

DOI: 10.11779/CJGE2017S2045

# 不同频率影响下结构性软黏土动力特性试验研究

杨爱武, 王亚成

(天津城建大学天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

**摘 要:** 为研究频率对结构性软黏土动力特性的影响, 以天津滨海新区结构性海积软土为试验材料, 基于两种波形, 进行了一系列动三轴试验, 研究不同振动频率作用下结构性软黏土应力 - 应变关系、动力塑性累积应变以及孔压特性。试验结果表明, 总体上振动频率越低, 土体的软化程度越高, 土体产生的变形越大, 累积应变增速快最终值大, 相同条件方波作用下的动应力应变软化程度高于正弦波。频率对孔压有影响, 在相同振次下, 孔压随频率的增大而减小。振幅对于孔压变化的影响表现为低幅值上升速度快, 数值也大于高幅值作用下的孔压值, 有明显的高幅滞后现象。

**关键词:** 频率; 结构性; 动应力应变关系; 动力塑性累积应变; 孔压

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)S2 - 0184 - 05

**作者简介:** 杨爱武(1971 - ), 男, 教授, 从事软黏土力学特性及土体微观结构研究。E-mail: tulilab@163.com。

## Experimental study on dynamic characteristics of structural soft clay under different vibration frequencies

YANG Ai-wu, WANG Ya-cheng

(Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** To study the influence of frequency on the dynamic characteristics of structural soft clay, a series of dynamic triaxial tests based on the two kinds of waveforms and different vibration frequencies are performed. The results show that when the vibration frequency is smaller and the deformation of the soil is larger, the deformation of the soft clay and permanent strain will be larger. Under the same conditions, the dynamic stress-strain softening degree of the square wave is higher than that of the sine wave. Under the same number of vibration, the pore pressure decreases with the increasing frequency. The effect of amplitude on the change of pore pressure is that the pore pressure increases fast and the stable value is larger when the amplitude is low.

**Key words:** frequency; structure; dynamic stress-strain relationship; dynamic plastic cumulative strain; pore pressure

## 0 引 言

目前国内就频率对软黏土动力特性的研究取得了一定成果。张茹等<sup>[1]</sup>认为, 当频率为 0.1~4 Hz 时, 强度随频率的升高而增大, 但当频率超过 4 Hz 时, 随着频率的增加, 强度有下降的趋势。周建和龚晓南<sup>[2]</sup>研究了循环应力比、超固结比、振动频率对软化指数的影响, 建立了反映各影响因素下杭州软黏土的软化模型。Yasuhara 等<sup>[3]</sup>认为频率对土体变形几乎没有影响。郑刚<sup>[4]</sup>等进行了动力三轴试验, 分析了不同振动频率下土体的动力变化规律。曹勇等<sup>[5]</sup>分析了海积结构性软土在 3 种不同循环荷载波形下的动力特性与刚度软化特征。白冰等<sup>[6]</sup>总结了国外同行关于加荷频率对周期荷载作用下黏性土变形和孔压的影响。

考虑到结构性对土体动力特性影响研究主要有: Larew 等<sup>[7]</sup>发现, 当循环应力比小于临界循环应力比

时, 循环振次很大时土体结构才发生破坏, 当大于临界循环应力比时, 土体结构在很少的振次内就发生破坏; 周建和龚晓南<sup>[8]</sup>认为, 土体在循环荷载作用下孔压升高、主应力方向不断改变导致土体结构重塑、循环应力破坏土体结构是土体软化的根本原因; 陈颖平、黄博等<sup>[9]</sup>探讨了循环荷载作用下结构性软土的不同破坏标准后认为, 采用轴向累积塑性应变随振次变化曲线上曲线转折点作为破坏应变较为合理; 姜岩<sup>[10]</sup>分析了交通荷载作用下结构性黏土的动力特性, 重点探讨了该类黏土的结构效应, 并利用数学模型推求出其结构强度值。

以上研究表明, 目前就频率对软土动力特性的影

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372291); 天津市科技计划项目(15JCZDJC40600, 15ZCZDSF00220)

收稿日期: 2017 - 08 - 02



表1 土体基本物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical parameters of soft clay

取样深度 <i>H/m</i>	含水率 <i>w/%</i>	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	比重 $G_s$	饱和度 $S_r/%$	液限 $w_l/%$	塑限 $w_p/%$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	灵敏度 $S_t$	三轴压缩结构屈服力(围压 100 kPa)/kPa
11.0	40.7	1.77	2.75	100.0	40.3	22.1	18.2	1.03	2.88	22.7

响取得了一定成果,但同时考虑到频率与结构性的软黏土动力特性的研究还很少。基于此,本文以天津滨海新区海积软土为试验材料,研究结构性软黏土在不同频率下的动力特性,为相关的工程建设提供参考。

### 1 试验方案

试验所用土样取自天津滨海新区临港工业区,取样深度为 11 m,地下水位 1 m,土体基本物理性质指标如表 1 所示。试验仪器使用 GCTS 动态空心扭剪仪,具体试验方案如表 2 所示。

表2 动三轴试验方案

Table 2 Schemes of dynamic triaxial texts

波形	频率/Hz	围压/kPa	幅值/kPa	循环周次
正弦波、	0.1, 0.5,	100	20, 40	3000
方波	2.5, 5.0			

### 2 试验成果与分析

#### 2.1 动应力应变关系

两种波型不同频率作用下的动应力应变关系曲线如图 1~8 所示。为便于观察滞回圈特性,文中所有滞回圈选取代表性圈数,且其之间累积塑性变形值规定为 1%。

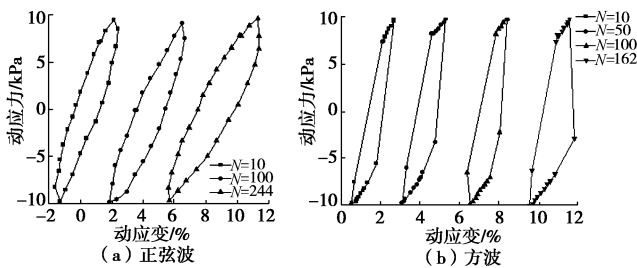


图1 频率 0.1 Hz 幅值 20 kPa 应力应变关系

Fig. 1 Stress-strain relationship under dynamic stress amplitude of 20 kPa and confining frequency of 0.1 Hz

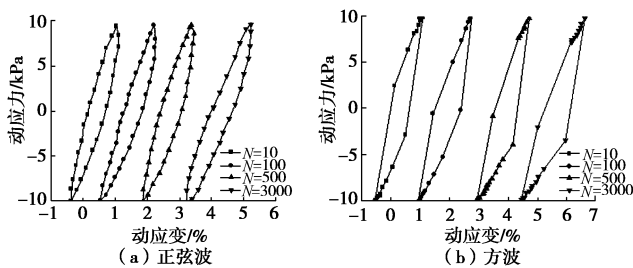


图2 频率 0.5 Hz 幅值 20 kPa 应力应变关系

Fig.2 Stress-strain relationship under dynamic stress amplitude of 20 kPa and confining frequency of 0.5 Hz

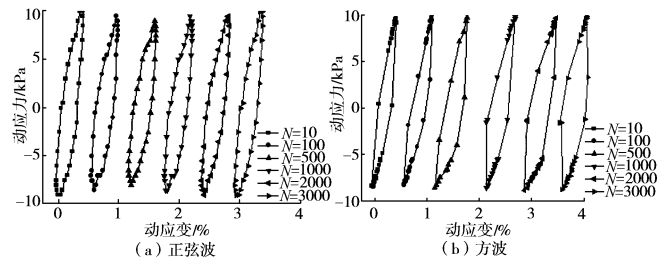


图3 频率 2.5 Hz 幅值 20 kPa 应力应变关系

Fig. 3 Stress-strain relationship under dynamic stress amplitude of 20 kPa and confining frequency of 2.5 Hz

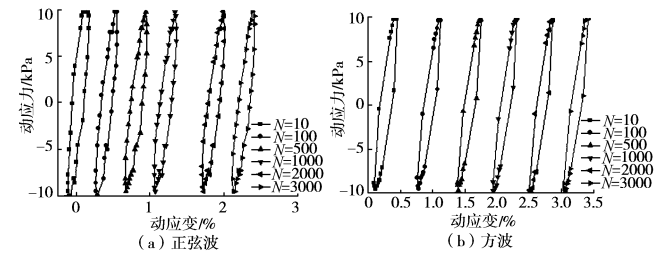


图4 频率 5.0 Hz 幅值 20 kPa 应力应变关系

Fig. 4 Stress-strain relationship under dynamic stress amplitude of 20 kPa and confining frequency of 5.0 Hz

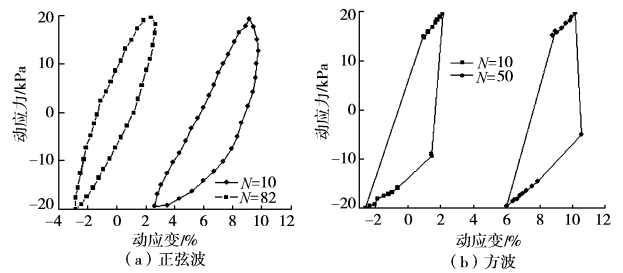


图5 频率 0.1 Hz 幅值 40 kPa 应力应变关系

Fig. 5 Stress-strain relationship under dynamic stress amplitude of 40 kPa and confining frequency of 0.1 Hz

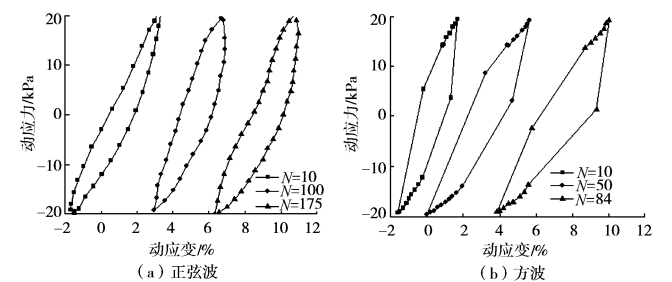


图6 频率 0.5 Hz 幅值 40 kPa 应力应变关系

Fig. 6 Stress-strain relationship under dynamic stress amplitude of 40 kPa and confining frequency of 0.5 Hz

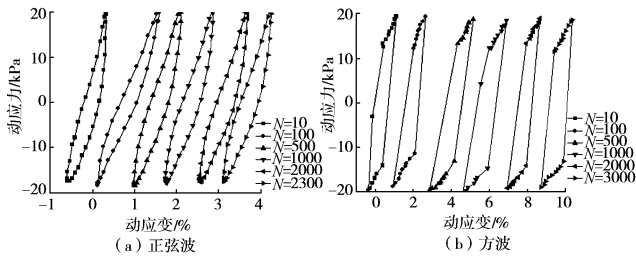


图7 频率 2.5 Hz 幅值 40 kPa 应力应变关系

Fig. 7 Stress-strain relationship under dynamic stress amplitude of 40 kPa and confining frequency of 2.5 Hz

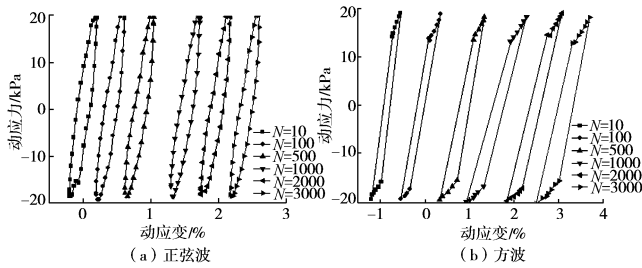


图8 频率 5.0 Hz 幅值 40 kPa 应力应变关系

Fig. 8 Stress-strain relationship under dynamic stress amplitude of 40 kPa confining frequency of 5.0 Hz

由图1~8可知：频率相同时，应力幅值越大，产生的动应变越大。在低频波作用下，滞回圈面积较大，且整体显“胖”；随着频率的增加，滞回圈面积逐渐减小。当动应力（20 kPa）小于结构屈服应力（ $\sigma_k = 22.7$  kPa）时，动应变增长趋势不变，低频波产生变形大于高频，高频波滞回圈整体形状相似；当动应力（40 kPa）大于结构屈服应力时，循环荷载作用下产生的变形总体增大，低频滞回圈面积增加更明显，且相同频率破坏所需振次更少。在相同试验条件情况下，方波作用下应力应变软化程度明显高于正弦波。

上述现象与土体结构及循环荷载作用产生的能量大小有关。一方面由于土体结构性的存在，当动应力小于结构屈服应力时，土体结构基本没有遭到破坏，抵抗变形能力强，两种波形产生的动应变大小接近，滞回圈面积较小整体形状相似。当动应力大于结构屈服应力时，土体结构破坏，容易发生变形。此外，频率对土体变形特性的影响可以从能量方面解释，施加低频波（0.1 Hz 与 0.5 Hz）时，循环荷载的周期较长，试样变形开展充分，即低频波作用产生的能量较大，这也是低频波破坏所需振次也少的原因。高频作用下（2.5 Hz 与 5 Hz），软黏土来不及充分变形，不能完全吸收外部荷载每一次振动对其产生的能量，所以软土在高频下的动应变小于低频下的动应变。综上可以认为结构性软黏土在循环荷载作用下存在一个临界频率，可以将低频（0.1 Hz 与 0.5 Hz）称为临界型频率，

高频（2.5 Hz 与 5 Hz）称为稳定型频率，且动应力大于结构屈服应力时，临界型与稳定型频率作用下区别更显著。又由于方波能量高于正弦波，引起的动应变明显要大于正弦波，导致方波滞回圈面积也大于正弦波。

### 2.2 动力塑性累积应变

两种波型不同频率作用下的动力塑性累积应变曲线如图9，10所示。

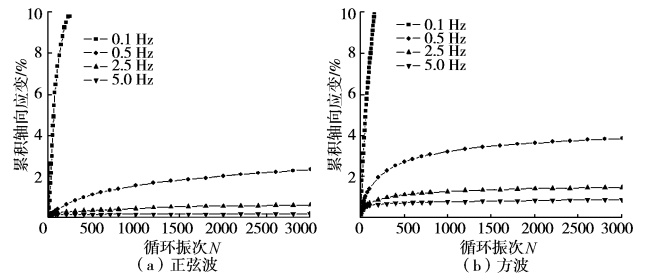


图9 幅值 20 kPa 不同频率下累积塑性应变

Fig. 9 Accumulative deformations under different frequencies and confining dynamic stress amplitude of 20 kPa

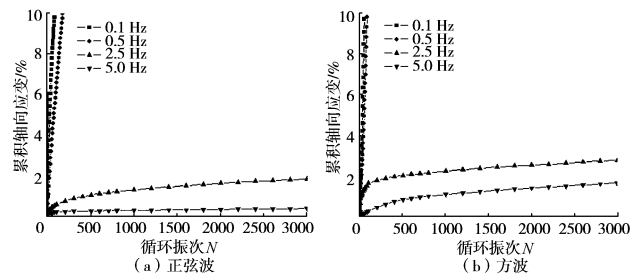


图10 幅值 40 kPa 不同频率下累积塑性应变

Fig. 10 Accumulative deformations under different frequencies and confining dynamic stress amplitude of 40 kPa

由上图9，10可以看出：累积塑性应变变化趋势总体表现为动应力相同时，频率越小，产生的累积应变越大。当动应力小于结构屈服应力时，临界型频率作用下累积应变增长快，最终稳定值大，且0.1 Hz在较少振次内达到破坏；当动应力幅值大于结构屈服应力时，循环荷载作用下软土的累积应变整体提高。临界型频率作用下累积应变变化更显著，在很少振次内直接被破坏；稳定型频率作用下，在振动初期应变有较大幅度的增长，随着循环次数的增加，曲线渐趋平缓，方波产生的最终值大于正弦波。

产生这些现象的原因与前述动应力应变关系机理基本一致，都与土体结构性变化以及不同频率的循环荷载对土体做功产生的能量大小有关。

### 2.3 孔压特性

两种波型不同频率作用下的孔压变化曲线如图11，12所示。

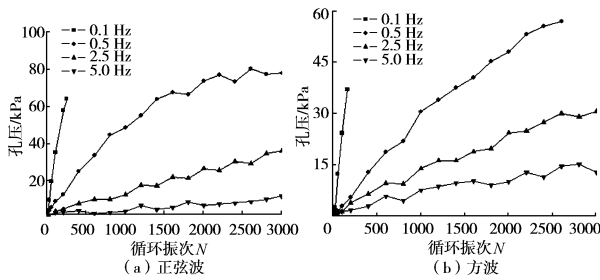


图 11 幅值 20 kPa 不同频率下孔压变化

Fig. 11 Change of pore pressure under different frequencies and confining dynamic stress amplitude of 20 kPa

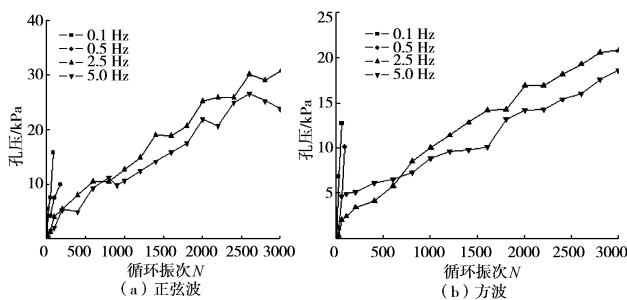


图 12 幅值 40 kPa 不同频率下孔压变化

Fig. 12 Change of pore pressure under different frequencies and confining dynamic stress amplitude of 40 kPa

从图 11, 12 可知: 相同振次下, 频率越小, 产生孔压越大。频率相同时, 低幅值上升速度快, 且有明显的高幅滞后现象。当动应力小于结构屈服应力时, 临界型频率增速快, 且最终值较大; 当动应力大于结构屈服应力时, 临界型频率作用下的孔压增速快, 但在很少振次内, 土体被破坏, 孔压停止增长。稳定型频率作用下的孔压随振次平缓增长, 且最终值大于临界型。正弦波的孔压总是大于方波。

产生以上现象的原因与土结构性破坏程度有关。当动应力小于结构屈服应力, 土体结构破损少, 此时, 频率大小对孔压变化影响起关键作用。临界型频率作用下土颗粒的空间排布被破坏, 中小孔隙演变为微孔隙, 导致孔压上升快且最终值大; 稳定型频率产生能量低, 对土体结构破坏少, 土体内部结构保持良好, 孔隙连通性好, 孔压随着振次增加呈渐进式增加。当动应力大于结构屈服应力, 土体结构发生大量破损, 土体内连通性变差, 再施加低频波时, 软土的结构破坏进一步加深, 随着振次的增加, 土体内结构很快完全破坏, 土体内孔隙连通性变差, 孔压无法继续增长; 当施加高频波时, 结构性软黏土来不及充分变形, 土体内还有破损的结构, 且其不会很快消失, 因此孔压在一定的振次范围内还会平缓增长, 最终值也较大。

### 3 结 论

(1) 在相同应力幅值的循环荷载作用下, 软黏土的轴向应变随振动频率增加而减小。当动应力大于结构屈服应力时, 低频波效应更明显。同条件下, 方波累积变形量总是大于正弦波。

(2) 幅值相同时, 临界型频率作用下累积应变整体增长快, 稳定型频率作用下累积应变随着循环次数的增加, 逐渐趋于平缓。幅值大于结构屈服应力时, 高幅值耦合低频波对土体产生破坏最显著。

(3) 相同振次下, 结构性软土的孔压随频率的增加而减小。当动应力幅值小于结构屈服应力时, 临界型频率作用下增速快, 且最终值较大; 当幅值大于结构屈服应力时, 临界型频率作用下孔压在较少的振次内快速发展并停止, 稳定型频率作用下孔压随振次平缓增长, 最终值大于临界型。

#### 参考文献:

- [1] 张 茹, 涂扬举, 费文平, 等. 振动频率对饱和黏性土动力特性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 699 - 704. (ZHANG Ru, TU Yang-ju, FEI Wen-ping, et al. Effect of vibration frequency on dynamic properties of saturated cohesive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 699 - 704. (in Chinese))
- [2] 周 建, 龚晓南, 李剑强. 循环荷载作用下饱和软黏土特性试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(1): 43 - 47. (ZHOU Jian, GONG Xiao-nan, LI Jian-qiang. Experimental study of saturated soft clay under cyclic loading[J]. Industrial Construction, 2000, 30(1): 43 - 47. (in Chinese))
- [3] Yasuhara Kazuya, Yamanouchi Toyotoshi, Hirao Ka-zutoshi. Cyclic strength and deformation of normally consolidated clay[J]. Soils and Foundations, 1982, 22(3): 77 - 79.
- [4] 郑 刚, 霍海峰, 雷华阳, 等. 振动频率对饱和黏土动力特性的影响[J]. 天津大学学报, 2013, 46(1): 38 - 43. (ZHENG Gang, HUO Hai-feng, LEI Hua-yang, et al. Contrastive study on the dynamic characteristics of saturated clay in different vibration frequencies[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2013, 46(1): 38 - 43. (in Chinese))
- [5] 曹 勇, 孔令伟, 杨爱武. 海积结构性软土动力性状的循环荷载波形效应与刚度软化特征[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 583 - 589. (CAO Yong, KONG Ling-wei, YANG Ai-wu. Waveform effect of cyclic loading of dynamic character and stiffness degradation characteristics of marine

- deposited natural soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(3): 583 - 589. (in Chinese))
- [6] 白冰, 周健. 周期荷载作用下黏性土变形及强度特性述评[J]. 岩土力学, 1999, **20**(3): 84 - 90. (BAI Bing, ZHOU Jian. Some problems on behaviour of saturated clay under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, **20**(3): 84 - 90. (in Chinese))
- [7] LAREW H G, LEONARDS G A. A repeated load strength criterion[C]// Proc Highway Res Board. 1962.
- [8] 周建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究[J]. 土木工程学报, 2000, **32**(5): 62 - 68. (ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Study on strain softening in saturated soft clay under cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, **32**(5): 62 - 68. (in Chinese))
- [9] 陈颖平, 黄博, 陈云敏. 循环荷载作用下结构性软黏土的变形和强度特性[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(9): 1065 - 1071. (CHEN Ying-ping, HUANG Bo, CHEN Yun-min. Deformation and strength of structural soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(9): 1065 - 1071. (in Chinese))
- [10] 姜岩. 交通荷载作用下结构性软土的动力特性及机理分析[D]. 天津: 天津大学, 2007. (JIANG Yan. Dynamic behavior and mechanism analysis of structural clay under traffic loading[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))

(本文责编 明经平)