

局部排水条件下南京细砂振动孔压的波动特性

陈国兴, 王炳辉

(南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘要: 饱和砂土中振动孔压波动特性的研究是建立瞬态孔隙水压力模型的基础。为了研究振动孔压的波动特性, 对细粒含量为 0%, 5.0%, 13.5%的饱和南京细砂试样, 分别施加频率为 0.5, 1.0, 5.0 Hz 的正弦波荷载, 进行了局部排水条件下的应力控制循环三轴试验。定量分析试验得到: ①当正弦波荷载频率为 0.5 Hz, 渗透系数为 1.35×10^{-3} cm/s (细粒含量 0%) 时, 振动孔压的波动反应超前轴向应变反应的相位角接近于 90°, 而与轴向应变率反应同步。②随着正弦波荷载频率的增大或渗透系数的减小, 振动孔压的波动反应超前轴向应变反应的相位角逐渐减小, 延后于轴向应变率反应的相位角逐渐增大。基于饱和固液两相介质理论, 建立了适用于任意排水边界条件的振动孔压方程。该方程不仅能解释不排水条件下振动孔压波动反应与轴向应变反应同步的现象, 也能解释局部排水条件下振动孔压波动反应超前轴向应变的现象。

关键词: 南京细砂; 局部排水条件; 振动孔压; 波动特性; 两相介质

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2010)05-0767-07

作者简介: 陈国兴(1963-), 男, 浙江新昌人, 博士, 教授, 主要从事土动力学及岩土地震工程研究。E-mail: gxc6307@126.com。

Fluctuating characteristics of excess pore water pressure in Nanjing fine sand under partially drained conditions

CHEN Guo-xing, WANG Bing-hui

(Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: The fluctuating characteristics of excess pore water pressure (EPWP) are the basics to establish the transient EPWP model. A series of stress-controlled cyclic triaxial tests are carried out for saturated Nanjing fine sand with various fine contents of samples and loading frequencies. The loading frequencies are 0.5 Hz, 1.0 Hz and 5.0 Hz, and the fine content of samples are 0%, 5.0% and 13.5%. Based on quantitative analysis of the test results, it is found that: (1) When the cyclic load of 0.5 Hz frequency is applied on the samples with fine particles of 0% and permeability of 1.35×10^{-3} cm/s, the leading-phase angle between EPWP's response and axial strain's response is approaching 90 degrees, and the EPWP's response is simultaneous with the axial strain-rate's response; (2) With the increase of loading frequency or the decrease of permeability of samples, the leading-phase angle between EPWP's response and axial strain's response decreases, and that between EPWP and axial strain-rate increases. Based on the theory of saturated porous media, an EPWP equation for any drainage bound condition is established. The proposed equation can explain the phenomena of the EPWP's response being simultaneous with the axial strain's response in undrained condition, and also that of EPWP's response leading axial strain's response under partially drained conditions.

Key words: Nanjing fine sand; partially drained condition; excess pore water pressure; wave characteristics; porous media

0 前 言

土动力学中, 有效应力原理应用的关键问题是需要正确测算不同条件下土中振动孔隙水压力(振动孔压)的发展和变化规律。振动孔压的发展和变化受到众多因素的影响, 边界条件是需要考虑的重要因素, 可分为不排水边界条件和局部排水边界条件。在不排水条件下, 振动孔压的发展和变化具有平均累积过程

的单调增长性和瞬态变化的起伏波动性。这方面的研究成果非常丰富, 计算模型方面, Seed^[1], Finn^[2], Ishihara^[3]、谢定义^[4]等分别提出过经验公式、应力路

基金项目: 国家自然科学基金项目(90715018, 50578076); 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB714200)

收稿日期: 2009-01-16

径模型、有效应力模型和瞬态反应模型等, 其后有许多的研究者开展进一步研究以拓展、改进上述模型。影响因素方面, 初始应力条件^[5-6]、土质条件^[7-8]等对振动孔压的影响也相继开展室内试验研究。上述研究成果是以不排水条件下室内试验结果为基础得到的, 可以发现就振动孔压波动的相位特性而言, 振动孔压的波动反应十分接近应变的反应。

事实上, 局部排水边界条件比不排水边界条件更加符合实际场地状况。现有振动孔压模型都假设不排水边界或忽略排水边界的影响。局部排水条件下, Lin^[9]基于 Boit 理论开展了半无限空间非黏性流饱和多孔介质弹性波的反射问题的数值分析, 结果表明: 排水和不排水两种边界条件下多孔介质的应力、应变以及排水边界处的变形等特性具有明显的差异, 但并未研究排水边界附近多孔介质的振动孔压特性。刘占芳^[10]、崔杰^[11]等进行了局部排水条件下饱和多孔介质动力反应特性的理论研究和数值分析。但在试验研究方面, 很少涉及局部排水边界条件下振动孔压的变化规律, 对局部排水边界附近饱和多孔介质中振动孔压的变化规律以及排水边界的影响厚度、影响程度等问题非常缺乏认识。

本文通过局部排水条件下南京细砂施加轴向荷载的循环三轴试验, 发现和分析了振动孔压波动反应的一种新现象。基于饱和两相介质理论, 探讨了振动孔压波动反应新现象的机理。

1 局部排水条件下分级循环荷载试验

1.1 试验仪器

试验采用南京工业大学岩土工程研究所自行研制的 DSZ-1 型轴向应力控制的动三轴仪。

1.2 局部排水条件的室内试验模拟

图 1 为试验模拟的水平场地的砂土单元示意图。该砂土单元位于地下水位以下, 并接近地下水位, 即 $x_0 \rightarrow 0$ 。砂土单元上表面处于完全排水条件下, 而下表面处于局部排水条件。地下水埋深为 H , 即该砂土单元的有效围压可通过土体重度和深度等计算得到。本试验采用有效围压 $s'_c = 100$ kPa。

为了在动三轴试验中模拟该砂土单元下表面受到动荷载 s_d 作用下振动孔压的波动反应, 将排水面设置到试样顶端, 排水管与截面积较大的容器相连, 确保排出的孔隙水基本不发生静水水头变化, 避免静水水头压力带来的误差。孔隙水压力传感器设置到试样底部。从试样底部施加轴向循环荷载。在轴向循环荷载作用下, 试样顶部处于完全排水状态, 而试样底部则为局部排水条件, 达到局部排水条件和振动孔压测试的目的。

DSZ-1 型动三轴仪的局部排水条件设置如图 2 所示, 循环三轴试验仪的其它更多信息请参见文献[12]。

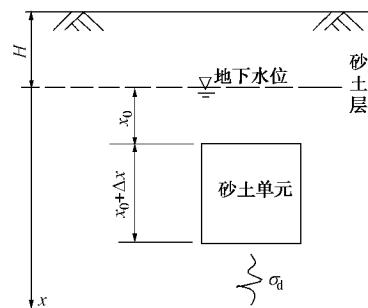


图 1 试验模拟的水平场地砂土单元

Fig. 1 Sand element in level field simulated in this study

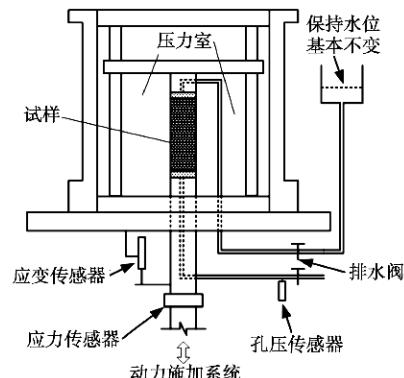


图 2 DSZ-1 型循环三轴试验仪的压力室示意图

Fig. 2 Pressure chamber system of cyclic triaxial test apparatus

1.3 试验试样制备和试验过程

试验试样使用南京细砂, 颗粒级配如图 3 所示。制备试样前, 首先筛出细粒 (粒径小于 0.075 mm), 然后使用筛出的细粒配置成细粒含量分别为 0%、5.0% 和 13.5% 三组干砂。将定量干砂 (135 g) 浸泡 12 h 以上, 之后采用与干砂水沉法^[13] 类似的方法在循环三轴仪的压力室内直接制成试样。每次的湿砂放入量尽量少, 各次的放入量尽量均等, 以减小试样的不均匀性。对比试验表明, 南京干细砂先经过浸泡能使试样达到更好的饱和度。试样的尺寸: 直径 3.91 cm×高 8 cm。试样的干密度 $r_d = 1.41$ g/cm³。

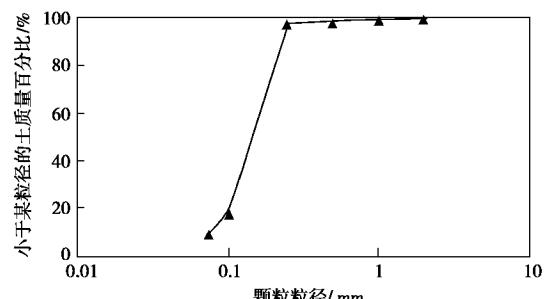


图 3 南京细砂的颗粒级配

Fig. 3 Particle size of Nanjing fine sand

成样之后, 先循环饱和约 1 h, 然后测量试样的饱和度。所有试样测得的 B 值均需在 0.95 以上。接着将有效围压缓慢增加到 100 kPa, 打开排水阀排水, 固结至孔压完全消散。固结完成后, 开始局部排水条件下的循环三轴试验。循环荷载采用 0.5 Hz、1.0 Hz 和 5.0 Hz 的正弦波, 施加 6~7 个循环后, 将循环荷载保持一段时间为 0 以保证振动孔压完全消散, 再施加下一级循环荷载, 分级增加到 80 kPa 左右时试验停止。荷载施加过程如图 4 所示。

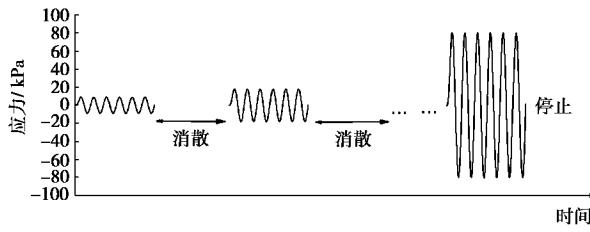


图 4 荷载施加过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of loading

试验的控制参数有循环荷载幅值和频率、试样的细粒含量; 试验直接测试得到的参数有轴向应力、轴向应变和试样底部的振动孔压, 通过轴向应变采用式(1)推算出间接测试参数轴向应变率:

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i}{t_{i+1} - t_i} + \frac{\epsilon_i - \epsilon_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right), \quad (1)$$

其中, ϵ_i 、 $\dot{\epsilon}_i$ 为 t_i 时刻对应的轴向应变、轴向应变率。

局部排水条件下的动三轴试验方案如表 1 所示。

表 1 动三轴试验方案

Table 1 Test schemes for cyclic triaxial tests

试样编号	细粒含量 $F_s/\%$	荷载频率 F/Hz
ND1	0	5.0
ND2	0	1.0
ND3	0	0.5
ED1	5.0	5.0
ED2	5.0	1.0
ED3	5.0	0.5
NE1	13.5	5.0
NE2	13.5	1.0
NE3	13.5	0.5

2 局部排水条件下振动孔压波动特性的试验结果

图 5 给出了试样 ND3 施加轴向应力幅值为 48.6 kPa 时的试验结果。可以看出, 振动孔压幅值和零点值的时刻明显位于轴向应力、轴向应变幅值和零点值之前, 而与轴向应变率的幅值和零点值时刻非常接近。其它试验结果也出现了超前于轴向应力和轴向应变反

应的振动孔压波动现象。

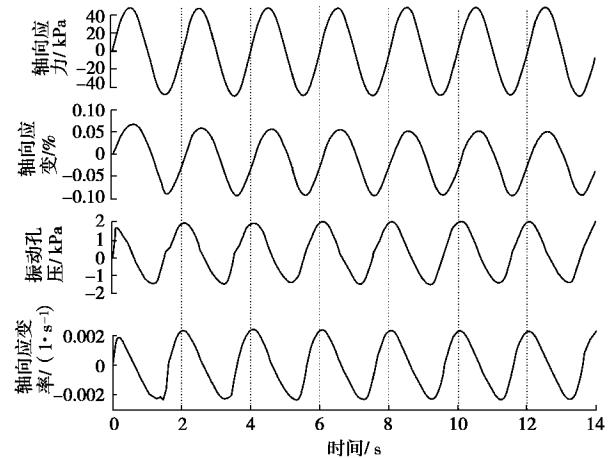


图 5 振动孔压波动反应的典型试验结果

Fig. 5 Typical results of EPWP wave response

本文从幅值关系和相位角关系两个方面来分析振动孔压的波动特性, 以及细粒含量和正弦波荷载频率对振动孔压波动特性的影响。轴向应力、轴向应变、轴向应变率、振动孔压的幅值采用第三、第四周循环幅值的平均值。运用互相关函数定量分析振动孔压波动反应的相位特性。根据互相关函数的定义可知: 互相关函数最大值对应自变量的数值反映了两组相关测试数据之间的相位差。对于周期性的两组数据而言, 得到的相关函数也具有周期性。根据测试参数的物理意义, 取相位差的最小值为两组测试数据之间的相位差。

2.1 振动孔压波动的幅值特性

图 6 给出振动孔压幅值和轴向应力幅值之间的关系, 可以看出: 在相同的正弦波荷载频率下, 振动孔压波动幅值随荷载幅值的增大而增大; 振动孔压波动幅值的增加量和正弦波荷载频率、细粒含量有关。振动孔压波动幅值与轴向应变幅值之间也具有相似的关系, 如图 7 所示。

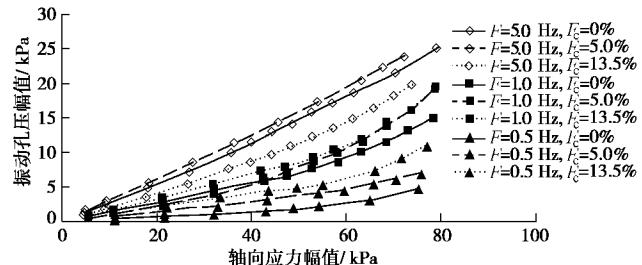


图 6 振动孔压波动幅值随轴向应力幅值的变化

Fig. 6 Variation of EPWP amplitudes with axial stress amplitudes

振动孔压波动幅值与轴向应变率幅值之间的关系如图 8 所示, 可以看出: 随着轴向应变率幅值的增大, 振动孔压波动幅值增大。试验得到的数据点都位于狭窄的区域内, 受到正弦波荷载频率和砂土细粒含量的

影响较小。特别是 1.0 Hz 正弦波荷载情况下的试验结果, 振动孔压几乎不受正弦波荷载频率和砂土细粒含量的影响。因此, 预测南京细砂振动孔压的波动幅值时采用轴向应变率幅值作为变量比采用轴向应力幅值和轴向应变幅值作为变量更合适。

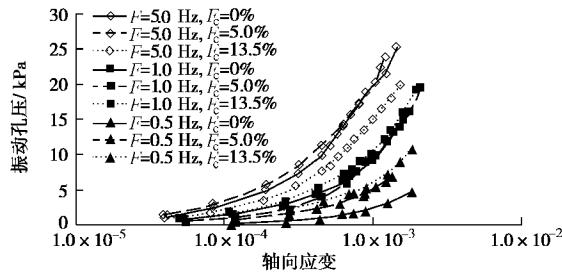


图 7 振动孔压波动幅值随轴向应变幅值的变化

Fig. 7 Variation of EPWP amplitudes with axial strain amplitudes

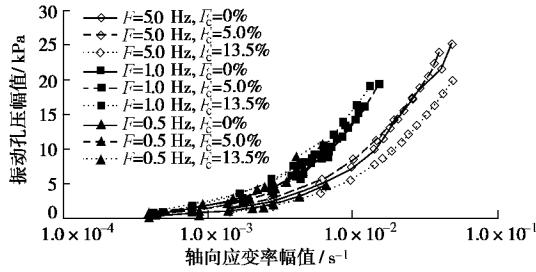


图 8 振动孔压波动幅值随轴向应变率幅值的变化

Fig. 8 Variation of EPWP amplitudes with axial strain-rate amplitudes

2.2 振动孔压波动的相位特性

图 9 给出振动孔压—轴向应力相位角随轴向应力的变化关系, 相位角为正值表示振动孔压的波动反应超前于轴向应力的反应, 反之则相反。可以看出, 对于细粒含量确定的试样在相同频率的正弦波荷载作用下, 振动孔压—轴向应力相位角随轴向应力幅值的增大只发生略微的变小。考虑到分级加载的试验过程, 可以认为, 相位角随轴向应力幅值的增大而稍微减小的变化是由于在逐级增加轴向应力作用于同一个试样, 使试样产生略微变密实造成的, 振动孔压反应超前于轴向应力反应的相位角不受轴向应力幅值的影响。根据振动孔压—轴向应变相位角以及振动孔压—轴向应变率相位角分别随轴向应变和轴向应变率幅值变化的试验结果, 可以认为这些相位角也不受轴向应变幅值或轴向应变率幅值的影响, 如图 10、11 所示。

另一方面, 振动孔压波动反应和轴向应力、轴向应变和轴向应变率反应之间的相位角受到试样细粒含量和荷载频率的影响非常明显。从图 12 可以看出, 当正弦波荷载频率为 0.5 Hz、细粒含量为 0% 时, 振动孔压—轴向应变率相位角为 0, 即振动孔压波动反应与轴向应变率反应同步。随着荷载频率和细粒含量的增加, 振动孔压波动反应滞后轴向应变率反应的相位角

逐渐增大。

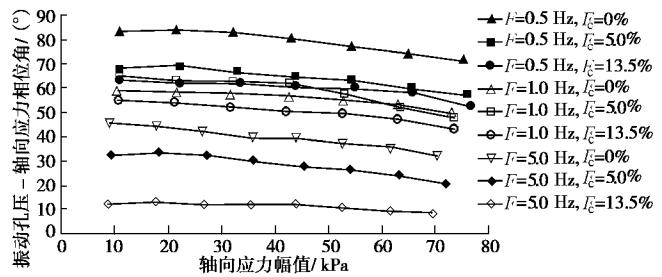


图 9 振动孔压—轴向应力相位角随轴向应力幅值的变化

Fig. 9 Variation of phase angles between EPWP and axial stress with axial stress amplitudes

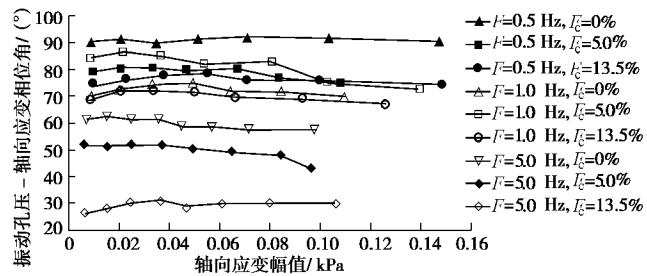


图 10 振动孔压—轴向应变相位角随轴向应变幅值的变化

Fig. 10 Variation of phase angles between EPWP and axial strain with axial strain amplitudes

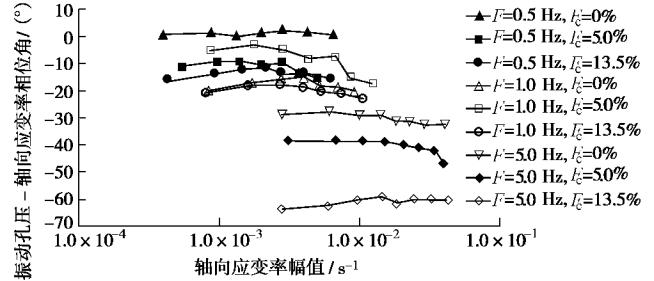


图 11 振动孔压—轴向应变相位角随轴向应变幅值的变化

Fig. 11 Variation of phase angles between EPWP and axial strain-rate with axial strain-rate amplitudes

砂土细粒含量的变化将引起砂土渗透性的变化。上述三类细粒含量砂土采用常水头渗透试验得到的渗透系数如表 2 所示, 渗透系数对振动孔压—轴向应变率相位角的影响关系如图 13 所示。可以看出, 随着砂土渗透性的增大, 振动孔压波动反应滞后于轴向应变率反应的相位角逐渐减小, 当渗透系数为 1.35×10^{-3} cm/s (细粒含量为 0%)、正弦波荷载频率为 0.5 Hz 时, 振动孔压波动反应与轴向应变率反应达到同步。

表 2 砂土渗透系数试验结果

Table 2 Results of permeability of sand

试验编号	$F_c/\%$	渗透系数/(cm \cdot s $^{-1}$)
C1	0	1.35×10^{-3}
C2	5.0	1.04×10^{-3}
C3	13.5	8.93×10^{-4}

注: 动三轴试验所用透水石的渗透系数大于 5×10^{-3} cm/s。

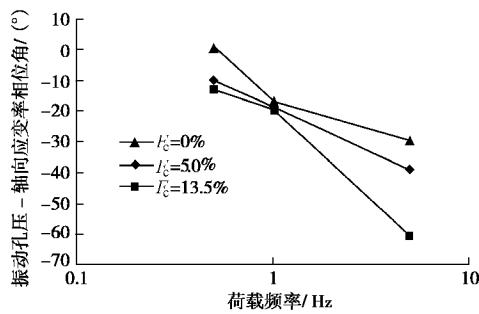


图 12 振动力压 - 轴向应变率相位角随荷载频率的变化
Fig. 12 Variation of phase angles between EPWP and axial strain-rate with loading frequency

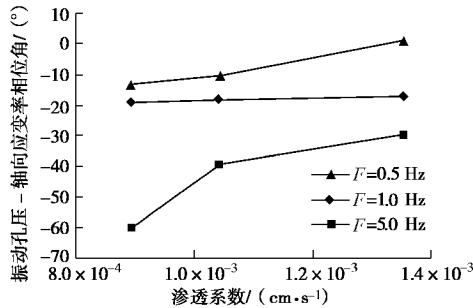


图 13 振动力压 - 轴向应变率相位角随渗透系数的变化
Fig. 13 Variation of phase angles between EPWP and axial strain-rate with permeability

3 局部排水条件下振动孔压波动反应相位特性的机理

饱和细砂是典型的两相介质, 且满足达西定律的适用范围^[14]。达西定律表示了流量与水力梯度之间的一种线性关系, 沿 x 方向的达西定律为

$$Q_x = \frac{k_x A (h_1 - h_2)}{L}, \quad (2)$$

式中, Q_x 、 k_x 分别为 x 方向的流量和渗透系数, A 为两相介质横切面积, $(h_1 - h_2)$ 为水头差, L 为 x 方向上水头测点之间的距离。由液相对固相的相对流速可知, 单位时间内通过饱和多孔介质单位面积的流量为

$$\frac{Q}{A} = n(\mathbf{v}_x - \mathbf{v}_s), \quad (3)$$

式中, \mathbf{v}_x 、 \mathbf{v}_s 分别为 x 方向的孔隙水和土颗粒的运动速度, n 为孔隙率。

使用水头来表示振动孔压, 即 $P = r_w g h$, r_w 为孔隙水密度, 联合式(3)一起代入式(2), 且当 $L \rightarrow 0$ 时, 得到

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{n r_w g}{k_x} (\mathbf{v}_x - \mathbf{v}_s). \quad (4)$$

采用三维向量形式, 稍作整理, 就可以进一步得到

$$\frac{\mathbf{r}}{r_w g} = \frac{k}{n r_w g} \operatorname{grad} P + \frac{\mathbf{r}}{r_w g}. \quad (5)$$

式中 k 为渗透系数; \mathbf{v} 、 \mathbf{v}_s 分别为孔隙水和土颗粒的运动速度向量; $\operatorname{grad} P$ 为振动孔压 P 的梯度。

根据饱和两相介质中孔隙水的连续性条件可以得到如下方程^[11, 15-16]:

$$n \operatorname{div}(\mathbf{v}) + (1-n) \operatorname{div}(\mathbf{v}_s) + \frac{n}{E_w} \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{1}{E_s} \frac{\partial \Theta}{\partial t} = 0. \quad (6)$$

式中 $\operatorname{div}(\mathbf{v})$ 、 $\operatorname{div}(\mathbf{v}_s)$ 分别为孔隙水和土体的体应变速率; E_w 、 E_s 分别为孔隙水和土颗粒体积压缩模量; Θ 为土体受到的平均主应力, 即 $\Theta = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3}$ 。振动孔压 P 以压为正。该方程表征了孔隙水的变形包括孔隙水自身变形 $\frac{n}{E_w} \frac{\partial P}{\partial t}$ 和流动孔隙水产生的变形 $n \operatorname{div}(\mathbf{v})$ 两部分, 两者之和等于土体的变形。

将式(5)代入式(6), 并假定各个方向的渗透系数相等, 整理得到

$$\frac{n}{E_w} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{k}{r_w g} \nabla^2 P = \frac{1}{E_s} \frac{\partial \Theta}{\partial t} - \operatorname{div}(\mathbf{v}), \quad (7)$$

式中, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 为拉普拉斯算子。

一般不考虑土颗粒的压缩性, 即式(7)为

$$\frac{n}{E_w} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{k}{r_w g} \nabla^2 P = -\operatorname{div}(\mathbf{v}). \quad (8)$$

式(8)与含有热源的各向同性物体的热传导(扩散)方程^[17]很相似, 是砂土受到动荷载作用时, 振动孔压随时间变化的空间分布场方程, 且与砂土的变形有直接的联系。由于推导过程中不需要考虑边界条件, 因此该方程适用于任意排水边界条件。该方程表明孔隙水自身变形 $\frac{n}{E_w} \frac{\partial P}{\partial t}$ 和孔隙水流动 $\frac{k}{r_w g} \nabla^2 P$ 对振动孔压都有贡献。

式(8)的一维形式为

$$\frac{n}{E_w} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{k_x}{r_w g} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = -\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial t}. \quad (9)$$

下面根据一维的振动孔压方程式(9)来讨论振动孔压波动特性的机理。

首先, 若砂土处于不排水状态, 则可认为砂土单元表面之间没有振动孔压差, 即 $\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = 0$, 则式(9)等号两边对时间积分, 整理得到

$$P = -\frac{E_w}{n} \frac{\partial u_x}{\partial x}. \quad (10)$$

分析式(10)可以看出, 若砂土单元的应变 $e_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}$ 随时间的变化为正弦形式, 则砂土中振动孔压的波动反应也为正弦形式, 两者的反应相位保持一致。这与不

排水条件下砂土振动孔压波动反应与轴向应变反应之间保持相位一致的现象吻合。因此,本文将式(8)等号左边第一项称为应变振动孔压项。

其次,当施加的荷载频率较小,砂土渗透系数较大时,孔隙水流产生的变形远远大于孔隙水自身变形,即 $\frac{n}{E_w} \frac{\partial P}{\partial t} \ll \frac{k}{r_w g} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$ 。如本文试验施加的正弦波荷载频率为 0.5 Hz,细砂的渗透系数为 1.35×10^{-3} cm/s 时,局部排水条件下试样中孔隙水的波动体积应变在 10^{-3} 量级,而即使压力变化为 219 kPa 的情况下,孔隙水自身变形的应变量级也只有 1×10^{-6} 量级 ($E_w = 2.19$ GPa (1atm, 20°C)^[18])。因此忽略孔隙水自身变形项,则式(9)可改写为

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = -\frac{r_w g}{k} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial t}, \quad (11)$$

即

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{r_w g}{k} \frac{\partial u_x}{\partial t}. \quad (12)$$

式(11)的三维形式便是熟知的饱和土 Boit 固结理论。分析式(12)可以看出,处于局部排水边界附近的一维砂土单元,如图 14 所示,若砂土单元的变形速率反应 $\frac{\partial u_x}{\partial t}$ 为正弦形式,则单元上下两表面间的振动孔压压力差 $\frac{\partial P}{\partial x}$ 的波动反应也为正弦形式,两者之间没有相位差。因此,本文将式(8)等号左边第二项称为应变率振动孔压项。图 5 试验结果中振动孔压相位与轴向应力、轴向应变相位相差很大,但与应变率相位十分接近的现象,是应变率振动孔压的具体体现。

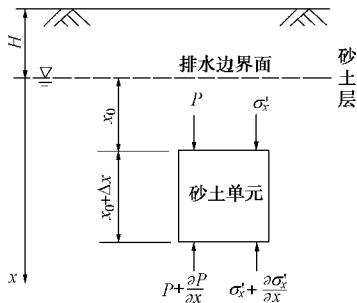


图 14 排水边界附近一维砂土单元示意图

Fig. 14 1D sand element near drainage boundary surface

随着施加的荷载频率的增大或砂土渗透系数的减小,局部排水条件下砂土振动孔压的波动越接近于不排水条件下砂土振动孔压的波动反应,其反应的相位越接近于应变的波动反应。一般情况下,砂土中应变振动孔压和应变率振动孔压同时存在,但所占的比重因砂土渗透系数和施加的荷载频率等条件而有所不同。

4 结 论

不同细粒含量的南京细砂试样在局部排水条件

下,施加不同频率的轴向循环荷载时,发现:

(1)当施加的正弦波荷载频率和砂土的渗透系数为某特定值时,本次试验荷载频率为 0.5 Hz,砂土的渗透系数为 1.35×10^{-3} cm/s 时,振动孔压的波动反应超前轴向应变反应的相位角达到 90°,与轴向应变率反应同步。

(2)随着施加的正弦波荷载频率的增大或砂土渗透系数的减小,振动孔压的波动反应超前于轴向应变反应的相位角逐渐减小,滞后于轴向应变率反应的相位角逐渐增大。

基于饱和两相介质理论,建立了适用于任意排水边界条件的砂土振动孔压方程式(8)或式(9)。分析该方程得出:孔隙水的自身变形和渗流都对振动孔压的产生有贡献。应变振动孔压和应变率振动孔压两者随着施加的正弦波荷载频率和砂土渗透系数的变化,对振动孔压贡献的比重是不同的,且随着正弦波荷载频率的增大或渗透系数的减小,应变率振动孔压的比重降低,应变振动孔压的比重增加,振动孔压的相位从与应变率同步向与应变同步发展。该方程能合理地解释局部排水条件下南京细砂振动孔压的波动特性。

参 考 文 献:

- [1] SEED H B, MARTIN P P, LYSMER J. Pore-water pressure changes during soil liquefaction[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1976, **102**(4): 323 - 346.
- [2] FINN W D L, BHATIA S K. Predictions of seismic pore water pressure[C]. Stockholm, 1982.
- [3] ISHIHARA K, ANAZAWA Y, KUWANO J. Pore water pressures and ground motions monitored during the 1985 Chiba-Ibaragi earthquake[J]. Soils and Foundations, 1987, **27**(3): 13 - 30.
- [4] 谢定义, 张建民. 饱和砂土瞬态动力学特性和机理分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995. (XIE Ding-yi, ZHANG Jian-min. Transient dynamics characteristics and mechanism analysis of saturated sand[M]. Xi'an: Shaanxi Publishing House of Science & Technology, 1995. (in Chinese))
- [5] JURKO J, SASSA K, FUKUOKA H. Study on seismic behavior of nonplastic silt by means of ring-shear apparatus[J]. Landslides, 2008, **5**(2): 189 - 201.
- [6] 张 茹, 何昌荣, 费文平, 等. 固结应力比对土样动强度和动孔压发展规律的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(1): 101 - 105. (ZHANG Ru, HE Chang-rong, FEI Wen-ping, et al. Effect of consolidation stress ratio on dynamic strength

- and dynamic pore water pressure of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1):101 - 105. (in Chinese))
- [7] DERAKHSHANDI M, RATHJE E M, HAZIRBABA K, et al. The effect of plastic fines on the pore pressure generation characteristics of saturated sands[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008, 28(5): 376 - 386.
- [8] 陈国兴, 刘雪珠. 南京粉质黏土与粉砂互层土及粉细砂的振动孔压发展规律研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 79 - 82. (CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu. Study on dynamic pore water pressure in silty clay interbedded with fine sand of Nanjing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 79 - 82. (in Chinese))
- [9] LIN C, LEE V W, TRIFUNAC M D. On the reflection of elastic waves in a poroelastic half-space saturated with non-viscous fluid[R]. Los Angeles: University of Southern California, 2001.
- [10] 刘占芳, 姜乃斌, 李思平. 饱和多孔介质一维瞬态波动问题的解析分析[J]. 工程力学, 2006, 23(7): 19 - 24. (LIU Zhan-fang, JIANG Nai-bin, LI Si-ping. An analysis on one-dimensional transient wave motion in saturated porous media[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(7): 19 - 24. (in Chinese))
- [11] 崔杰. 含水土层中的波传播及土壤化[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2002. (CUI Jie. The wave propagation in saturated soil layer and sand liquefaction[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, 2002. (in Chinese))
- [12] 陈国兴, 朱定华, 何启智. DSZ-1型动三轴试验机研制与性能试验[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(6): 71 - 74. (CHEN Guo-xing, ZHU Ding-hua, HE Qi-zhi. Development and test of DSZ-1 cyclic triaxial testing system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibaration, 2002, 22(6): 71 - 74. (in Chinese))
- [13] ISHIHARA K. Soil behavior in earthquake geotechnics[M]. Oxford: Clarendon Press, 1996.
- [14] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guang-xin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [15] 陈龙珠. 饱和土中弹性波的传播速度及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 1987. (CHEN Long-zhu. Propagation velocities of elastic waves in saturated soils and applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1987. (in Chinese))
- [16] 陈少林, 廖振鹏. 关于两相介质动力学问题建模的注记[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(4): 1 - 8. (CHEN Shao-lin, LIAO Zhen-peng. Study on mechanic models of two-phase media[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibaration, 2002, 22(4): 1 - 8. (in Chinese))
- [17] 邵惠民. 数学物理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (SHAO Hui-min. Method of mathematical physics[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [18] WHITE F M. Fluid mechanics[M]. 5th ed. McGraw-Hill Education (Asia) Co and Tsinghua University Press, 2004.