

DOI: 10.11779/CJGE201906008

# 初始静孔隙水压力对砂土静动力剪切特性影响的试验研究

许成顺<sup>1</sup>, 李艳梅<sup>1,2</sup>, 潘 霞<sup>1</sup>, 耿 琳<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 荣盛建筑设计有限公司, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 选取福建标准砂和滹沱河细砂, 利用空心圆柱扭剪仪开展了一系列不同初始静孔隙水压力条件下的不排水循环扭剪试验和单调扭剪试验, 着重探讨初始静孔隙水压力对超静孔隙水压力发展及其不排水抗剪强度的影响。试验结果表明: 初始静孔隙水压力对超静孔隙水压力的发展产生显著的影响, 从而影响砂土的静动力剪切特性。具体地, 在不排水循环剪切过程中, 初始静孔隙水压力越大, 其超静孔隙水压力发展和变形发展越快; 在不排水单调剪切过程中, 初始静孔隙水压力越大, 在砂土剪胀阶段产生负超静孔隙水压力越大, 从而使砂土的强度显著提高。基于试验结果, 初步探讨了初始静孔隙水压力对超静孔隙水压力及静动力剪切特性的影响机理。研究表明, 研究地下水位以下土体(准饱和土)静动力剪切特性尤其是研究液化问题时, 应充分考虑初始静孔隙水压力对砂土抗液化强度的影响, 室内试验应根据砂土所处的地下水位深度来决定初始静孔隙水压力(反压)的大小。

**关键词:** 初始静孔隙水压力; 循环扭剪; 单调剪切; 超静孔隙水压力; 反压

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)06-1050-08

**作者简介:** 许成顺(1977—), 女, 黑龙江海林人, 教授, 主要从事岩土力学基础理论与试验研究。E-mail: xuchengshun@bjut.edu.cn。

## Experimental study on effect of initial static pore water pressure on static and dynamic shear properties of sand

XU Cheng-shun<sup>1</sup>, LI Yan-mei<sup>1,2</sup>, PAN Xia<sup>1</sup>, GENG Lin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. RiseSun Architectural Design Co., Ltd., Langfang 065000, China)

**Abstract:** A series of undrained cyclic torsional shear tests and monotonic torsional shear tests are carried out on Fujian standard sand and Hutuo River fine sand under different initial static pore water pressures by using the hollow cylinder torsional shear apparatus in order to emphatically discuss the effects of the initial static pore water pressure on the development of the excess pore water pressure and undrained shear strength. The experimental results show that the initial static pore water pressure has a significant effect on the development of the excess pore water pressure, which affects the static and dynamic shear characteristics of sand. Specifically, during the undrained cyclic shear process, the greater initial static pore water pressure leads to the faster development of the excess pore water pressure and deformation. During the undrained monotonic shearing process, the greater the initial static pore water pressure, the greater the negative excess pore water pressure during the sand dilatancy, which significantly increases the strength of the sand. Based on the test results, the mechanism of the influences of the initial static pore water pressure on the excess pore water pressure and static and dynamic shear characteristics is preliminarily discussed. According to the results, the influences of the initial static pore water pressure on the anti-liquefaction strength of sand should be fully considered when we investigate the static and dynamic shear characteristics of soil (partially saturated soil) below the groundwater table, especially the liquefaction problem. In laboratory tests, the initial static pore water pressure (back pressure) should be determined according to the depth of underground water level where the sand is located.

**Key words:** initial static pore water pressure; cyclic shear; monotonic shear; excess pore water pressure; back pressure

## 0 引言

一般认为地下水位以下的土体处于完全饱和状

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金项目(51722801); 国家自然科学基金项目(51578026)

收稿日期: 2018-05-02

态, 因此利用室内试验方法研究饱和土体力学特性时, 为了提高试样的饱和度, 经常采用反压饱和法。反压饱和法的原理是通过试样体内外同时施加压力, 在确保试样有效应力不变的情况下, 使试样体内气体体积减小或溶解于水中, 从而提高试样饱和度。由于施加反压过程中土体有效应力并未发生变化, 认为反压大小并不影响土体剪切特性, 因此《土工试验方法标准》中对反压的大小并未做规定, 所施加的反压的大小主要取决于满足饱和度要求, 在实际试验操作过程中, 反压的取值在 0~900 kPa 之间大小不等。

关于反压对土体剪切特性的影响, 国内外也有相关学者开展了试验研究并对其机理进行了分析。Brand 等<sup>[1]</sup>, Helen Ahnberg 等<sup>[2]</sup>, Allam 等<sup>[3]</sup>针对黏土开展了不同反压下的三轴试验, 试验结果表明当反压不同时, 试样表现出不同的应力-应变特性, 反压对孔隙水压力的发展及抗剪强度有重大影响。黄博等<sup>[4]</sup>的试验结果表明, 不排水条件下, 反压对砂土应力-应变关系及孔隙水压力发展有重要影响, 而在排水条件下, 反压对砂土抗剪强度基本无影响。在海洋岩土工程研究中, Hyodo 等<sup>[5]</sup>和 Miyazaki 等<sup>[6]</sup>通过饱和试样在不同反压下的动三轴试验, 发现当有效围压相同时, 能源土在不同反压下的抗剪强度并不相等, 而有随反压的增加呈增长的趋势。蒋明镜等<sup>[7]</sup>利用离散元对深海砂土力学性质进行数值模拟, 结果表明反压对能源土力学特性具有显著影响, 认为反压对能源土力学特性的影响与水合物作用相关。目前反压对土体剪切特性的影响及其影响机理方面的研究成果并不多见, 且现有的研究多为静力特性研究, 影响机理方面主要从能源土的黏结效应出发进行分析。

实际上, 施加在土体中的反压具有明确的物理意义, 它代表初始静孔隙水压力, 且土体初始静孔隙水压力随水深而改变, 即施加在土体中的反压其实质是反映不同水深的初始静水压力。另一方面, 自然界并不存在完全意义上的饱和土, 即使是处于地下水位以下的砂土也一般为准饱和土, 是由土颗粒、水和气体组成的三相介质。准饱和土骨架孔隙中的水能连续流动, 气体不连续, 只能以气泡的形式分布于土体孔隙中, 土处于气封闭(水敞开)状态, 土体中的液相实际上是气液混合体, 其体积模量并非无穷大。准饱和土中初始静孔隙水压力较大时, 气泡相对较小, 气液混合体可压缩性小, 体积模量较大, 反之, 其气液混合体体积模量较小。而气液混合体体积模量对超静孔隙水压力发展必然产生重要影响。

而目前的室内饱和度测试方法很难准确反映准饱和土的饱和度。因此对于准饱和土, 从初始静孔隙水

压力对气液混合体体积模量的影响角度考虑其对超静孔隙水压力及其静动力剪切特性的影响, 可能比从饱和度的角度讨论更为合适。

有关反压(或初始静孔隙水压力)对土体强度的影响, 目前试验成果及其影响机理研究较少, 从初始静孔隙水压力对气液混合体体积模量的角度分析更少。为了研究初始静孔隙水压力对超静孔隙水压力发展和静动力剪切特性的影响及其机理, 本文针对福建标准砂和滹沱河细砂, 利用空心圆柱扭剪仪<sup>[8]</sup>进行了不同初始静孔隙水压力条件下的固结不排水循环扭剪试验和单调扭剪试验, 试为完善土工室内试验方法和研究砂土液化等问题提供重要参考。

## 1 试验设计

### 1.1 试验土料

本文试验采用福建标准砂和石家庄滹沱河两岸细砂两种土样。福建标准砂相对密度  $G_s=2.643$ ; 颗粒尺寸  $d_{50}=0.34 \text{ mm}$ ; 不均匀系数  $G_u=1.542$ ; 最大和最小孔隙比分别为 0.848, 0.519; 最大和最小干密度分别为  $1.74, 1.43 \text{ g/cm}^3$ 。石家庄滹沱河两岸细砂最大和最小干密度分别为  $1.7, 1.37 \text{ g/cm}^3$ , 两种砂土的颗粒级配曲线如图 1 所示。

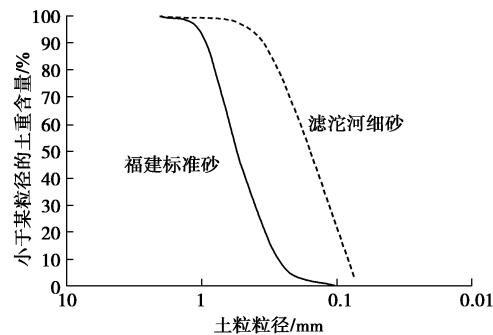


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves

### 1.2 试样制备及饱和

本试验采用空心圆柱扭剪仪, 可进行单调扭剪试验、循环扭剪试验和循环三轴试验等多种试验。试样体外径和内径分别为 100, 60 mm, 高度为 150 mm, 空心圆柱试样及其应力状态如图 2 所示<sup>[8]</sup>。

试样采用干装法制样。首先根据所设计的密度称取一定质量的烘干砂土均匀装入成模筒内, 并用-20 kPa 的压力使干砂试样成型。之后试样体内外室注入无气水, 并施加 30 kPa 的压力, 撤去-20 kPa 的压力, 使干砂试样在 30 kPa 围压作用下完全成型。

随后对试样体内部依次通入 CO<sub>2</sub>、无气水和施加反压(初始静孔隙水压力)进行饱和。之后在不排水



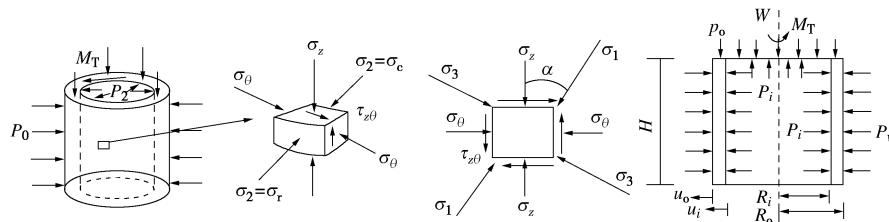


图 2 空心圆柱试样的应力状态

Fig. 2 Stress conditions of soil element in hollow-cylinder soil sample

条件下施加 50 kPa 的围压，并观察超静孔隙水压力的变化，从而测定饱和度，本文试验饱和度值均达到 92% 以上，即土体均达到准饱和状态<sup>[9]</sup>。

### 1.3 试验方案

为了探讨不同初始静孔隙水压力对砂土静动力剪切特性的影响，针对福建标准砂和石家庄滹沱河两岸细砂，进行了不排水循环扭剪试验和单调扭剪试验，相应的试验方案分别如表 1、2 所示，其中循环荷载加载频率均为  $f = 0.1 \text{ Hz}$ 。需要说明的是，本文进行的 23 组试验，其试样体均在各向均等的 100 kPa 压力下完成固结，并均采用纯扭剪试验，加载过程中总应力保持不变，因此，无论是在循环扭剪还是单调扭剪过程中所产生的超静孔隙水压力均由土体的剪胀剪缩特性引起，这不同于以往的三轴剪切试验。

表 1 循环扭剪试验方案

Table 1 Test plans under cyclic shear

砂土	初始静孔隙水压力 /kPa	相对密实度	剪应力幅值 /kPa
福建标准砂	0	0.70	24.3
	100		24.3
	200		24.3
	300		24.3
	400		24.3
	500		24.3
细砂	0	0.35	14.6
	100		14.6
	200		14.6
	300		14.6
	400		14.6
	500		14.6
	600		14.6

## 2 试验结果分析

### 2.1 循环扭剪试验结果分析

图 3~6 表示不同初始静孔隙水压力条件下的不排水循环扭剪试验结果。图中  $\Delta u$  表示超静孔隙水压力， $u_0$  表示初始静孔隙水压力（反压）， $p_0$  表示初始固结压力， $p'$  表示有效应力， $\gamma$  表示剪应变， $\tau$  表示剪

应力。

表 2 单调剪切试验方案

Table 2 Test plans under monotonic shear

砂土	初始静孔隙水压力/kPa	相对密实度
细砂	0	0.30
	100	
	200	
	300	
福建标准砂	0	0.30
	100	
	200	
	300	
	500	
	500	

图 3,4 分别表示福建标准砂和滹沱河细砂在初始固结压力  $p_0=100 \text{ kPa}$ ，初始静孔隙水压力  $u_0$  分别为 0, 200, 500 kPa 时的实测剪应力、剪应变、超静孔隙水压力时程曲线以及有效应力路径和第 75 次循环荷载作用下的应力 - 应变关系（细砂为第 50 次）。

对比图 3,4 可知，福建标准砂和细砂在循环荷载作用下表现出显著不同的特性。福建标准砂由于密实度较高，且颗粒尺寸相对较大，其剪胀特性明显，超静孔隙水压力波动幅度较大，即使发生初始液化以后，仍然能承受一定循环荷载，且即使变形发展相对较大，仍能承担较大荷载。而细砂则表现出明显的剪缩特性，发生液化以后超静孔隙水压力始终与有效固结围压相等，液化瞬间变形发展迅速，且不能再承受循环荷载。

值得注意的是：①无论是标准砂还是细砂，在不同初始静孔隙水压力条件下，发生液化所需要的循环荷载的作用次数明显不同，以细砂为例，当初始静孔隙水压力为 0, 200, 500 kPa 时，发生液化所需要的循环荷载作用次数分别为 170 次、80 次和 25 次；以标准砂为例，初始静孔隙水压力为 0 kPa 时发生液化所需振次为 150 左右，而初始静孔隙水压力为 200, 500 kPa 时液化所需振次分别为 90 次和 40 次左右，且以  $N=50$  次（或  $N=75$  次）为例，当初始静孔隙水压力不同时，在循环荷载作用下其应力 - 应变关系具有很

大的差异; ②无论是标准砂还是细砂, 当初始静孔隙水压力不同时, 虽然液化所需要的循环荷载作用次数

不同, 但最终均能达到液化状态, 说明准饱和土在一定循环荷载作用下均能发生液化, 只是发生液化所需

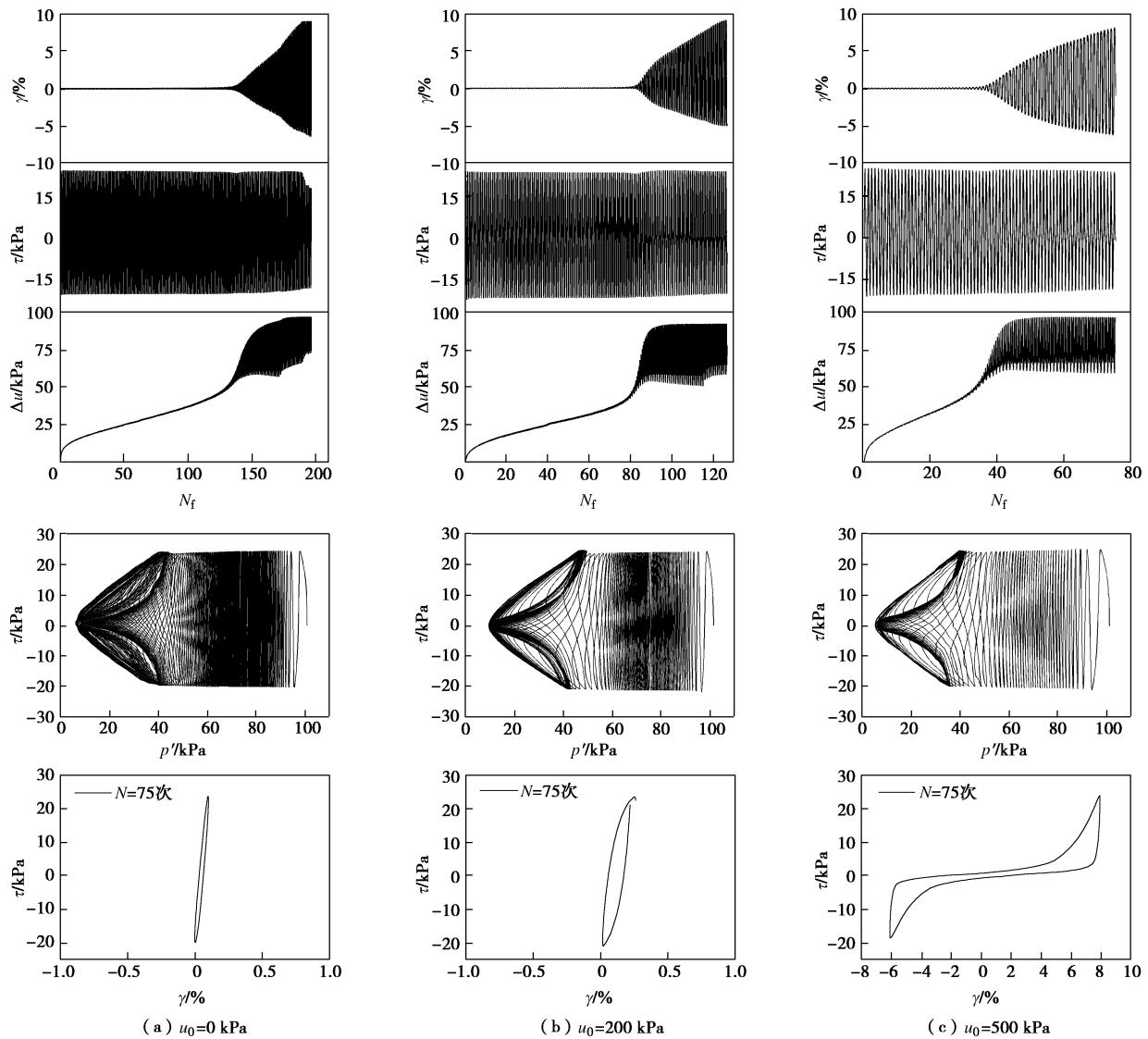
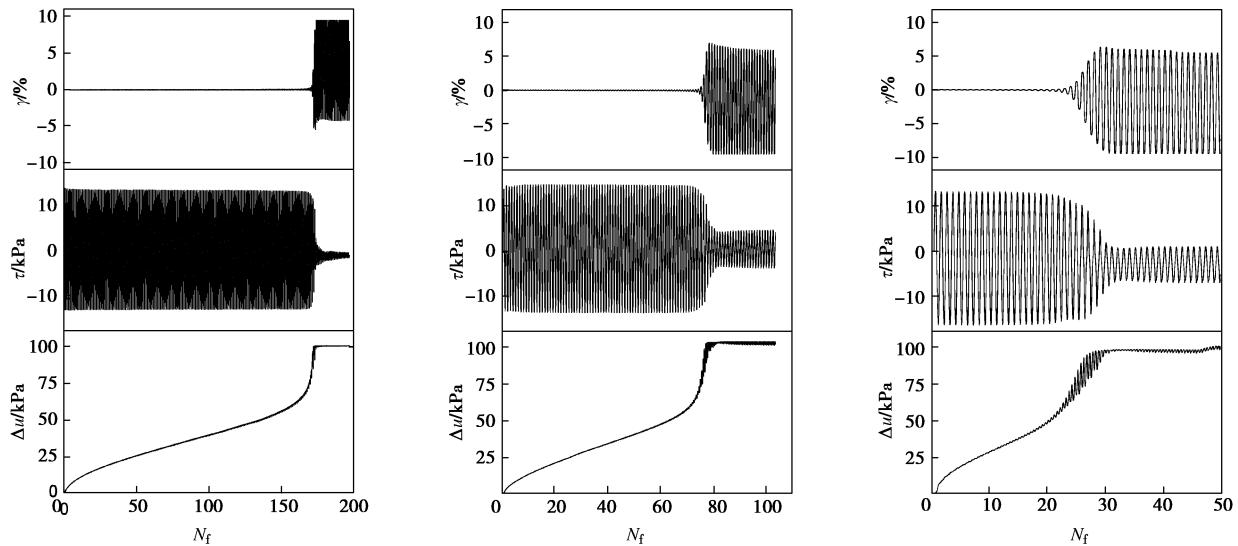
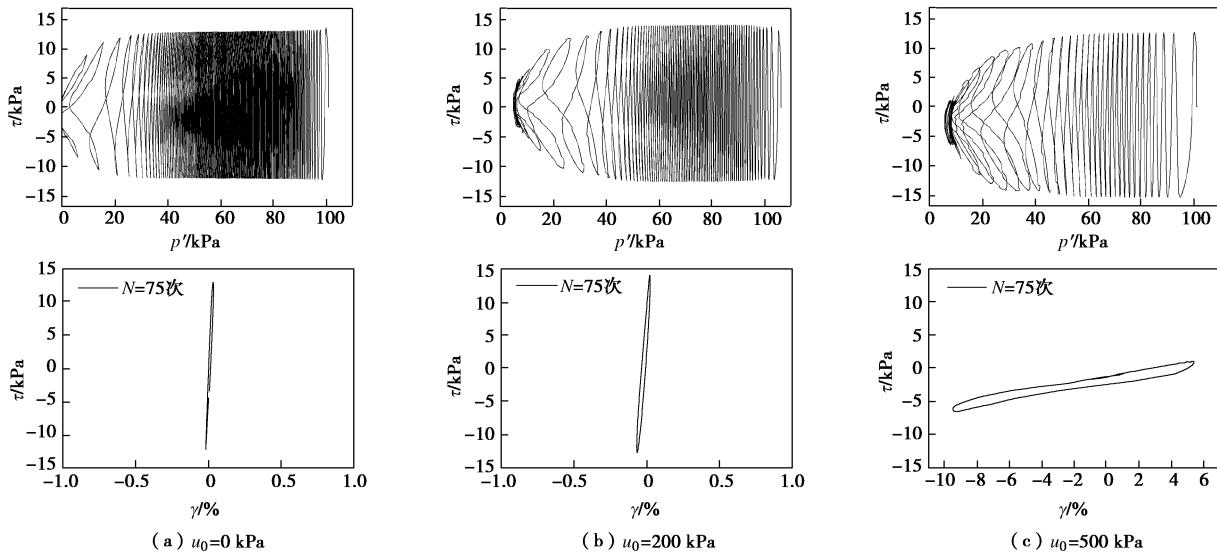


图3 标准砂在不同初始静孔隙水压力下的试验结果( $p_0=100 \text{ kPa}$ )

Fig. 3 Test results of Fujian standard sand under different back pressures ( $p_0=100 \text{ kPa}$ )



图 4 细砂在不同初始静孔隙水压力下试验结果( $p_0=100$  kPa)Fig. 4 Test results of Binhexiqu sand under different back pressures ( $p_0=100$  kPa)

的循环荷载作用次数不同。

图 5 给出了福建标准砂和细砂在不同初始静孔隙水压力下的超静孔隙水压力增长曲线的对比。同样可见, 初始静孔隙水压力对超静孔隙水压力发展具有显著的影响, 即初始静孔隙水压力越大, 超静孔隙水压力发展越快, 试样发生液化所需的循环荷载作用振次越少。

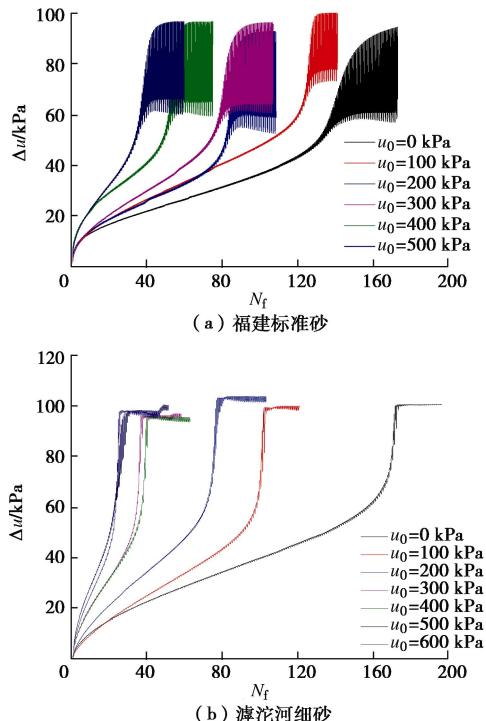


图 5 不同初始静孔隙水压力下砂土的超静孔隙水压力增长曲线

Fig. 5 Growth curves of excess pore water pressure under different back pressures

以  $N/N_f$  为横坐标, 以  $u/u_f$  ( $u_f$  为发生液化时的超静孔隙水压力, 本文实验中为 100 kPa) 为纵轴对超静孔隙水压力曲线进行归一化, 得到超静孔隙水压力归

一化曲线, 如图 6 所示。归一化后超静孔隙水压力曲线表现出很好的一致性, 进一步说明初始静孔隙水压力影响的是超静孔隙水压力的发展速度, 并不影响超静孔隙水压力的最终大小。

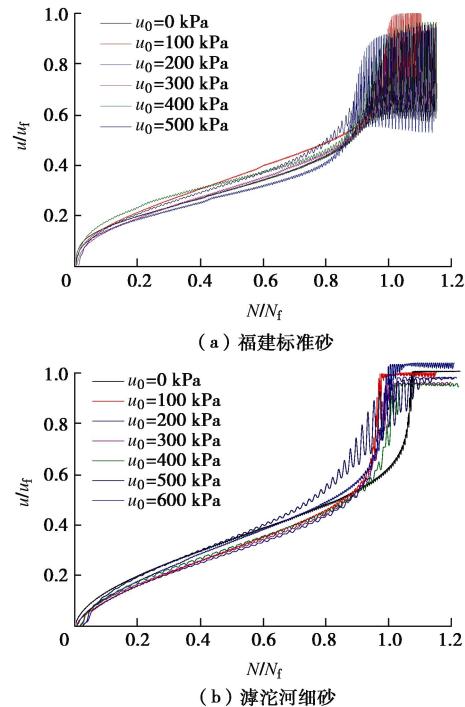


图 6 归一化的超静孔隙水压力增长曲线

Fig. 6 Curves of normalized excess pore water pressure

## 2.2 单调扭剪条件下的试验结果分析

笔者针对福建标准砂(相对密实度为 0.30)及细砂进行了不排水单调扭剪试验, 分析不同初始静孔隙水压力下砂土的剪应力-剪应变关系和超静孔隙水压力发展规律<sup>[10]</sup>。图 7, 8 分别给出了不同初始静孔隙水压力下得到的福建标准砂和细砂超静孔隙水压力变化曲线和剪应力-剪应变关系曲线。从图中可以看出,

标准砂在剪胀阶段, 其超静孔隙水压力受初始静孔隙水压力的影响显著, 从而影响剪应力-应变关系, 即初始静孔隙水压力越大, 剪胀阶段产生负超静孔隙水压力越大, 导致有效应力增大, 砂土的强度明显得到提高, 这与黄博<sup>[4]</sup>的结论一致。而细砂基本处于剪缩状态, 超静孔隙水压力及剪应力-应变关系受初始静水压力影响相对较小<sup>[10]</sup>。

为了进一步验证初始静孔隙水压力对土体剪切特性的影响是通过对超静孔隙水压力的影响产生, 作者专门进行了福建标准砂排水单调扭剪试验。图9表示不同初始静孔隙水压力条件下的福建标准砂排水剪切试验结果, 可见排水条件下初始静孔隙水压力对砂土应力-应变关系基本不产生影响, 与已有的研究结论基本一致<sup>0</sup>。

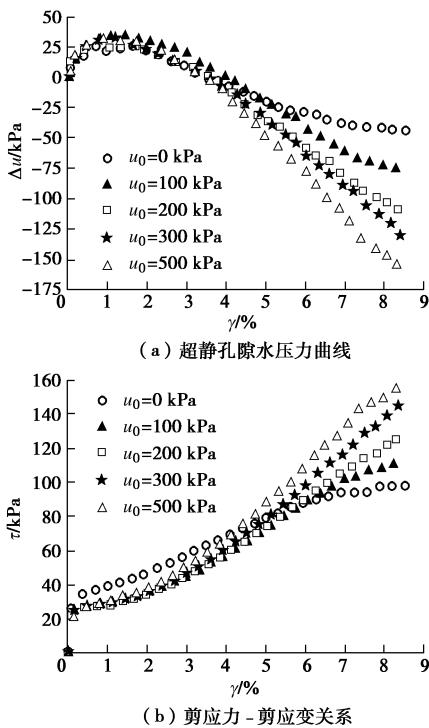


图7 福建标准砂( $D_r=0.30$ )不排水条件下试验结果( $p_0=100$  kPa)<sup>[10]</sup>

Fig. 7 Test results of Fujian standard sand ( $D_r=0.30$ ) under undrained conditions ( $p_0=100$  kPa)<sup>[10]</sup>

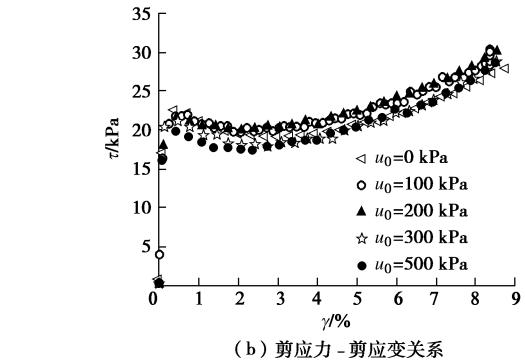
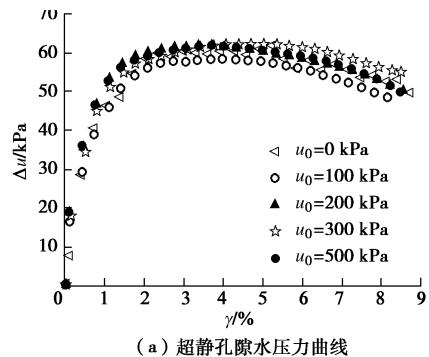


图8 细砂在不排水条件下的试验结果( $p_0=100$  kPa,  $\rho=1.41$  g/cm<sup>3</sup>)<sup>[10]</sup>

Fig. 8 Test results of fine sand under undrained conditions<sup>[10]</sup>

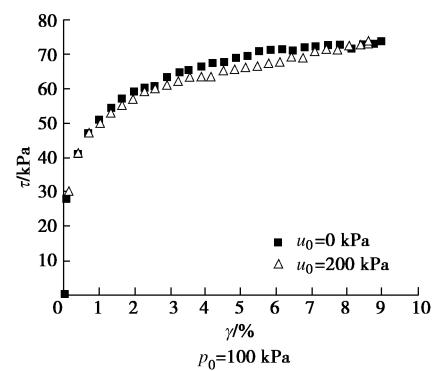


图9 福建标准砂在不同围压下的排水应力-应变关系<sup>[10]</sup>

Fig. 9 Stress-strain relationship of Fujian standard sand under different confining pressures<sup>[10]</sup>

### 3 影响机理分析

自然界不存在绝对意义上的完全饱和土, 处于地下水位以下的砂土一般为准饱和土, 是由土颗粒、水和气体组成的三相介质, 气体以气泡的形式均匀分布于水中, 土处于气封闭(水敞开)状态, 土体中的液相实际上是气液混合体, 如图10所示。在实际工程中所接触的液化土层, 其实也多为准饱和土<sup>[11]</sup>。

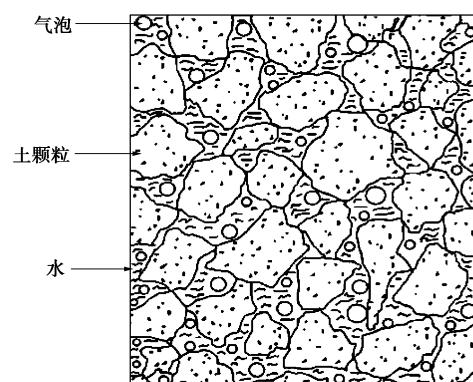


图10 准饱和土的三相组成<sup>[16]</sup>

Fig. 10 Partially saturated soils<sup>[16]</sup>

已有研究表明由于在准饱和土中气体不独立,一方面气泡影响了孔隙流体的渗透性,另一方面,气体的存在也将影响土中孔隙水的可压缩性即体积模量,少量气体对准饱和土中波的传播有不可忽略的影响<sup>[12-14]</sup>。图 11 为显微镜下的准饱和多孔介质,当初始静孔隙水压力由 1 个大气压增加到时 1.5 个大气压时,气泡的体积明显缩小<sup>[15]</sup>,因此在研究准饱和土静动力效应时应该充分考虑初始静孔隙水压力的大小对土中气泡的影响<sup>[16]</sup>。

实际上初始静孔隙水压力代表水深,它通过影响准饱和土中气液混合体的体积模量来影响超静孔隙水压力的发展:对于动力试验,初始静孔隙水压力越大,气液混合体的可压缩性越小,其体积模量越大,因此受到动荷载后,超静孔隙水压力发展速度越快,达到液化所用的时间越短。静力试验中,由于加载相对缓慢,在剪缩阶段,初始静孔隙水压力并不影响超静孔隙水压力的产生,但在剪胀阶段,由于初始静孔隙水压力导致气液混合体体积模量不同,在相同的体积回弹或剪胀趋势下,气液混合体所释放的压力不同,即初始静孔隙水压力越大,气液混合体的体积模量越大,所产生的负超静孔隙水压力越大,导致土体的抗剪强度显著增大。

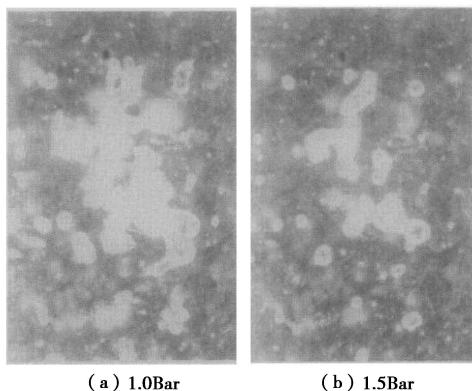


图 11 准饱和多孔介质中的气泡<sup>[15]</sup>

Fig. 11 Bubbles in porous media<sup>[15]</sup>

而在排水剪切过程中,由于并不产生超静孔隙水压力,因此初始静孔隙水压力对砂土剪应力-剪应变基本不产生影响。进一步说明了初始静孔隙水压力通过影响气液混合体的体积模量而影响超静孔隙水压力,从而进一步影响了砂土的剪切强度。

## 4 结 论

本文选取福建标准砂和滹沱河细砂,利用空心圆柱扭剪仪开展了一系列不同初始静孔隙水压力条件下的不排水循环扭剪试验和单调扭剪试验,着重探讨初始静孔隙水压力对超静孔隙水压力发展及其静动力剪

切特性的影响,得到以下认识:

(1) 初始静孔隙水压力影响准饱和土气液混合体的体积模量,因此对砂土不排水静动力剪切特性产生显著影响,在循环剪切荷载作用下,初始静孔隙水压力的大小不同,超静孔隙水压力的增长速度明显不同,初始静孔隙水压力越大,砂土发生初始液化所需的振动次数越小,砂土的抗液化强度越低;在单调剪切荷载作用下,初始静孔隙水压力主要在剪胀阶段对其剪切特性产生显著影响,即初始静孔隙水压力越大,产生负超静孔隙水压力就越大,从而影响不排水抗剪强度。在砂土排水剪切试验中,初始静孔隙水压力对剪切特性影响不显著。

(2) 实际上初始静孔隙水压力大小代表不同水深,研究地下水位以下土体(准饱和土)静动力剪切特性尤其是研究液化问题时,应考虑初始静孔隙水压力对砂土抗液化强度的影响,室内试验应该根据砂土所处的地下水位深度来决定初始静孔隙水压力(反压)的大小,不能盲目以饱和度作为控制标准施加反压。

## 参 考 文 献:

- [1] BRAND E W. Back pressure effects on the undrained strength characteristics of softclay[J]. Soils and Foundations, 1975, 15(2): 1 - 16.
- [2] AHNBERG H. Effects of back pressure and strain rate used in triaxial testing of stabilize dorganic soils and clays[J]. Geotechnical Testing Journal, 2004, 27(3): 250 - 259.
- [3] ALLAM M M, SRIDHARAN A. Influence of the back pressure technique on the shear strength of soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1980, 3(1): 35 - 40.
- [4] 黄博, 汪清静, 凌道盛, 等. 饱和砂土三轴试验中反压设置与抗剪强度的研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1313 - 1319. (HUANG Bo, WANG Qing-jing, LING Dao-sheng, et al. Effects of back pressure on shear strength of saturated sand in triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1313 - 1319. (in Chinese))
- [5] HYODO M, YONEDA J, YOSHIMOTO N, et al. Mechanical and dissociation properties of methane hydrate-bearing sand in deep seabed[J]. Soils and Foundations, 2013, 53(2): 299 - 314.
- [6] MIYAZAKI K, MASUI A, HANEDA H, et al. Variable-compliance-type constitutive model for methane hydrate bearing sediment[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrate. Vancouver, 2008.
- [7] 蒋明镜, 朱方园, 申志福. 试验反压对深海能源土宏观力学特性影响的离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2):

- 219 - 226. (JIANG Ming-jing, ZHU Fang-yuan, SHEN Zhi-fu. Influence of back pressure on macro-mechanical properties of methane hydrate soils by DEM analyses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(2): 219 - 226. (in Chinese))
- [8] 许成顺, 刘晨, 刘海强, 等. 竖向-扭转双向耦合剪切仪功能析及应用[J]. 北京工业大学学报, 2013(2): 233 - 238. (XU Cheng-shun, LIU Chen, LIU Hai-qiang, et al. Function analysis and application of vertical-torsional coupling shear apparatus[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013(2): 233 - 238. (in Chinese))
- [9] 李伟华, 郑洁. 饱和度对平面P波入射下自由场地地震反应的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(3): 427 - 435. (LI Wei-hua, ZHENG Jie. Effects of saturation on free-field responses of site due to plane P-wave incidence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(3): 427 - 435. (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 Cheng-shun, GENG Lin, DU Xiu-li, 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))
- [11] 王明洋, 钱七虎. 爆炸波作用下准饱和土的动力模型研究[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(6): 103 - 110. (WANG ming-yang, QIAN Qi-hu. Study on the dynamic model of partially saturated soil under the action of explosive wave[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(6): 103 - 110. (in Chinese))
- [12] 刘建新, 宋华, 赵跃堂, 等. 准饱和砂土中平面压缩波传播[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, **24**(1): 86 - 92. (LIU Jian-xin, SONG Hua, ZHAO Yue-tang, et al. Propagation of plane compress-wave in quasic-saturated sandy soil[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation, 2004, **24**(1): 86 - 92. (in Chinese))
- [13] 王滢, 高广运. 准饱和土中圆柱形衬砌的瞬态动力响应分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(12): 3400 - 3409. (WANG Ying, GAO Guang-yun. Analysis of transient dynamic response of cylindrical lined cavity in nearly saturated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(12): 3400 - 3409. (in Chinese))
- [14] 陈炜昀, 夏唐代, 黄睿, 等. P1波在非饱和土地基表面的反射特性[J]. 工程力学, 2013, **30**(9): 56 - 62. (CHEN Wei-yun, XIA Tang-dai, HUANG Rui, et al. Reflection characteristics of P1 waves at the free boundary of unsaturated soil[J]. Engineering Mechanics, 2013, **30**(9): 56 - 62. (in Chinese))
- [15] SMEULDERS D M J. On wave propagation in saturated and partially saturated porous media[J]. Thesis Technische Univ, 1992.
- [16] 周新民. 准饱和土波动特性及动力响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006. (ZHOU Xin-min. Research on wave Propagation characteristics and dynamic response in partially saturated soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese))