

循环荷载对上海软土动力特性 影响规律的试验研究^①

冷 建¹, 叶冠林¹, 刘学增², 朱合华²

(1. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要:为研究上海第 4 层软土在循环荷载作用下的动力特性变化规律, 采用原状土进行室内动三轴试验, 分析不同动应力比和频率对上海第 4 层软土动强度的影响。试验结果表明: 对于上海第 4 层软土, 其剪切模量与应变关系曲线几乎不受动应力比和频率的影响; 剪切模量的下降主要发生在应变 0~1% 阶段; 由于应变速率效应的影响, 高频率时试样破坏所需的循环次数要大于低频率时; 动应力比达到 0.2 时土样才发生破坏; 在土的不同应变阶段, 频率对应变增幅的影响效果不同。

关键词: 上海软土; 动三轴试验; 剪切模量; 动强度; 加载频率

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)04-1049-04

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.1049

Experimental Study on the Dynamic Characteristics of Shanghai Soft Clay Subjected to Cyclic Loading

LENG Jian¹, YE Guan-lin¹, LIU Xue-zeng², ZHU He-hua²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To study the strength of Shanghai soft clay under cyclic loading, a series of dynamic triaxial tests were conducted with different dynamic stress ratios and frequencies. According to the test results, the relationship between the shear modulus and strain was not affected by the dynamic stress ratio and frequency. When the strain was set to 2%, the shear modulus decreased slowly but significantly. The sample cyclic time with high frequency was larger than that with low frequency. With the Shanghai soft clay, soil sample damage phenomenon occurred until the dynamic stress ratio reached 0.2. The frequency had different effects on the growth of the strain in different strain stages.

Key words: Shanghai soft clay; dynamic triaxial test; shear modulus; dynamic strength; loading frequency

0 引言

地铁在城市交通中发挥着越来越重要的作用, 然而地铁隧道长期处在列车循环荷载作用下, 由此引发的工程环境问题也不容忽视, 对其研究也逐渐成为土动力学的热点问题^[1-2]。

循环荷载作用下土动力特性研究由来已久, 黄

文熙^[3]于上世纪 60 年代发表了有关饱和砂土地基及土坡液化稳定分析的研究成果。Thiers 和 Seed 等^[4-5]通过循环三轴和循环剪切试验, 建立了相关的应力-应变数学模型。

现如今, 循环荷载作用下土的动力特性在许多

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372284)

作者简介: 冷 建(1988—), 男, 山东威海人, 博士研究生, 主要从事岩土工程、地下工程等领域的学习与科研。

E-mail: keepwalkinglj@163.com。

通信作者: 叶冠林, 男, 博士, 副教授。E-mail: ygl@sjtu.edu.cn。

方面都取得了研究成果。Yasuhara 等^[6]和 Toyota 等^[7-8]分析了初始剪应力对土动强度的影响。在动应力比方面,Hyde 等^[9]认为临界循环应力比与试样的应力历史和加载应力路径有关;Adrian 等^[10]提出了一种预测土循环剪应力和破坏次数的方法。对于振动频率对软黏土的影响尚未达成一致意见,需要进一步加以研究。Yasuhara^[6]认为循环荷载频率对软黏土的动强度和变形几乎没有影响,但在相同的循环周次下孔压随着频率的增加而增大。Brewer^[11]采用频率 $f=0.01\sim 4$ Hz,对 $I_p=35$ 的黏土进行动三轴试验,发现在相同循环周次下低频荷载产生的孔压和变形比高频大。Seed、Taylor 等^[7-8,12]分析了波形状的对循环作用的影响。

本文采用现场原状土进行室内动三轴试验,分析动应力比(动应力比为 $\sigma_d/2\sigma_s$,其中 σ_d 为动应力幅值, σ_s 为有效固结压力)、频率等对上海软土动强度的影响规律。

2 试样制备和试验方法

在上海松江地区钻孔,用薄壁取土器采集第 4 层原状软土进行动三轴试验,研究上海软土在不同动应力比和不同频率下的动力特性。

2.1 试样制备

用来进行试验的土体应该为原状土,以便精确地模拟现场土体的初始状态以及真实地反映现场土体的动力响应。在松江地铁站施工现场用薄壁取土器取得试验土样,选用动态空心圆柱扭剪仪进行室内动三轴试验。

试样直径为 50 mm,高 100 mm,采用 100 kPa 反压饱和,试样 $B\geq 0.96$ 。试样等向固结,有效固结压力为 100 kPa。

2.2 试验方法

- (1) 荷载选取:动应力比分别取 0.1、0.15、0.2、0.3 和 0.4,分析不同动应力比对土动强度的影响。
- (2) 频率选取:初步参考上海地区现有实测成果,地铁列车驶过时引起的隧道周围土体的响应频率分布两个区域:低频为 0.4~0.6 Hz,高频为 2.4~2.6 Hz,结合设备的循环加载能力后确定动三轴试验的加载频率为 0.5 Hz 和 2 Hz。
- (3) 加载波形:正弦波。

3 试验结果与分析

3.1 剪切模量随应变发展规律

图 1 为频率 $f=2$ Hz 和 $f=0.5$ Hz 时动应力

比为 0.4 和 0.2 的剪切模量与应变关系图。从图中可以看出, $f=2$ Hz 时动应力比 0.4 和动应力比 0.2 的剪切模量与应变关系曲线基本吻合; $f=0.5$ Hz 时不同动应力比曲线也基本吻合,且剪切模量一开始下降速率很快,当应变达到 1% 时下降速率明显变慢。

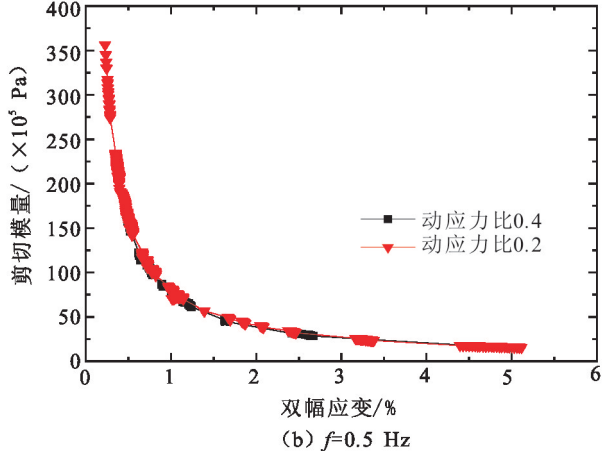
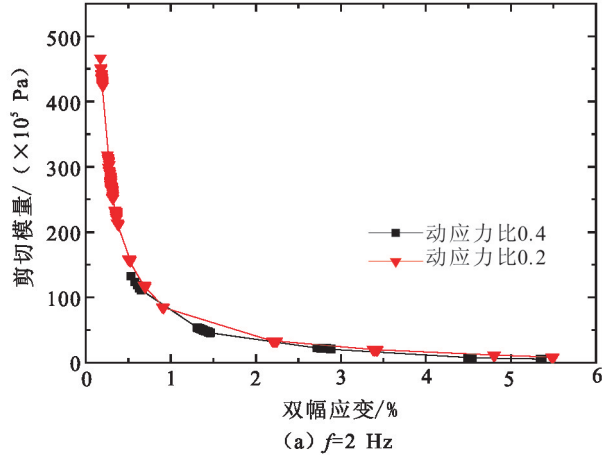


图 1 不同频率时剪切模量与应变关系曲线
Fig.1 Relationship curves between shear modulus and strain with different frequency

图 2 为动应力比 0.4 和 0.2 下,频率 $f=2$ Hz 和 $f=0.5$ Hz 时剪切模量与应变关系图。从图中可以看出,动应力比 0.4 时, $f=2$ Hz 和 $f=0.5$ Hz 的剪切模量与应变关系曲线基本吻合。动应力比 0.2 时也有类似的结果,且剪切模量一开始下降速率很快,当应变达到 2% 时下降速率明显变慢。

通过比较图 1~图 2 可以发现,频率和动应力比几乎不会影响土的剪切强度与应变的关系曲线,且在小应变情况下土的剪切模量下降速率快,当应变达到 2% 左右剪切模量下降速率明显变慢。

3.2 松江土破坏动应力比

总结不同频率和不同动应力比下试样破坏(破

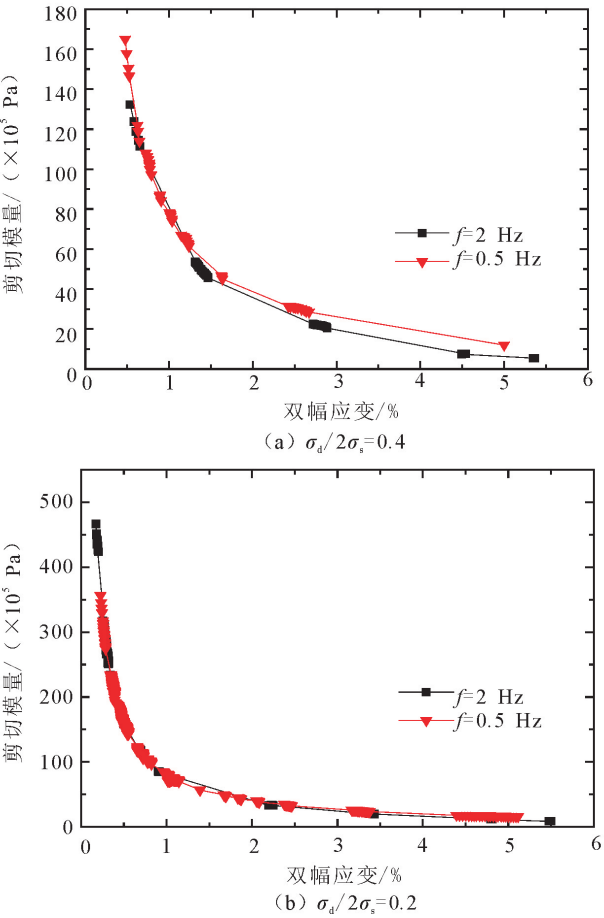


图 2 不同动应力比下剪切模量与应变关系曲线

Fig.2 Relationship curves between shear modulus and strain with different dynamic stress ratio

坏标准:双向应变没有达到 10%,或者累积塑性应变没有达到 5%)所需的循环次数如表 1。

表 1 试样破坏所需的循环次数

Table 1 Number of cycles for the specimen failure

频率/Hz	动应力比 $\sigma_d/2\sigma_s$	循环次数 N
2	0.4	300
2	0.3	400
2	0.2	5 600
2	0.15	10 000
2	0.1	10 000
0.5	0.4	570
0.5	0.2	6 700
0.5	0.15	10 000
0.5	0.1	10 000

注: $N=10\,000$ 则试样没有破坏。

从表中可以看出,试样破坏所需的循环次数与荷载的频率有关。由于应变速率效应,频率为 2 Hz 时试样破坏所需的循环次数要大于频率为 0.5 Hz 时的循环次数,且动应力比为 0.1 和 0.15 时试样并未破坏(双向应变没有达到 10%,累积塑性应变没

有达到 5%),当动应力比为 0.2 时试样开始发生动循环破坏。

3.3 频率影响

图 3 为动应力比为 0.4、0.2 和 0.1 时频率 $f=2$ Hz 和 $f=0.5$ Hz,对应变和循环次数关系的影响。当动应力比为 0.4 和 0.2 时,试样会有较大的应变,最终会发生破坏;当动应力比为 0.1 时,试样应变很

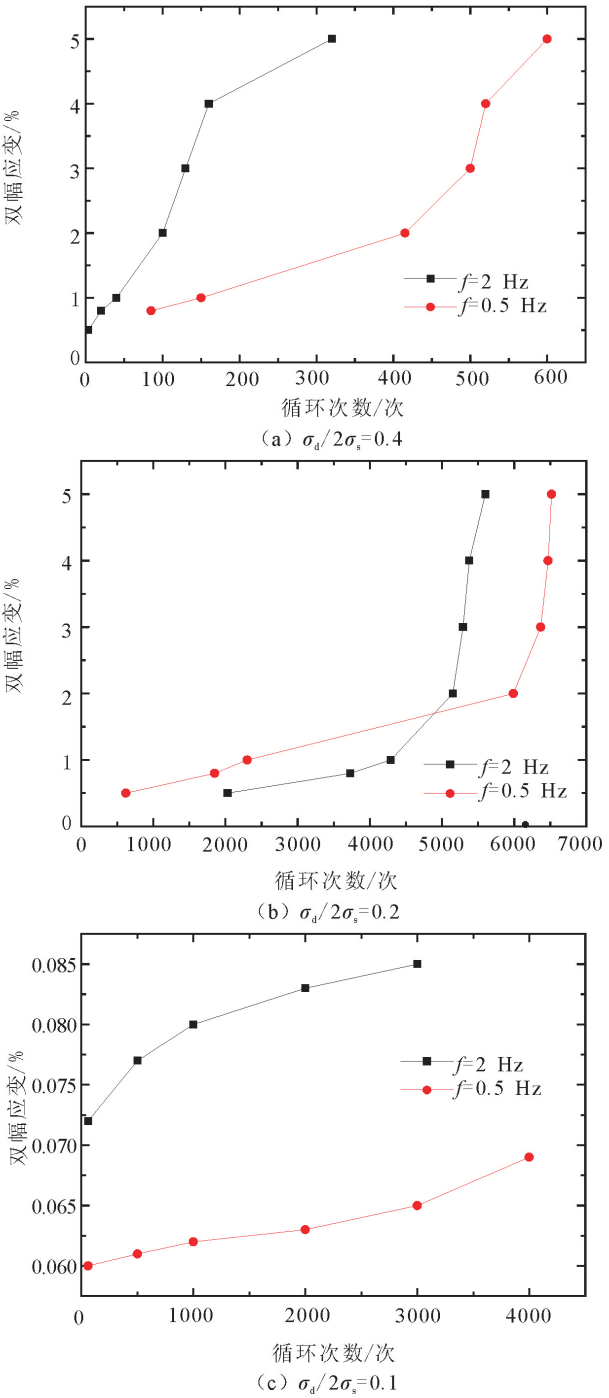


图 3 不同动应力比下应变与循环次数关系图

Fig.3 Relationship curves between strain and cycles with different dynamic stress ratio

小,并不会发生破坏。即当应变较大时(动应力比为 0.4 和 0.2),频率为 2 Hz 时,应变增幅大于频率为 0.5 Hz 时的应变;当应变较小时(动应力比为 0.1),频率为 2 Hz 时,应变增幅小于频率为 0.5 Hz 时的应变。说明土在应变不同阶段时频率对应变增长的影响不同。

3.4 不同应变下的动强度曲线

图 4 为频率 2 Hz 时达到不同应变所需的动应力比与循环次数。从图中可以看出,动应力比 0.3 到 0.4 段的斜率明显陡于动应力比 0.2 到 0.3 段,说明动应力比到 0.3 后对土的破坏比较显著。

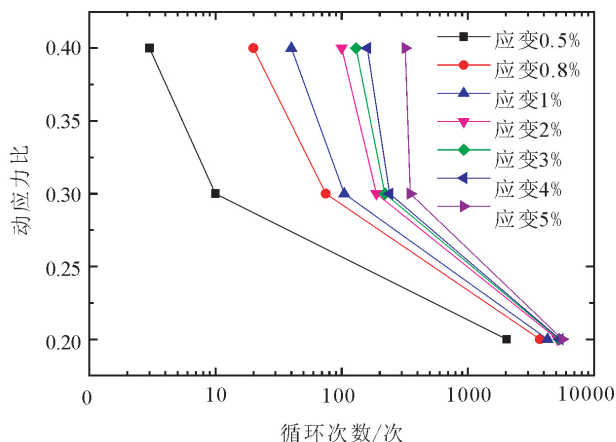


图 4 $f=2$ Hz 时动应力比与循环次数图

Fig.4 Relationship curves between dynamic stress ratio and cycles when $f=2$ Hz

4 结论

本文针对列车动荷载作用下的长期沉降问题,用原状土进行室内动三轴试验,分析动应力比、频率等对上海软土动强度的影响规律,得到以下结论:

(1) 频率和动应力比对上海软土剪切强度与累积应变关系曲线的影响很小,并且土的剪切模量在应变为 0~1% 阶段衰减速率快。

(2) 由于应变速率效应的影响,频率为 2 Hz 时试样破坏所需的循环次数要大于频率为 0.5 Hz 时。

(3) 对于松江土原状土,动应力大于 0.2 才发生破坏(双向应变达到 10% 或累积塑性应变达到 5%)。

(4) 动应力比大于 0.2 情况下,累积应变较大,频率为 2 Hz 的应变增幅大于频率为 0.5 Hz 时的应变增幅;动应力比为 0.1 情况下,累积应变较小,频率为 2 Hz 时的应变增幅小于频率为 0.5 Hz 时的应变增幅。在应变不同阶段时,频率对累积应变增幅的影响不同。

参考文献(References)

- [1] YANG Shu-rong, HUANG Wei-hsing, LI Chi-chou. Correlation between Resistant Modulus and Plasticde Formation for Cohesive Subgrade Soil under Repeated Loading[J]. Transportation Research Record, 2008(2053): 72-70
- [2] 宫全美, 廖彩凤, 周顺华, 等. 地铁行车荷载作用下地基土孔隙水压力实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊 1): 1154-1157.
- [3] GONG Quan-mei, LIAO Cai-feng, ZHOU Shun-hua, et al. Testing Study of Dynamic Pore Water Pressure Under Train Loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Suppl. 1): 1154-1157. (in Chinese)
- [4] Huang W X. Investigation on Stability of Saturated Sand Foundation and Slope Against Liquefaction [C]//Paris France: Proceeding of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Paris, France: [s. n.], 1961, II: 629-631.
- [5] Seed H B, Chan C K. Strength Under Earthquake Loading Conditions[J]. Journal of Soil and Foundation Division, ASCE, 1966, 92(SM2): 53-78.
- [6] Thiers G R, Seed H B. Cyclic Stress-Strain Characteristics of Clay[J]. Journal of Soil and Foundation Division, ASCE, 1968, 94(2): 555-569.
- [7] Yasuhara K, Yamanouchi T, Hirao K. Cyclic Strength and Deformation of Normally Consolidated Clay[J]. Soils and Foundations, 1982, 22 (3): 77-91.
- [8] Taylor P W, Bacchus D R. Dynamic Cyclic Strain Tests on a Clay[C]//Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: [s. n.], 1969: 401-409.
- [9] Taylor P W, Hughes J M O. Dynamic Properties of Foundation Subsoils as Determined from Laboratory Tests[C]//Proceedings of 3rd World Conference on Earthquake Engineering. New Zealand: [s. n.], 1965: 196-212.
- [10] Hyde A F L. Cyclic Triaxial Tests on Remoulded Clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1987, 113 (6): 665-669.
- [11] Adrian F Hyde, Toru Higuchi, Kazuya Yasuhara. Liquefaction, Cyclic Mobility, and Failure of Silt [J]. Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, 2006, 132 (6): 716-735.
- [12] Brewer J H. The Response of Cyclic Stress in a Normally Consolidated Saturated Clay[D]. Raleigh: North Carolina State University, 1972.
- [13] Seed H B, Chan C K. Clay Strength under Earthquake Loading Conditions. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division[J]. ASCE, 1966, 92(SM2): 53-78.