

振动频率对饱和砂土动力特性的影响

张建民 王稳祥

(陕西机械学院水利系, 西安)

一、前言

加荷速率和循环效应是影响往返荷载下饱和砂土动力特性的重要因素。采用往返荷载作用条件下改变振动频率的室内试验方法, 能够综合研究加荷速率和循环效应对饱和砂土动力特性的影响。文献[1, 2]的研究表明: 砂土在一般地震作用的频率范围内, 振动频率对抗液化强度没有多大影响。对于更大的频率范围, 文献[3]指出: 抗液化强度随振动频率增高而略有减小。但振动频率在更多方面对饱和砂土动力特性的影响尚需进一步研究。

本文采用较粗粒径的饱和标准砂, 在振动频率为1, 5, 10, 15, 20Hz, 固结侧压力 $\sigma_{sc}=100\text{kN/m}^2$, 固结应力比 $K_c=1.0, 1.5, 2.0$ 条件下, 进行了固结不排水振动三轴试验。在此基础上, 分析了振动频率对饱和砂土抗液化强度, 动有效抗剪强度指标, 动变形, 动孔隙水压力和动模量等动力特性的影响, 为进一步定量描述饱和砂土的这些动力特性打下了重要的基础。

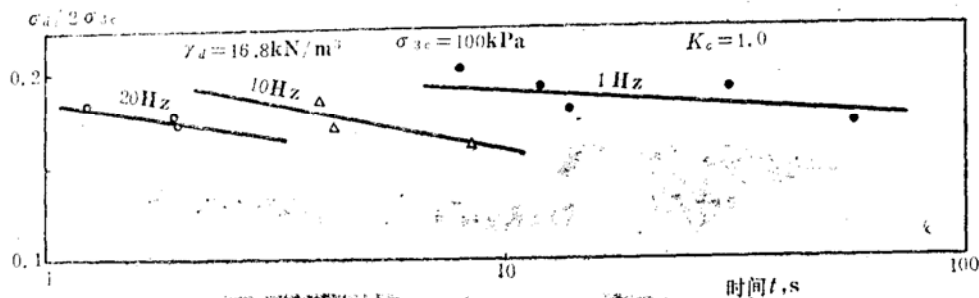
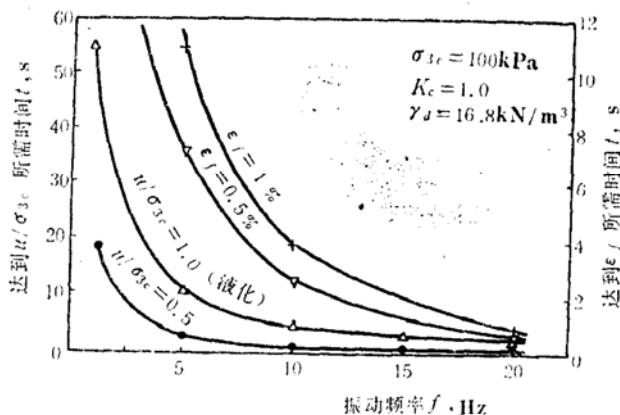
二、振动频率对动强度特性的影响

(一) 抗液化强度特性

一般将土的抗液化强度定义为, 在一定振动次数条件下土产生液化所需要的动应力。通常用所谓抗液化强度曲线(即动应力比 $\sigma_d/2\sigma_{sc}$ 与液化振次 N_L 间关系曲线)来表示。已有的研究认为^[1,2], 抗液化强度受振动频率的影响不大, 我们在1—20Hz振动频率范围内验证了这一结论。但是, 如果采用动应力比 $\sigma_d/2\sigma_{sc}$ 与液化所需的振动时间 t 之间关系(图1)来表述土的抗液化强度特性, 则发现不同振动频率下饱和砂土的抗液化强度特性有明显区别。这一差别的重要意义, 可以通过绘制达到液化所需的振动时间 t 与振动频率 f 之间的关系来揭示。从图2可以看出, 在其它条件相同情况下, 振动频率越高, 达到液化所需要的振动时间急剧减少; t 与 f 关系近似为双曲线(即 $f \cdot t \approx \text{常数}$), 说明在振动荷载相近条件下, 只要振动次数不变, 低频长振动持续时间和高频短振动时间的不同组合下土的抗液化强度在大小上没有多大差别, 或者说同样可以导致砂土产生液化。

到稿日期1987年8月10日。

本文研究得到水利水电科学基金资助。

图1 $\sigma_d / 2 \sigma_{3c} - t$ 关系图2 不同取值标准下的 $f-t$ 关系

(二) 动有效抗剪强度指标

笔者在文献[4]中提出, 饱和砂土在往返荷载下的有效抗剪强度 τ_{at} 可表述为

$$\tau_{at} = \sigma_t' \operatorname{tg} \varphi_a' + \eta \dot{\gamma}_t \quad (1)$$

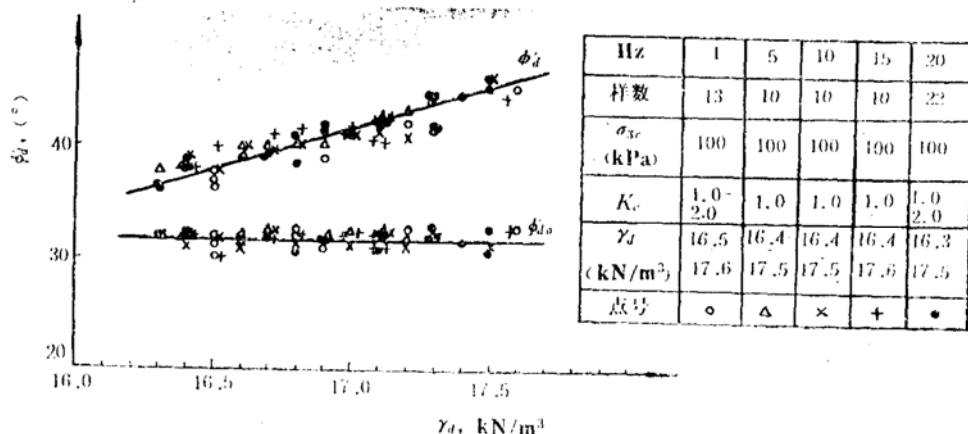
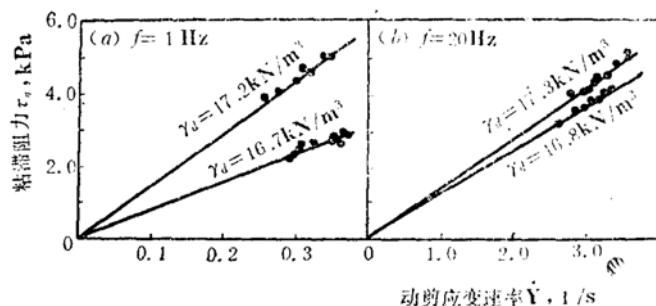
式中 σ_t' 和 $\dot{\gamma}_t$ 分别为 t 时刻剪破面上的法向有效应力和动剪应变速率; φ_a' 和 η 分别为动有效内摩擦角和动力粘滞系数, 统称为饱和砂土的动有效抗剪强度指标。

根据文献[4]所提出的试验确定方法, 以应变充分发展为取值标准所确定的动有效内摩擦角 φ_a' , 和以初始剪胀为标志作为取值标准所确定的初始剪胀角 φ_{ao}' , 均不随振动次数、固结应力比、动应力大小不同而变化, 并与起始密度状态之间有着良好的线性关系; 并且与相同取值标准下的静有效内摩擦角 φ_s' 和静初始剪胀角 φ_{so}' 在数值上有完全相同的变化规律。同时, 动力粘滞系数 η 当达到液化状态后仅随起始密度增高而增大。上述结论是在振动频率为0.5Hz条件下得到证实的。下面将扼要说明, 在一般地震作用的频率变化范围内, 动有效抗剪强度指标的变化规律和影响强度指标测定的主要因素。

1. 动有效抗剪强度指标的唯一性

试验资料分析表明: 不同振动频率条件下, 饱和砂土的动有效内摩擦角 φ_a' 和初始剪胀角 φ_{ao}' 不受振动次数的影响, 也不随固结应力比 K_c 的变化而不同, φ_a' 与起始密度状态 γ_d 间具有良好的线性关系, φ_{ao}' 则不随 γ_d 的不同而变化(图3)。从而证明了饱和砂土的动有效内摩擦角 φ_a' 和初始剪胀角 φ_{ao}' 在1—20Hz振动频率范围内是稳定的土性指标。

图4表明在饱和砂样达到液化状态以后, 当振动频率一定时, 动力粘滞系数 η 随剪应变速率 $\dot{\gamma}$ 的增大基本不变(η 即图中试验关系曲线的斜率), 并随起始密度 γ_d 的增大而增高。 η 因振动频率不同而有明显变化。

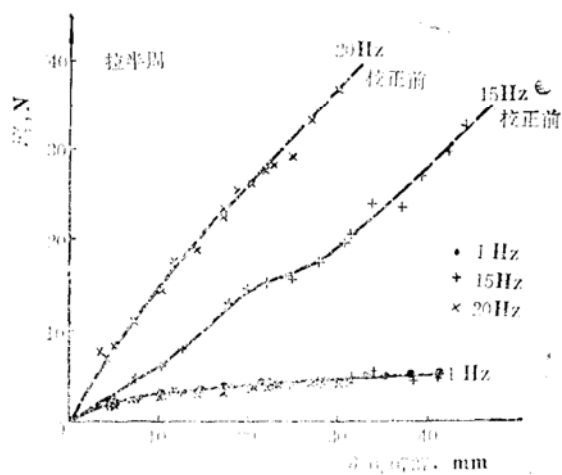
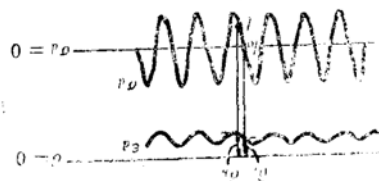
图3 $\phi'_d-\gamma_d$ 图4 $\tau_d-\dot{\gamma}$

2. 影响动有效抗剪强度指标确定的主要因素

饱和砂土的振动三轴试验中, 影响土动有效抗剪强度指标的因素是众多的。对较高振动频率的情形, 除了要考虑常规试验中应该注意的问题外, 根据文献[4]方法所确定的动有效抗剪强度指标的唯一性, 将取决于能否合理地校正不同振动频率下仪器系统的阻尼力, 土样的惯性力及试验记录的滞后现象。

采用水试样试验方法^[5]能较好地确定出不同振动频率下仪器系统的阻尼力。图5(以往返荷载作用的拉半周为例)给出了水试样试验确定出的不同频率下仪器系统阻尼力的校正曲线, 即仪器系统阻尼力 F_d' 与水试样轴向拉半周位移 $\delta/0.0737$ (其中分母的0.0737为位移标定系数)之间的关系。分析表明: 不同振动频率下水试样的惯性力大小的差别, 是导致仪器系统阻尼力校正曲线不一致的原因。如果扣除掉水试样的惯性力影响, 则不同振动频率下仪器系统阻尼力校正曲线是基本重合的。

土样惯性力对动强度指标唯一性的影响是随振动频率提高而明显增大的。由于惯性力不是土样受到外荷作用时其材料本身的阻抗力, 但又包含在荷载传感器所记录的荷载值中, 所以必须加以扣除。为了确定动荷作用过程中任一时刻 t 土样的惯性力 F_g 的大小, 首先, (如图6所示)取动应力 σ_d 为零的 t_0 时刻作为土样 F_g 计算的相对零点, 并以土样固结稳定后状

图5 $F'-\delta$ 图6 确定 F_g 的计算零点

态作为土样位移 δ 的零点(即 $\delta = 0$)；其次，近似地认为：①，所计算周期内的变形服从正弦变化规律；②任一时刻变形沿土样轴向为线性分布；③，土样的密度分布是均匀的，便可建立如下计算任一时刻土样惯性力 F_g 的公式

$$F_g = -\frac{1}{2} \pi^2 f^2 V_c \left(\gamma_w + \frac{G-1}{G} \gamma_d \right) (\delta_b - \delta_c) \times 10^{-6} \quad (\text{N}) \quad (2)$$

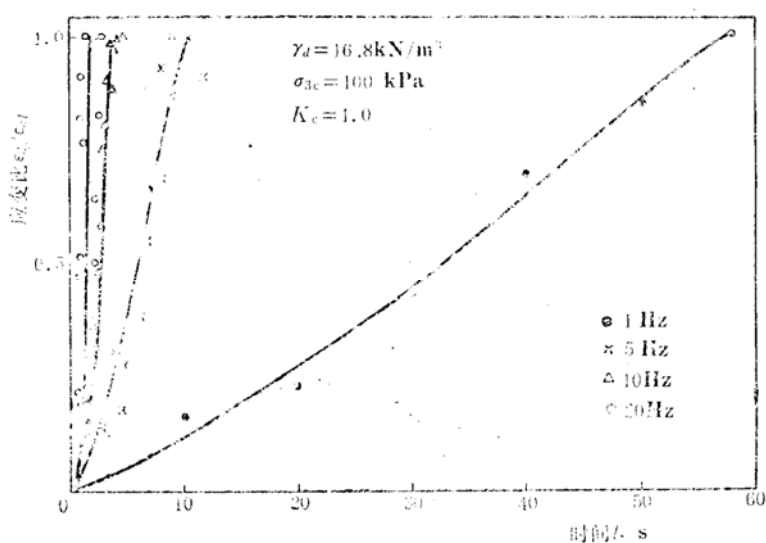
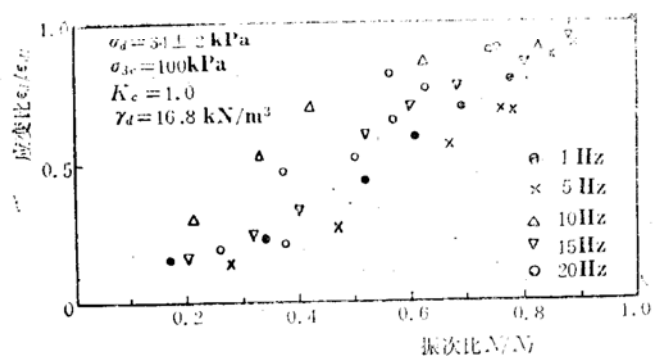
式中 负号表示 F_g 方向与土样位移方向相反； f 为振动频率； V_c 为土样固结后的体积，以 cm^3 计； G 为砂的比重； γ_d 为饱和砂土的干密度、以 g/cm^3 计； γ_w 为水的密度，以 g/cm^3 计； δ_b 、 δ_c 的物理意义见图6，均以 mm 计。

在较高频率(10—20Hz)下试验记录的孔压过程线滞后于相应的动荷、造成孔压的实际波动变化值与实测值之间存在时间差的主要原因是孔压传感器距土样有一定的距离。这可根据文献[6, 7]对饱和砂土在往返荷载下瞬态变形与孔压变化机理的认识，分析荷载与变形的变化特征点与相应时刻孔压变化特征点之间的关系，便可确定出实测的孔压与实际孔压值间的时差(近乎常数)并予以校正。

三、振动频率对动变形特性的影响

动荷作用下土的变形特性因动应变幅发展及应变速率大小的差异而有明显的不同。振动频率对饱和砂土动变形特性的影响如下所述：

如果取土样产生液化时所对应的动应变为 ϵ_{dL} ，点绘不同振动频率的往返荷载下饱和砂土的动应变比 $\epsilon_d / \epsilon_{dL}$ 和振动时间 t 之间的关系(图7)，则发现振动频率对动应变的发展有显著影响。由图7转换得到的图2表明：达到某一应变标准时，随振动频率的增加，振动时间急剧减少。这一结论的实际意义是，振动持续时间一定时，较高频率比较低频率的动荷作用下导致饱和砂土发生过量变形而破坏的可能性显著增大。并且 t 与 f 近乎双曲线关系，即振动次数一定时，在其它因素相同条件下，高频短振动时间与低频长振动时间的不同组合下均会使土样产生同样大小的变形量。

图7 $\varepsilon_d/\varepsilon_{dL}-t$ 图8 $\varepsilon_d/\varepsilon_{dL}-N/N_L$

如果点绘出相同密度, 相同固结应力状态和相近动荷条件下, 不同振动频率的 $\varepsilon_d/\varepsilon_{dL}-N/N_L$ 关系(图8), 可以看出, 不同振动频率下上述关系具有一定的规律性, 但没有明显地反映出振动频率的影响。

总而言之, 要准确描述往返荷载下饱和砂土的动变形变化规律, 振动频率的影响是不能忽视的。

四、振动频率对动孔隙水压力变化规律的影响

(一) 不同振动频率下孔压水平与振次间的关系。

试验成果的分析表明: 对均压固结条件, 如果绘制相同密度, 相近动荷作用, 但不同振动频率情况下的孔压水平 u/σ_{3c} 与振次比 N/N_L 之间的关系(图9), 则试验点据有较好的归一化性状。如果采用孔压水平 $u/\sigma_{3c} = 80\%$ 时的孔隙水压力 u_f 和振动次数 N_f , 绘制出与

图9中其它条件相同情况下的 $u/u_f-N/N_f$ 关系(图10), 试验点据也具有良好的归一化性状, 基本不受振动频率影响。并且图9和图10中的试验关系均可用幂函数关系来拟合, 即

$$u/u_f = (N/N_f)^n \quad (2)$$

其中 n 为试验参数。对图9中试验曲线可取 $n = 0.454$ (且 $u_f = \sigma_{3c}$, $N_f = N_L$), 对图10中试验曲线可取 $n = 0.567$ 。

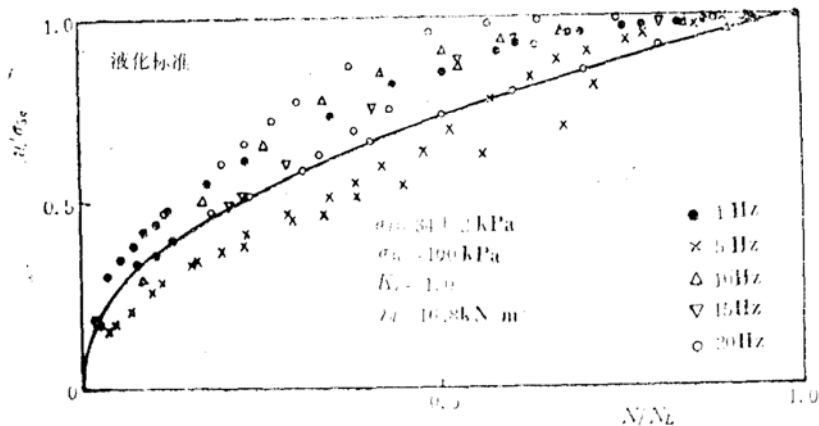


图9 $u/\sigma_{3c}-N/N_L$ (液化标准)

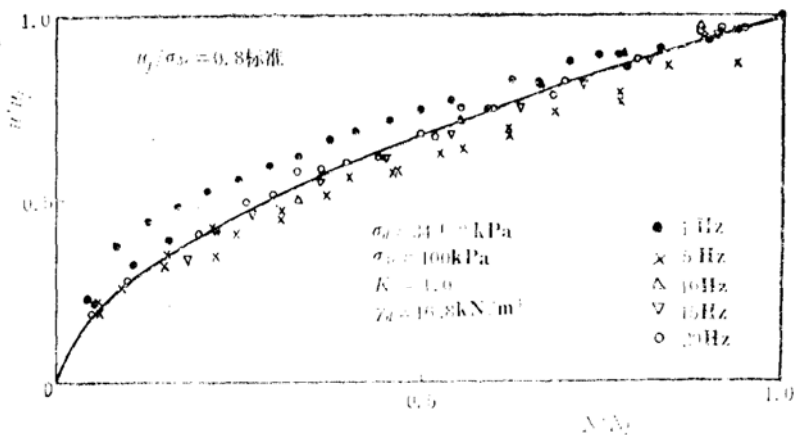


图10 $u/u_f-N/N_f$ (孔压标准)

对偏压固结($K_c = 1.5, 2.0$)条件, 由于饱和砂土孔隙水压力发展最终大多不可能发生液化(即 $u_{max} < \sigma_{3c}$), 所以, 我们选取某一应变标准(如2%应变)下的孔隙水压力 u_f 和相应的振次 N_f , 绘制出 $u/u_f-N/N_f$ 关系(图11), 表明偏压固结条件下 $u/u_f-N/N_f$ 关系也不受振动频率影响。并且发现 u_f/σ_{3c} 与 K_c 间有良好的线性关系, 即符合

$$u_f/\sigma_{3c} = 1 - \alpha(K_c - 1) \quad (3)$$

式中 α 为一定应变标准下的 $u_f/\sigma_{3c}-K_c$ 试验关系的斜率, 对 $\varepsilon_f = 2\%$ 情况, $\alpha = 0.48$ 。同时, 图11中 $u/u_f-N/N_f$ 关系也符合式(2), 并且 n 可取0.69。将式(3)代入式(2)则得

$$u/\sigma_{3c} = [1 - \alpha(K_c - 1)](N/N_f)^n \quad (4)$$

由于经验模式(4)中 N_f 可根据实际情况, 选用孔压水平取值标准与应变取值标准, 故能较好地适用于均压和偏压固结应力状态, 不同振动频率的往返荷载下饱和砂土孔隙水压力的估算。

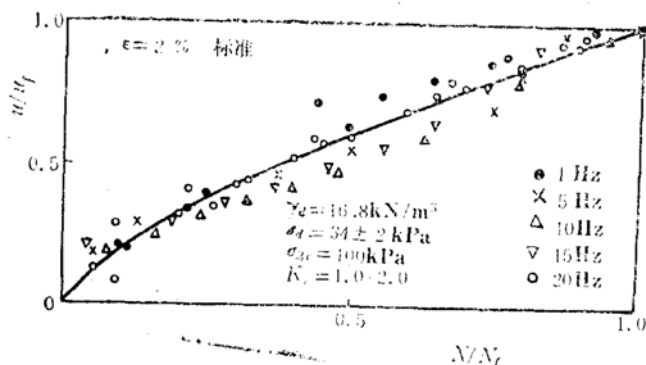


图11 $u/u_f-N/N_f$ (应变标准)

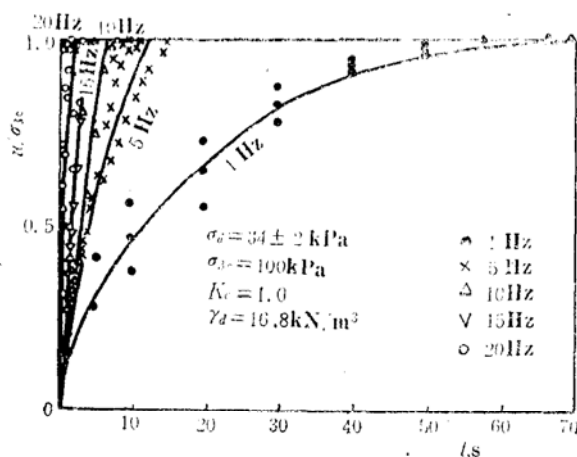


图12 $u/\sigma_{3c}-t$

(二)不同振动频率下孔压水平与振动时间之间的关系

如果建立孔压水平 u/σ_{3c} 与振动时间 t 间的关系(图12), 则发现不同振动频率条件下的 $u/\sigma_{3c}-t$ 关系有着十分明显的差别, 达到同一孔压水平时所需要的振动时间随振动频率增大而显著减少。这一结论的实际意义是, 如果实际工程条件下, 动荷的振动频率较低, 因引起某一较大孔压水平所需振动时间较长, 则动荷所引起的孔压还可能发生扩散消散而有所降低; 如果动荷的振动频率较高, 则孔隙水压力发展迅速且不能及时消散, 可能导致饱和砂体的动强度急剧下降, 最终导致土体动力失稳。所以, 较高频率的往返荷载作用对孔隙水压力发展速率的影响应予以注意。

在其它因素相同情况下, 达到某一孔压水平时, t 与 f 关系近乎双曲线(图2), 说明只要振动次数一定, 低频下较长振动时间和高频下较短振动时间的往返荷载作用下, 会使饱和砂土产生同样大小的孔压。

五、振动频率对动模量特性的影响

等效线性模量 E_d 是目前土体动力分析中应用较为广泛的一个土动力特性参数。不同振动频率、相同起始密度和相同固结应力状态条件下饱和砂土的等效线性模量 E_d 随动应变幅 ε_d 变化具有良好的归一化特性(图13),表明 $E_d-\varepsilon_d$ 基本不受振动频率影响、 E_d 随 ε_d 的发展而衰减。应该指出,不同振动频率下 $E_d-\varepsilon_d$ 的关系有良好的归一性,这给等效线性模量的试验测定和实际应用带来方便。

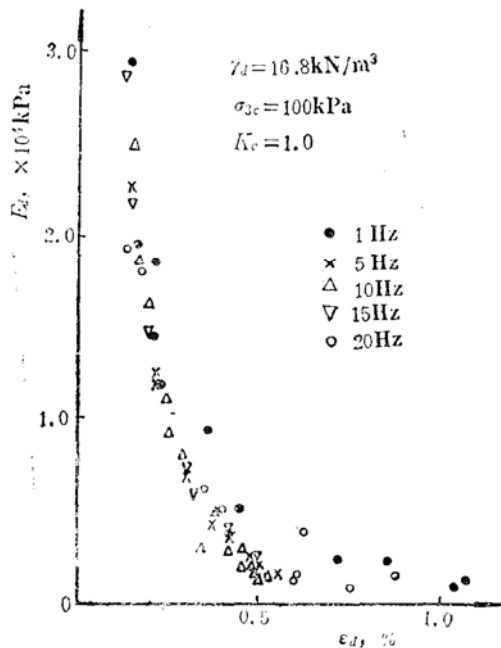


图13 $E_d-\varepsilon_d$

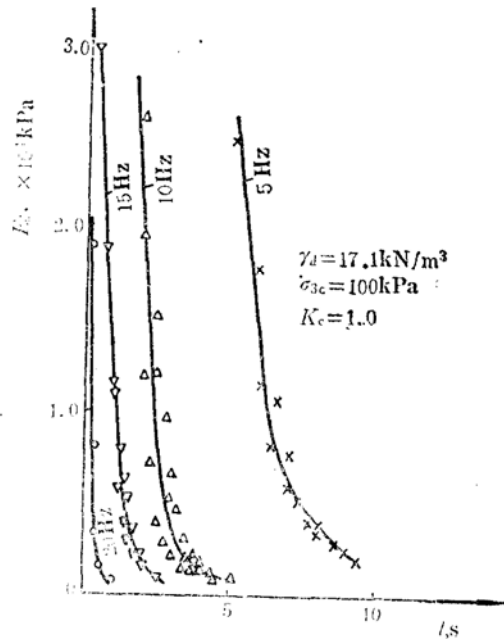


图14 E_d-t

在相同密度和相同固结应力状态条件下,不同振动频率时的等效线性模量与振动时间之间的关系(图14)表明:振动频率对 E_d-t 关系有明显影响。

六、结 语

1. 不同振动频率(1—20Hz)的往返荷载作用下,饱和砂土的有效抗剪强度受式(1)的制约。其中动有效内摩擦角 φ'_d 和初始剪胀角 φ'_{d0} 不受振动频率影响,是稳定的土性指标。动力粘滞系数 η 随土样起始密度增大而增大,随振动频率增大而降低。

2. 如果以振动时间为标尺,则较高频率比较低频率的往返荷载作用能更迅速地使饱和砂土达到某一变形、孔压和强度发挥水平,也使饱和砂土产生液化的可能性显著增大。所以,振动频率对饱和砂土动力特性的影响是不能忽视的。

3. 在其它因素相同条件下,达到某一变形、孔压或强度发挥水平时,振动频率和振动持续时间近乎双曲线关系。说明在振动荷载相近条件下,较高频率而较短振动时间与较低频率而较长振动时间的不同组合作用下,会使饱和砂土产生同样大小的变形、孔压水平或导致砂土液化。

4. 不同振动频率条件下, 饱和砂土的等效线性模量与动应变幅之间有良好的归一化性状; 饱和砂土的孔压比 u/u_f 与振次比 N/N_f 之间也具有较好归一性, 可以用幂函数模式式(4)来拟合。

本文得到谢定义教授指导。试验是在中国有色金属工业总公司西安勘察院电磁式振动三轴仪上完成的, 试验得到赵小林工程师的大力协助。特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Yoshimi, Y., Oh-oka, H., Influence of Degree of Shear stress Reversal on the Liquefaction Potential of Saturated Sand, Soils and Foundations, Vol 15, No.3, 1975, pp.27—40.
- [2] Lee, K.L., Focht, J.A., Cyclic Testing of Soil for Ocean Wave Loading Problems, 7th Annual Offshore Technology Conf., 1975, Houston, Texas.
- [3] Wong, R.T., Seed, H.B., Chan, C.K., Cyclic Loading Liquefaction of Gravelly Soils, J.GTD., Proc. ASCE, Vol.101, No. GT6, 1975, pp.571—583.
- [4] 张建民、邵生俊, 往返荷载下饱和砂土瞬态有效抗剪强度的研究, 水利学报, 1987年, 第10期, pp.33—40.
- [5] 张建民、段云秦, 振动三轴试验中仪器系统阻尼力的水试样校正法, 岩土工程学报 Vol. 11, No.1, 1989. pp.79—84.
- [6] 谢定义、张建民, 往返荷载下饱和砂土强度变形瞬态变化的机理, 土木工程学报, 1987年, 第20卷, 第3期, pp.57—70.
- [7] 谢定义、张建民, 往返荷载下饱和砂土瞬态孔隙水压力的变化机理与计算模型, 全国土工建筑物及地基抗震学术会议论文汇编. 西安, 1986.10.