

排水条件下饱和砂土单调剪切特性试验研究

冷 艺^{1,2,3}, 栾茂田^{*1,2}, 许成顺⁴, 马太雷^{1,2}

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

3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

4. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022)

摘要:应用大连理工大学研发的土工静力-动力液压-三轴扭转多功能剪切仪,控制试验过程的平均主应力和中主应力系数保持恒定,改变主应力方向,针对相对密度为30%、60%的饱和福建标准砂,进行一系列排水单调剪切试验.主要探讨排水条件下主应力方向和相对密度对砂土应力-应变关系、有效内摩擦角及体变特性的影响.试验结果表明:主应力方向对饱和砂土的单调剪切特性具有显著影响;不同主应力方向对应的应力-应变关系所表现出的变化规律取决于水平面与竖直面受到的剪应力作用,相变及峰值广义剪应力和有效内摩擦角与主应力方向角之间存在抛物线型关系.同时相对密度的影响也不容忽略;同中密砂相比,松砂的剪缩现象明显,其峰值抗剪强度降低.

关键词:主应力方向;排水单调剪切;相变状态;峰值状态;有效摩擦角

中图分类号: TU441 **文献标志码:** A

0 引言

实际工程中地基通常处于三向非均等应力状态,并非总是处于各向均等应力状态.例如,在天然的水平场地上筑坝、开挖地基或城市地下水位变动,都会引起地基内应力状态的改变,即主应力方向角、中主应力系数和固结应力比等将发生不同程度的变化^[1],而且土体在重力作用下沉积时往往容易形成结构面,这些因素都会对实际土体的剪切特性产生不同程度的影响.作为分析和评价土工建筑物地基应力与变形及其稳定性的基础,土的变形与强度特性及其工程参数具有至关重要的意义.因此,当前土力学的研究热点问题之一就是如何真实地模拟土体中的实际应力状态,以便系统全面地探讨复杂初始应力状态下土的应力-应变关系、孔隙水压力与残余变形发展规律及液化强度等特性.这一切均需要依靠研制出的高精

度现代土工实验设备,才能真实再现实际土体的复杂应力状态及其多变的加载方式,展开深入的试验研究探讨各种因素对土的剪切特性的影响.

Oda^[2]、Yamada等^[3]对砂土内结构各向异性的特征进行了研究. Symes等^[4]利用空心圆柱扭剪仪的试验表明,大主应力方向偏离轴向会显著影响砂土的剪缩特性. Yoshimine等^[5]针对日本丰浦砂,通过应变控制式单调剪切试验发现:主应力方向与中主应力系数是决定砂土单调剪切特性的重要因素.近些年来, Vaid等^[6]、Nakata等^[7]同样在空心圆柱扭剪仪得到的试验结果中观察出相似的剪切特性.这些试验大多集中在不排水剪切条件下进行,而且施加的试验条件组合,如主应力方向、中主应力系数都是有所限制的.由于砂土的渗透系数比较大,一般实际工程的荷载施加速度不是非常快,土体中的水有充分时间排出或被吸入,这时需要进行排水试验研究.但倘若地基被不

收稿日期: 2007-01-10; 修回日期: 2008-06-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579006, 50639010).

作者简介: 冷 艺(1980-),女,博士生, E-mail: lxxh@dlut.edu.cn; 栾茂田*(1962-),男,博士,教授,博士生导师, E-mail: mtluan@dlut.edu.cn.

透水边界包围,砂土中存在孔隙水压力直至土体破坏,这时进行不排水强度试验是必要的^[8].目前,国内利用空心圆柱三轴扭剪仪得到的试验研究成果有限.通过应用此类仪器施加各种复杂的荷载组合,研究不同因素对砂土剪切特性影响的排水试验资料,仍需要进一步补充.

鉴于上述情况,本文利用大连理工大学研发的“土工静力-动力液压-三轴扭转多功能剪切仪”^[9],对均等或非均等固结的福建标准砂,进行十余组排水条件的应力控制式单调剪切试验;在中主应力系数与平均主应力不变的前提下,通过对比重点探讨主应力方向、相对密度对饱和砂土排水单调剪切特性的影响,并寻求出相互之间的密切联系.

1 试验条件

1.1 试样尺寸及试验土料

试验中采用内径为 60 mm、外径为 100 mm 及高度为 150 mm 的空心圆柱试样.试料采用福建标准砂,通过室内试验测定基本参数,该砂土的比重 $G_s=2.643$;颗粒尺寸 $d_{50}=0.34\text{ mm}$;不均匀系数 $C_u=1.542$;最大与最小孔隙比分别为 $e_{\max}=0.848, e_{\min}=0.519$.

1.2 试验参数及试验过程

试验采用分层干装方法制备试样,相对密度控制为 $D_r=30\%、60\%$ 两种.并依次通 CO_2 、通无气水与施加 200 kPa 反压联合对试样进行饱和,保证制备砂样的孔压系数 B 均达到 98% 以上.在整个试验过程中,通过控制不同的内侧压力 p_i 、外侧压力 p_o 、竖向荷载 W 和扭矩 M ,从而实现各种不同的固结与剪切应力路径.空心圆柱试样的应力状态如图 1 所示.

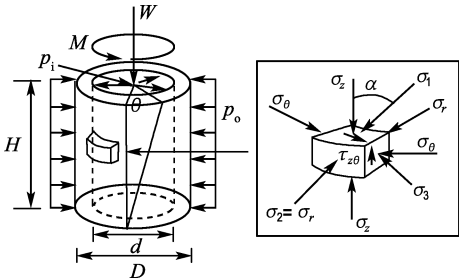


图 1 空心圆柱试样的应力状态

Fig. 1 Stress conditions on hollow cylinder sample

在所采用的试验参数中,主应力方向角 α 定义为大主应力方向与竖向之间的夹角

α = 1/2 arctan((2τ_zθ) / (σ_z - σ_θ)) (1)

式中 $\sigma_z、\sigma_\theta$ 与 $\tau_{z\theta}$ 分别表示空心圆柱试样的轴向与环向正应力及由扭矩所形成的剪应力.同时平均有效应力 p' 、广义剪应力 q 、有效内摩擦角 ϕ' 及初始有效偏应力比 η_0 分别定义为

p' = σ'_m = 1/3 (σ'_1 + σ'_2 + σ'_3) (2)

q = √(1/2 [(σ'_1 - σ'_2)^2 + (σ'_2 - σ'_3)^2 + (σ'_3 - σ'_1)^2]) (3)

φ' = arcsin((σ'_1 - σ'_3) / (σ'_1 + σ'_3)) (4)

η_0 = q_0 / p'_m0 (5)

为了探讨主应力方向、相对密度、初始固结应力状态和加载方式对砂土剪切特性的影响,进行了 3 类应力控制式排水试验,具体条件如表 1 所示.试验类型如下.

表 1 排水单调剪切试验条件

Tab. 1 The condition of drained monotonic shear tests

试验	$p'_{m0}=100\text{ kPa}, b=0.5$		
	$D_r/\%$	η_0	$\alpha/(^\circ)$
类型 1	30	0.43	0、30、45、60、90
类型 2	30、60	0	45
类型 3	30	0.43	30、60(改变加载速率)

(1) 类型 1:在平均主应力 $p'_{m0}=100\text{ kPa}$ 、中主应力系数 $b=0.5$ 、相对密度 $D_r=30\%$ 、初始有效偏应力比 $\eta_0=0.43$ 的非均等固结条件下,分别控制主应力方向角 $\alpha=0^\circ、30^\circ、45^\circ、60^\circ$ 和 90° 等 5 种工况,进行单调剪切试验,以此探讨主应力方向变化对砂土剪切特性的影响.

(2) 类型 2:在平均主应力 $p'_{m0}=100\text{ kPa}$ 、初始有效偏应力比 $\eta_0=0$ 的均等固结条件下,控制中主应力系数 $b=0.5$ 、主应力方向角 $\alpha=45^\circ$,相对密度 $D_r=30\%$ 和 60% ,进行单调剪切试验,通过比较两种情况研究相对密度的影响.同时,与类型 1 具有相同初始条件($D_r=30\%, \alpha=45^\circ$)的工况相比较,关注固结应力比的影响.

(3) 类型 3:在平均主应力 $p'_{m0}=100\text{ kPa}$ 、相对密度 $D_r=30\%$ 、中主应力系数 $b=0.5$ 、初始有效偏应力比 $\eta_0=0.43$ 的非均等固结条件下,控制主应力方向角 $\alpha=30^\circ$ 和 60° ,用不同的速率进行单调剪切试验,通过与类型 1 中 $\alpha=30^\circ$ 和 60° 具有相同初始条件的工况作比较,探讨改变加载速率对剪切特性的影响.

1.3 试验预先设定应力路径与实测应力路径

针对类型 1 试验, p' - q 平面上预先设定的进程如图 2 所示,图中的虚线与实线分别表示固结与剪切过程的应力路径,点 C 表示固结完成状态;图 3 表示控制中主应力系数始终为 0.5,同时主应力方向角保持不变的设计思路,图中用实线表示出固结完成后的剪切应力路径^[10].

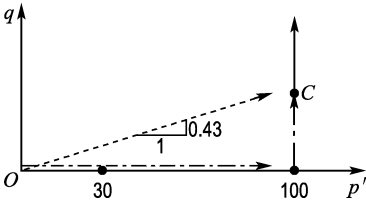


图 2 p' - q 平面上固结与剪切时的设计试验应力路径

Fig. 2 The designated stress paths in p' - q plane during test

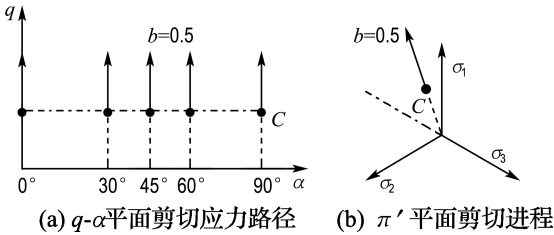


图 3 设计的剪切应力路径

Fig. 3 The designated shear stress paths during test

针对试验控制 $\alpha=0^\circ$ 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 等 5 种主应力方向角情况,图 4 给出了在类型 1 试验中实测到的有效应力路径,同时实测的剪切应力路径如图 5 所示,对比分析后认为,整个试验过程能够保持主应力方向基本不变,实现了预先设定的应力路径.

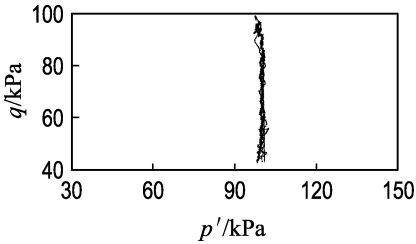


图 4 试验类型 1 的实测有效应力路径

Fig. 4 The actual effective stress paths measured in the test mode 1

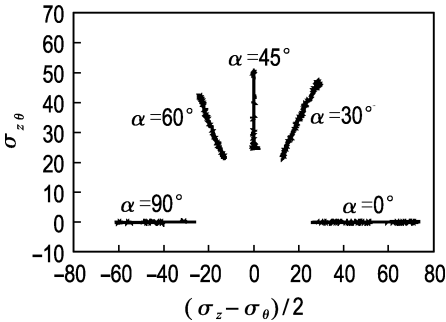


图 5 试验类型 1 的实测剪切应力路径

Fig. 5 The actual shear stress paths measured in the test mode 1

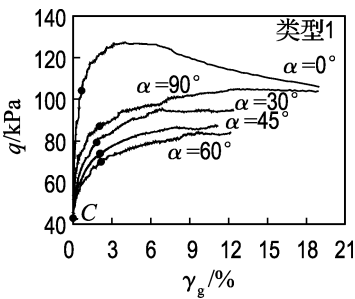
2 试验结果及分析

2.1 主应力方向对排水条件下单调剪切特性的影响

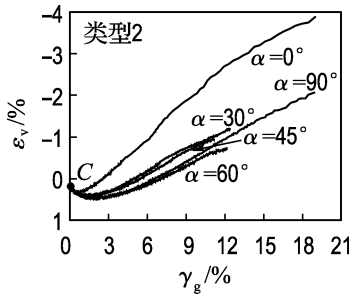
在试验类型 1 中,进行主应力方向角 $\alpha=0^\circ$ 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 等 5 种情况的试验,其中 $\alpha=0^\circ$ 和 90° 时水平面与竖直面上仅受到压应力作用,当 $\alpha=30^\circ$ 、 45° 和 60° 时水平面与竖直面上不仅有压应力的作用还存在剪应力作用.图 6(a)给出了各种主应力方向角情况下广义剪应力 q 与广义剪应变 γ_g 之间的关系,其中点 C 表示固结结束时或剪切开始时的应力状态,同时用实心圆点表示出砂土由剪缩状态过渡为剪胀状态的临界状态即相变状态^[11].由图可见,主应力方向对砂土的应力-应变关系具有显著的影响.当大主应力方向与竖向之间的夹角 $\alpha=0^\circ$ 时,松砂在达到应力峰值后,出现了明显的应力跌落即应变软化现象.随着大主应力方向与竖向之间的夹角增大,应力-应变关系曲线为应变硬化型,砂土的广义剪应力逐渐降低,直至当大主应力方向与竖向之间夹角 $\alpha=60^\circ$

时,即主应力方向角接近 $45^\circ + \phi/2$ 时,砂土所发挥的强度最低,在相同剪应力水平下所产生的应变最大.随后主应力方向偏离了 $45^\circ + \phi/2$,即当 $\alpha=90^\circ$ 时强度又重新得到了恢复.其根本原因在于装样时形成的水平结构面,吉嶺充俊^[12]指出本文采用的干装方法最容易形成水平结构面.根据摩尔-库仑强度准则,砂土在发生破坏时,其破坏面与受到大主应力作用平面之间的夹角为 $45^\circ + \phi/2$,当主应力方向角接近 $45^\circ + \phi/2$ 时,其强度薄弱面正好平行于水平结构面,因而此时砂土所发挥的强度最低.这与王洪瑾等^[13]对击实黏性土强度进行研究得到的结论类似.对应于不同的主应力方向角,最终的广义剪应力均会趋于稳定.当 $\alpha=0^\circ$ 和 90° 时变形超过 15%,广义剪应力基本达到统一的强度水平.上述现象与不排水条件下的剪切特性存在差别.不排水试验^[10]结果表明,随着主应力方向角的增大,相变状态的广义剪应力减小,峰值有效偏应力比降低.

体变特性关系曲线则如图 6(b)所示,主应力方向同样对其变化具有显著影响.大主应力方向偏离竖向的角度越大,砂土的剪缩现象越明显.当



(a) 对应力-应变关系的影响



(b) 对体应变-广义剪应变之间关系的影响

图 6 主应力方向对 $q-\gamma_g$ 和 $\epsilon_v-\gamma_g$ 关系的影响

大主应力方向与竖向之间的夹角较小时,容易出现相变状态、很快进入剪胀状态;而随着主应力方向角的不断增大,先会产生明显的体积剪缩而后出现剪胀现象.同时不难发现:与主应力的作用方向无关,饱和松砂在变形初始阶段均表现为体积剪缩状态,在最终的变形时均表现为体积剪胀状态直至破坏.由此可见,具有相同初始物理状态的砂土,主应力方向的变化,能够导致其表现出不同的应变硬化、软化以及剪缩、剪胀等变形特征,即不同主应力方向时应力-应变关系、体变特性表现出的变化模式,取决于水平面与竖直面存在的剪应力作用.因此在工程中应结合土体的实际应力状态合理考虑这种效应.

在剪切过程中,将相变状态时对应的有效内摩擦角和广义剪应力分别定义为相变有效内摩擦角 ϕ'_{pt} 和相变广义剪应力 q_{pt} ;将达到峰值状态时对应的有效内摩擦角和广义剪应力称为峰值有效内摩擦角 ϕ'_p 和峰值广义剪应力 q_p (仅有应变硬化现象产生时的稳态与峰值状态的抗剪强度一致).由于仪器量程的限制,各种工况条件最终的应变大小不同.当 $\alpha=0^\circ$ 发生应变软化时存在明显的峰值点;仅发生应变硬化时, $\alpha=30^\circ$ 和 90° 的工况进入稳态即为峰值状态, $\alpha=45^\circ$ 和 60° 的条件认为在广义剪应变达到 12% 左右出现峰值状态.表 2 中详细列出了由类型 1 试验得到的相变状态与峰值状态的广义剪应力,发现中主应力系数保持不变,相变和峰值状态广义剪应力同主应力方向角能够很好地满足抛物线型关系,即 $q = A\alpha^2 + B\alpha + C$, 各系数取值详见表 3.

表 2 不同主应力方向条件下的广义剪应力
($b=0.5$)

Tab. 2 The generalized deviator stress for different orientation of principal stress ($b=0.5$)

$\alpha/(^\circ)$	q_{pt}/kPa	q_p/kPa
0	104.17	127.43
30	79.32	95.46
45	74.13	87.48
60	71.32	84.53
90	88.05	105.03

表 3 系数 A、B、C 的确定
Tab. 3 The determination of A, B and C

q	A	B	C
q _{pt}	0.011 3	−1.20	104.51
q _p	0.014 4	−1.57	127.92

2.1.1 主应力方向对有效内摩擦角的影响 同样是针对试验类型 1,表 4 列出了在不同的主应力方向条件下,所对应得到的相变状态与峰值状态的有效内摩擦角.由表可见,当中主应力系数保持不变时,随着大主应力方向与竖向之间夹角的逐渐增大,对应的有效内摩擦角呈降低的趋势;主应力方向角越接近 $45^{\circ}+\phi/2$,有效内摩擦角越低,而后偏离 $45^{\circ}+\phi/2$ 方向又会增大.相变有效内摩擦角和峰值有效内摩擦角与主应力方向角之间同样能够满足抛物线型关系,即 $\phi'=D\alpha^2+E\alpha+F$,各系数取值详见表 5.

表 4 不同主应力方向条件下的有效内摩擦角
($b=0.5$)

Tab. 4 The effective friction angles for different orientation of principal stress ($b=0.5$)

$\alpha/(^{\circ})$	$\phi'_{pt}/(^{\circ})$	$\phi'_{p}/(^{\circ})$
0	37.32	45.77
30	27.21	33.74
45	24.61	30.36
60	23.78	29.48
90	30.68	38.19

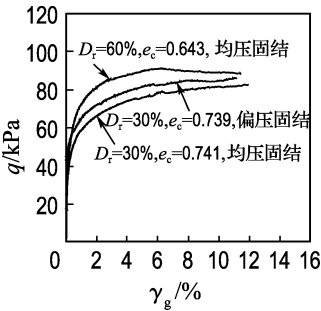
表 5 系数 D、E、F 的确定
Tab. 5 The determination of D, E and F

ϕ'	D	E	F
ϕ'_{pt}	0.004 7	−0.50	37.49
ϕ'_{p}	0.005 8	−0.61	46.03

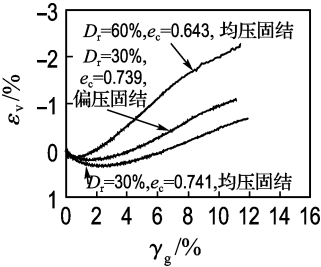
2.1.2 相对密度对排水条件下单调剪切特性的影响 在类型 2 中,将 $D_r=30\%$ 与 60% 两种相对密度的砂土试验结果进行对比,如图 7 所示.

可以看出,初始相对密度对排水剪切特性同样具有显著的影响.相对密度越大,越易出现剪胀特性,其广义剪应力达到峰值以后有回落趋势;而相对密度较小的砂土所呈现出的剪胀现象并不显著(出现明显的剪缩现象后剪胀),广义剪应力逐渐升高且最终趋于稳定.在本试验中,当主应力方

向角 $\alpha=45^{\circ}$ 时,两者的峰值广义剪应力相差约 9% .



(a) 应力-应变关系曲线



(b) 体应变-广义剪应变关系曲线

图 7 相对密度与初始固结应力状态对砂土剪切特性的影响

Fig. 7 Effect of relative density and initial consolidated stress state on shear behavior of sand

2.1.3 初始固结应力比对排水单调剪切特性的影响 针对类型 1 与类型 2 中两种不同固结状态的 $D_r=30\%$ 松砂,控制主应力方向角为 $\alpha=45^{\circ}$,试验结果如图 7 所示,以此研究初始固结有效应力状态对排水条件下饱和砂土单调剪切特性的影响.

由图不难发现:当主应力方向、中主应力系数相同时,砂土在排水条件下,单调剪切时的体变特性与应力-应变关系基本相似,表现出相近的应变硬化趋势与剪胀、剪缩特性.应该注意的是,当主应力方向相同时,初始固结应力比越大,砂土产生相同变形时的广义剪应力越高,更易于达到相变状态,其剪胀特性似乎更显著.在本试验中,当其他条件相同时,偏压固结 $\eta_0=0.43$ 的峰值广义剪应力比 $\eta_0=0$ 均压固结条件的强度提高近 4.6% .

2.2 应力加载速率对砂土排水剪切特性的影响

为了弄清楚剪切速率的影响,针对类型3中相对密度 $D_r=30\%$ 、初始固结应力比 $\eta_0=0.43$ 的饱和松砂,采用不同的加载速率进行应力控制式剪切试验,结果如图8所示。控制主应力方向角 $\alpha=30^\circ$ 时,以 $\dot{q}=1.82$ kPa/min 和 $\dot{q}=2.81$ kPa/min 两种速率进行剪切;当主应力方向角 $\alpha=60^\circ$ 时,则以 $\dot{q}=1.19$ kPa/min 和 $\dot{q}=3.07$ kPa/min 两种速率分别进行剪切。由图可见,不同加载速率的应力-应变关系曲线基本相似,表现出相同的变化模式。当应力加载速率变化范围在 $1.1\sim 3.1$ kPa/min 时,对剪切特性的影响并不显著。

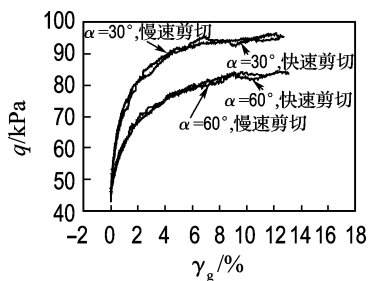


图8 剪切速率对应力-应变关系的影响

Fig. 8 The effect of shear rate on the stress-strain relationship

3 结 论

(1) 主应力方向对剪切过程中砂土的应力-应变关系和体变特性的影响十分显著,其变化规律取决于水平面与竖直面所受到的剪应力作用。大主应力方向偏离竖向的程度不同,会表现出不同的剪缩剪胀特性。当主应力方向角接近 $45^\circ + \phi/2$ 时,砂土强度最低,在相同应力水平下产生的变形最大,而后剪应力重新增大,相变及峰值广义剪应力与主应力方向角之间呈抛物线型关系。

(2) 中主应力系数一定,随着大主应力方向与竖向之间夹角的不断增大,砂土的内摩擦角逐渐降低,直至主应力方向角接近 $45^\circ + \phi/2$ 时,相变及峰值的内摩擦角最小,其随后又会增大,摩擦角与主应力方向角之间也存在抛物线型变化规律。

(3) 初始相对密度的影响同样显著。相对密度越大,越易出现剪胀特性,其广义剪应力达到峰

值以后有回落趋势;而相对密度较小的砂土所呈现出的剪胀现象并不显著,剪应力逐渐升高且最终趋于稳定,两者峰值剪应力相差约 9% 。

(4) 主应力方向不变,初始固结应力比对应力-应变关系与体变特性的变化规律没有明显的影响,松砂偏压固结的峰值剪应力比均压固结条件略高 4.6% 。

(5) 加载剪切速率对试验结果的影响不大。

致谢:大连理工大学岩土工程研究所王栋博士对本文提出了修改建议。

参考文献:

- [1] 中田幸男. 主应力方向变动下における異方性砂の变形のおよび強度特性に関する研究[D]. 日本: 山口大学, 1998
- [2] ODA M. Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material [J]. **Soils and Foundations**, 1972, 12(1):17-36
- [3] YAMADA Y, ISHIHARA K. Anisotropic deformation characteristics of sand under three dimensional stress conditions [J]. **Soils and Foundations**, 1979, 19(2):79-94
- [4] SYMES M J, SHIBUYA S, HIGHT D W, *et al.* Liquefaction with cyclic principal stress rotation [C] // **Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. San Francisco:[s n], 1985:1919-1922
- [5] YOSHIMINE M, ISHIHARA K, VARGAS W. Effects of principal stress direction and intermediate principal stress on undrained shear behavior of sand [J]. **Soils and Foundations**, 1998, 38(3):179-188
- [6] VAID Y P, UTHAYAKUMAR M, SIVATHAYALAN S. Laboratory testing of syncrude sand [C] // **Proceeding of 48th Canadian Geotechnical Conference**. Vancouver: [s n], 1995: 223-232
- [7] NAKATA Y, HYODO M, MURATA H. Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation [J]. **Soils and Foundations**, JGS, 1998, 38(2):115-128
- [8] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004

- [9] 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)
- [10] 许成顺. 复杂应力条件下饱和砂土剪切特性及本构模型的试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006
- [11] VAID Y P, CHUNG E K F, KEURBIS R H. Stress path and steady state [J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1990, **27**(1):1-7
- [12] 吉嶺充俊. 色々な方法で作成した砂の三軸供試体の非排水せん断時の異方性[EB/OL]. [1999-06-10]. <http://geot.civil.metro-u.ac.jp/~my/publications/jgs01a.pdf>
- [13] 王洪瑾, 张国平, 周克驥. 固有和诱发各向异性对击实粘性土强度和变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(3):1-10

Experimental research on behavior of saturated sand under drained monotonic shearing

LENG Yi^{1,2,3}, LUAN Mao-tian^{*1,2}, XU Cheng-shun⁴, MA Tai-lei^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
4. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The experimental tests of Fujian standard sand with the relative density of 30% and 60% were performed by using the soil static and dynamic universal triaxial and torsional shear apparatus which was developed in Dalian University of Technology. A series of drained monotonic shearing tests were conducted under complex stress conditions with various orientations of principal stress, constant mean principal stress and coefficient of intermediate principal stress. Based on the comparative experimental results, the effects of orientation of principal stresses and relative density on shear strength as well as volumetric characteristics were respectively investigated. It is shown that the drained shear behavior of sands is considerably dependent on the orientation of principal stress. Furthermore, the patterns of the stress-strain relationships are related to the shear stress imposed on the horizontal and vertical planes. It is indicated that the relationship between generalized deviator stress (or the effective friction angle) and orientation of principal stress in phase-transformation state and in peak state can be represented by an empirical parabolic model. Finally, the influence of density on shear behavior is also discussed. Compared with medium-density sand, the shear-contraction phenomenon of loose sand is significant, and the peak resistant-shear strength decreases.

Key words: orientation of principal stress; drained monotonic shearing; phase-transformation state; peak state; effective friction angle