

排水循环剪切条件下砂土体变特性试验研究

何 杨^{1,2}, 栾茂田^{*1,3}, 张振东^{1,3},
郭 莹^{1,3}, 张小玲^{1,3}, 金 丹^{1,3}

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 海洋石油工程股份有限公司 设计公司 海管部, 天津 300451;

3. 大连理工大学 土木水利学院 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 利用土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪, 针对饱和福建标准砂, 在各向均等与三向非均等固结条件下, 进行了排水循环扭剪试验. 通过试验讨论了初始主应力方向、相对密度和剪应变幅度对排水条件下饱和砂土体积变化特性的影响. 研究表明: 循环剪应变幅度和相对密度显著地影响饱和砂土体积变化规律, 循环剪应变幅度越高, 相对密度越大, 越易于发生剪胀. 在三向非均等固结情况下, 饱和砂土在排水循环剪切条件下的体变特性密切地依赖于砂土的初始主应力方向. 不同初始主应力方向时应力-应变关系表现出不同的变化模式, 体积变化累积规律的具体模式取决于正应力水平与垂直平面上所存在的初始剪应力.

关键词: 排水循环扭剪试验; 三向非均等固结; 初始主应力方向; 剪胀; 剪缩

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A

0 引言

动力加载条件下土的动力特性是土工建筑物与地基抗震性能评价和动力设计的重要基础, 尽管自 1964 年世界上美国 Alaska 地震与日本新潟地震两次大地震后, 土的动力特性的试验研究及其本构模型一直是土动力学研究热点问题之一^[1], 但是与单调剪切条件下土的变形特性及强度特性相比, 目前的研究尚不完善与成熟, 关于循环剪切条件下土的动力特性研究更多地集中在不排水条件下砂土的动力变形特性和抗液化强度特性的探讨, 而对砂土在排水循环剪切条件下体积变化特性的研究并不充分. 在实际工程中, 地基开挖或建筑物的修建引起基础周围地基中土单元的剪切方向发生了不同程度的变化, 同时波浪等循环荷载将引起地基中循环应力的主轴方向发生连续的旋转, 循环荷载作用前主应力方向的变化及动荷载所导致的循环应力主轴的连续旋转, 使得在排水循环剪切条件下砂土的体积变化特性表现

出复杂的剪胀与剪缩特征. 而排水条件下循环应力所引起的体积变形特性与不排水条件下循环剪切所产生的超静孔隙水压力的上升与增长特性密切相关^[2].

剪应力的作用引起土体颗粒相互运动并重新定向排列, 从而导致土体体积的膨胀或者收缩. Reynolds^[3]最早针对散粒体材料定性地探索了由于剪切而引起的体积变化现象. Taylor^[4]通过能量修正将摩擦角分为膨胀部分与摩擦部分, Rowe^[5]基于最小能量比的假设进一步研究了二维应力条件和轴对称三维应力条件下剪胀的物理表现形式, 并提出了应力-剪胀方程, 成为现代土力学理论框架的重要基础. 20 世纪 60 年代后, Roscoe 与 Schofield、Schofield 与 Wroth、Moroto、Dafalias、Muhunthan、Chameau 与 Masad 基于能量原理, 先后提出了各自的剪胀理论^[6]. 而 Matsuoka、Tokue、Goddard 与 Bashir 基于考虑变形过程中内部颗粒几何尺寸限制的颗粒运动学理论, 对砂土剪胀特性进行了分析^[6].

收稿日期: 2006-09-04; 修回日期: 2007-10-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579006, 50179006; 重点项目 50639010, 50439010); 教育部跨世纪优秀人才培养计划研究基金资助项目(教技函[1999]2 号).

作者简介: 何 杨(1978-), 男, 博士; 栾茂田^{*}(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师.

目前所进行的排水循环扭剪试验都是在均等固结条件下进行的. Wan 与 Guo 利用所建立的应力-剪胀模型对三轴试验条件下的体积变化特性进行了数值模拟, 揭示了砂土排水循环特性对初始结构的依赖性^[7]. Dhan、Pradhan 与 Tatsuoka 等针对饱和丰浦砂, 在均等固结条件下进行了循环扭剪试验, 探讨了 Rowe 剪胀方程在循环扭剪试验条件下的适用性^[8,9]. Shamoto 等^[10]通过研究表明, 弹塑性理论中所采用的剪胀模型为完全塑性的基本假定是不符合实际的, 并证实了剪胀具有可逆性; 张建民^[11]研究了砂土剪胀的可逆性和不可逆性规律. 然而以往的研究^[12~14]表明, 三向非均等固结条件对不排水循环剪切特性会产生显著的影响, 而实际中土体的初始应力状态往往是三向非均等的.

为此, 本文在各向均等与三向非均等固结条件下, 对饱和砂土进行应力控制式排水循环扭剪试验, 通过对比试验着重讨论初始主应力方向、相对密度和循环剪应变幅度对排水循环剪切条件下饱和砂土体积变化特性的影响.

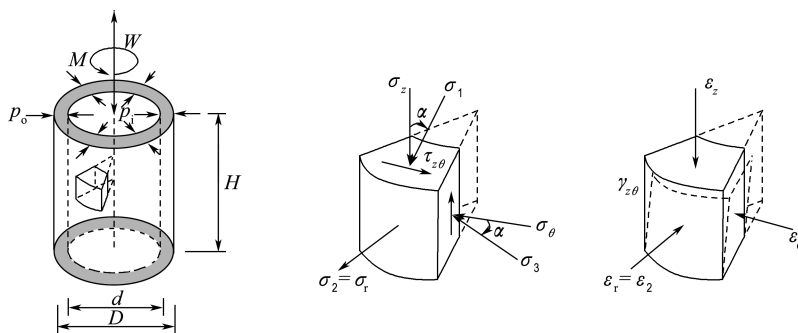


图1 空心圆柱试样的应力状态

Fig. 1 Stress condition of hollow cylindrical specimen

试验采用福建标准砂, 经室内试验测定该砂土的物理性质指标为 $G_s = 2.643$, $e_{\max} = 0.848$, $e_{\min} = 0.519$. 试验中所采用的空心圆柱状试样的外径与内径及高度分别为 $D = 100 \text{ mm}$, $d = 60 \text{ mm}$, $H = 150 \text{ mm}$. 用干装法成样, 所有砂样均采用通 CO_2 与无气水和施加 200 kPa 反压的方式进行联合饱和, 要求孔隙水压力系数 B 均达到 0.98 以上. 循环荷载的振动频率为 0.005 Hz , 确保试样内的孔隙水有足够的时间排出或者流入. 所有试验中控制初始平均有效应力在循环剪应力施加过程中保持不变, 在这种条件下, 砂土的体积变化完全是由剪应力的变化而引起的.

1 试验条件

试验研究中所采用的土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪^[15]是由大连理工大学与日本诚研舍株式会社联合设计并由诚研舍独立制造的, 对于空心圆柱试样, 通过独立地控制和施加轴向荷载 W_0 、扭矩 M_{T0} 和空心圆柱试样内室压力 p_i 与外室压力 p_o 等大小及其组合, 可以调整与改变初始主应力方向及中主应力, 从而能够实现任意组合的三向非均等固结条件. 空心圆柱试样的应力状态如图 1 所示. 主应力方向、中主应力系数、广义剪应力分别定义为

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

$$b = (\sigma'_2 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 - \sigma'_3) \quad (2)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (3)$$

固结应力比、初始偏剪应力比分别定义为 $K_c = \sigma_1 / \sigma_3$, $\eta_p = q_0 / p'_{m0}$, p'_{m0} 为初始平均有效主应力.

在均等固结条件下, 循环扭剪试验中控制试样的初始相对密度 D_r 分别为 30% 与 70% , 初始固结应力状态与循环应力幅度列于表 1. 在三向非均等固结条件下, 控制试样的初始相对密度 $D_r = 70\%$ 、初始偏剪应力比 $\eta_p = 0.433$ 、固结应力比 $K_c = 1.67$. 针对初始主应力方向角 $\alpha_0 = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 等 3 种非均等固结条件, 分别进行了动剪应力幅值恒定和动剪应力幅值随循环次数不断增长的排水循环扭剪试验. 表 2 列出了实现非均等固结条件所施加的各个荷载分量及其组合与循环剪应力比的变化范围. 表 1、2 中 τ_{θ} 为循环扭矩所产生的循环剪应力, p' 为平均有效主应力.

表1 均等固结条件下排水循环扭剪试验条件
($K_c=1.0$)

Tab. 1 The condition of drained cyclic torsional shear tests under isotropic consolidation condition ($K_c=1.0$)

试验名称	$D_r/\%$	p_{a0}/kPa	τ_d/p'
PDn-1	30	30	$-0.55\sim 0.55$
PDn-2	70	50	$-0.55\sim 0.55$
PDn-3	30	30	$-0.80\sim 0.80$
PDn-4	70	30	随循环次数增加

表2 非均等固结排水循环扭剪试验条件($K_c=1.67$)

Tab. 2 The condition of drained cyclic torsional shear tests under anisotropic consolidation condition ($K_c=1.67$)

试验名称	α_0 /(°)	p_t /kPa	p_o /kPa	W_0 /kN	M_{T0} /(N·m)	τ_d/p'
FPDn-1	0	32.5	28.5	0.057	0	$-0.6\sim 0.6$
FPDn-2	45	30.0	30.0	0	1.54	$-0.2\sim 0.7$
FPDn-3	90	27.5	32.5	-0.057	0	$-0.45\sim 0.45$
FPDn-4	0	32.5	28.5	0.057	0	随循环 次数增加
FPDn-5	45	30.0	30.0	0	1.54	
FPDn-6	90	27.5	32.5	-0.057	0	

2 均等固结条件下循环剪切试验

2.1 相对密度对体变特性的影响

按照表1所列的试验条件,进行了均等固结排水循环扭剪试验.对于PDn-1与PDn-2等2种试验情况,在相同动剪应力比 $\tau_d/p'=0.55$ 条件下砂土的应力-应变关系及体变随循环剪应力比的剪切变化过程如图2和图3所示,这里 γ_d 为扭转剪应变, ϵ_v 为体变.当体变 ϵ_v 为正时表示试样内部水体流出,试样处于体缩状态,反之则表示试样处于体积膨胀状态.由图可见,对于相对密度 $D_r=30\%$ 的松砂,体积始终是收缩的,且随循环剪应力的作用而单调增长;而对于相对密度 $D_r=70\%$ 的较密砂样,体变呈现波动变化,在应力循环的第1周期出现体积膨胀,随后均为收缩,体变单调累积,当循环剪应力达到正向峰值前的附近,砂样在体积收缩的情况下发生剪胀,当循环剪应力达到峰值后出现卸载体缩^[14,16].不同初始相对密度的砂土具有不同的孔隙比和颗粒分布状态,对于松砂,大孔隙较多,剪应力作用下孔隙变小易于出现剪缩;密砂颗粒间孔隙较小,剪应力作用下孔隙变小出现剪缩,随后当剪应力持续增加时,土颗粒出现相互错动,反而颗粒间孔隙变大,总体表现为体积膨胀.

2.2 剪应变幅度对体变特性的影响

为了考察剪应变幅度对饱和砂土体积变化特

征的影响,针对相对密度 $D_r=30\%$ 的松砂,在均等固结排水条件下进行了 $\tau_d/p'=0.55$ 与 $\tau_d/p'=0.80$ 等2种等幅循环剪应力的排水循环扭剪试验.图2和图4给出了2种情况下试验所测得的应力-应变关系及体积变形特性.由图2可见,初次加载中所产生的剪应变幅度较小,随着循环次数增加,剪应变幅度减小并趋向于稳定状态.试样体变始终单调累积正向增加,没有出现剪胀现象.颗粒孔隙变小砂土变密,土的刚度提高,滞回圈面积变小.由图4可见,初次加载所产生的剪应变幅度较大,随着循环次数的增加,剪应变幅度基本上保持为初次加载循环产生的幅度而不变.在剪应力比达到约为0.55后试样体变迅速减小,初次加载即产生体积膨胀,在此后的循环剪切过程中体变发生正向累积,在总体体积收缩条件下交替出现剪胀性.

进一步地,针对相对密度 $D_r=70\%$ 的密砂进行了剪应力幅度随循环次数而逐渐增长的排水循环扭剪试验,所得到的试验结果如图5所示.图中(a)和(c)分别给出了循环扭剪过程中前8个和前10个应力循环过程中剪应力比与剪应变之间的关系,(b)和(d)分别表示循环扭剪过程中前10个应力循环中体变随循环次数 N 的变化和体变与剪应变之间的关系.由图可见,由对称的循环剪应力作用所产生的循环剪应变并不对称.在前3个循环内剪应变水平较低,体变呈现单调正向累积增长,表现为总体体积收缩,没有出现剪胀现象.从第4周开始体变出现减小趋势而发生剪胀,剪应力幅值越大,所产生的剪应变越大,同时剪胀趋势越明显.剪应变幅度较高时密砂体积迅速膨胀,总体体积由收缩变为膨胀.

联合观察图2~5可以发现,在均等固结条件下,无论松砂还是密砂,剪胀趋势依赖于循环剪应变幅度.对于较低的剪应变幅度,松砂和密砂均可能只出现剪缩而不发生剪胀,此时体积在总体上是收缩的,且是完全塑性的.在较高的剪应变幅度下,松砂和密砂均会出现剪胀现象,此时颗粒之间发生剧烈的滑移、滚动,土颗粒从低位能的原有相对稳定状态向高位能的不稳定状态转变,当剪应力达到峰值时,剪应变最大,剪胀趋势最显著.当剪应力由峰值降低时,不能继续维持土颗粒所处于的高位能状态,在围压的作用下,剪胀程度降低,出现卸载体缩现象^[16],此时剪胀具有可恢复性,而不是完全塑性的.

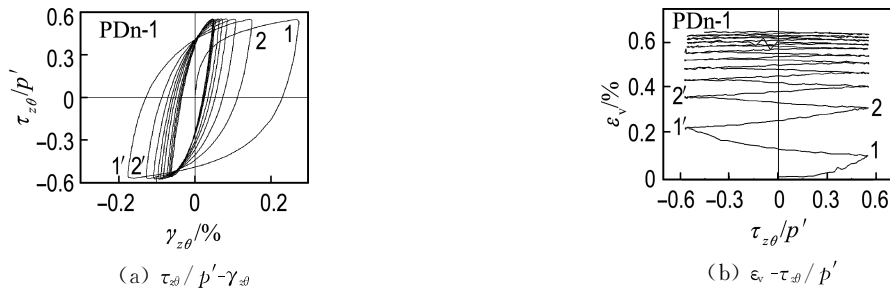


图2 砂土排水循环剪切特性(情况 PDn-1)

Fig. 2 Drained shear behaviour of sand under isotropic consolidation condition for the case of PDn-1

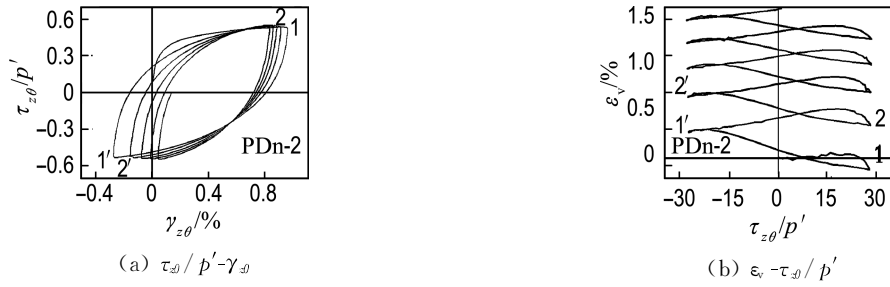


图3 砂土排水循环剪切特性(情况 PDn-2)

Fig. 3 Drained shear behaviour of sand under isotropic consolidation condition for the case of PDn-2

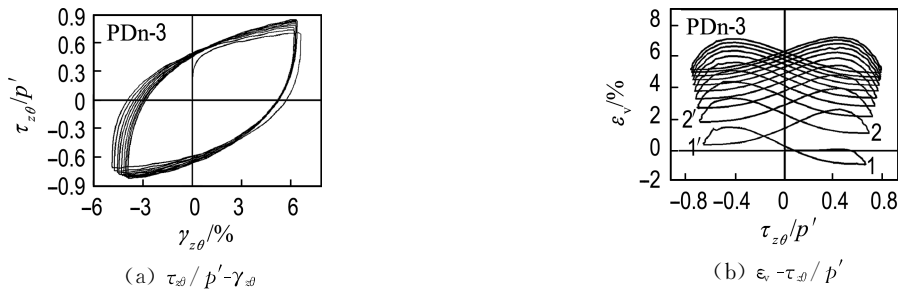


图4 砂土排水循环剪切特性(情况 PDn-3)

Fig. 4 Drained shear behaviour of sand under isotropic consolidation condition for the case of PDn-3

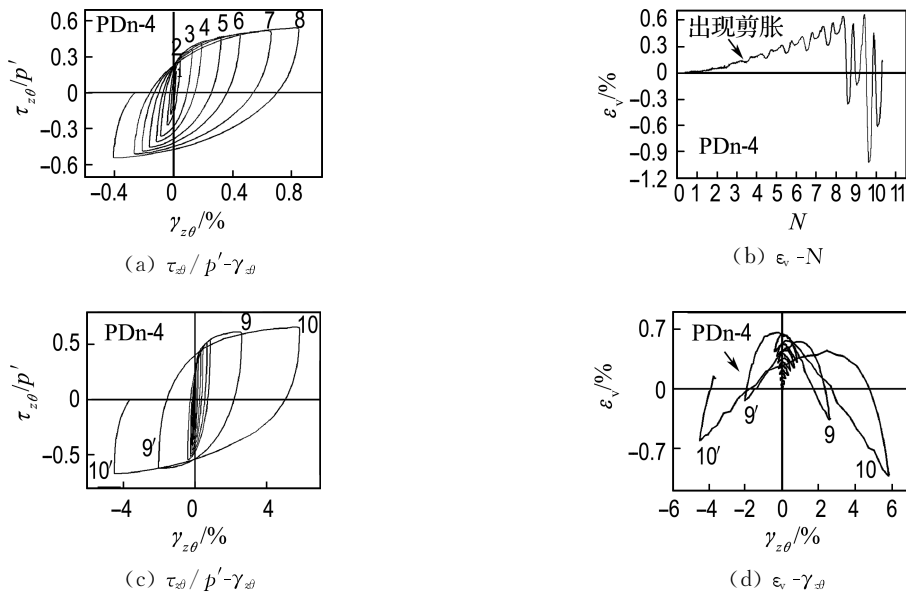


图5 砂土排水循环剪切特性(情况 PDn-4)

Fig. 5 Drained shear behaviour of sand under isotropic consolidation condition for the case of PDn-4

3 非均等固结条件下循环剪切试验

对于相对密度 $D_r=70\%$ 的密砂,在中主应力系数 $b=0.50$ 和初始大主应力方向相对于竖向的夹角 $\alpha_0=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 等 3 种非均等固结条件下进行了排水循环扭剪试验,以此探讨初始固结应力状态对循环剪切中砂土体变特性的影响。

3.1 等幅剪应力条件下砂土的循环剪切试验

在循环剪应力幅度恒定的条件下,进行了排水循环扭剪试验,图 6 给出了 $\alpha_0=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 等 3 种情况(即 FPDn-1、FPDn-2、FPDn-3)下实测得到的应力-应变关系及体积变形特性。

结合表 2,观察图 6 可以发现:

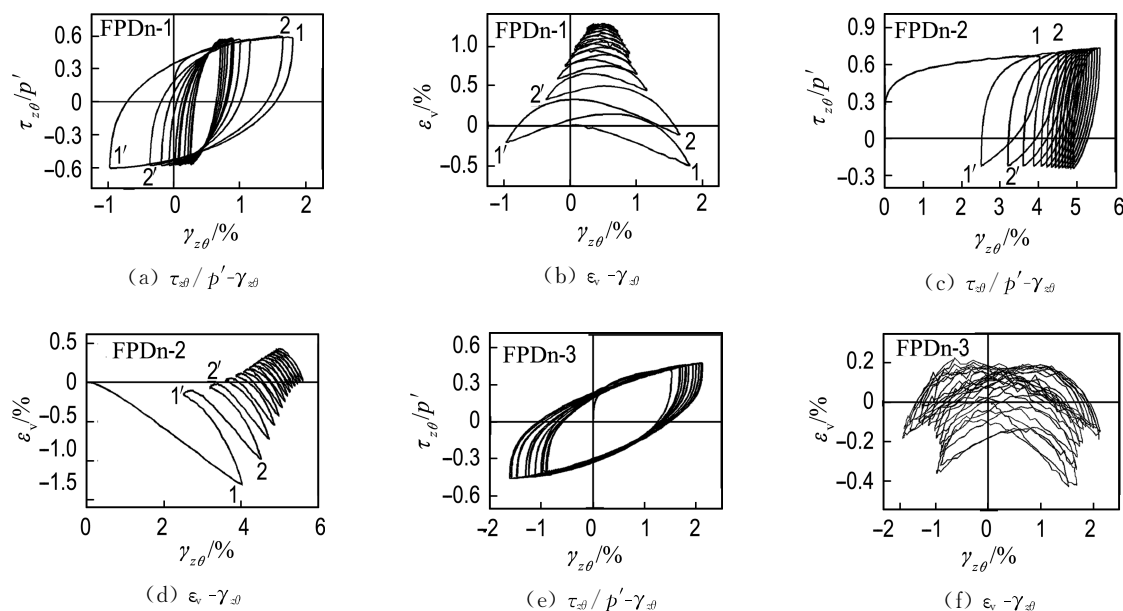


图 6 非均等固结条件下等幅循环扭剪试验结果

Fig. 6 Experimental results measured from drained cyclic torsional shear tests with constant amplitude of cyclic shear stress under anisotropic consolidation condition

(1) 当 $\alpha_0=0^\circ$ 时,土样竖直平面上存在初始压应力,应力-应变关系与均等固结情况具有相似特征,初次加载后剪应变较大,一定程度上破坏了土体的原有结构,发生剪胀趋势,但直至最终达到稳定状态时试样体积在总体上是收缩的.随着循环次数的增加,剪应变幅度不断减小并趋于稳定。

(2) 当 $\alpha_0=45^\circ$ 时,试样竖向与水平面上存在初始剪应力.初始剪应力的预先作用使得土体内部颗粒沿着大主应力的方向重新定向排列,因而具备了初始剪胀势.由于剪应力预先作用的方向与循环剪应力初始加载方向一致,剪应变迅速增加,试样体积急剧膨胀,剪胀显著.当循环剪应力与初始剪应力反向时,合成的反向剪应力降低,于是产生较小的剪应变,再次加载后剪应变超过初次加载所产生的剪应变幅度,随着循环剪应力的作用,剪应变累积增长最终趋向于稳定,土体体变累积增长方向与水平方向呈现一定的角度,在稳定状态时总体体积收缩。

(3) 当 $\alpha_0=90^\circ$ 时,试样竖直平面上存在初始拉应力.随着循环次数的增加,剪应变幅度不断增大,并逐渐趋于稳定,初次加载即产生体积膨胀,此后收缩,体变不断累积.当达到最终稳定状态时,同一应力循环内体积收缩与体积膨胀交替出现.与 $\alpha_0=0^\circ$ 的情况相反。

由上述对比发现,体积应变密切地依赖于剪应变幅度,而初始主应力方向的变化改变了饱和砂土应力-应变关系的特征.同时水平与垂直平面上剪应力的预先作用,改变了颗粒集合的定向排列方向.因此,初始主应力方向对饱和砂土的体变特征具有显著影响。

3.2 变幅剪应力条件下砂土的循环剪切试验

在循环剪应力幅度随循环次数逐渐增长的条件,针对 $\alpha_0=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 等 3 种情况(即 FPDn-4、FPDn-5、FPDn-6)进行了排水循环扭剪试验,实测得到的应力-应变关系及体积变形特性如图 7 所示.由图可见,在 $\alpha_0=0^\circ$ 的情况下,当剪应

变幅度较小时, 体积变形几乎全部为收缩; 当剪应变幅度较大时, 出现体积膨胀, 并在体变特征中起主导作用. 在 $\alpha_0 = 45^\circ$ 的情况下, 土体始终是收缩的, 同时, 体积应变随剪应变单向非对称累积, 且近似地线性依赖于循环剪应变幅度. 在 $\alpha_0 = 90^\circ$ 情

况下, 土体始终是膨胀的, 体积应变随剪应变双向对称累积, 且近似地与循环剪应变幅度呈线性关系. 因此, 初始主应力方向对初次加载的应变水平与循环剪切作用下体积变化之间关系的特征具有显著的影响.

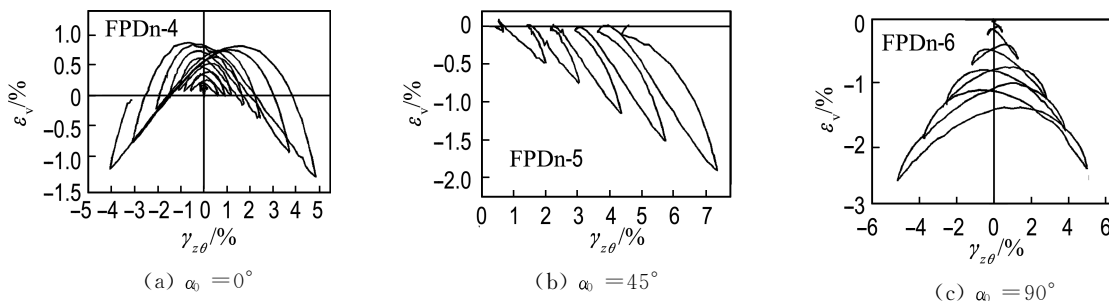


图7 非均等固结条件下变幅循环扭剪试验结果

Fig. 7 Experimental results measured from drained cyclic torsional shear tests with increasing amplitude of cyclic stress under anisotropic consolidation condition

根据图2~7所给出的试验结果可以看出, 在本文各种试验条件下, 在初次加载所产生的体积应变基础上, 在排水循环剪切中体变发生不同程度的累积. 初次加载所产生的土体颗粒定向排列对砂土体变特性具有决定性的作用.

4 结 论

(1) 排水条件下循环剪切过程中体变特性密切依赖于剪应变幅度. 均等固结条件下, 较小剪应变时只发生体积收缩并不出现剪胀, 体积应变是完全塑性的; 在较大剪应变时产生剪胀, 剪应变达到峰值时剪胀趋势最显著, 卸载时出现反向剪缩, 此种体积应变具有一定的可逆性.

(2) 对应于不同的初始固结应力状态, 循环剪切应力-应变关系呈现出不同的特征, 初始预剪应力的作用可能改变了土体颗粒排列特征. 因此初始主应力方向等初始应力状态对循环剪切条件下的体积应变变化规律具有显著的影响.

(3) 一般地, 排水循环剪切中所产生的体积变形在初次加载所产生的体积应变基础上将发生一定的累积. 初次加载所产生的土体颗粒定向对砂土的循环剪切体变特性具有重要影响.

参考文献:

[1] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988

[2] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997

[3] REYNOLDS O. On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact[J]. *Philosophical Magazine*, 1885, **5**(20): 469-481

[4] TAYLOR D W. *Fundamentals of Soil Mechanics*[M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 1948

[5] ROWE P W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1962, **269**(A): 500-527

[6] GUO P J, STOLLE D F E. The extension of Rowe's stress-dilatancy model to general stress condition[J]. *Soils and Foundations*, 2004, **44**(4): 1-10

[7] WAN R G, GUO P J. Drained cyclic behavior of sand with fabric dependence[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2001, **127**(11): 1106-1116

[8] DHAN T B S, TATSUOKA F, SATO Y. Experimental stress-dilatancy relations of sand subjected to cyclic loading[J]. *Soils and Foundations*, 1989, **29**(1): 45-64

[9] PRADHAN T B S, TATSUOKA F. On stress-dilatancy equations of sand subjected to cyclic loading[J]. *Soils and Foundations*, 1989, **29**(1): 65-81

[10] SHAMOTO Y, ZHANG J M, GOTO S. Mechanism of large post-liquefaction deformation in saturated sand[J]. *Soils and Foundations*, 1997, **37**(2): 71-80

- [11] 张建民. 砂土的可逆性和不可逆性剪胀规律[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(1): 12-17
- [12] SATO K, YASUHARA K, HIGUCHI T, *et al.* Effects of principal stress direction on undrained cyclic shear behavior of dense sand[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, JSCE**, 1996, **41**/III-35: 199-213
- [13] 郭莹, 栾茂田, 许成顺, 等. 主应力方向变化对松砂不排水动强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(6): 666-670
- [14] 何杨, 栾茂田, 许成顺, 等. 复杂应力条件下松砂振动孔隙水压力与体变特性的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, **25**(6): 127-134
- [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] 李广信, 武世锋. 土的卸载体缩的试验研究及其机理探讨[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(1): 47-50

Experimental study of volumetric strain characteristics of sand subjected to drained cyclic shearing

HE Yang^{1,2}, LUAN Mao-tian^{*1,3}, ZHANG Zhen-dong^{1,3},
GUO Ying^{1,3}, ZHANG Xiao-ling^{1,3}, JIN Dan^{1,3}

- (1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Subsea Pipeline Department, Engineering Company, Offshore Oil Engineering Co. Ltd., Tianjin 300451, China;
3. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The soil static and dynamic universal triaxial and torsional shear apparatus is employed to perform drained cyclic torsional shear tests of saturated Fujian standard sand under initial conditions of isotropic consolidation or three-directional anisotropic consolidation. The effects of initial orientation of principal stress, relative density and shear strain amplitude on characteristics of volumetric strain induced under drained cyclic shear condition are examined on the basis of comparative tests. It is shown that the characteristics of volumetric change are noticeably affected by shear strain amplitude and relative density. The higher shear strain amplitude and the larger relative density, the heavier the dilatancy of sand subjected to drained cyclic shearing. It is indicated that the feature of volumetric change is closely dependent on the initial orientation of principal stress under initial three-directional anisotropic consolidation condition. The patterns of the stress-strain relation are associated with the initial orientation of principal stress and both variation mode of volumetric strain accumulation and dilatancy or/and contraction behaviour are related to the initial pre-shear stress imposed on the horizontal and vertical planes.

Key words: drained cyclic torsional shear test; three-directional anisotropic consolidation; initial orientation of principal stress; dilatancy; contraction