

# 循环荷载下饱和砂土固 - 液相变特征

王志华<sup>1,2</sup>, 周恩全<sup>2</sup>, 陈国兴<sup>1,2</sup>, 高洪梅<sup>1,2</sup>

(1. 南京工业大学城市地下空间研究中心, 江苏南京 210009; 2. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏南京 210009)

**摘要:** 基于南京饱和细砂动三轴试验发现, 循环荷载下饱和砂土应力 - 应变速率曲线形状随孔压累积由“椭圆形”渐变为“哑铃形”。“哑铃形”关系曲线的出现表明饱和砂土具有低抗剪性和流动性。定义了反映循环荷载下饱和砂土流动性的平均流动系数以及反映流动性随振次变化的流动曲线, 发现流动曲线具有明显的三阶段特征。给出了相对密度、有效固结压力和循环应力比对流动曲线的影响规律。提出以平均流动系数急速增长初始点作为饱和砂土由固态向液态转变的临界点, 据此定义平均流动系数急速增长初始点对应的孔压比为相变孔压比。试验发现, 各工况的平均流动系数与孔压比关系曲线基本一致, 相对密度、有效固结压力和循环应力比对相变孔压比几乎无影响, 各工况相变孔压比均在 0.8 左右。

**关键词:** 饱和砂土; 固 - 液相变; 平均流动系数; 流动曲线; 相变孔压比

**中图分类号:** TU441      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2012)09-1604-07

**作者简介:** 王志华(1977-), 男, 江西东乡人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土力学和地震工程研究与教学工作。E-mail: wzhnjut@163.com。

## Characteristics of solid-liquid phase change of saturated sand under cyclic loading

WANG Zhi-hua<sup>1,2</sup>, ZHOU En-quan<sup>2</sup>, CHEN Guo-xing<sup>1,2</sup>, GAO Hong-mei<sup>1,2</sup>

(1. Research Center of Urban Underground Space, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** Based on the dynamic triaxial tests on the saturated Nanjing fine sand, an obvious phenomenon is discovered that the relationship curves of the shear stress-strain rate are altered from an elliptical shape to a dumbbell one with the build-up of the pore water pressure. The relationship curve with the dumbbell shape demonstrates that the saturated sand possesses low shear resistance and fluidity. The average flow coefficient and the flow curve describing the fluidity of the saturated sand under cyclic loading are defined. It can be found apparently that the three-phase characteristics exist in the flow curves. The influences of the relative dense, effective consolidation pressure and cyclic stress ratio on the flow curves are discussed. It is presented that the initial sharply-increasing point for the average flow coefficient is taken as the critical point of the saturated sand changing from the solid state to the fluid one. The pore water pressure ratio corresponding to the initial sharply-increasing point is defined as the pore water pressure ratio of phase change. The tests show that the relationship curves of the average flow coefficient and the pore water pressure ratio under various loading conditions are similar in shape. In addition, the pore water pressure ratios of phase change for the saturated Nanjing fine sand under various test conditions are about 0.8. The relative dense, effective consolidation pressure and cyclic stress ratio have few influences on the pore water pressure ratios of phase change.

**Key words:** saturated sand; solid-liquid phase change; average flow coefficient; flow curve; pore water pressure ratio of phase change

## 0 引言

早在 1948 年, Terzaghi 和 Peck 就认识到了饱和砂土受循环荷载扰动后会像流体一样流动, 并认为这是饱和砂土边坡发生地震滑动的主要原因<sup>[1]</sup>。Sasaki 等<sup>[2]</sup>通过振动台试验研究了液化变形机理时, 也给出了“液化砂土与流体非常类似”的结论。众多的试验均表明,

液化后饱和砂土具有典型的“剪切稀化”非牛顿流体性质<sup>[3-5]</sup>。至今, 将液化砂土看作某种流体, 采用流体

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908114, 41172258); 江苏省自然科学基金项目(BK2011020); 江苏省普通高校研究生科技创新计划项目(CXLX11-0364)

收稿日期: 2011-07-21

力学和流变学理论对液化砂土大变形问题进行研究也已得到很大的发展<sup>[6-7]</sup>。

但是, 循环荷载作用下的饱和砂土何时能视为流体, 也即饱和砂土在循环荷载下发生固 - 液相变的条件却无定论。1978年, 美国土木工程师协会岩土工程分会土动力学委员会对“液化”一词给出了定义<sup>[8]</sup>: “液化”指的是任何物质转化为液体的行为和过程。而关于液化条件, Seed等<sup>[9]</sup>将孔压值作为液化判断依据, 定义不排水剪切试验中有效应力第1次为0的状态为“初始液化”, 据此区分“初始液化前”和“初始液化后”两个阶段。这一观点强调孔压状态是判断饱和砂土固 - 液相变的主要参量。现有的关于液化饱和砂土流体特性的研究中, 无论是采用振动台落球法和拖球法<sup>[5, 7]</sup>, 亦或是室内动三轴试验<sup>[4]</sup>, 都是将饱和砂土激振液化(孔压比达到1.0)后实施落球、拖球或静加载试验来考察液化土体的流体特性, 这些做法事实上都隐含了饱和砂土发生固 - 液相变的条件为Seed所定义的“初始液化”。然而, Casagrande和Poulos等学者<sup>[10-11]</sup>所持另一类观点强调土的液化流动性, 认为土体液化是其强度降低过程中的流动现象, 流动破坏时的土体强度与土性和应力相关, 而孔压比则未必达到1.0。凌贤长<sup>[12]</sup>的振动台试验结果也表明, 饱和砂土振动孔压比在0.6~0.7左右时, 已出现局部液化的宏观现象。陈育民等<sup>[13]</sup>利用小型振动台拖管试验证明液化前高孔压比状态下的砂土和液化后的砂土都具有一定的流体特性, 且其流动特性在液化前到液化后并没有突变, 是连续的。

饱和砂土的固 - 液相变条件是从流体角度认识循环荷载下饱和砂土动力学性能的前提, 也是从流变学角度进行饱和砂土液化大变形效应分析首要解决的关键问题。为此, 本文利用室内动三轴试验, 对循环荷载下饱和南京细砂的固 - 液相变特征进行了有益的讨论和分析。从试验得到的饱和砂土应力 - 应变率关系曲线形态着手, 探讨了循环荷载下饱和砂土相变前后的应力 - 应变率反应主要特征; 以任一周中的单位平均剪应力可产生的最大剪应变率衡量饱和砂土的可流动性, 定义了具明确物理意义的平均流动系数和流动曲线, 给出了相对密度、有效固结压力和循环应力比等主要因素对循环荷载下饱和砂土流动曲线的影响规律; 以流动曲线中平均流动系数急速增长的初始点作为饱和砂土由固态向液态转变的临界点, 提出相变孔压比的概念, 得到了各试验工况下饱和南京细砂的相变孔压比。

## 1 试验方案

试验采用南京工业大学岩土工程研究所自行研制的DSZ-1型应力控制动三轴仪进行<sup>[14]</sup>。试验用砂为南京细砂, 其基本物理参数如下: 不均匀系数 $C_u=2.31$ , 曲率系数 $C_c=1.07$ , 特征颗粒 $d_{50}=0.16\text{ mm}$ , 最大孔隙比 $e_{max}=1.14$ , 最小孔隙比 $e_{min}=0.62$ , 颗粒密度 $G_s=2.70\text{ g/cm}^3$ 。图1为试验用南京细砂颗粒级配曲线。试验考虑相对密度、有效固结压力和循环应力比3个主要因素影响。相对密度分别为70%, 50%和30%, 对应饱和土样密度分别为 $1.96$ ,  $1.90$ 和 $1.86\text{ g/cm}^3$ , 其含水率分别为28.7%, 32.6%和36.4%; 有效固结压力分别采用150, 100和50 kPa; 试验采用的循环应力比控制在0.25, 0.21和0.17三个水平。

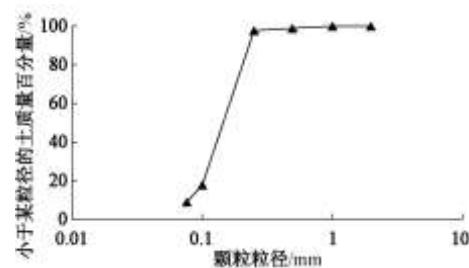


图1 南京细砂的颗粒级配

Fig. 1 Particle size of Nanjing fine sand

试验前, 将定量干砂浸泡10 h以上, 之后采用水沉法直接在循环三轴的压力室内制成试样。每次湿砂放入量尽量少, 各次的放入量尽量均等, 以减小试样的不均匀性。试样在压力室成样之后, 先循环饱和1 h左右, 然后测量试样的饱和度, 所有试样测得的B值均在0.95以上。打开排水阀, 在预定有效围压下进行排水固结, 直至孔压完全消散。固结完成后, 关闭排水阀, 施加正弦轴向应力, 当试样达到初始液化后持续振动10周试验停止。试验初始液化标准为超孔隙水压力达到初始有效围压。

根据动三轴得到的轴向应力 $\sigma$ 和轴向应变 $\varepsilon$ 通过式(1)和式(2)转换成剪应力 $\tau$ 和剪应变 $\gamma$ 。

$$\tau = \frac{\sigma}{2}, \quad (1)$$

$$\gamma = (1+\nu)\varepsilon, \quad (2)$$

式中,  $\nu$ 为泊松比, 文中所有的工况为饱和砂土不排水条件下正弦振动, 泊松比 $\nu$ 取0.49。

循环荷载下饱和砂土剪应变率可由式(2)得到的剪应变按下式计算:

$$\dot{\gamma}_i = \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_{i+1} - \gamma_i}{t_{i+1} - t_i} - \frac{\gamma_i - \gamma_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right), \quad (3)$$

式中,  $\gamma_{i+1}$ ,  $\gamma_i$ 和 $\gamma_{i-1}$ 分别为 $t_{i+1}$ ,  $t_i$ 和 $t_{i-1}$ 时刻对应的剪应变,  $\dot{\gamma}_i$ 为 $t_i$ 时刻的剪应变率。

试验中, 循环荷载下饱和砂土中的孔压在上升和

持续液化过程中都具有典型的波动特征。本文中所指孔压比为振动孔压比 ( $u/\sigma'_c$ ) 曲线的外包线值。

## 2 饱和砂土的固 - 液相变特征

### 2.1 循环荷载下饱和砂土应力 - 应变率曲线特征

随着振次的增加, 饱和砂土中的孔压上升, 其应力 - 应变率反应也呈现出典型的阶段性特征。图 2 为试验得到的部分工况的应力 - 应变率关系曲线。

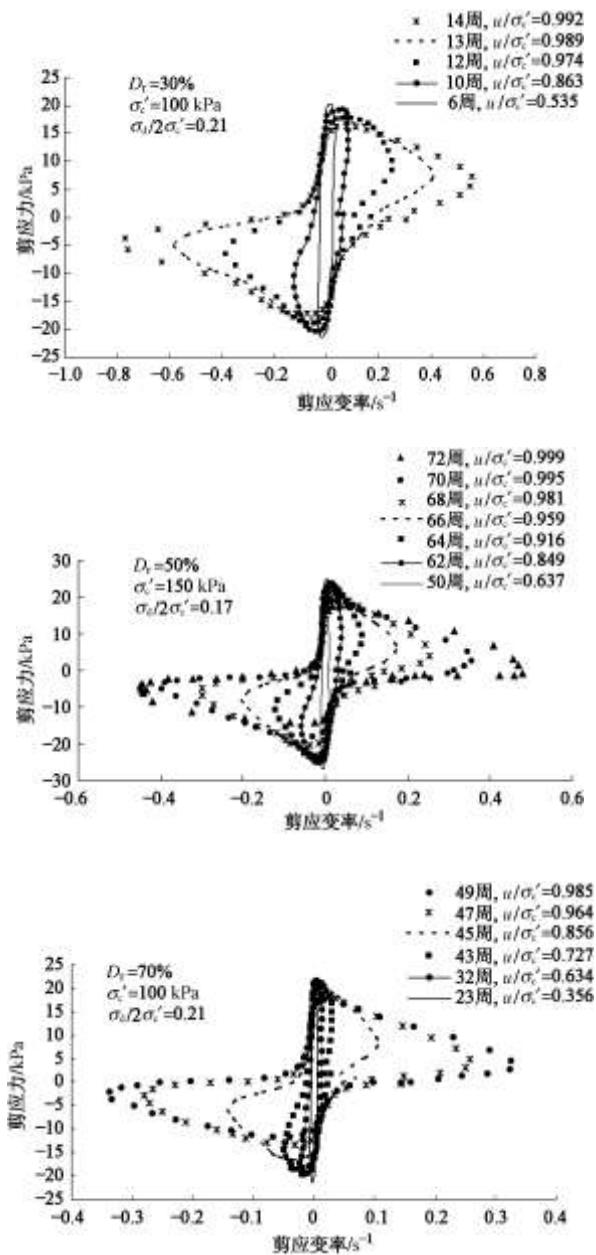


图 2 部分工况得到的应力 - 应变率关系曲线

Fig. 2 Relationship curves of shear stress-strain rate

从图 2 中可以看出, 不同工况下的饱和砂土应力 - 应变率反应具有以下共同特点:

(1) 循环荷载下饱和砂土的应力 - 应变率关系曲

线形状在不同振次和孔压状态下有很大差异。当孔压比相对较小时, 应力 - 应变率曲线形状类似“椭圆形”。此时, 应力和应变率反应基本同相位; 随着振次的增加和孔压的上升, 应力 - 应变率曲线逐渐由“椭圆形”向“哑铃形”过渡。此时的应变率反应超前于应力反应。

(2) “哑铃形”应力 - 应变率曲线的出现表明此时的饱和砂土具有低抗剪性和流动性。这是因为, 当饱和砂土中的孔压累积到一定程度后, 在不同振次峰值应力相差不大的情况下, 饱和砂土的峰值应变率反应明显放大。而且, 对于单周循环加载而言, 在施加的剪应力很小的条件下, 饱和砂土的剪应变率却能迅速增加, 也即饱和砂土的流动性非常明显。从形状上看, 随着孔压比增长, “哑铃”的中部内凹程度越发突出。

由饱和砂土应力 - 应变率关系曲线不难看出, 伴随孔压的增长, 应力 - 应变率曲线由“椭圆形”渐变为“哑铃形”, 预示着饱和砂土的流动性显现。循环荷载下的饱和砂土经历了由固态向液态转变的过程, 而这个固 - 液相变过程应与孔压状态密切相关。然而, 仅从应力 - 应变率关系曲线中却难以定义饱和砂土的相变条件, 也难以判断相变时的孔压状态。

### 2.2 循环荷载下饱和砂土的平均流动系数

定义 1: 平均流动系数系指饱和砂土在单周循环加载中, 由单位平均剪应力所能触发的最大剪应变率水平。

平均流动系数由下式计算:

$$\bar{\kappa} = \frac{(\dot{\gamma}_{\max} - \dot{\gamma}_{\min}) \cdot (\dot{\gamma}_{\max} - \dot{\gamma}_{\min})}{A}, \quad (4)$$

$$A = \iint d\tau d\dot{\gamma} = 4\bar{\tau}\dot{\gamma}_{\max}. \quad (5)$$

式中  $\bar{\kappa}$  为平均流动系数( $s^{-1}/kPa$ );  $A$  为任一周循环荷载作用下饱和砂土应力 - 应变率曲线所围成的面积 ( $kPa \cdot s^{-1}$ );  $\bar{\tau}$  为一周循环作用的平均剪应力;  $\dot{\gamma}_{\max}$  为一周循环加载时的最大剪应变率( $s^{-1}$ );  $\dot{\gamma}_{\min}$  为一周循环加载时的最小剪应变率( $s^{-1}$ )。

由式(4)和(5)可以看出, 若  $\bar{\kappa}$  越大, 则表示在该周循环荷载下单位平均剪应力引起的最大剪应变率越大, 饱和砂土的流动性越强。

将式(4)做简单变换如下:

$$\bar{\kappa} = \frac{(\tau_{\max} - \tau_{\min}) \cdot (\dot{\gamma}_{\max} - \dot{\gamma}_{\min}) \cdot (\dot{\gamma}_{\max} - \dot{\gamma}_{\min})}{A \cdot (\tau_{\max} - \tau_{\min})}, \quad (6)$$

式中,  $\tau_{\max}$  和  $\tau_{\min}$  分别为单周循环中的波峰剪应力和波谷剪应力 ( $kPa$ )。

$$\text{令 } \beta_a = \frac{(\tau_{\max} - \tau_{\min}) \cdot (\dot{\gamma}_{\max} - \dot{\gamma}_{\min})}{A}, \quad (7)$$

$$\eta = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\dot{\gamma}_{\max} - \dot{\gamma}_{\min}}, \quad (8)$$

其中,  $\beta_a$  为任一周循环中的应力-应变率曲线的外包矩形面积与该曲线围成的面积之比, 如图 3 所示。它蕴含了应力-应变率曲线的形状因素。显然, “哑铃形” 应力-应变率曲线的  $\beta_a$  大于“椭圆形” 应力-应变率曲线的  $\beta_a$ ;  $\eta$  为应力-应变率曲线外包矩形的对角斜率( $\text{kPa}\cdot\text{s}$ )。根据流体力学基本理论,  $\eta$  的物理意义为流体的表观黏度<sup>[15]</sup>。流体表观黏度越小, 则流体的流动性越强。式(8)中的  $\eta$  可理解为一周循环内饱和砂土的平均表观黏度。

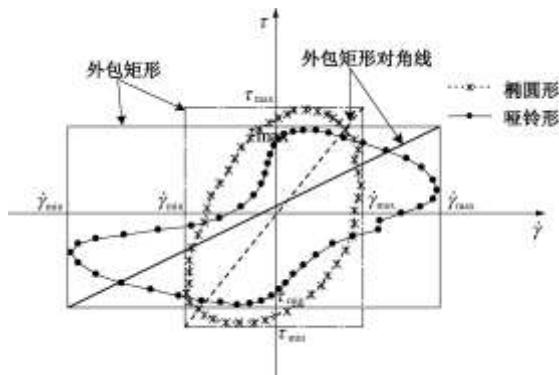


图 3  $\bar{\kappa}$  的物理意义

Fig. 3 Physical implication of  $\bar{\kappa}$

综合以上各式, 则平均流动系数可以式(9)表示如下:

$$\bar{\kappa} = \beta_a / \eta. \quad (9)$$

由式(9)及以上分析可知, 平均流动系数  $\bar{\kappa}$  不但反映了应力-应变率曲线的形状影响, 还体现了将饱和砂土作为流体考虑的表观黏度特性, 物理意义明确, 适用于描述饱和砂土在循环荷载下的流动性。

### 2.3 循环荷载下饱和砂土的流动曲线及其特征

根据试验各工况得到的饱和砂土应力-应变率曲线按式(9)可计算出各工况不同循环周数下的平均流动系数。

**定义 2:** 流动曲线指循环荷载下饱和砂土平均流动系数随循环周数变化曲线。

图 4 以  $D_r = 50\%$ ,  $\sigma'_c = 100 \text{ kPa}$ ,  $\sigma_d / 2\sigma'_c = 0.17$  为例, 给出了整个加载历时的完整流动曲线。从图中可以看出, 整个试验加载过程中饱和砂土流动性的阶段性特征突出。本文将该流动曲线分为 3 个阶段: 阶段 I, 开始加载至平均流动系数急速增长初始点 ( $OA$  段)。该阶段的典型特征是流动曲线几乎为水平直线, 且平均流动系数很小。这表明饱和砂土在阶段 I 的循环荷载下基本不具备流动性; 阶段 II, 平均流动系数急速增长初始点至初始液化点 ( $AB$  段)。该阶段中的饱和砂土平均流动系数随着振次增加而急速增长, 饱

和砂土的流动性强烈显现, 且流动性不断增强; 阶段 III, 初始液化后阶段 ( $BC$  段)。由于饱和砂土孔压已达到有效围压, 处于完全液化状态, 且在循环荷载持续作用下的液化状态基本稳定, 故而该阶段的流动系数维持不变, 流动性保持在高强状态。

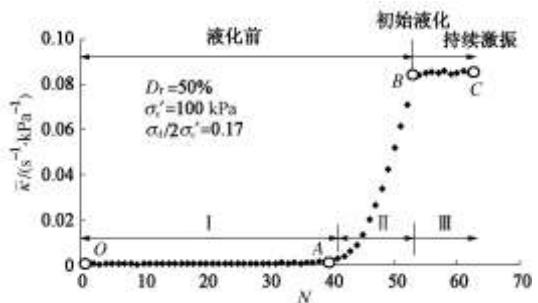


图 4 流动曲线

Fig. 4 Flow curve

为了进一步明确循环荷载下饱和砂土流动曲线特征, 图 5~7 给出了不同相对密度、有效固结压力和循环应力比试验得到的流动曲线。

图 5 为相对密度 70%, 50% 和 30% 时的饱和砂土流动曲线。不同相对密度下的流动曲线的阶段性特征基本一致。相对密度越大, 流动曲线突变对应的循环振次越大, 相同荷载条件下饱和砂土可能达到的最大平均流动系数越小。这意味着相对密度对循环荷载下饱和砂土可能产生的流动性强弱有重要影响。

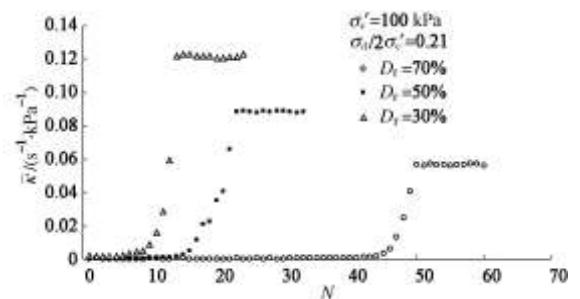


图 5 相对密度对流动曲线的影响

Fig. 5 Influences of relative dense on flow curves

图 6 为有效固结压力和相对密度相同、不同循环应力比条件下各试验工况得到的流动曲线的比较。各工况中的流动曲线同样具有上述 3 阶段特征, 且相同有效围压和相对密度下饱和砂土所能达到的最大平均流动系数一致。这说明液化后的饱和南京细砂的流动性与施加的动应力无关。但是, 循环应力比越大, 饱和南京细砂达到最大平均流动系数所需的循环振次越少。

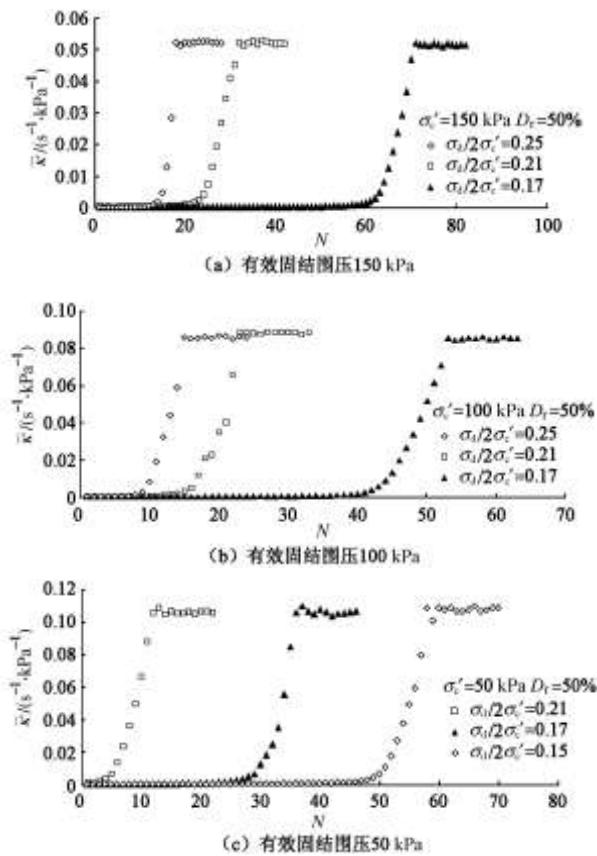


图 6 循环应力比对流动曲线的影响

Fig. 6 Influences of cyclic stress ratio on flow curves

相同循环应力比、不同有效固结压力情况下的饱和砂土流动曲线见图 7。试验结果表明,有效固结压力对流动曲线有重要影响且有较好的规律性。有效固结压力越大,饱和砂土的最大平均流动系数越小,流动性越弱,达到最大平均流动系数所需的循环振次越多。

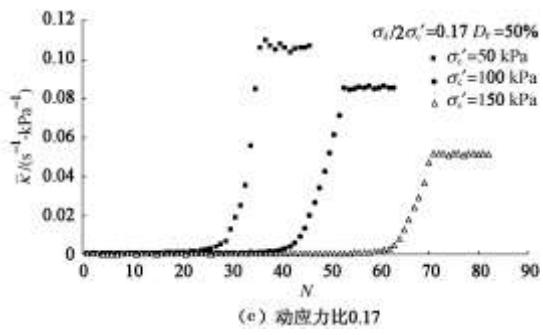
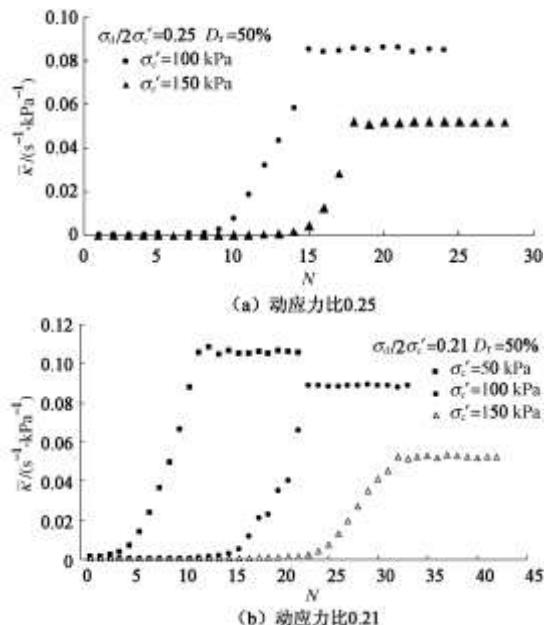


图 7 有效固结压力对流动曲线的影响

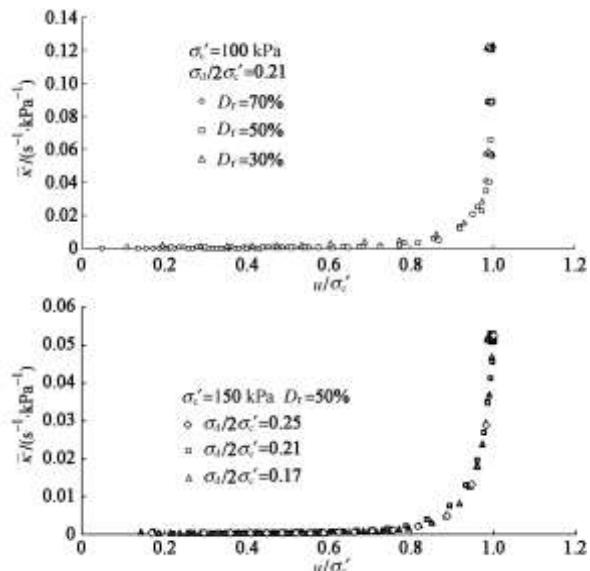
Fig. 7 Influences of effective consolidation pressure on flow curves

#### 2.4 循环荷载下饱和砂土的相变孔压比

以上各试验工况结果表明,饱和砂土自开始加载到完全液化过程中,其流动曲线都存在明显突变。根据平均流动系数的物理意义,平均流动系数增大预示着饱和砂土的流动性增强。平均流动系数的急速增长不仅是量的改变,在深层次上预示着饱和砂土内部结构发生了质的变化。流动曲线的突变指示了饱和砂土由固态向液态的转变。

定义 3: 循环荷载下饱和砂土固-液相变指饱和砂土流动曲线突变,固-液相变时刻为平均流动系数急速增长初始点对应时刻。

饱和砂土在循环荷载作用下,孔隙水压力的上升将减弱和破坏土体颗粒的联接,导致砂土结构发生破坏。这是饱和砂土在循环荷载下产生固-液相变的根本原因。图 3 中不同孔压状态下的应力-应变率曲线也反映了饱和砂土的流动性与孔压状态密切相关。由饱和砂土流动曲线,将振次变换为孔压比,则可作出平均流动系数与孔压比关系曲线,如图 8 所示。



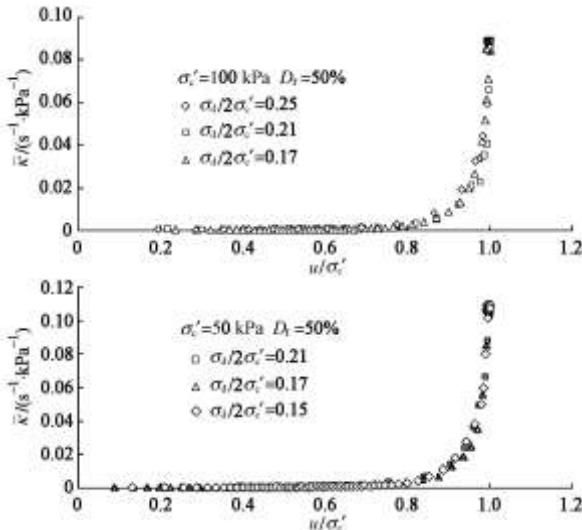


图 8 平均流动系数与孔压比关系

Fig. 8 Relationships between  $\bar{K}$  and pore water pressure ratio

由图可见, 各工况得到的平均流动系数与孔压比关系曲线在形状上几乎一致。孔压比较小时, 平均流动系数很小, 且不随孔压比增长而变化; 孔压比相对较高时, 平均流动系数急速增长; 至初始液化后的持续激振阶段, 由于孔压比保持在 1.0, 平均流动系数维持不变。

根据饱和砂土固 - 液相变的定义, 找出流动曲线突变所需振次, 则很容易确定相变时刻的孔压状态。

**定义 4:** 相变孔压比系指循环荷载下饱和砂土平均流动系数急速增长初始点对应振动孔压比。

图 8 显示平均流动系数的急速增长初始点位置基本相同, 也即各工况下饱和南京细砂的相变孔压比相当, 都在 0.8 左右。此外, 本次试验结果表明, 饱和南京细砂相变孔压比与其相对密度、有效固结压力以及循环应力比无关。

针对试验中展现的不同工况下相变孔压比一致的现象, 可作如下解释: 循环荷载作用下, 饱和砂土内孔压升高, 细观上土体颗粒间的粒间力(有效应力)减小, 土体颗粒接触和联接开始减弱或失效, 当孔压累积到一定程度时, 土体中能够形成接触和联接的颗粒则变得有限, 此时土体形成了一种大部分固体颗粒悬浮于水中的物质, 宏观上的物质形态则表现为液态。这是循环荷载下饱和砂土发生固 - 液相变的本质原因。因而, 循环荷载下饱和砂土的物质形态应由土体中仍存接触的固体颗粒数所决定, 而这点在每次特定试验条件下则完全取决于土体中的孔压状态。由此可知, 尽管相对密度、有效固结压力以及外部的动应力条件是影响土体孔压发展的重要原因, 但对相变孔压比则无影响。根据这一解释推测, 循环荷载下饱和砂土的相变孔压比可能与土体的颗粒级配有关, 这将在后续的试验中加以验证。

### 3 结 论

本文利用室内动三轴试验, 研究了循环荷载下饱和南京细砂的固 - 液相变特征, 得到以下几点结论:

(1) 随着循环振次的增加和孔压比的增长, 饱和砂土应力 - 应变率关系曲线由“椭圆形”渐变为“哑铃形”, 且“哑铃形”应力 - 应变率关系曲线中部内凹程度越发突出。这表明饱和砂土的流动性随着孔压比增长而增强。

(2) 平均流动系数的物理意义明确, 适合用于描述循环荷载下饱和砂土的流动特性。平均流动系数越大, 则饱和砂土的流动性越强。

(3) 循环荷载下饱和砂土流动曲线具有明显的三阶段特征。相对密度、有效固结压力和循环应力比对流动曲线均有重要影响。根据平均流动系数的物理意义和流动曲线形态特征, 可将饱和砂土固 - 液相变时刻视为流动曲线中平均流动系数急速增长的初始时刻。

(4) 各工况中的平均流动系数与孔压比关系曲线形状基本一致。试验饱和南京细砂相变孔压比约为 0.8, 相对密度、有效固结压力和循环应力比对其相变孔压比无影响。

### 参 考 文 献:

- [1] TERZAGHI K, PEAK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. 2nd ed. New York: John Wiley&Sons, INC, 1948.
- [2] SASAKI Y, TOWHATA I, TOKIDA K I, et al. Mechanism of permanent displacement of ground caused by seismic liquefaction[J]. Soils and Foundations, 1992, **32**(3): 79 - 96.
- [3] HUWANG J I, KIM C Y, CHUNG C K, et al. Viscous fluid characteristics of liquefied soils and behavior of piles subjected to flow of liquefied soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, **26**(2/4): 313 - 323.
- [4] SAWICKI A, MIERCZYNSKI J. On the behaviour of liquefied soil[J]. Computers and Geotechnics, 2009, **36**(4): 531 - 536.
- [5] TOWHATA I, VARGAS M, ORENSE R P, et al. Shaking table tests on subgrade reaction of pipe embedded in sandy liquefied subsoil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, **18**(5): 347 - 361.
- [6] UZUOKA R, YASHIM A, KAWAKAMIC T, et al. Fluid dynamics based prediction of liquefaction induced lateral spreading[J]. Computers and Geotechnics, 1998, **22**(4): 243 - 282.
- [7] DUNGCA J R, KUWANO J, TAKAHASHI A, et al. Shaking

- table tests on the lateral response of a pile buried in liquefied sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(2/4): 287 - 295.
- [8] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (CHEN Guo-xing. Geotechnical earthquake engineering[M]. Beijing, Science Press, 2007. (in Chinese))
- [9] SEED H B, LEE K L. Saturated sands during cyclic loading[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1966, 92(SM6): 105 - 134.
- [10] CASAGRANDE A. Liquefaction and cyclic deformation of sands: a critical review[C]// Proceedings of the 5th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Buenos Aires, Argentian, 1975.
- [11] POULOS S J, CASTRO G, FRANCE J W. Liquefaction evaluation procedure [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985, 111(6): 772 - 792.
- [12] 凌贤长, 唐亮, 于恩庆. 可液化场地地震振动孔隙水压增长研究的大型振动台试验及其数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3998 - 4003. (LIN Xian-zhang, TANG Liang, YU En-qing. Large scale shaking table test and its numerical simulation of research on build-up behaviour of sesimically-induced pore water pressure in liquefiable site[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3998 - 4003. (in Chinese))
- [13] 陈育民, 沙小兵, 林奔, 等. 饱和砂土液化前高孔压状态流动特性试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26: 267 - 272. (CHEN Yu-min, SHA Xiao-bing, LIN Ben, et al. The flow characteristics of pre-liquefied sand under high excess pore pressure[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26: 267 - 272. (in Chinese))
- [14] 陈国兴, 朱定华, 何启智. DSZ-1 型动三轴试验机研究与性能试验[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(6): 71 - 75. (CHEN Guo-xing, ZHU Ding-hua, HE Qi-zhi. Development and test of DSZ-1 cyclic triaxial testing system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(6): 71 - 75. (in Chinese))
- [15] 陈文芳. 非牛顿流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1984. (CHEN Wen-fang. Non-newtonian fluid mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese))

## 《建筑科学与工程学报》2013 年征订通知

《建筑科学与工程学报》是国家教育部主管, 长安大学与中国土木工程学会联合主办的学术性期刊, 是《中文核心期刊要目总览》2011 版来源期刊, 主要报道建筑科学与工程领域的最新研究成果, 包括建筑结构、地下建筑与基础工程、防灾减灾、桥梁工程、建筑材料、建筑学、市政工程、力学等专业及相关领域的科研、设计、施工方面的研究成果与工程实践总结。

《建筑科学与工程学报》的主要读者对象为: 建筑科学与工程领域的科研人员、工程技术人员、大专院校师生及管理决

策人员。

《建筑科学与工程学报》为季刊, 大 16 开本, 128 页, 每期定价 10.00 元 (含邮寄费), 全年共 40.00 元, 国内外公开发行, 邮发代号: 52-140, 订阅时也可直接汇款至《建筑科学与工程学报》编辑部, 欢迎国内外读者订阅!

地址: 西安市南二环路中段长安大学内; 邮编: 710064;  
电话: (029)82334397; E-mail: jzxb@chd.edu.cn。

(《建筑科学与工程学报》编辑部 供稿)