

# 潮间带土在吊装荷载下的动力性质<sup>①</sup>

王淑云, 张旭辉, 鲁晓兵

(中国科学院力学研究所中国科学院流固耦合系统力学重点实验室 北京 100190)

**摘要:** 对取自如东潮间带的原状土样进行了一系列模拟施工吊装动载的应变控制和载荷控制动三轴试验, 得到了土样在动载作用下的应力、应变和孔压随时间的变化关系, 并对此种潮间带地基土的动力特性和液化可能性进行了分析, 最后针对现场施工方法提出了一些建议。

**关键词:** 潮间带土; 动力特性; 液化; 动三轴试验

中图分类号: TU411; TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)03-0580-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.03.0580

## Dynamic Properties of Soil in Intertidal Zone under Cyclic Lifting Loads

WANG Shu-yun, ZHANG Xu-hui, LU Xiao-bing

(Laboratory of Mechanics for Fluid-solid Coupling System Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** A series of dynamic triaxial tests of soil samples from intertidal zone were performed under strain-controlled and stress-controlled conditions respectively. The relationships among stress, strain and pore pressure of soil samples under cyclic lifting loads were obtained, and the dynamic properties and liquefaction potential of the foundation soil were analyzed. Finally, some suggestions about construction methods in site were proposed.

**Key words:** soil in intertidal zone; dynamic property; liquefaction; dynamic triaxial test

### 0 前言

动荷载是指随时间而变化的荷载。在研究地基土的动力特性时, 考虑地震和波浪荷载影响的比较多, 因为这些荷载在自然界频发而且对地基土的影响和破坏比较大。但在设计公路路基和厂房类建筑物基础时, 车辆和机械设备震动产生的荷载对地基土强度的影响也必须考虑, 虽然这些荷载周期可能大于 10 s, 可以做为拟静态的问题来处理和分析。但实际上, 不同的土质条件在不同的动荷载(大小、频率和循环周次)条件下, 所呈现的应力和应变关系以及动力特性必然不同。在高质量工程设计和施工标准的要求下, 必须对实际的场地土质和载荷条件进行调研, 对原状土样进行必要的动三轴试验和分析。

在我国江苏如东的潮间带地区地下深度 10 m 范围内, 分布着大量的粉质砂土, 并有在此地基土上

进行风电设备的安装和施工的计划。设计部门担心在桶形基础吊装施工过程中, 机械振动产生的周期荷载会对地基土的强度造成影响。比如, 这些动载使得地基土强度衰减多少、产生多大的沉降、地基土是否可能产生液化, 从而导致桶形基础就位后的承载力下降和不均匀沉降等问题。

近几年, 针对我国近海和潮间带区域风电设施的兴建, 对近海地基土的动载特性以及相关基础设计的工作日渐增多, 尤其是在优先采用桶形基础时对特定地区砂质粉土和黏土在动载下的行为得到了更多的关注。

基于此, 本文对如东现场土样进行了一系列动三轴试验, 包括不同土层土样、不同载荷大小和不同循环周次等实际工况条件, 分别采用应变控制和载荷控制实验条件, 得到粉细砂土样在不同动载条件下的应力、应变和孔压随时间的变化关系, 评价了此

<sup>①</sup> 收稿日期: 2014-08-20

作者简介: 王淑云(1965-), 女, 高级工程师, 主要从事土力学研究及天然气水合物沉积物的力学性质实验研究。

场地土样的变形和液化可能性,并对现场施工提出了一些建议。

## 1 现场土分层和基本参数

现场钻孔区域0~12 m深度范围内的土体主要分成以下四层:

第一层:0~3.5 m 灰色次长石细砂岩,粉性较强的土,作为桶形基础贯入的层,也是地面起重和运输机械的持力层;

第二层:3.5~6.0 m 灰色杂砂岩,粉砂性土,为桶基底部持力层,是土体静动载荷特性需研究的最重要土层;

第三层:6.0~9.0 m 灰色次长石细砂岩,粉土,土体静承载力偏低,因此作为一层重点进行分析;

第四层:9.0~12.0 m 灰色次长石细砂岩,粉土,强度较高,作为一层进行处理。

现场土的物性参数参见表1。

表1 场地土的基本物性表

Table1 Basic properties of site soils

深度/m	湿密度	含水量/%	比重
0.8~1.0	1.92	30.0	2.694
1.3~1.5	1.96	26.2	2.699
2.3~2.5	1.98	28.9	2.696
3.8~4.0	1.96	28.6	2.697
4.3~4.5	1.92	30.0	2.693
8.3~8.5	1.93	31.0	2.696
10.8~11.0	1.96	28.1	2.695

土样的静三轴试验结果为:平均黏聚力30 kPa,平均内摩擦角 $36^\circ$ 。从土样的应力和应变关系看,土样呈现脆性破坏,其在相同围压下的最大主应力差值在 $\pm 10$  kPa范围,破坏应变在7~10%范围。

## 2 动三轴试验条件

现场施工过程中,起重机与吊重的最大载荷2700 kN,最小载荷660 kN,3只桶基结构总重250 kN。吊装过程中动载的周期为70 s。

首先计算现场在不同深度处的附加应力,根据附加应力再换算到三轴施加载荷,最后得到室内动三轴试验的总工况条件。动三轴试验的初始静压、载荷幅值和围压选择情况如表2所示。

动三轴试验分为应变控制和载荷控制两种情况,即在动态实验过程中分别保持土样应变的幅值不变来记录动载和孔压随循环周次的变化,和保持动载幅值不变来记录应变和孔压随循环周次的变化。

应变控制试验组数为9组,包括四层的土样,重点实验对象为第二层和第三层的土样。载荷控制试验组数为15组,也包括四层的土样,重点对第二层的土样进行实验。

表2 样品深度与试验条件

Table 2 Sample depths and test conditions

深度	工况	初始施加静压/kPa	载荷幅值/kPa	围压/kPa
0~3.5m	1. 不固结不排水	79.25	48.17	25
3.5~6.0 m	2. 固结不排水	79.25	48.17	50
6.0~9.0 m	3. 周期70 s	55.33	33.67	70
9.0~12.0 m	4. 饱和或不饱和	35.33	21.50	100

## 3 动三轴试验结果和分析

### 3.1 应变控制试验结果

第二层土样在应变控制为2%时(不固结不排水)的动三轴试验结果如图1所示。表3为整理后的一系列不同层的土样在不同应变控制条件下的不固结不排水动三轴试验结果。从中可以看到:

第一层土样在应变控制1%时,循环20周后,土样发生液化,承载力降低为初始的39%。因此在现场施工时应特别注意,同时也要考虑桶基的抗拔力可能也会有变化。

第二层、第三层和第四层的土样在应变控制1%和2%时,承载力先下降后又增加,孔压先上升后下降,土样发生剪胀,200周后(4个小时左右),土样未发生破坏和液化。

第二层和第三层的土样先饱和后固结,再进行动三轴试验,其强度与上述原状土样相差不大,但60周后出现明显剪胀。

第三层试样在变形控制2%和3%应变时,承载力急剧下降,孔压明显上升,经过20周左右(23分钟),土样液化但未出现明显破坏现象。

### 3.2 载荷控制试验结果

第三层土样在载荷控制条件下的(不固结不排水)动三轴试验结果如图2所示。第三层土样在重新饱和后载荷控制条件下的(不固结不排水)动三轴试验结果如图3所示。表4为整理后的一系列不同层位土样在不同载荷控制条件下的动三轴试验结果。从中可以看到:

(1) 第一层土样的应变随周次明显增加,200周后累计应变达到2.74%。土样的孔压先上升后下降,试样发生剪胀,未发生液化和破坏。

(2) 第二层、第三层和第四层土样的孔压变化与第一层的相近,变形随周次缓慢增加,到200周累

计应变分别达到 1.12%、0.88% 和 0.46%。

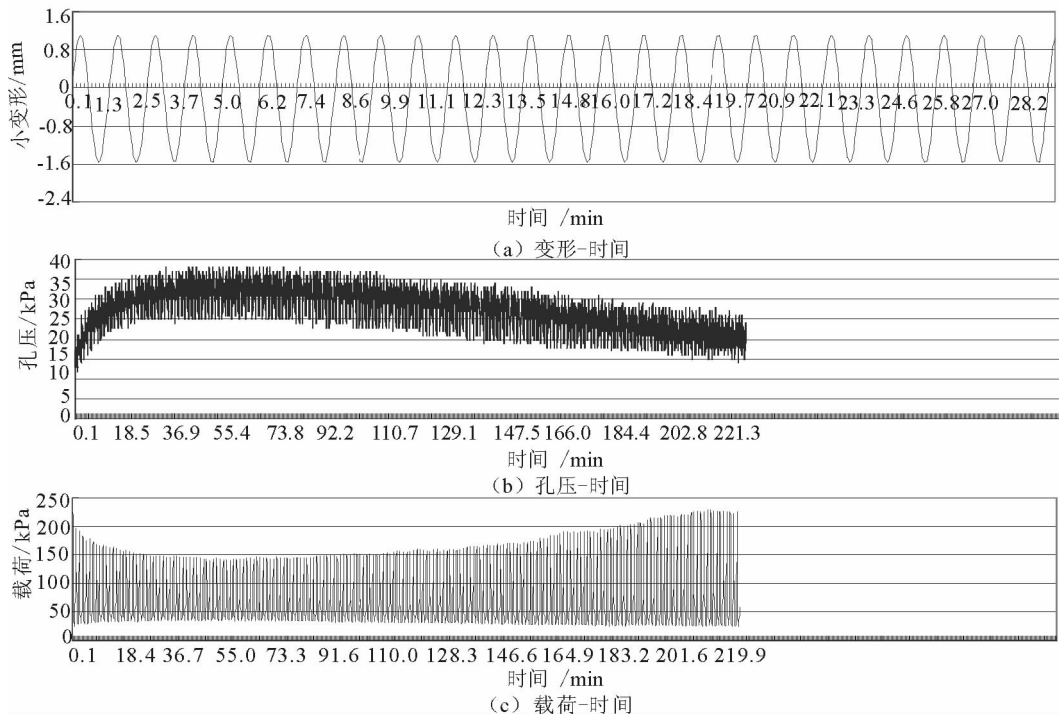


图1 应变控制为2%时第二层土样的孔压和载荷随循环时间的变化关系

Fig.1 Pore pressures and stress versus time of soil samples in second layer under 2% of strain-controlled condition

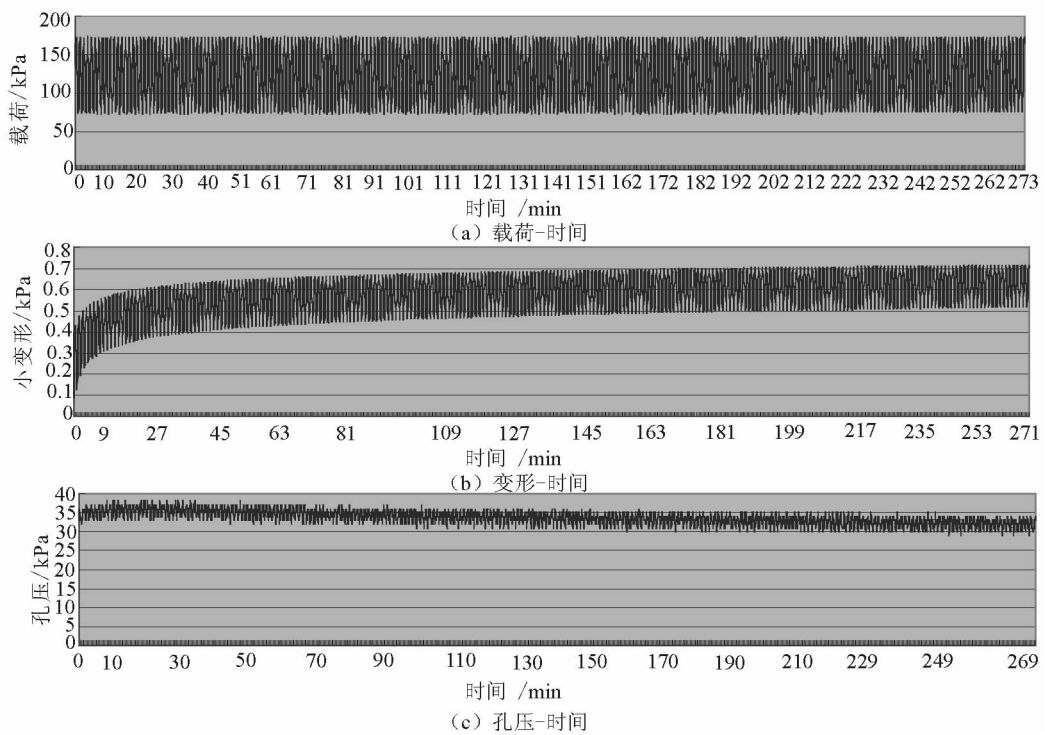


图2 第三层土样在载荷控制时(未饱和)的孔压和变形随循环时间的变化关系

Fig.2 Pore pressures and deformations versus time of soil samples (unsaturated) in third layer under stress - controlled condition

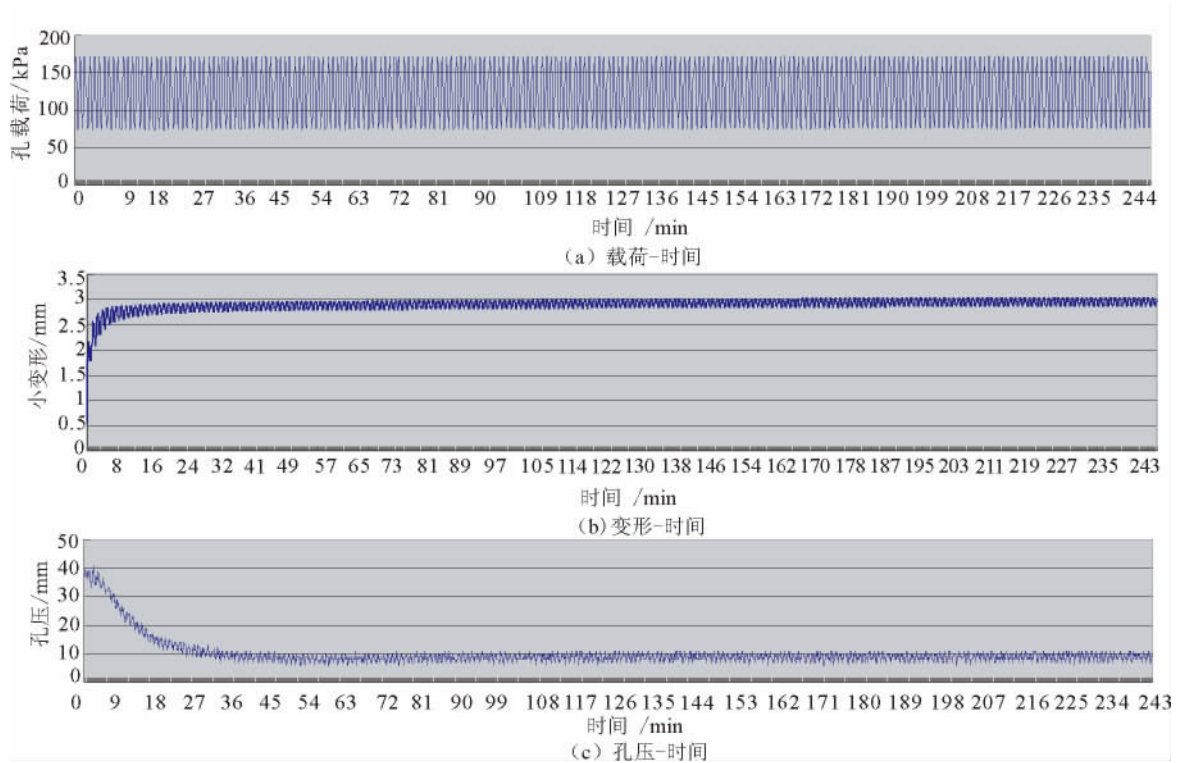


图 3 第三层土样在荷载控制时(饱和后)的孔压和变形随循环时间的变化关系

Fig. 3 Pore pressures and deformations versus time of soil samples (saturated) in third layer under stress-controlled condition

表 3 应变控制动三轴试验结果

Table 3 Dynamic triaxial test results under strain-controlled condition

深度/m	层位	动应力值/kPa				
		1 周	10 周	20 周	60 周	200 周
1.8 ~ 2.0	第一层	214.75	90.53	84.05	-	-
4.3 ~ 4.5	第二层	171.84	112.62	104.99	89.60	77.12
5.3 ~ 5.5(饱和)	第二层	184.90	104.99	100.72	116.81	193.19
5.3 ~ 5.5	第二层	225.24	165.67	153.85	143.93	229.65
7.3 ~ 7.5	第三层	180.62	169.59	187.59	188.82	190.45
7.3 ~ 7.5(饱和)	第三层	161.26	123.25	121.66	143.36	210.87
8.3 ~ 8.5	第三层	324.46	170.79	170.74	-	-
7.3 ~ 7.5	第三层	325.65	263.56	210.30	-	-
10.8 ~ 11.0	第四层	221.8	253.11	251.00	251.61	263.26

表 4 荷载控制动三轴试验结果

Table 4 Dynamic triaxial test results under load-controlled condition

深度/m	层位	累计变形/mm				
		1 周	10 周	20 周	60 周	200 周
1.8 ~ 2.0	第一层	0.68	1.50	1.74	2.05	2.19
3.8 ~ 4.0	第二层	0.53	0.68	0.72	0.77	0.81
3.8 ~ 4.0	第二层	0.57	0.74	0.78	0.83	0.90
8.3 ~ 8.5	第三层	0.43	0.57	0.61	0.66	0.70
8.3 ~ 8.5	第三层	0.27	0.42	0.46	0.52	0.57
10.8 ~ 11.0	第四层	0.13	0.16	0.21	0.21	0.26
10.3 ~ 10.5	第四层	0.18	0.27	0.29	0.32	0.37

(3) 土样固结后,累计变形随周次的增加比固结前更加缓慢。

从模拟实际作业工况的载荷控制的动三轴试验结果来看,桶形基础的持力层第二、第三和第四层的动态应变幅值在 0.12%,而应变控制发生液化的条件至少在动态应变幅值为 1%,总体来讲发生液化的概率不高。

对于第一层,因为表层的黏土在动载荷下累计变形较大,且易发生液化,静承载力也较低,应通过较好的排水或者去除等方式进行处理。

#### 4 结论和建议

变形控制动三轴试验表明:除 2.0 m 以上的土体易发生液化外,桶基础以下持力层动态小变形幅值在 1% 应变时,孔隙压力先升高后降低,样品在 4 个小时内基本不发生液化。随着动态小变形幅值的增加至 2% 应变,液化现象明显。

载荷控制动三轴试验表明:第一层的土样变形随周次明显增加,200 周后累计应变达到 2.74%;孔压先上升后下降,土样发生剪胀,未发生液化和破坏。第二层、第三层和第四层土样的孔压变化与第一层相近,变形随周次缓慢增加,到 200 周累计应变分别达到 1.12%、0.88% 和 0.46%。土样固结后,累计变形随周次的增加比固结前更加缓慢。四层土样均表现为累计变形缓慢增加但未发生液化。

建议在现场施工过程中,实时监测设备的沉降,使得累计变形量不超过 50 cm(设备可调整容许高度的 1/2)。

#### 参考文献(References)

[1] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996.  
QIAN Jia-hui, YIN Zong-ze. Civil Principle and Calculation[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996. (in Chinese)

[2] 张克绪,谢君斐. 土动力学[M]. 北京:地震出版社,1989.  
ZHANG Ke-xu, XIE Jun-fei. Soil Dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 1989. (in Chinese)

[3] 张建民,王稳祥. 振动频率对饱和砂土动力特性的影响[J]. 岩土工程学报,1990,12(1): 89-97.  
ZHANG Jian-min, WANG Wen-xiang. Effect of Vibration Frequency on Dynamic Characters of Saturated Sandy Soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(1): 89-97. (in Chinese)

[4] 蔡迎春,郑元勋,刘忠玉,等. 飞机荷载作用下粉砂土路基动力响应研究[J]. 岩土力学,2012,33(9): 2863-2868.  
CAI Ying-chun, ZHENG Yuan-xun, LIU Zhong-yu, et al. Study of Dynamic Response of Silty Sand Subgrade Loaded by Airplane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2863-2868. (in Chinese)

[5] 边学成,卢文博,蒋红光,等. 粉土循环累积应变和残余动模量的试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(4): 974-980.  
BIAN Xue-cheng, LU Wen-bo, JIANG Hong-guang, et al. Experimental Study of Cumulative Axial Strain and Residual Dynamic Modulus of Silt Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 974-980. (in Chinese)

[6] 王明洋,赵跃堂,钱七虎. 饱和砂土动力特性及数值方法研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(6): 737-742.  
WANG Ming-yang, ZHAO Yue-tang, QIAN Qi-hu. Study on Dynamic Behavior and Numerical Method for Saturated Sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 737-742. (in Chinese)

[7] 武科,栾茂田,范庆来,等. 滩海桶形基础破坏机制及极限承载力分析研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(3): 394-398.  
WU Ke, LUAN Mao-tian, FAN Qing-lai, et al. Failure Mechanism and Ultimate Bearing Capacity of Bucket Foundation in Shallow Water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(3): 394-398. (in Chinese)

[8] 黄维平,李兵兵. 海上风电场基础结构设计综述[J]. 海洋工程,2012,30(2): 150-156.  
HUANG Wei-ping, LI Bing-bing. Reviews and Comments on the Design for Offshore Wind Structures[J]. Ocean Engineering, 2012, 30(2): 150-156. (in Chinese)