b = 0.5$ 、 $\eta = 0.866$, p 分别为 50, 100, 200 kPa 的主应力轴 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的旋转试验. 具体方案见表 2.

应当指出,系列 I 中,主应力轴的旋转范围未选择在 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 内是因为从 $\alpha = 0^{\circ}$ 进行主应力轴旋转

表2 试验方案

Tab.2 Test scheme

| 系列 | p/kPa | η | b | $\alpha/(^{\circ})$ |
|----|----------------|--------|-----|-------------------------------|
| I | 100 | 0.430 | 0.2 | $75^{\circ} \sim -75^{\circ}$ |
| | 100 | 0.430 | 0.5 | |
| | 100 | 0.430 | 0.9 | |
| II | 50 | 0.866 | 0.5 | $0 \sim 90$ |
| | 100 | 0.866 | 0.5 | |
| | 200 | 0.866 | 0.5 | |

时,主应力方向在 0° 和 180° 方向上跳跃,试验无法进行.

上述两个试验系列的应力变化情况若用 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \alpha$ 表示,则使 3 个主应力值不变,主应力方向发生连续偏转,相应的应力分量可表示为

$$\sigma_z = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (7)$$

$$\sigma_r = \sigma_2 \quad (8)$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (9)$$

试验过程中所有试样均保持干燥状态,各应力分量与其有效应力分量相等. 下文将对各应变分量的确定进行简单描述. 图 4 为试验前、后空心圆柱试样尺寸变化的示意图. 各应变分量的计算分析前,首先对试验后试样的内、外半径采用式(10)、式(11)分别进行修正.

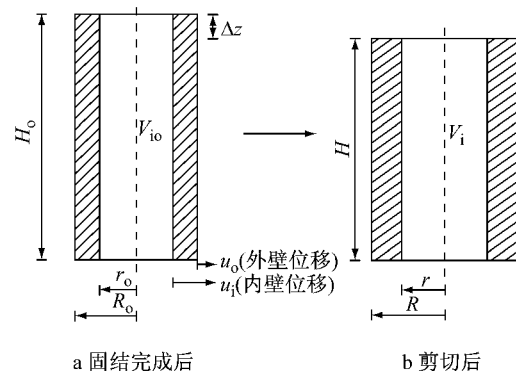


图4 空心圆柱试样剪切前、后的尺寸变化

Fig.4 Schematic diagram of dimensional changes after the test

$$R = \sqrt{\frac{R_o^2 H_o}{H} - \frac{\Delta V_b + \Delta V_{int}}{\pi H}} \quad (10)$$

$$r = \sqrt{\frac{r_o^2 H_o}{H} - \frac{\Delta V_{int}}{\pi H}} \quad (11)$$

式(10), (11)中: r_o, R_o 分别为固结完成后空心圆柱试样的内、外半径; r, R 分别为剪切至某时刻的内、

外半径; H_0 为试样固结完成后的高度; H 为剪切至某一时刻的高度; ΔV_{int} 为剪切过程中内压力室水的体积变化; ΔV_b 为剪切过程中试样发生的体积变化; $\Delta V_{\text{int}}, \Delta V_b$ 由内压、反压控制器根据排出/吸入水的体积测得, 若进行不排水剪切或试样在剪切过程中保持干燥, 则 $\Delta V_b = 0$ 。

由图 4 可推得各应变分量的表达式如下:

$$\text{轴向应变 } \epsilon_z = \frac{\Delta z}{H} \quad (12)$$

$$\text{径向应变 } \epsilon_r = -\frac{u_o - u_i}{R - r} \quad (13)$$

$$\text{环向应变 } \epsilon_\theta = -\frac{u_o + u_i}{R + r} \quad (14)$$

$$\text{剪应变 } \gamma_{z\theta} = \frac{2\Delta\theta(R^3 - r^3)}{3H(R^2 - r^2)} \quad (15)$$

式中: u_i, u_o 为图 4 中剪切过程中内外半径的变化量; $\Delta\theta$ 为试样发生转动的角度。

规定本文中各应变分量均以压缩为正。还需指出, TJ-1 模拟月壤试样在试验过程中需保持干燥, 体变无法根据排水量直接测得, 可由 $\epsilon_v = \epsilon_z + \epsilon_r + \epsilon_\theta$ 计算得到。考虑到乳胶膜嵌入量很小, 分析体变规律时未考虑乳胶膜嵌入的影响。

3 主应力轴旋转对变形特性的影响

3.1 中主应力系数对应变发展的影响

图 5a~5c 为系列 I 中各试样应力主轴旋转过

程中应变分量的变化情况。系列 I 中应力主轴的偏转范围为 $75^\circ \sim -75^\circ$, 即主应力方向逐渐向土体沉积方向偏转, 与其重合后又偏离沉积方向。各应变分量起点所对应的应力状态应为 $p = 100 \text{ kPa}, \alpha = 0^\circ$, 而图 5a~5c 中各应变起点所对应的应力状态为 $p = 100 \text{ kPa}, \alpha = 75^\circ$, 虽然两者的起点不同, 但应变的变化规律基本相同, 且后者数据处理更为方便。由图 5 可知, 系列 I 中主应力系数 b 对各应变分量的发展影响显著: ①对于轴向应变 ϵ_z , 由式(6)可知, 应力主轴旋转使试样的轴向应力增加, 故各试样的轴向应变均表现为压缩应变。 b 值从 0.2 到 0.9 变化时, 轴向应力减小, 相应的轴向应变也呈减小趋势。 ②对于环向应变 ϵ_θ , 由式(7)可知, 应力主轴旋转使试样的环向应力减小, 故相应的环向应变主要为拉伸应变。随 b 值的增加, 拉伸应变呈增大趋势, 但增幅相对较小。 ③对于径向应变 ϵ_r , 由式(8)可知, 径向应力即为中主应力, 径向应力反映的是对试样径向的约束情况。由图 5 可知, 随着 b 值的增加, 径向约束增大, 相应的径向应变逐渐由拉伸应变向压缩应变变化。 ④对于剪应变 $\gamma_{z\theta}$, 应力主轴旋转过程中剪应变呈类似正弦规律变化, 应力主轴旋转至 -30° 左右时剪应变为零, 且 $\alpha = 75^\circ$ 与 $\alpha = -75^\circ$ 时 $\gamma_{z\theta}$ 在数值上并不相等, 由此可知应力主轴的旋转使 TJ-1 模拟月壤产生了明显的塑性变形。进一步分析可知, 随 b 值的增大, $\gamma_{z\theta}$ 呈增大趋势。

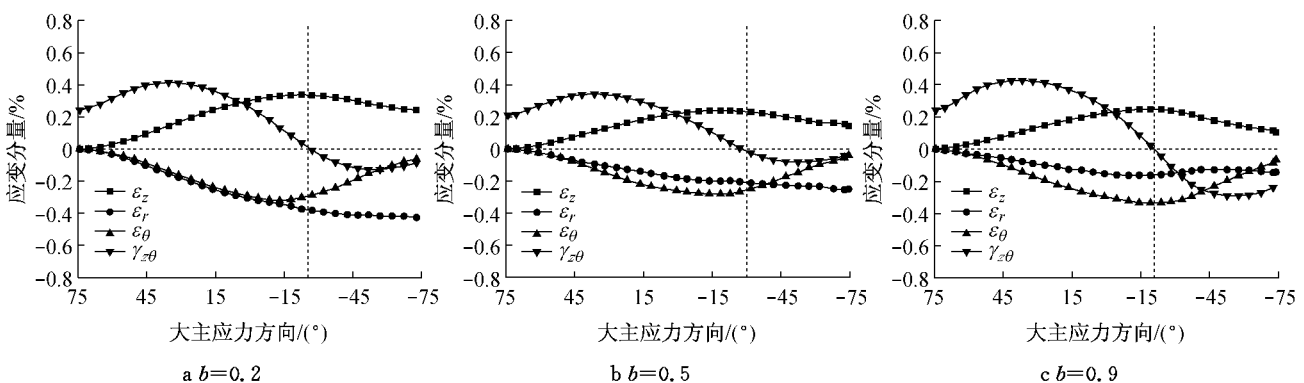


图 5 应变分量与主应力方向的关系曲线(系列 I)

Fig.5 Strain components and principal stress directions (Series I)

3.2 应变分量随平均应力的变化情况

系列 II 中各试样的应变分量与应力主轴旋转角度的关系曲线如图 6 所示。系列 II 中应力主轴的偏转范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$, 即主应力方向从土体的沉积方向向垂直于沉积方向偏转。由图 6 可知, 应力主轴的旋转同样使 TJ-1 模拟月壤产生明显的塑性变形, 且平

均应力对各应变分量的发展趋势影响显著: ①对于轴向应变 ϵ_z , 应力主轴旋转时产生的轴向应变主要为拉伸应变, 且随平均应力 p 的增加呈增大趋势。 ②对于环向应变 ϵ_θ , 应力主轴旋转产生的应变主要为压缩应变; 平均应力 $p = 50, 100 \text{ kPa}$ 时其随应力主轴的旋转发展趋势基本一致, $p = 200 \text{ kPa}$ 时有所增

加。③对于径向应变 ϵ_r , 其变化情况与平均应力的 大小密切相关。平均应力 $p=50$ kPa 时, 径向应变为拉 伸应变, 且随应力主轴的旋转呈增大趋势; $p=200$ kPa 时径向应变前期为压缩应变, 随应力主轴的旋 转逐渐转化为拉伸应变。④对于剪应变 $\gamma_{z\theta}$, 应力主 轴旋转产生的剪应变随平均应力的增加整体呈减小 趋势。应力主轴旋转至 90° 时剪应力为零, 但剪应变 分量并未回落至零点, 由此可知该试验系列中应力 主轴的旋转同样使 TJ-1 模拟月壤产生了明显的塑 性变形。上述各应变分量的发展规律可解释如下: 制 样过程中 TJ-1 模拟月壤遭受重力、插捣作用以及应 力主轴旋转前主应力方向与轴向应力方向一致, 导

致试样沿轴向压缩性小, 膨胀性大。应力主轴旋转 时, 由公式(6), (7)可知, 轴向应力 σ_z 减小、环向应 力 σ_θ 增大, 这种应力的变化情况对应两者的优势变 形趋势, 从而导致试样产生拉伸轴向应变和压缩环 向应变。对于不同的平均应力 p , 应力主轴偏转使得 σ_z, σ_θ 变化的幅度也不相同: p 越大, σ_z 的减小量越 大, 相应的拉伸应变也越大; σ_θ 的增加量越大, 产生 的压缩应变也越大。对于给定 p 值, 径向应力 σ_r 在 应力主轴的偏转过程中保持不变, 但随 p 值的增加, σ_r 对试样的径向约束不断增强, 径向应变逐渐由压 缩应变转化为拉伸应变。

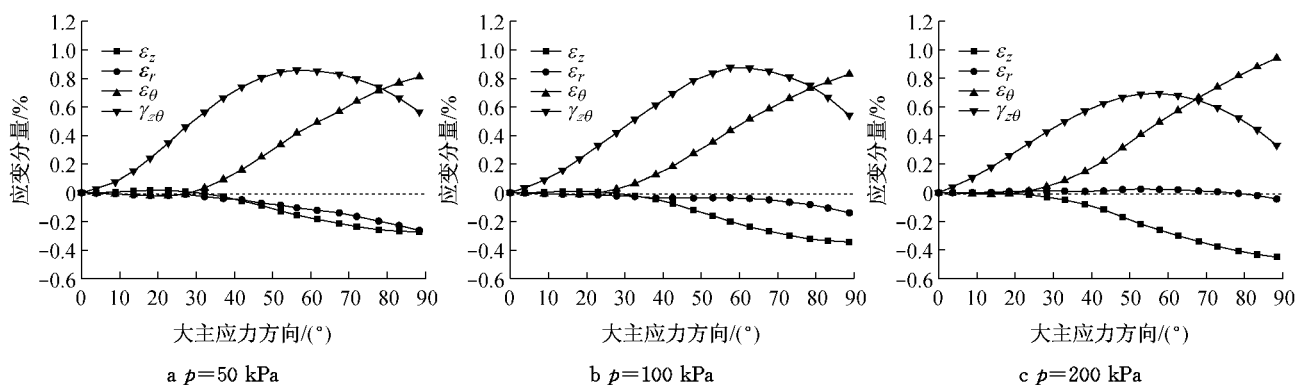


图6 应变分量与主应力方向的关系曲线(系列Ⅱ)

Fig.6 Strain components and principal stress directions (Series II)

3.3 体应变的变化规律

图7为系列Ⅰ中应力主轴偏转过程中体应变的 发展情况。由图7可知, 主应力轴 $75^\circ \sim -75^\circ$ 旋转使 得各 TJ-1 模拟月壤试样的体应变均呈剪胀现象; 且体 应变的发展趋势随中主应力系数 b 的增加呈先减小 后增大趋势, $b \in [0.2, 0.9]$ 范围内剪胀现象呈减弱 趋势, $b=0.2$ 时剪胀最为明显, $b=0.9$ 时剪胀现象 最弱, 这也与 3.1 节中各应变分量的发展趋势相吻 合。

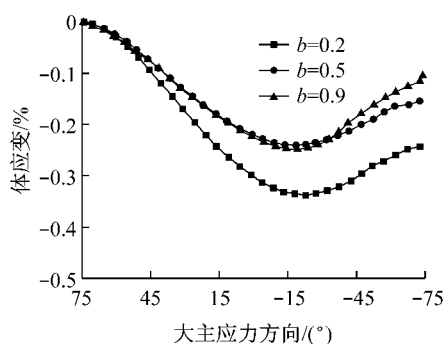


图7 体应变与主应力方向的关系曲线(系列Ⅰ)

Fig.7 Volumetric strain and principal stress directions (Series I)

图8为系列Ⅱ中 TJ-1 模拟月壤主应力方向在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 偏转时体应变的发展情况。由图8可知, 主 应力轴旋转的开始阶段体积变化不明显, 在旋转至 30° 之后开始呈剪缩现象, 且随偏转角度的增大, 剪缩现象 越来越明显。且通过图8可以发现, 即使偏应力比 η 、 中主应力系数 b 不变, 主应力轴旋转过程中 TJ-1 模 拟月壤试样的剪缩现象随平均应力的增大也愈加明 显。

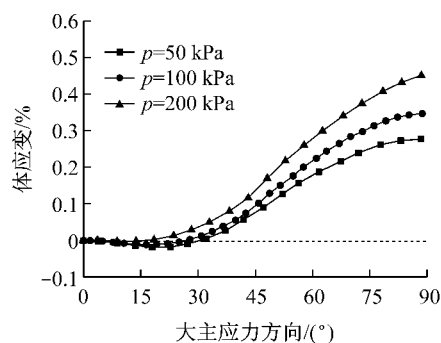


图8 体应变与主应力方向的关系曲线(系列Ⅱ)

Fig.8 Volumetric strain and principal stress directions (Series II)

4 主应力轴旋转对非共轴特性的影响

由文献[8-9]可知,主应力轴旋转时砂样均表现出非共轴性,即主应力轴旋转过程中主应变增量方向与主应力方向不一致.非共轴性是土体受力变形过程中表现出的一种基本性质,它的存在会导致土体的宏观力学响应“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^[19].土体的非共轴性数值上常用主应变增量方向 $\bar{\alpha}$ 与主应力方向间的夹角(非共轴角 β ^[20])表示,即

$$\beta = \bar{\alpha} - \alpha \quad (16)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2d\gamma_{z\theta}}{d\epsilon_z - d\epsilon_\theta}\right) \quad (17)$$

图 9 为试验系列 I 中 $b=0.2$ 时主应力轴旋转过程中主应变增量方向叠加在应力路径上的结果.图 10 为不同中主应力系数 b 情况下非共轴角 β 在主应力轴旋转过程中的变化情况.文献[8]指出,砂性土的变形中绝大部分为塑性应变,弹性应变可以忽略不计,故图 9 中总的主应变增量方向可近似认为是塑性应变增量的方向.由图 9 可知,主应力轴循环过程中 TJ-1 模拟月壤具有明显的非共轴现象(若共轴,则应变增量应垂直于弧线),主应变增量方向基本处于主应力与主应力增量方向之间,且具有明显的分段性: α 在 $45^\circ \sim 0^\circ$ 旋转时,非共轴角 β 逐渐减小, 0° 附近达到最小值(β 接近 -45°),在 $0^\circ \sim -45^\circ$ 时则呈增大趋势;且由图 10 可知,在 $b \in [0.2, 0.9]$ 时,非共轴角随主应力轴旋转的变化规律相似,非共轴角 β 的变化范围基本为 $[-45^\circ, -20^\circ]$.由此可见, $b \in [0.2, 0.9]$ 时, b 值对 TJ-1 模拟月壤的非共轴性影响较小.

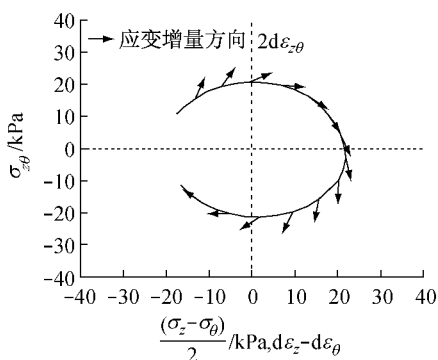


图 9 $b=0.2$ 时应变增量方向(系列 I)

Fig.9 Directions of strain increments, $b=0.2$ (Series I)

图 11 为系列 II 中各试样的主应变增量方向叠

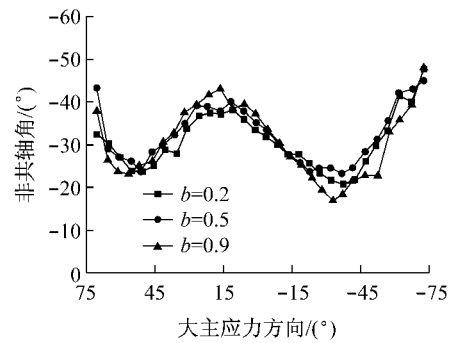


图 10 非共轴角与主应力方向的关系曲线(系列 I)

Fig.10 Non-coaxial angle and principal stress directions

加在应力路径上的结果.由图 11 可知,系列 II 中 TJ-1 模拟月壤在主应力轴旋转时同样呈明显的非共轴现象,且主应变增量方向介于主应力方向与主应力增量方向之间.以 $p=100$ kPa 为例,非共轴角 β 随主应力轴的旋转呈先减小后增大的变化趋势, β 在 $\alpha=45^\circ$ 附近达到最小值.但偏应力比 η , 中主应力系数 b 恒定时,主应力轴旋转过程中平均应力的变化对 TJ-1 模拟月壤的非共轴现象影响并不明显,不同平均应力时非共轴角的变化规律几乎相同.

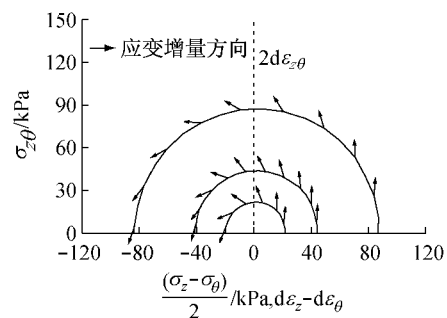


图 11 应变增量方向(系列 II)

Fig.11 Directions of strain increments (Series II)

5 结论

以 TJ-1 模拟月壤为原材料,采用空心圆柱扭剪仪进行了主应力轴旋转情况下中主应力系数、平均应力对干燥 TJ-1 模拟月壤变形特性及非共轴性影响的试验研究,得出的主要结论如下:

(1) 主应力轴旋转可致使 TJ-1 模拟月壤产生明显的塑性变形,且平均应力和中主应力系数对各应变分量的发展趋势影响显著.

(2) 主应力轴的逆时针旋转可使 TJ-1 模拟月壤出现剪胀趋势,而顺时针旋转导致剪缩趋势,这与主应力轴旋转时主应力方向的初始点及旋转过程中主应力的变化情况密切相关.

(3)偏应力比、中主应力系数恒定情况下主应力轴旋转时平均应力对 TJ-1 模拟月壤的非共轴现象影响不明显,不同平均应力时非共轴角与主应力方向的变化规律几乎相同。

(4)平均应力、偏应力比恒定时主应力轴旋转过程中,中主应力系数对 TJ-1 模拟月壤的非共轴性影响较小。

参考文献:

- [1] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
OUYANG Ziyuan. Introduction of lunar sciences [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005.
- [2] 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.
- [3] Miura K, Miura S, Toki S. Deformation behavior of anisotropic sand under principal stress axes rotation [J]. Soils and Foundations, 1986, 26(1): 36.
- [4] Wijewickreme D, Vaid YP. Behavior of loose sand under simultaneous increase in stress ratio and principal stress rotation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30: 953.
- [5] Nakata Y, Hyodo M, Murata H, et al. Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation [J]. Soils and Foundations, 1998, 38(2): 115.
- [6] 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.
YAO Yangping, XIE Dingyi. Extension-compression and torsion vibrating triaxial apparatus and experimental investigation[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 1996, 28(2): 129.
- [7] 郭莹, 栾茂田, 何杨, 等. 主应力方向循环变化对饱和松砂不排水动力特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 403.
GUO Ying, LUAN Maotian, HE Yang, et al. Effect of variation of principal stress orientation during cyclic loading on undrained dynamic behavior of saturated loose sands [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 403.
- [8] Gutierrez M, Ishihara K, Towhata I. Flow theory for sand during rotation of principal stress directions [J]. Soils and Foundations, 1991, 31(4): 121.
- [9] 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.
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.
- [10] Yang Z X. Investigation of fabric anisotropic effects on granular soil behavior [D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2005.
- [11] 郑永春. 模拟月壤研制与月壤的微波辐射特性研究[D]. 北京: 中国科学院, 2005.
ZHENG Yongchun. Development of lunar soil simulants and characteristic of microwave radiation of lunar regolith [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [12] 蒋明镜, 李立青. TJ-1 模拟月壤的研制[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 209.
JIANG Mingjing, LI Liqing. TJ-1 lunar soil simulant [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 33(2): 209.
- [13] JIANG Mingjing, LI Liqing, SUN Yugang. Properties of TJ-1 lunar soil simulant [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2012, 25(3): 463.
- [14] Carrier WD. Particle size distribution of lunar soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2003, 129(10): 956.
- [15] Nakashima H, Shioji Y, Tatayama K, et al. Specific cutting resistance of lunar regolith simulant under low gravity conditions [J]. Journal of Space Engineering. 2008, 1(1): 58.
- [16] 柳艳华. 天然软黏土屈服特性及主应力轴旋转效应研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2010.
LIU Yanhua. On yielding characteristics and principal stress rotation in natural soft clay [D]. Shanghai: College of Civil Engineering in Tongji University, 2010.
- [17] JIANG Mingjing, SHEN Zhifu, LI Liqing, et al. A novel specimen preparation method for TJ-1 lunar soil simulant in hollow cylinder apparatus [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012, 4(4): 312.
- [18] 蒋明镜, 李立青, 刘芳, 等. 主应力方向和偏应力比对 TJ-1 模拟月壤各向异性的影响[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 6.
JIANG Mingjing, LI Liqing, LIU Fang, et al. Effects of principal stress direction and deviatoric stress ratio on deformation behavior of TJ-1 lunar soil simulant [J]. Soil and Rock Mechanics. 2013, 34(1): 6.
- [19] 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: Patron Editore, 2005: 709-718.
- [20] 史宏彦, 谢定义, 汪闻韶. 平面应变条件下主应力轴旋转产生的应变[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 162.
SHI Hongyan, XIE Dingyi, WANG Wenshao. Strain due to rotation of principal stress axes under plane strain condition [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 162.