

初始各向异性砂土不排水剪切特性试验研究

罗 强^{*1}, 李晓磊¹, 王忠涛²

(1. 南阳师范学院 土木建筑工程学院, 河南 南阳 473061;

2. 大连理工大学 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 合理运用砂土的毛细特性制备具有水平和竖直沉积方向的松、密砂样, 进行一系列三轴固结不排水剪切试验, 分析沉积方向对砂土偏应力、应力比和孔压的影响, 探讨砂土密实程度与该影响的关系. 研究表明: 沉积方向水平时松砂的偏应力极值比沉积方向竖直时的小, 沉积方向水平时密砂偏应力发展呈应变软化特征, 沉积方向竖直时密砂偏应力发展呈应变硬化特征. 沉积方向水平时松砂应力比数值比沉积方向竖直时的数值小, 沉积方向水平时密砂应力比数值比沉积方向竖直时的数值大. 沉积方向水平时孔压发展速度比沉积方向竖直时的更快. 沉积方向竖直时松砂试样更容易破坏, 沉积方向水平时密砂试样更容易破坏.

关键词: 沉积方向; 毛细效应; 不排水试验; 剪切强度; 初始各向异性

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201906012

0 引言

土的各向异性是指土材料在空间不同方向表现出不同的力学特性. 分析各向异性土的强度及变形, 不仅要考虑外部荷载的影响, 还要考虑材料自身内部强度分布的影响^[1-2]. 土体初始各向异性主要考虑在土体颗粒沉积方向(沉积面与大主应力作用面的夹角)对土体强度的影响^[3]. 李广信^[4]通过真三轴压缩试验结论指出竖向大主应力与沉积面的夹角对应力-应变关系有显著影响. Oda等^[5]在密砂地基中进行条形基础竖向承载力试验, 结果表明沉积面水平时的地基承载力比沉积面竖直时的结果大50%. 相关研究工作表明沉积方向对土体强度的影响在初始各向异性研究领域具有重要意义. 罗强等^[6]通过三轴固结排水剪切试验研究沉积方向对试样强度和体变特性的影响, 建立沉积方向和峰值强度的拟合公式. 宋飞等^[7]采用特殊制样模具和冷冻方法, 制备了沉积方向为水平和竖直的试样, 探索了沉积方向对于砂土渐近状态的影响. 姚仰平等^[8]认为在分析各向异性土的破坏问题中, 需考虑土材料内部的强

度分布, 并指出表观摩擦角最小的情况发生在沉积面与破坏面相重合时.

在海洋土力学研究领域, 往往需要研究海床土体在不排水条件下的剪切强度对海洋构筑物的影响, 例如: 深海滑坡、海底管线、海上风机基础等海洋工程问题, 此时, 研究初始各向异性对土体不排水剪切强度的影响就具备实际工程意义. 为了研究沉积方向对砂土固结不排水剪切特性的影响, 运用砂土的毛细特性制备具有水平和竖直沉积方向的松、密砂样, 进行系列三轴试验, 分析沉积方向对砂土偏应力、应力比和孔压的影响, 探讨砂土密实程度与该影响的关系, 以期对土体初始各向异性理论和工程技术研究提供合理建议.

1 试样制备方法介绍

1.1 沉积方向示意

试样高140 mm, 直径70 mm. 轴向加载应变速率为0.01%/min. 沉积方向 α 在试样中的分布如图1所示, α 分别取0°、90°.

1.2 试验材料

试验所用福建标准砂的基本参数如下: $G_s =$

2.627; 颗粒尺寸 $d_{10}=0.068\text{ mm}$, $d_{50}=0.117\text{ mm}$, 不均匀系数 $C_u=2.12$, $e_{\max}=0.913$, $e_{\min}=0.583$, D_r 分别取 40% 和 80%. 颗粒级配曲线如图 2 所示.

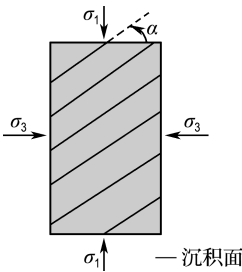


图 1 试样沉积方向示意

Fig. 1 Schematic of sedimentary direction of sample

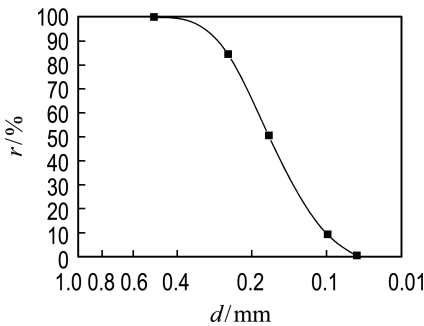


图 2 颗粒级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of particle

1.3 制样方法

采用砂雨法装样设备将砂粒均匀撒落到模型箱内,通过控制砂粒的流速、落距及喷撒路径,能够有效控制试样的相对密度,详见文献[9].在撒砂过程中,粗、细颗粒在自重作用下均匀分布成层状结构.由于试验所用砂土颗粒大多呈现较规则圆形状,粗颗粒形成骨架,细颗粒填充粗颗粒间的间隙.撒砂结束后,将模型箱放入水槽中.砂土颗粒间的毛细效应能够产生毛细张力,引起颗粒存在假凝聚力^[6].试验研究发现,毛细效应在细砂制样过程中效果比较好;如果采用粗砂制样,则效果略差,需要辅助采用冷冻技术对试样进行处理,详见文献[6].

砂土在模型箱内的沉积方向是水平的($\alpha=0^\circ$).预先设定好试样所用沉积方向 α ,然后,沿着与水平方向呈夹角 $(90^\circ-\alpha)$ 的方向取样,那么,在试样内沉积方向为 α .

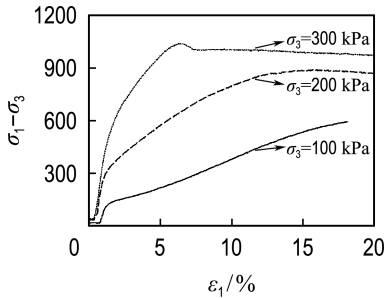
将试样固定在三轴剪切仪的围压室内,对试样

内部通 CO_2 ,然后,逐级施加反压达到 300 kPa ^[10].对试样进行 B 值检测,饱和度达到 0.98 以上.

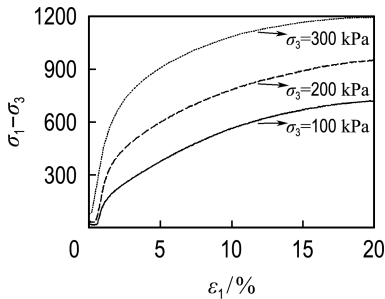
2 松砂($D_r=40\%$)试验结果分析

2.1 沉积方向对偏应力的影响

在不同围压下,沉积方向水平和竖直时的偏应力变化规律如图 3 所示.



(a) $\alpha=0^\circ$



(b) $\alpha=90^\circ$

图 3 松砂偏应力-应变关系

Fig. 3 Deviation stress-strain relation of loose sand

由图 3 可知:(1)沉积方向水平($\alpha=0^\circ$)时,偏应力-应变关系的发展趋势大致分为 3 个阶段.第 1 阶段为弹性变形阶段,关系曲线斜率较大,偏应力增长速度较快.第 2 阶段为弹塑性变形阶段,关系曲线斜率明显减小,偏应力增长速度变慢.第 3 阶段为极限阶段,偏应力达到极限强度.(2)沉积方向竖直($\alpha=90^\circ$)时,偏应力-应变关系大致分 2 个阶段.第 1 阶段为弹性变形阶段;第 2 阶段为弹塑性变形阶段,后者的斜率比前者低,关系曲线没有明显的水平拐点,偏应力没有达到极值.(3)沉积方向水平($\alpha=0^\circ$)时,大主应力方向与沉积面相垂直,颗粒之间的挤压作用在剪切过程中比较显著,试样内部逐渐形成稳定的剪切破坏面,偏应力能够达到稳定的极值.(4)沉积方向竖直($\alpha=90^\circ$)时,大主应力方向与沉积面相平行,试样更容易达到破坏状态.在剪切过程中,砂土颗粒间不但有挤

压作用,还伴随着相邻沉积面间的错动,导致试样内的剪切破坏面不稳定,偏应力一直在缓慢增长,较难达到极值。

不同沉积方向下的偏应力-应变关系对比如图 4 所示。

由图 4 可知:(1)低围压条件下($\sigma_3=100\text{ kPa}$),沉积方向竖直时的偏应力发展速度比水平的快,前者的偏应力大于后者。在中围压条件下($\sigma_3=200\text{ kPa}$),两种沉积方向的偏应力发展趋势非常接近。在高围压条件下($\sigma_3=300\text{ kPa}$),两种

沉积方向的偏应力差异随着变形的发展而增加。(2)围压越大,砂土颗粒间的相互挤压作用越显著,颗粒错动越困难,沉积方向对偏应力的影响就越小。在低围压条件下,由于颗粒错动比较显著,沉积面间更容易发生相对移动,松砂试样的剪缩特性更容易发挥,因此,沉积方向竖直时的偏应力发展速度更快。

2.2 沉积方向对应力比的影响

在不同围压条件下,沉积方向水平和竖直时的应力比变化规律如图 5 所示。

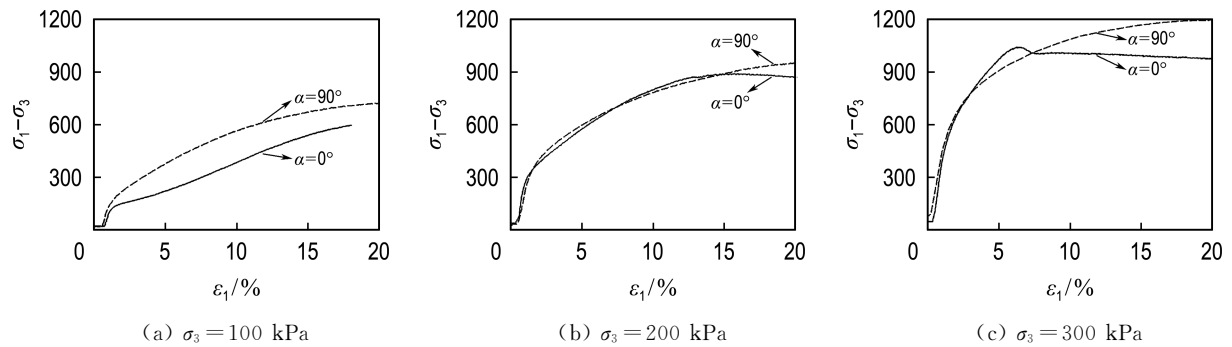


图 4 松砂偏应力-应变关系对比

Fig. 4 Comparison of deviation stress-strain relation of loose sand

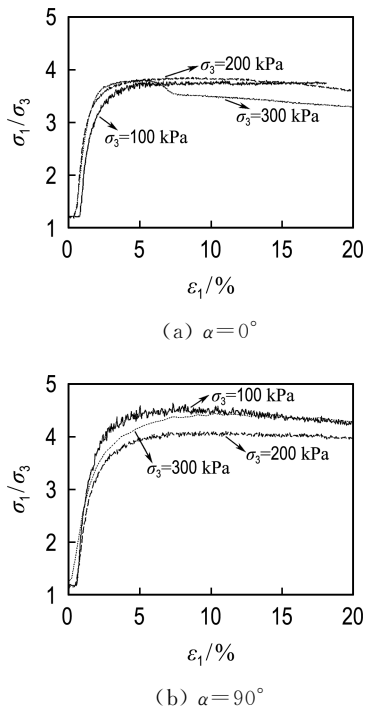


图 5 松砂应力比-应变关系

Fig. 5 Stress ratio and strain relation of loose sand

由图 5 可知:(1)沉积方向水平($\alpha=0^\circ$)时,在轴向应变达到 7%之前,不同围压条件下的应力比很接近。沉积方向竖直($\alpha=90^\circ$)时,围压对应力比的影响比较显著。(2)沉积方向水平时,砂粒在剪切过程中主要发生旋转,错动不显著,围压变化对砂粒的旋转影响不大,因此,沉积方向对应力比的影响不明显。然而,当沉积方向竖直时,不同沉积面间的错动比较明显,围压变化对颗粒错动的径向约束比较显著,因此,应力比受到沉积方向的影响比较显著。

不同沉积方向下松砂应力比-应变关系对比如图 6 所示。

由图 6 可知:(1)在轴向应变达到 2%之前,沉积方向对应力比的影响不显著;轴向应变达到 2%以后,这种影响逐渐明显。(2)沉积方向水平的应力比极值要比沉积方向竖直时的低一些。其原因在于,沉积方向竖直时试样颗粒错动导致体积压缩显著增加,试样强度也随之提高,在相同围压条件下,其剪切过程中所需要的大主应力也要大于沉积方向水平时的数值。

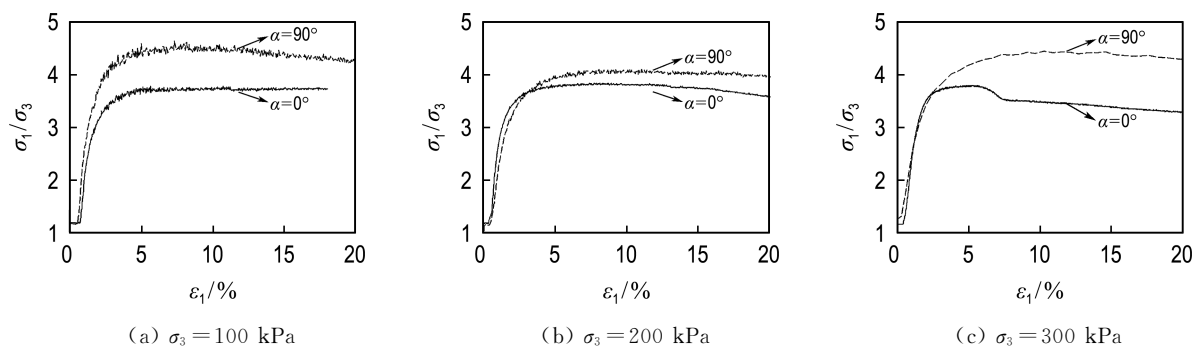


图 6 松砂应力比-应变关系对比

Fig. 6 Comparison of stress ratio and strain relation of loose sand

2.3 沉积方向对孔压的影响

在不同围压下,沉积方向水平和竖直时的孔压变化规律如图 7 所示。

由图 7 可知:(1)当沉积方向水平时,随着围压的增加,在变形初期的增长速度逐渐变大,孔压在变形中后期的减小速度也逐渐变大.当轴向应变达到 17%以后,不同围压下的孔压极值比较接近。(2)当沉积方向竖直时,孔压在变形初期的增长速度受到围压的影响非常微弱;在变形的中后期,中、低围压时的孔压减小趋势非常接近,均低于高围压时的孔压,这种差异随着变形的增加而显著。

不同沉积方向下松砂孔压-应变关系对比如图 8 所示。

由图 8 可知:(1)在低围压条件下,沉积方向水平时的孔压发展趋势要滞后于沉积方向竖直时的.在中、高围压条件下,沉积方向水平时的孔压发展趋势要比沉积方向竖直时的略快。(2)随着围压的增加,沉积方向对孔压变化规律(发展速度和极值)的影响逐渐增强。

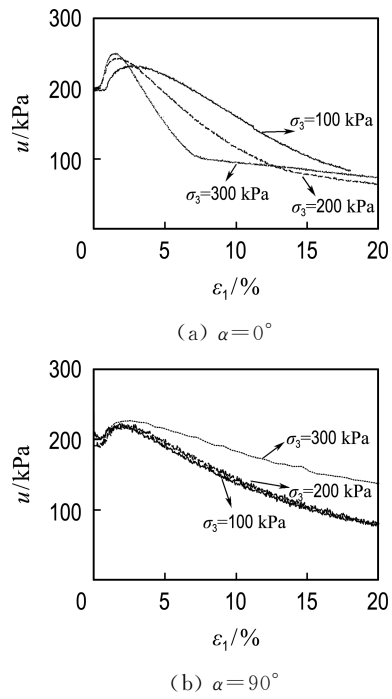


图 7 松砂孔压-应变关系

Fig. 7 Pore pressure and strain relation of loose sand

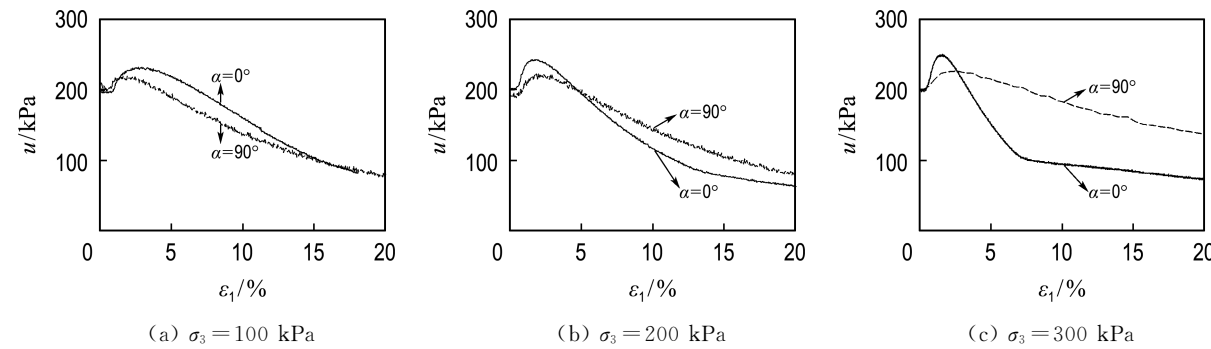


图 8 松砂孔压-应变关系对比

Fig. 8 Comparison of pore pressure and strain relation of loose sand

3 密砂($D_r=80\%$)试验结果分析

3.1 沉积方向对偏应力的影响

不同围压条件下,沉积方向水平和竖直时的偏应力变化规律如图 9 所示.

由图 9 可知:(1)当沉积方向水平($\alpha=0^\circ$)时,偏应力-应变关系呈明显的应变软化特性,偏应力在达到极值强度后出现一个短暂的下降段,然后达到稳定的残余强度.随着围压的增加,试样初始密实程度进一步提高,强度发挥的更早,偏应力达到极值强度和残余强度就更快.(2)当沉积方向竖直($\alpha=90^\circ$)时,偏应力-应变关系不再呈现应变软化特征,具备应变硬化的特性.其原因在于,砂粒在竖直方向的错动容易发生,导致密砂试样的体积变化仍有较大可压缩量,强度仍有较大发挥余地,因此,这种砂粒错动导致其偏应力发展具备了应变硬化特性.

不同沉积方向下的偏应力-应变关系对比如图 10 所示.

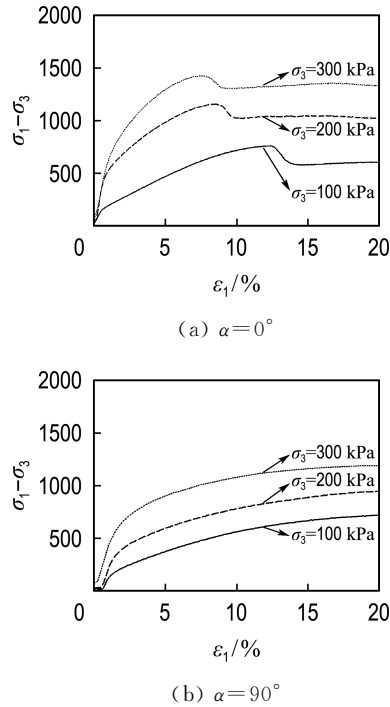


图 9 密砂偏应力-应变关系
Fig. 9 Deviation stress and strain relation of dense sand

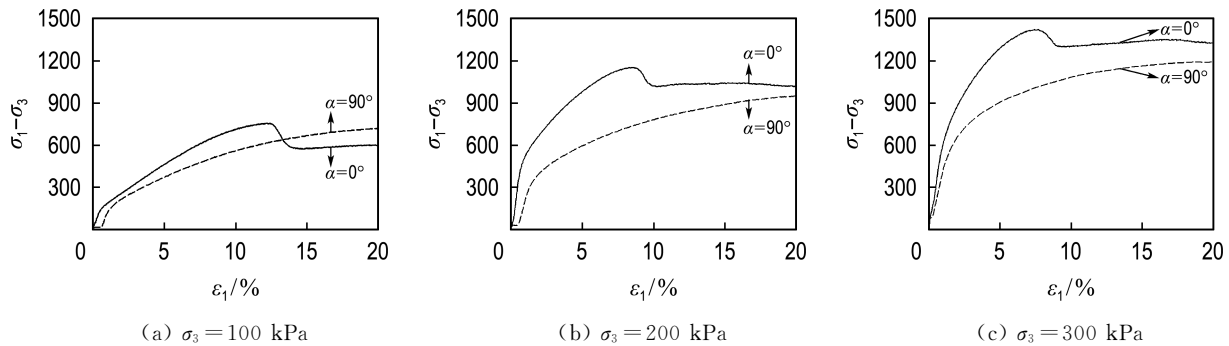


图 10 密砂偏应力-应变关系对比
Fig. 10 Comparison of deviation stress and strain relation of dense sand

由图 10 可知:(1)沉积方向水平时的偏应力增长速度比沉积方向竖直时的更快.沉积方向水平时,密砂试样的初始密实状态与承载力极限状态时的密实状态比较接近,砂粒错动不明显,试样强度发挥比较充分;然而,沉积方向竖直时,砂粒错动导致试样初始密实状态发生改变(变松),试样在剪切过程中需要进一步发生体积压缩,强度发挥较慢.(2)在低围压条件下,沉积方向竖直时的偏应力比沉积方向水平时的残余强度高,比后者极值强度低.在中、高围压条件下,沉积方向竖直时的偏应力不断向后者的残余强度靠近.

3.2 沉积方向对应力比的影响

在不同围压条件下,沉积方向水平和竖直时的应力比变化规律如图 11 所示.

由图 11 可知:(1)当沉积方向水平时,由于密砂的偏应力-应变关系具有应变软化特征,应力比-应变关系也呈现软化特征.(2)当沉积方向竖直时,偏应力-应变关系具备应变硬化的特性,因此,应力比-应变关系达到极值状态后保持稳定.

不同沉积方向条件下密砂应力比-应变关系对比如图 12 所示.

由图 12 可知:(1)在低围压条件下,轴向应变

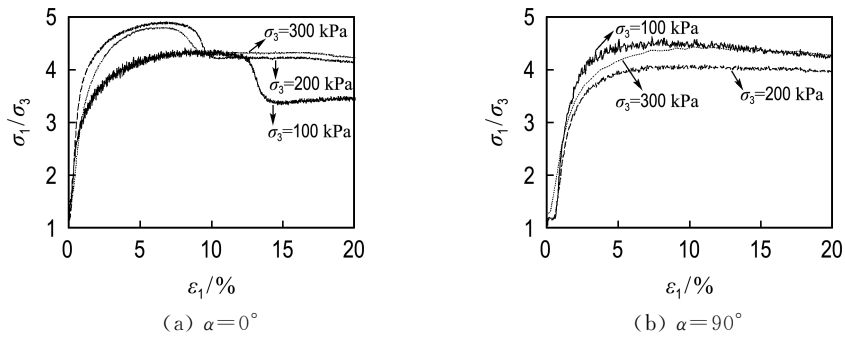


图 11 密砂应力比-应变关系

Fig. 11 Stress ratio and strain relation of dense sand

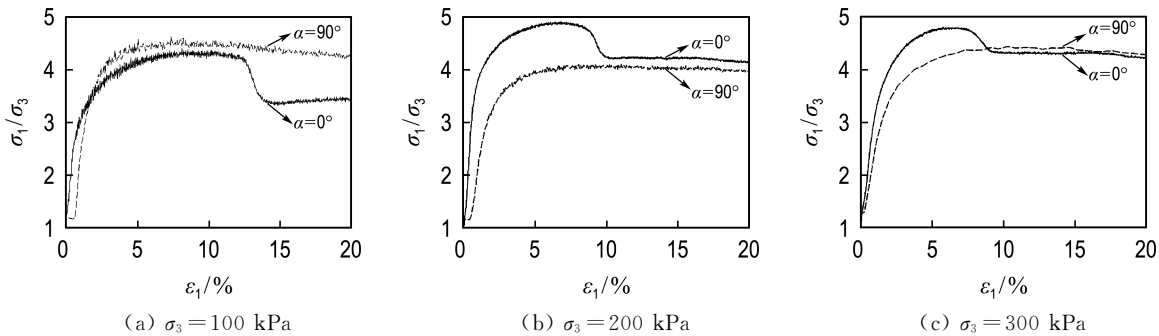


图 12 密砂应力比-应变关系对比

Fig. 12 Comparison of stress ratio and strain relation of dense sand

达到 12% 之前,不同沉积方向的应力比数值比较接近.在轴向应变达到 12% 以后,沉积方向水平时的应力比开始进入残余状态,而沉积方向竖直时的应力比仍然保持稳定,两者的差异逐渐增加.

(2)在中、高围压条件下,沉积方向的变化对应力比的影响主要集中在轴向应变达到 10% 之前,同时,沉积方向水平时的应力比发展速度要比沉积方向竖直时的更快.当轴向应变达到 10% 以后,沉积方向水平时的应力比达到了残余状态,而沉积方向竖直时的应力比仍然处于极值状态,两者的数值比较接近.

3.3 沉积方向对孔压的影响

在不同围压条件下,沉积方向水平和竖直时的孔压变化规律如图 13 所示.

由图 13 可知:沉积方向水平时,密砂试样偏应力具有应变软化特性,在试样达到极值状态前孔压不断减小;当试样向残余状态变化时,偏应力迅速减小后保持稳定,孔压也不再变化,试样保持着稳定的残余状态.沉积方向竖直时,砂粒错动导致试样进一步发生体积压缩,偏应力处于增长状态,孔压相应地始终处于减小状态,表明试样没有达到稳定的极限状态.

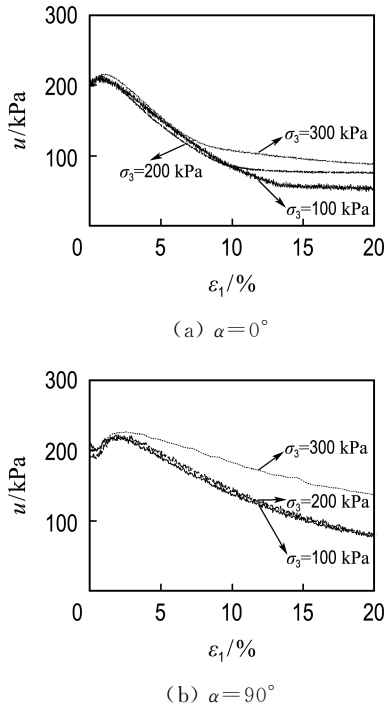


图 13 密砂孔压-应变关系

Fig. 13 Pore pressure and strain relation of dense sand

不同围压条件下,沉积方向对孔压的影响如图 14 所示.

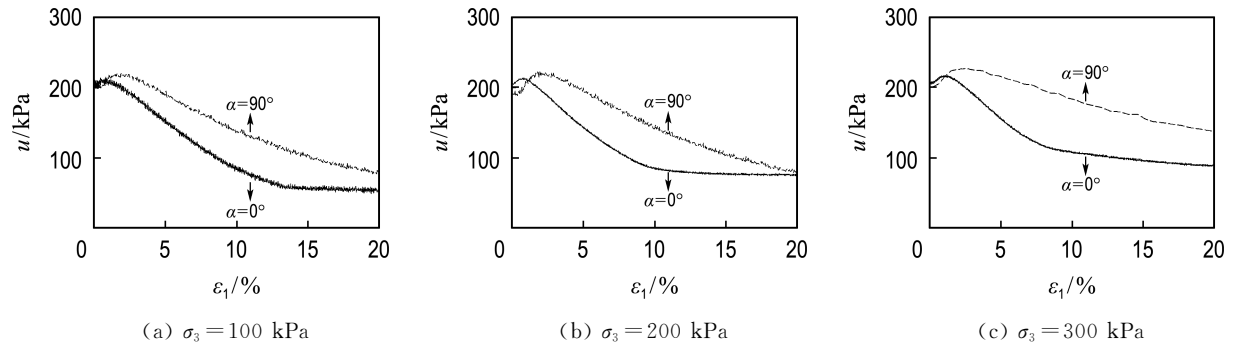


图 14 密砂孔压-应变关系对比

Fig. 14 Comparison of pore pressure and strain relation of dense sand

由图 14 可知：(1)沉积方向水平时孔压达到极值状态的速度要比沉积方向竖直时更快. 其原因在于,沉积方向水平时试样初始密实状态与极限状态比较接近,强度发挥比较充分,因此,孔压变化也更快更稳定. 沉积方向竖直时,砂粒错动导致试样体积压缩量更大,孔压变化速度减慢. (2)随着围压的增加,沉积方向对试样偏应力、体积变化的影响更显著,导致两种沉积方向的孔压差异逐渐变大.

4 松、密砂试验结果对比分析

以沉积方向水平的试验结果为基准,计算沉积方向竖直时的结果与前者的差异百分比 R ,如图 15~17 所示.

由图 15~17 可知：(1)在低围压条件下,沉积方向由水平向竖直变化时,砂粒竖向错动逐渐显著,引起试样体积变化和强度发挥程度发生改变,因此,沉积方向对偏应力的影响比较显著. 随着围

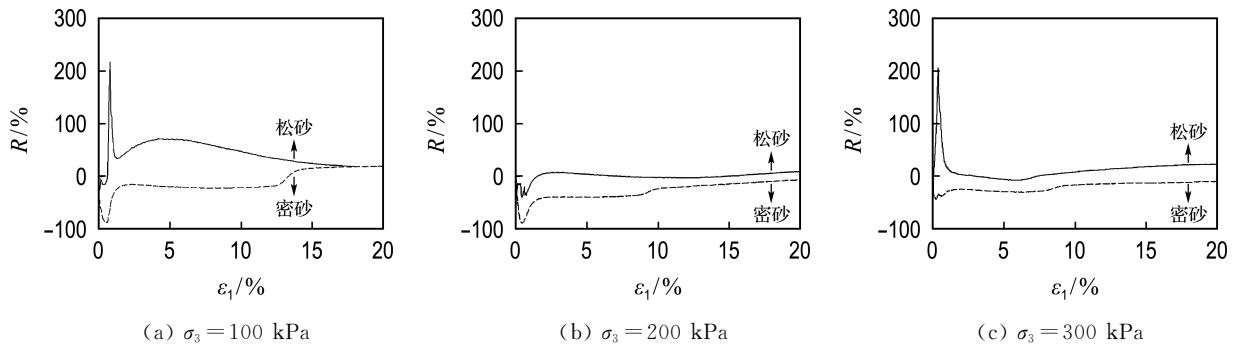


图 15 沉积方向对偏应力的影响

Fig. 15 Effect of sedimentary direction on deviation stress

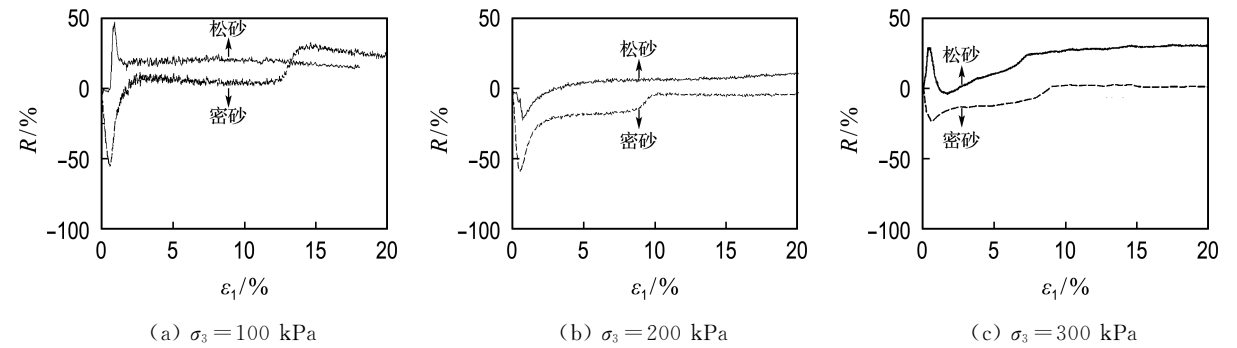


图 16 沉积方向对应力比的影响

Fig. 16 Effect of sedimentary direction on stress ratio

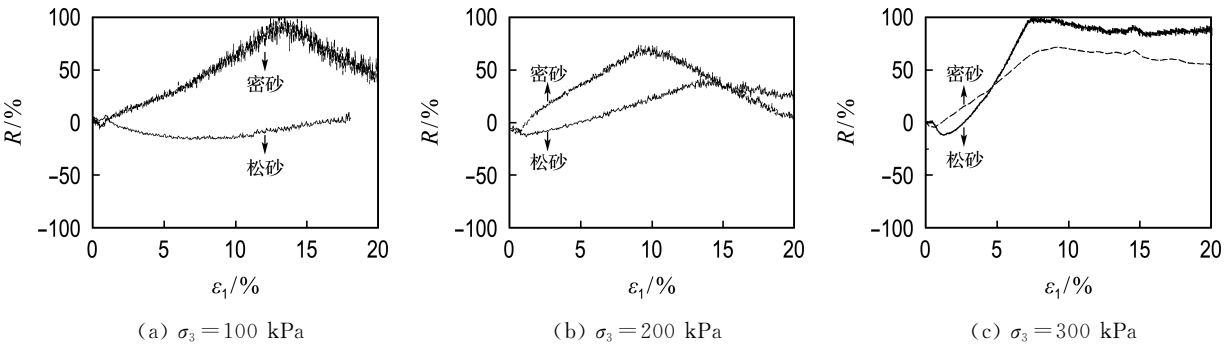


图 17 沉积方向对孔压的影响

Fig. 17 Effect of sedimentary direction on pore pressure

压的增加,砂粒受到径向约束逐渐增加,其竖向错动更加困难,导致沉积方向对偏应力的影响逐渐减小。(2)沉积方向对松砂应力比的影响在低、高围压状态下比较明显。随着围压的增加,沉积方向对密砂应力比的影响逐渐减弱。(3)沉积方向对松砂孔压的影响随着围压的增加而变强。然而,沉积方向对密砂孔压的影响随着围压的增加而变弱。

5 结 论

(1)对松砂而言,沉积方向水平时的偏应力有明显的极值,沉积方向竖直时砂土偏应力始终处于增长状态,且比沉积方向水平时的偏应力略大。对密砂而言,沉积方向水平时偏应力发展呈应变软化特征,沉积方向竖直时偏应力发展呈应变硬化特征,同时,前者的发展速度比后者更快,前者的极值比后者更大。

(2)沉积方向的变化对松砂应力比的影响比较明显。松砂状态时,沉积方向竖直时的应力比数值比沉积方向水平时的数值稍大。密砂状态时,沉积方向竖直时的应力比数值比沉积方向水平时的数值略小。

(3)沉积方向水平时,孔压-应变关系曲线有明显的拐点,沉积方向竖直时则没有该拐点。对松砂而言,在中、高围压状态下,沉积方向水平时孔压的发展速度比沉积方向竖直时的更快,这种差异在低围压状态下较弱。对密砂而言,沉积方向水平时的孔压发展速度比沉积方向竖直时的更快,且孔压变化幅度更大。

(4)随着砂土密实程度的变化,沉积方向对砂土不排水剪切强度的影响也在发生变化。松砂状态下,沉积方向竖直时试样更容易达到破坏状态。密砂状态下,沉积方向水平时更容易达到破坏。

参考文献:

[1] YAO Yangping, KONG Yuxia. Extended UH model: Three-dimensional unified hardening model for anisotropic clays [J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2012, **138**(7): 853-866.

[2] 罗汀,田新国,姚仰平,等. 土的三维渐近状态准则 [J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(5): 792-796. LUO Ting, TIAN Xinguo, YAO Yangping, *et al.* Three-dimensional asymptotic state criterion for soils [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, **33**(5): 792-796. (in Chinese)

[3] DUCAN J M, SEED H B. Strength variation along failure surfaces in clay [J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1966, **SM6**: 81-104.

[4] 李广信. 高等土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016. LI Guangxin. **Advanced Soil Mechanics** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese)

[5] ODA M, KOISHIKAWA I. Effect of strength anisotropy on bearing capacity of shallow footing in a dense sand [J]. **Soils and Foundations**, 1979, **19**(3): 15-28.

[6] 罗强,汤振,王忠涛,等. 沉积方向对密砂固结排水剪切强度的影响研究 [J]. 力学与实践, 2019, **41**(2): 164-170. LUO Qiang, TANG Zhen, WANG Zhongtao, *et al.* Influence of sedimentary direction on shear strength of saturated dense sand in consolidated drained triaxial test [J]. **Mechanics in Engineering**, 2019, **41**(2): 164-170. (in Chinese)

[7] 宋飞,张建民. 各向异性砂土渐近状态试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(4): 551-561.

SONG Fei, ZHANG Jianmin, Experimental study on asymptotic behaviour of anisotropic sand [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, **32**(4): 551-561. (in Chinese)

[8] 姚仰平,祝恩阳. 横观各向同性土的简明破坏机制解释 [J]. 岩土力学, 2014, **35**(2): 328-333.

YAO Yangping, ZHU Enyang. Concise interpretation of damage mechanism for cross-anisotropic soil [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, **35**(2): 328-333. (in Chinese)

[9] 曾虹静,王忠涛,罗 强,等. 自制砂土装样设备及其控制要素分析 [J]. 人民长江, 2012, **43**(11): 66-70.

ZENG Hongjing, WANG Zhongtao, LUO Qiang, *et al.* Introduction to a new sand pourer and its control element analysis [J]. **Yangtze River**, 2012, **43**(11): 66-70. (in Chinese)

[10] 许成顺,耿 琳,杜修力,等. 反压对土体强度特性的影响试验研究及其影响机理分析 [J]. 土木工程学报, 2016, **49**(3): 105-111.

XU Chengshun, GENG Lin, DU Xiuli, *et al.* Effect of back pressure on shear strength of sand: Experimental study and mechanism analysis [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2016, **49**(3): 105-111. (in Chinese)

Experimental study of shear behavior of inherent anisotropy sand in undrained condition

LUO Qiang^{*1}, LI Xiaolei¹, WANG Zhongtao²

(1.Academy of Civil Engineering and Architecture, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China;
2. Institute of Geotechnical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The capillary effect of sand is used to prepare loose and dense sand sample with horizontal and vertical sedimentary directions. A series of triaxial shear tests in undrained condition are performed to study sedimentary direction's influence on the deviation stress, stress ratio and pore pressure, and the relation between former influence and relative density is also discussed. The study results show that the deviation stress's peak value of loose sand with horizontal sedimentary direction is lower than that with vertical sedimentary direction. The deviation stress development of dense sand performs a strain softening characteristic when the sedimentary direction is horizontal, and the deviation stress development of dense sand performs a strain hardening characteristic when the sedimentary direction is vertical. The stress ratio of loose sand in the condition of horizontal sedimentary direction is lower than that in the condition of vertical sedimentary direction. The stress ratio of dense sand in the condition of horizontal sedimentary direction is bigger than that in the condition of vertical sedimentary direction. The pore pressure in the condition of horizontal sedimentary direction develops faster than that in the condition of vertical sedimentary direction. The loose sand sample is easy to reach failure stage with vertical sedimentary direction, and the dense sand sample is easy to reach failure stage with horizontal sedimentary direction.

Key words: sedimentary direction; capillary effect; undrained test; shearing strength; inherent anisotropy