

DOI: 10.11779/CJGE2015S2012

砂土中不同长径比单桩水平非线性振动特性模型试验

郭彦超^{1, 2}, 刘欢^{1, 2}, 黄茂松^{*1, 2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 水平向动力荷载作用下, 桩侧土往往表现出显著的非线性特性。采用室内模型试验对砂土中不同长径比单桩水平非线性振动特性进行了研究, 分析了不同荷载幅值和长径比对单桩水平非线性振动特性的影响。试验结果表明, 激振荷载幅值越大, 桩土非线性相互作用越明显, 桩土系统的共振频率越低; 桩径相同情况下, 桩土系统共振频率及其衰减率与桩的长径比基本负相关。

关键词: 单桩; 模型试验; 水平振动特性; 非线性; 长径比

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)S2-0057-04

作者简介: 郭彦超(1990-), 男, 河南濮阳人, 硕士, 从事岩土工程方面的学习和研究工作。E-mail: gych1202@126.com。

Model tests on nonlinear vibration characteristics of single piles with different length-diameter ratios under lateral loading in sand

GUO Yan-chao^{1, 2}, LIU Huan^{1, 2}, HUANG Mao-song^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Soil nonlinearity around the pile becomes significant under lateral dynamic loading. Several laboratory model tests were conducted to investigate the nonlinear behavior of laterally loaded piles with different length-diameter ratios in sand, and to analyze the influence of loading amplitude and pile's length-diameter ratio on the nonlinearity. Test results show that the higher load amplitude leads to much stronger pile-soil nonlinear interaction and lower resonant frequency of the pile-soil system. The resonant frequency of the pile-soil system as well as its attenuation rate is negatively correlated with the pile's length-diameter ratio in case of the same pile diameter.

Key words: single piles; model test; lateral vibration characteristic; nonlinearity; length to diameter ratio

0 引言

近年来, 随着国家经济建设的迅速发展, 海上、江中的工程项目不断增多, 如跨海大桥、海上风机等, 其中基础多采用桩基础型式。然而, 深水环境中的桩基础, 不同于传统的陆上桩基, 其工作环境恶劣, 除承受上部竖向荷载外还需承受波流荷载、风荷载、地震荷载等水平动力荷载作用。在水平动力荷载作用下, 桩基会产生明显的动力非线性响应, 另外这些大型海上、江中工程, 对振动频率及振幅要求严格, 必须对基础在水平动力荷载下的振动特性进行深入分析。

目前, 在桩土非线性相互作用领域应用最广的分析方法是基于动力 Winkler 地基模型。Nogami 等^[1]基于 Winkler 假设, 采用静力 $p-y$ 曲线法提出了一种分析单桩和群桩动力响应的时域方法; El Naggar 和 Novak^[2]提出 BNWF 模型, 即非线性 Winkler 地基梁模型, 并将其运用于桩基竖向振动分析; Boulanger 等^[3]在原有的静力 BNWF 模型的基础上提出动力

BNWF 模型, 将原来一直沿用的 API 规范中静力 $p-y$ 曲线修正为动力 $p-y$ 曲线; 随后, El Naggar 和 Bentley^[4]在原有的动力 BNWF 基础上, 通过单桩模型试验结果进行拟合, 得到了桩侧土弹簧系数和阻尼系数的表达式。

上述研究方法虽然相对比较简化, 但其桩土作用参数换算需要大量的试验进行验证。而由于水平动力荷载作用下桩周土弹塑性、桩土分离等机理非常复杂, 数值分析方法往往难以获得理想结果。模型试验能够很好地控制试验条件, 可辅助进行机理分析, 是一种有效的研究方法。国内外许多学者在模型试验中进行了大量的研究。Gle 等^[5]通过水平稳态激振试验实测了多根单桩的动刚度和阻尼, 并同理论计算值进行了对

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)课题(2012CB719803); 国家自然科学基金项目(91315301)

收稿日期: 2015-03-26

*通讯作者

比; Manna 等^[6]采用足尺和缩尺现场激振试验研究了单桩和群桩在水平和摇摆耦合作用下非线性动力特性; Goit 等^[7]先后通过模型试验探讨了桩土共振以及桩周土发生局部非线性对桩-桩相互作用因子的影响; Lombardi 等^[8]采用室内模型试验研究了水平动荷载对单桩基础的长期效应影响, 主要为针对不同的频率和幅值的外荷载对桩基共振频率的影响; 国内童建波等^[9]采用室内模型试验对单桩及排桩的共振特性进行了研究, 分析了激振频率对桩基的影响。然而, 上述模型试验研究多集中于小应变范畴, 对较大变形的试验研究较少, 且对单桩非线性响应机理缺乏研究。

本文通过缩尺模型试验研究砂土中单桩在水平激振荷载下的振动特性, 分析了不同荷载幅值、长径比等因素对单桩水平非线性振动特性的影响, 为水平向动力荷载下的单桩特性分析提供必要的依据。

1 试验方案

1.1 试验原理

在水平稳态激振荷载 $F = F_0 \sin 2\pi ft$ 作用下, 桩身为稳态振动。保持激振荷载幅值 F_0 不变, 通过固定在桩顶的加速度传感器记录不同激振频率 f 作用下桩顶的加速度响应, 再根据积分换算到桩顶的位移响应, 就可以得到单桩位移响应频谱曲线, 以此来研究单桩基础在当前荷载作用下的共振特性, 同时沿每根单桩的桩身布置应变片, 可以记录激振过程中的桩身受力。

1.2 地基土及其物理特性

试验用土为砂土, 对其取样测量, 得到土体密度 $\rho = 1390 \text{ kg/m}^3$, 砂土黏聚力 $c = 0$, 摩擦角 $\phi = 34^\circ$ 。粉细砂的比重 G_s 近似取 2.67。试验填土过程中, 砂土为分层填筑, 每填 10 cm 需进行一次碾压。

1.3 模型桩

本次模型试验共设置了 3 组单桩的振动试验, 分别对 3 根相同桩径、不同桩长的单桩进行稳态激振, 研究它们在不同工况下的共振频率和振动特性的变化规律。3 根单桩均按照 1:20 的长度相似比换算, 试验所用模型桩有关参数如表 1 所示。

表 1 模型桩参数

Table 1 Parameters of model piles

桩号	桩长 L/mm	桩径 D/mm	长径 比 L/D	材 质	弹 性 模 量 $/\text{GPa}$	相似比	
						长 度	弹性 模 量
1	320	32	10	ABS	2	0.05	0.1
2	480	32	15	ABS	2	0.05	0.1
3	640	32	20	ABS	2	0.05	0.1

为了水平加载的方便, 为每根单桩加工一个桩帽, 尺寸为 5 cm×5 cm×2 cm。桩帽材料为铝合金, 在桩帽两侧各开一个 M5 的螺纹孔, 一侧用于固定加速度

传感器, 另一侧用于连接加载杆。

试验过程中, 为了记录观测桩身受力的变化, 沿桩径方向将桩身分成两半, 在每根桩的指定位置布设应变片。在距桩顶约 1 cm 的桩身位置上开设一个直径为 5 mm 的孔, 将应变片导线从孔中引出, 最后用 502 胶水将桩身粘牢, 并将桩顶嵌入桩帽中, 用胶水粘牢, 具体见图 1 所示。



图 1 桩身应变片布置示意图

Fig. 1 Instrumented model piles

1.4 模型箱布置

模型箱尺寸为 1500 mm(长)×1000 mm(宽)×1000 mm(高), 钢框架加玻璃钢侧壁。模型试验的边界效应主要来自模型箱边壁对模型的约束作用。当模型中结构物与侧壁相对较近时, 模型箱的约束会明显影响到模型桩的性状, 为消除边界反射波的影响, 在模型箱四周粘贴 2 cm 厚泡沫板。试验所研究的 3 根单桩一次性埋入预定位置, 桩间距设为 400 mm, 大于 10D(D 为桩径), 模型桩与箱壁的最小距离大于 8D, 可忽略边界效应。模型桩的布置具体如图 2 所示。

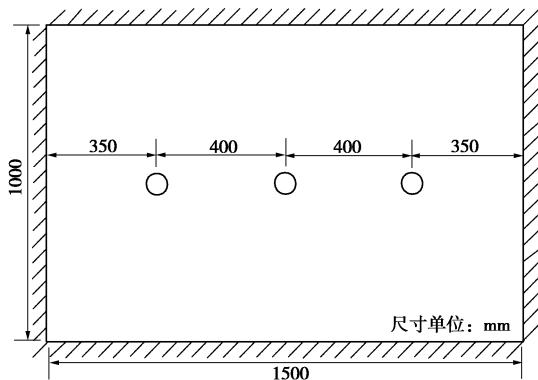


图 2 模型箱及模型桩布置示意图

Fig. 2 Model box and pile arrangement

1.5 试验加载装置

整个试验装置由激振系统、数据采集系统和信号分析系统三部分组成, 试验布置如图 3 所示。其中, 各装置分别是加速度传感器①、力传感器②、激振器

③、信号发生器④、功率放大器⑤、泰斯特动态应变采集仪⑨。

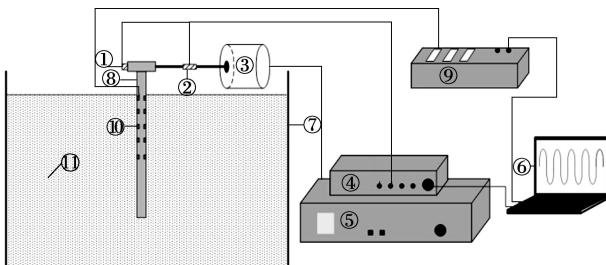


图 3 试验布置示意图

Fig. 3 Test arrangement

激振系统由激振器、信号发生器及功率放大器组成。激振器型号为 TV51120-M, 最大激振力 200 N, 激振频率范围 1~2 Hz。激振器与桩基础采用刚性杆连接, 不考虑杆的变形。功率放大器采用 BAA120 型, 频率范围为 (2~20000) Hz。

2 试验结果分析

通过稳态激振试验后, 将各组数据记录在表格中, 把同一根单桩在不同幅值激振力作用下的位移频率响应曲线绘制到一起, 如图 4 所示。试验结果显示, 随着激振力幅值的增大, 单桩的共振频率均发生了不同程度的衰减, 说明在试验过程中桩周土动应力应变不再是线弹性关系, 而是进入了弹塑性阶段。根据频响曲线得到单桩在不同荷载作用下的共振频率, 见表 2 所示。对比结果表明, 桩径相同情况下, 共振频率及其衰减率基本上与桩的长径比负相关; 也就是说随着桩长径比的增大, 桩的共振频率及其衰减率基本上呈减少趋势。

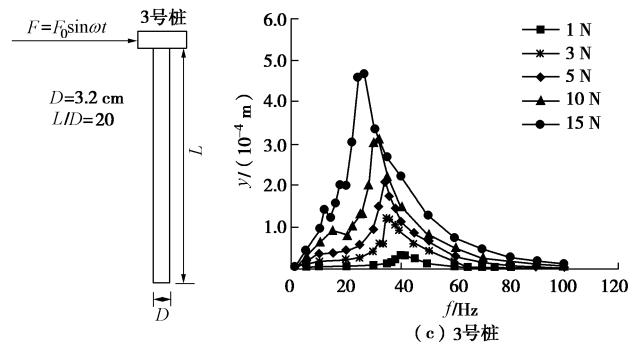
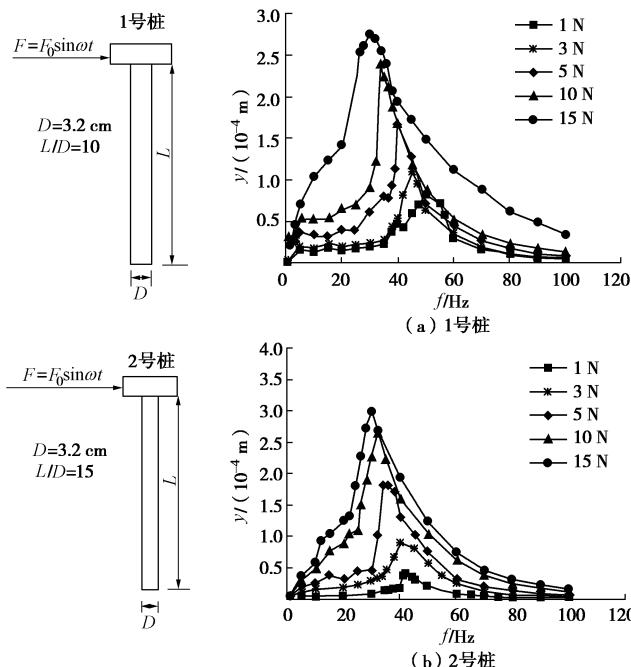


图 4 模型桩及桩顶位移频响曲线

Fig. 4 Displacement-frequency curves at pile head

表 2 单桩共振频率

Table 2 Resonance frequencies of piles

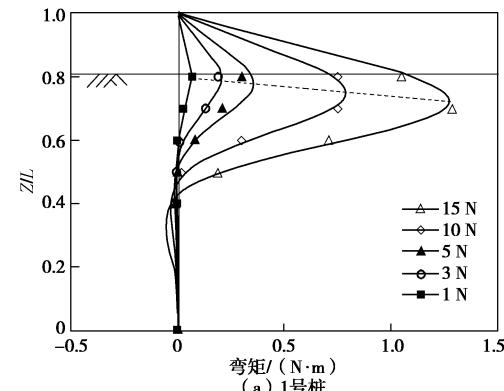
桩号	荷载幅值 /N	共振频率 /Hz	频率降低百分比/%
1	1	50	—
	3	45	10.0
	5	40	20.0
	10	34	32.0
	15	30	40.0
2	1	44	—
	3	40	9.1
	5	36	18.2
	10	32	27.3
	15	28	36.3
3	1	40	—
	3	35	12.5
	5	34	15.0
	10	31	22.5
	15	28	30.0

根据桩身应变片分布, 可以得到单桩共振时桩身弯矩分布, 见图 5 所示, 图中纵坐标为归一化的桩长。结果表明, 随着激振力幅值的增加, 最大弯矩点和反弯点的位置均逐渐向土层深处发展, 从而说明随着外荷载的增大, 桩身各点受力并非呈线性增长。桩身弯矩与桩周土反力之间存在如下关系:

$$p(x) = \frac{d^2 M(x)}{dx^2} \quad (1)$$

因此, 桩身最大弯矩点的非线性变化能够反映桩周土体之间的塑性影响。

图 6 为不同单桩桩顶荷载与桩身最大弯矩关系曲线。可以发现, 随着荷载幅值增大, 桩身最大弯矩呈非线性增长趋势, 从而证明了桩土间的非线性相互作用。



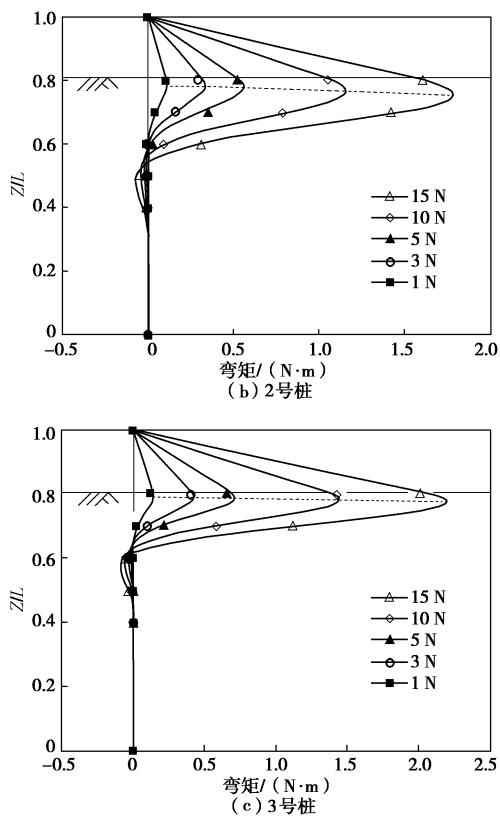


图 5 共振时桩身弯矩幅值分布

Fig. 5 Bending moments of pile shaft under resonance

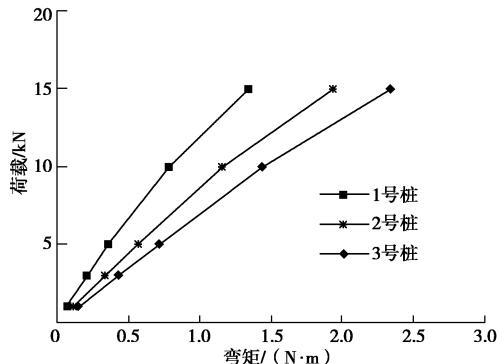


图 6 荷载幅值 - 最大弯矩幅值曲线

Fig. 6 Load amplitude-maximum bending moment curves of pile shaft

3 结 论

本文通过模型试验对不同长径比单桩进行了水平向振动特性测试, 通过试验结果的对比分析, 可以得出以下结论。

(1) 在试验过程中, 随着激振力幅值的逐渐增大, 桩周土体已经进入塑性阶段, 桩土相互作用过程中非线性逐渐增强。

(2) 桩土系统的共振频率会随着桩土非线性相互作用的增强逐渐衰减。

(3) 桩径相同情况下, 共振频率及其衰减速度基本上与桩的长径比负相关; 也就是说随着桩长径比的增大, 桩的共振频率及其衰减率基本上呈减小趋势。

(4) 桩土非线性相互作用会对桩身弯矩分布造成影响。随着荷载增大, 桩身最大弯矩呈非线性增长并且桩身最大弯矩点和反弯点位置均会随着非线性的增强而逐渐向土层深处发展。

参 考 文 献:

- [1] NOGAMI T, OTANI J, KONAGAI K, et al. Nonlinear soil-pile interaction model for dynamic lateral motion[J]. *J Geotech Eng, ASCE*, 1992, **118**(1): 89 - 106.
- [2] EL Naggar M H, NOVAK M. Non-linear model for dynamic axial pile response[J]. *J Geotech Engng, ASCE*, 1992, **118**: 89 - 106.
- [3] BOULANGER R W, Curras C J, KUTTER B L, et al. Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analysis[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 1999, **125**(9): 750 - 759.
- [4] EL Naggar M H, BENTLEY K J. Dynamic analysis for laterally loaded piles and dynamic $p-y$ curves[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, **37**: 1166 - 1183.
- [5] GLE D R, WOODS R D. Predicted versus observed dynamic lateral response of pipe piles[C]// Proc of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, 1984: 905 - 912.
- [6] MANNA B, BAIDYA D K. The nonlinear coupled response of single and group piles under various horizontal excitations: experimental and theoretical study[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2012, **35**(6): 1 - 15.
- [7] GOIT C S, SAITO M, MYLONAKIS G, et al. Model tests on horizontal pile-to-pile interaction incorporating local non-linearity and resonance effects[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, **48**: 175 - 192.
- [8] LOMBARDI D, BHATTACHARYA S, WOOD D M. Dynamic soil-structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil[J]. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 2013, **49**: 165 - 180.
- [9] 童建波, 高 明. 侧向受载排桩的动力试验和非线性分析[J]. 水利水运科学研究, 1989(4): 65 - 80. (TONG Jian-bo, GAO Ming. Dynamic test and nonlinear analysis of row piles under lateral load[J]. Hydro-Science and Engineering, 1989(4): 65 - 80. (in Chinese))