

桩-土动力相互作用问题中桩身刚度的影响效应研究

马 亢¹, 裴建良²

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 通过开展2类刚度差异较大的桩基础的离心机动力模型试验, 系统地讨论柔性桩和刚性桩的地震反应差异, 以及周围土体对桩体的不同作用效应。对于柔性桩, 周围土体的作用主要体现在对桩的约束效应上; 然而对于刚性桩, 土体更大程度上对桩体施加附加惯性力的作用, 以致桩筏基础的周期明显高于无土时的周期; 针对柔性桩和刚性桩显著的地震反应差异, 巧妙地提出用桩筏结构自振频率 w_{pr} 界定两者的行为, 可为今后类似研究提供参考。

关键词: 桩基工程; 地震; 软黏土; 相互作用; 弯矩; 桩刚度

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2011)增2-3626-07

EFFECT STUDY OF PILE STIFFNESS ON PILE-SOIL DYNAMIC INTERACTION PROBLEM

MA Kang¹, PEI Jianliang²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China; 2. School of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: By conducting the centrifuge dynamic tests coverage to two kinds of piles with great stiffness difference, This paper investigated that there exist some quite different characteristics between behavior of flexible and stiff piles during earthquake shakings. For the flexible piles, the bending moment drops to a very small value below the changeover point. This is similar to the bending moment distribution curves for laterally loaded piles, and suggests that, for flexible piles, the clay beneath a certain depth is able to provide lateral support for the pile. On the other hand, for the stiff piles, the bending moment changes over at a much larger depth indicating that lateral support is not effective until much deeper. There is also much larger reverse moment below the changeover depth. This is quite different from the typical moment distribution of laterally loaded piles, the surrounding clay effect on the pile mainly focus on the providing additional inertia forces. Finally, a skillful parameter of pile-raft native frequency was presented herein to quantify pile flexibility.

Key words: pile foundation; earthquake; soft clay; interaction; bending moment; pile stiffness

1 引言

桩基础是软土地区广泛应用的基础形式, 根据

桩头的约束形式主要可分为固定和自由两类, 根据刚度(EI)或长细比(l_p/d)等指标可划分为刚性短桩和柔性长桩2类(或从刚度角度上可称为长短桩), 它们在侧向荷载或循环动荷载作用下的破坏模式有很

收稿日期: 2010-12-03; **修回日期:** 2011-02-09

基金项目: 国家自然科学基金“重大国际合作研究项目”(2007DFB60100); 国家建设高水平大学公派研究生项目

作者简介: 马 亢(1981-), 男, 2010年于四川大学岩土工程专业获博士学位, 现任助教, 主要从事岩土地震工程和岩石力学等方面的教学与研究工作。E-mail: makangxmu@xmu.edu.cn

大区别：一般来说，对于短刚性桩，桩身刚度大，其破坏模式主要是由于桩周土的屈服破坏导致桩土脱离，丧失承载能力而失效；对于柔性长桩，其破坏模式主要是在桩身内形成塑性铰导致的桩体断裂破坏(见图 1)。然而，在具有任意频谱特性真实地震的作用下，由于桩刚度的差异，柔性桩和刚性桩的动力行为差异是否和静力情况或循环动力试验结论相同，目前国内外的研究成果还十分有限，更未有基于机制上的认识提出明确的指标用于界定两者的动力行为，为实际桩基础的抗震设计提供科学依据。

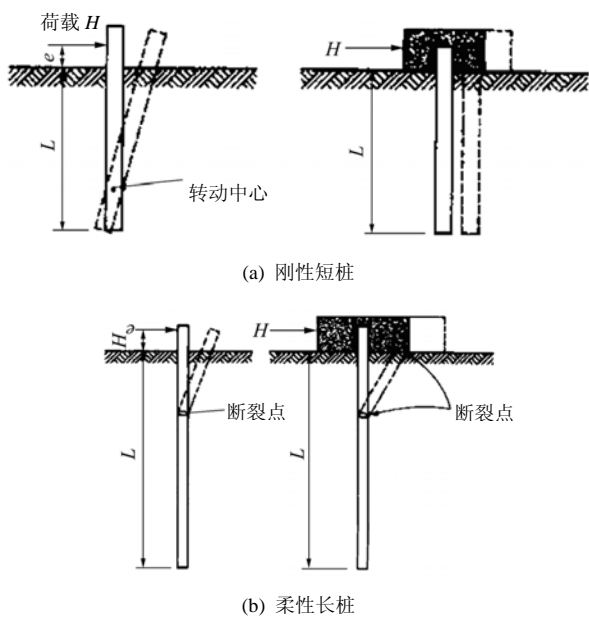


图 1 不同桩头约束条件下桩的破坏模式

Fig.1 Damage modes of piles under the different constraints of pile head

试验是在新加坡国立大学岩土离心机上完成的，试验水平加速度为 50 g，首先需要将振动台安装至离心机的负载吊篮内并调试(见图 2)。本文的试验方法、输入地震波(仅考虑剪切波的影响，每次试验连续被 3 次不同强度的地震事件所激励，即小震 $PGA = 0.022 g$ ，中震 $PGA = 0.052 g$ ，大震 $PGA = 0.130 g$ (PGA 为地震加速度峰值)三次频谱特性相同只是峰值强度按比例缩放的地震事件，每次地震事件持续时间同为 25 s)，传感器布置及桩筏基础模型情况均在马 亢^[1]的研究中有详细介绍。基于量纲分析和控制方程，可以确定离心机原型模型和原型的相似关系，本文均以原型单位作讨论。

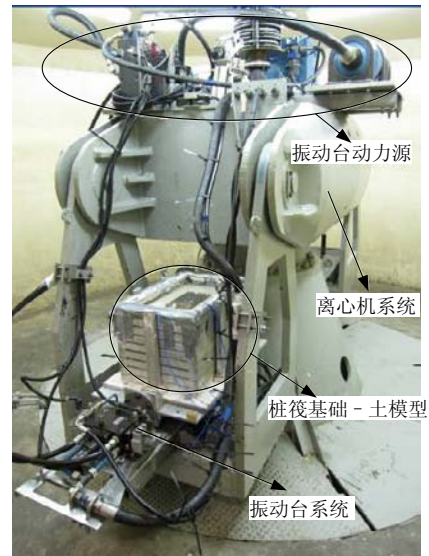


图 2 模型试验布局
Fig.2 Layout of model test

2 桩筏模型

本文桩筏基础中桩直径分别为 0.5 和 0.9 m，长度均为 13 m，但两者的刚度差异约为 10.5 倍，刚度差异显著，本文以柔性桩和刚性桩作区分(柔性和刚性是相对的，仅作区分，不代表实际)如图 3 所示，桩的特性参数见表 1。筏板目的主要为了固定桩头，也经常作为建筑物的基础结构型式，同时可为试验地震工程中模型的对称性要求，即始终保持沿着地震方向平动，不发生倾覆和翻转。桩与桩的间距大于 5 倍桩直径，从而桩与桩之间的相互作用基本上可忽略，因此，本文研究的是单桩效应。为了模拟上部结构荷载的惯性效应，额外的铁块将在试验中分阶段的加到筏板表部以模拟上部结构传递给基础(筏板)的惯性荷载水平(见表 2)。



图 3 桩筏模型
Fig.3 Pile-raft model

表 1 桩的特性参数

Table 1 Property parameters of piles

类别	刚度 EI ($kN \cdot m^2$)	直径 d/m	二次面积矩 I_p/m^4	长细比 l_p/d	刚度比
柔性桩	644 271	0.5	0.003 1	26.0	1.0
刚性桩	6 763 303	0.9	0.032 0	14.4	10.5

表 2 不同荷载下的试验方案

Table 2 Test cases of different loads

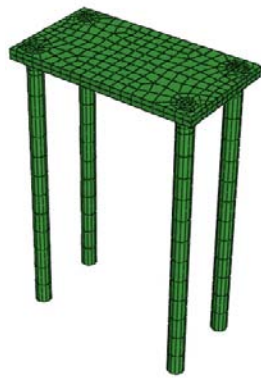
工况	荷载	筏板模型质量/kg	筏板原型质量/t
1	筏板	2.95	368
2	筏板+1 个铁块	4.84	605
3	筏板+2 个铁块	6.90	863

3 桩筏基础(无土)的地震反应

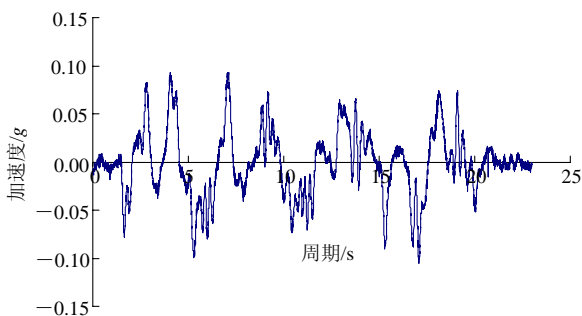
为了更好地研究桩-土动力相互作用的机制, 须首先单独地了解桩筏基础(无土)的地震反应行为(见图 4(a)), 桩底用高强胶水固定于模型箱内, 类似单层框架结构体系。由于结构体系在地震中的反应行为往往表现为弹性, 其固有周期应与地震加速度峰值(PGA)是非关联的, 由于中震和大震强度相对较高, 桩底可能因为胶水的黏结力不够引起松动,



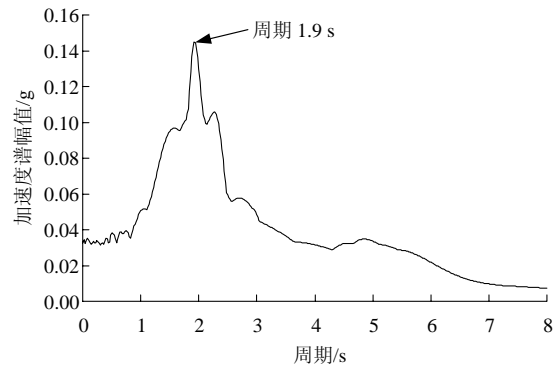
(a) 桩筏结构离心机模型试验(无土)



(b) ABAQUS 计算模型



(c) 实测的筏板加速度时程曲线



(d) 由实测的加速度时程确定筏板周期

图 4 桩筏基础的周期

Fig.4 Periods of pile-raft foundation

故桩筏基础的周期一律从小震事件实测的加速度时程曲线中(见图 4(c), (d))确定。表 3 给出了所有实测的基础(筏板)在无土时的固有周期, 同时与 ABAQUS 计算结果对比, 图 4(b)为 ABAQUS 计算模型。

表 3 基础(筏板)在无土时的周期

Table 3 Raft periods under the condition without surrounding clay

桩型	筏板质量/t	基础(筏板)周期(无土)/s	
		ABAQUS 结果	离心机试验值
柔性桩 ($d = 0.5\text{ m}$)	368	1.34	1.90
	605	1.76	桩底松断
	863	2.04	桩底松断
刚性桩 ($d = 0.9\text{ m}$)	368	0.58	0.68
	605	0.65	0.90
	863	0.74	桩底松断

从表 3 可知, 由 ABAQUS 弹性分析(此时认为桩与筏板的联结处是绝对刚性的, 不存在软化和松动)确定的周期略低于由离心机试验确定的周期, 这很大程度上取决于试验中桩筏联结处的有限刚度(并非绝对的刚性), 即可能发生一定程度的软化和松动。尽管两者确定的周期存在一定的差异, 但数值基本相当, 证明结果是合理的。同时, 在相同条件下, 由柔性桩支持的筏板周期总体上要高于刚性桩筏板周期, 这是所期望的, 因为在相同条件下, 柔性桩筏基础的刚度要小于刚性桩基础, 故周期更长。本节确定的无土时桩筏基础周期将为下节讨论的有土时周期(见图 5)作对比分析, 以揭示桩周土对 2 类刚度差异较大的桩筏基础的不同作用机制, 更好地理解土体对桩基础的作用规律。

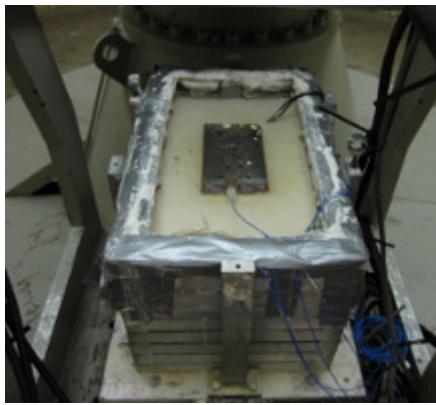


图 5 桩筏基础 - 土体系的离心机试验
Fig.5 Centrifuge test of pile-raft-clay system

4 柔性桩和刚性桩的动力反应差异

4.1 共振周期

表 4 给出了柔性桩和刚性桩筏基础在有土时的共振周期，以与表 3 中无土条件下的周期对比，以期探索在地震作用下周围土体对桩筏基础的作用效应及差异。

表 4 基础(筏板)在有土时的共振周期
Table 4 Resonance periods of raft under the condition with surrounding clay

桩型	筏板质量/t	有土条件下筏板周期/s (离心机试验值)		
		小震	中震	大震
柔性桩 ($D = 0.5 \text{ m}$)	368	1.32	1.48	1.52
	605	1.56	1.52	1.54
	863	1.68	2.00	2.26
刚性桩 ($D = 0.9 \text{ m}$)	368	0.86	0.96	1.40
	605	1.60	1.56	1.58
	863	1.62	1.82	1.86

对比表 3, 4 可知：对于柔性桩，在筏板质量为 368 t 情况下，筏板的周期在有土时的周期为 1.32~1.52 s，基本上和无土时的周期 1.34 s 相接近，在筏板质量为 605 和 863 t 的情况也基本类似；然而，对于刚性桩，当筏板质量为 368 t 时，筏板的周期在有土时的周期为 0.86~1.40 s，明显高于无土时的周期 0.58 s，当筏板质量加重(605 和 863 t)时更为明显，根据 $T = (M/K)^{0.5}$ (M 和 K 分别代表体系的质量和刚度)，桩筏结构的刚度始终未变，只有周围土体对桩筏结构施加了附加的惯性力作用才会使得周期变长。这说明周围土体对桩的作用是有区别的：对于

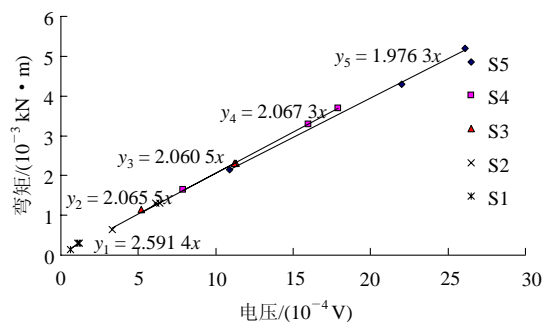
刚性桩，沿其几乎整个长度的所有深度土体对桩(筏)基础明显地施加了惯性力的作用，土体对桩的约束作用不显著，S. Banerjee 等^[2]曾基于非常短刚性桩 ($l_p/d = 8.5$, $l_p = 9.5 \text{ m}$) 的研究，给出了类似的结论；然而，对于柔性桩，土体对整个桩筏结构的惯性作用不显著，由于土体上软下硬的强度特征，深部土体给桩的作用更体现于约束效应上，而浅部土体对桩的惯性作用相对较为明显。这在下面的弯矩讨论中也将有所体现。

4.2 桩身弯矩

桩身弯矩由安装于沿其长度不同位置的应变片测得，应变片编号为 S1~S5。在试验之前，需要按悬臂梁方法进行多种工况标定，以确定弯矩和试验中实测电压信号之间的关系，可以看出，弯矩和电压之间的转换系数约为 2。桩身弯矩应变片标定如图 6 所示。



(a) 桩身弯矩应变片及标定(单位: mm)



(b) 桩身弯矩各应变片的标定拟合曲线

图 6 桩身弯矩应变片标定

Fig.6 Calibration of strain gauges for pile bending moment

根据桩身不同位置应变片 S1~S5 记录的典型弯矩时程曲线(最大弯矩发生于约 5.1 s 时)，依次将各点记录的最大弯矩值选出，绘出沿桩身长度各对

应点的弯矩包络图。图7为试验实测的桩身弯矩包络图。

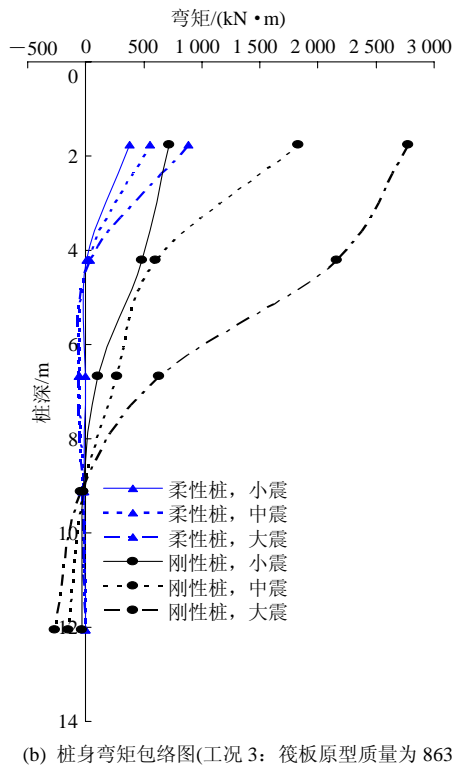
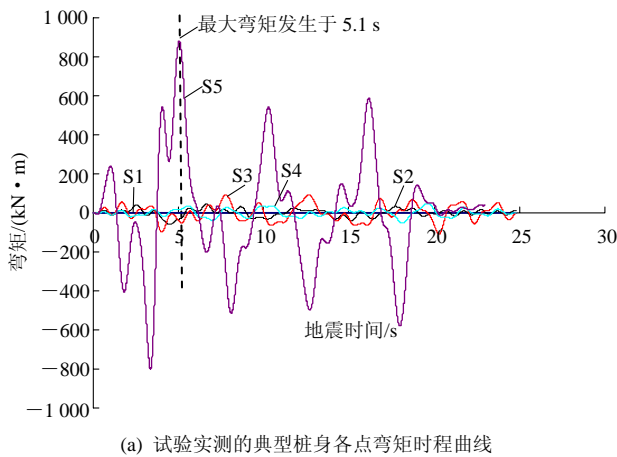


图7 试验实测的桩身弯矩包络图

Fig.7 Measured envelopes of pile bending moment from tests

由图7可以看出,对于柔性桩和刚性桩,桩身最大弯矩均发生于靠近桩筏联结处的桩头附近,并且最大弯矩值随地震强度(PGA)的增大而增大;在桩身某一深度,存在一个分界点即弯矩值反向(由正转负),且有刚性桩的分界点比柔性桩更深。对于柔性桩,分界点以下的桩身弯矩非常微小,甚至可以忽略。这与侧向荷载作用下的桩身弯矩分布特征非常类似,说明在分界点以下深度的土体对桩身的侧向约束作用非常显著。H. G. Poulos等^[3-5]曾基于柔性桩的桩头载荷试验提出了计算桩的有效长度 l_a 的

几类公式,并指出在该有效深度 l_a 以下,桩身弯矩将不超过靠近桩头最大弯矩值的5%;然而,对于刚性桩,其分界点比柔性桩更深,这说明桩周土体对桩身的侧向约束作用,甚至到了深部土体时仍不显著,较高的负弯矩仍能在分界点以下产生。这与侧向荷载试验的桩身弯矩分布特征有着明显的差异,土体对刚性桩的作用主要体现在施加附加惯性力上。

图8总结了不同地震强度(PGA)下柔性桩和刚性桩的最大弯矩值(近桩头,应变片编号S5)随筏板质量的变化情况。与PGA的变化趋势相似,两类桩的最大弯矩值均随筏板质量的增大几乎呈线性地增大。由于刚度(ED)的差异,在相同条件下,刚性桩的弯矩值大于柔性桩。

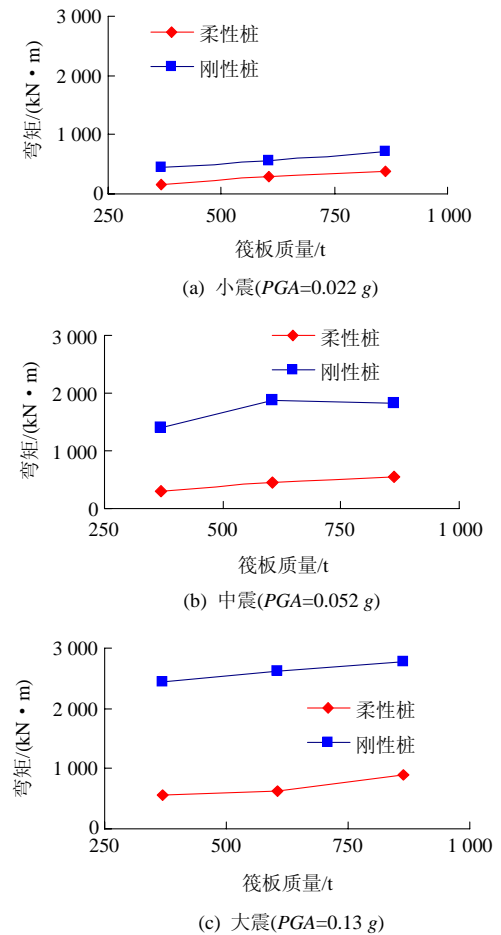


图8 试验实测的桩身最大弯矩值

Fig.8 Measured maximum bending moments from tests

5 桩刚度的界定

通过以上讨论可知,在地震作用下,柔性桩和刚性桩的反应行为以及与土的相互作用机制有着非常显著的差异,因此,在桩基础的抗震设计中,对

桩刚度的界定尤为重要，因为这直接关系到设计方案和工程预算。然而，一直以来，对桩刚度的界定方法很多，尚未形成统一且有效实用的量化指标。B. B. Broms 等^[6-11]已对柔性桩和刚性桩行为的界定提出过很多指标，见表 5(表中 B 为桩直径， D 为桩长， E_p 为桩的弹性模量， I_p 为桩的二次面积矩， E_s 为土的弹性模量， ν_s 为土的泊松比， G_s 土的剪切模量。)。它们在许多工程设计中都发挥过一定的作用，但各自有一定的适用条件和范围，在一定程度上还具局限性。

表 5 桩刚度的界定指标

Table 5 Separating standard of pile behavior

来源	界定指标		备注
	刚性桩	柔性桩	
Michael Tomlinson ^[3]	$L < 2R$ 或 $L < 2T$	$L > 3.5R$ 或 $L > 4T$	假设土体强度不随深度变化, $R = \sqrt{E_p I_p / (k_h B)}$; 假设土体强度随深度变化, $T = \sqrt{E_p I_p / n_h}$, k_h, n_h 为每层土的抗力系数
B. B. Broms ^[6]	$\beta D > 1.5$	$\beta D < 1.5$	$\beta_t = [k_h B / (4E_p I_p)]^{0.25}$; k_h 为每层土的抗力系数
M. Budhu 和 T. Davies ^[7]	$D < 1.5BK^{0.36}$	$D > 1.5B$ $K^{0.36}$	$K = (E_p / E_s)$, 假设土体强度不随深度变化
M. Budhu 和 T. Davies ^[7]	$D < 1.3BK^{0.222}$	$D > 1.3B$ $K^{0.222}$	$K = [E_p / (mB)]$, 假设土体强度随深度变化, 线性增加率为 m
M. Bierschwale 等 ^[8]	$D/B < 6$	$D/B > 6$	某些情况下, 刚性桩可 $D/B < 10$
Dobry ^[8]	$SH < 5$	$SH > 5$	$S_H = (D/B) / (E_p / E_s)^{0.25}$
H. Poulos 和 T. Hull ^[9]	$D < D_p/3$	$D > D_p$	$D_p = 4.44(E_p I_p / E_s)^{0.25}$
J. Carter 和 F. Kulhaw ^[10]	$D/B < 0.05(E_p/G^*)^{0.5}$	$D/B > (E_p/G^*)^{2/7}$	$G^* = G_s(1 + 3\nu_s/4)$

本文研究的桩筏结构，可将桩按悬臂梁情形进行受力简化：即桩头固定于筏板内，承受桩周土体施加的分布荷载作用 $P(h)$ 以及桩尖(桩底)的点荷载作用 F ，桩筏结构的简化受力模型如图 9 所示。

因此，桩的弯曲刚度可表达为

$$k = \frac{E_p I_p}{l_p^3} \tag{1}$$

式中： E_p 为桩的弹性模量， I_p 为桩的二次面积矩， l_p 为桩长。采用弯曲刚度 k 来度量桩的刚度具有一定的不足，因为它未考虑筏板质量和上部结构传递给桩的荷载水平 m_{raft} ，而该因素对桩筏结构的自振周期和弯矩设计峰值都具有十分重要的影响。因此，考虑这个因素在内的度量参数，可由桩筏基础的自振频率 w_{pr} (体系包括 4 根桩)表达如下：

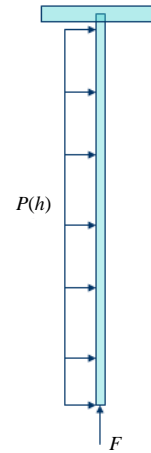


图 9 桩筏结构的简化受力模型

Fig.9 Simplified pile-raft structure model under different forces

$$w_{\text{pr}} = \sqrt{\frac{4k}{m_{\text{raft}}}} \tag{2}$$

由于本次研究中采用的土体均为相同特性和厚度的高岭土(即由高岭土粉末和水按质量比 1 : 1.2, 人工配制的软黏土)，故土的自振频率 $w_s (= \nu_s / (4l_p)) = \sqrt{(G_s / \rho_s) / (4l_p)}$ 是相同的。为了更好地反映桩筏基础与土体的强度差异，采用频率比 w_{pr} / w_s 比单一 w_{pr} 更为合理和系统(当 $w_{\text{pr}} / w_s = 1$ 时，将发生共振，是工程中极力回避的)。该指标相对于以前多种指标打破了单纯从桩身特性(如表 1 中长细比(l_p/d))等宏观指标来界定桩刚度的影响行为，是基于动力机制上的理论指标，目前国内外还未有这方面的动力指标，具有一定的工程应用价值，值得参考，对于该指标的界定可以通过开展充足的试验和数值手段来确定。用自振频率(或比值)来界定 2 种桩基础的动力反应的研究思路，可供以后研究者参考，对于界定值的选择则需开展更多的工作。

6 结 论

本文通过开展 2 类刚度差异较大的桩基础离心机模型试验，系统地讨论了柔性桩和刚性桩的不同地震反应行为，以及周围土体对桩体的不同作用效应，在前文研究的基础上，本文取得的创新性成果如下：

(1) 桩刚度对桩 - 土动力相互作用问题的影响效应非常显著，柔性桩和刚性桩的地震反应行为差异显著：土体对柔性桩基础的主要作用体现在约

束效应上,与侧向荷载试验的弯矩分布特征类似,然而,对于刚性桩周围土体的作用却体现在施加惯性力的效应上,以使周期明显高于无土时的周期。

(2) 桩身最大弯矩发生于桩筏联结处的近桩头部位;且有在相同条件下,弯矩峰值随 PGA 、筏板质量以及桩身刚度的增大而增大;对于柔性桩,存在某一有效长度 l_a ,即 l_a 以下的桩体弯矩很小,在实际工程对该部分以下桩体可作某些特殊考虑(如使用廉价的桩体材料)以节省工程造价;而对于刚性桩,较大的弯矩值仍能在较深桩体内发生。

(3) 基于柔性桩和刚性桩的不同地震反应行为,巧妙地运用桩筏结构自振频率 w_{pr} 来界定两者的动力行为。

致谢 本文得到了新加坡国立大学离心机实验室提供的试验资源及沈瑞福博士提供的大力帮助;在课题研究中得到了导师谢和平院士和 F. H. Lee 教授的悉心指导,在此一并表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 马 亮. 地震条件下桩筏基础与土的动力相互作用机制研究[博士学位论文][D]. 成都: 四川大学, 2010.(MA Kang. Dynamic pile-raft-soil interaction in soft clay condition during earthquakes[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Sichuan University, 2010.(in Chinese))
- [2] BANERJEE S, GOH S H, LEE F H. Response of soft clay strata and clay-pile-raft systems to seismic shaking[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2007, 1(3): 233 - 255.
- [3] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1980: 455 - 481.
- [4] GAZETAS G. Seismic response of end-bearing single piles[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1984, 3(2): 82 - 93.
- [5] NIKOLAOU S, MYLONAKIS G, GAZETAS G, et al. Kinematic pile bending during earthquakes: analysis and field measurements[J]. Geotechnique, 2001, 51(5): 425 - 440.
- [6] BROMS B B. Lateral resistance of piles in cohesive soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1964, 90(3): 123 - 156.
- [7] BUDHU M, DAVIES T. Nonlinear analysis of laterally loaded piles in cohesionless soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(2): 289 - 296.
- [8] BIRSCHWALE M, COYLE H, BARTOWKEWITZ R. Lateral load tests on drilled shafts founded in clay[C]// Proceedings of a Session at the ASCE National Convention: Drilled Piers and Caissons Held Oct.. [S.l.]: [s.n.], 1981: 98 - 113.
- [9] POULOS H, HULL T. The role of analytical geomechanics in foundation engineering[C]// Proceedings of the 1989 Foundation Engineering Conference. [S.l.]: [s.n.], 1989: 1 578 - 1 606.
- [10] CARTER J, KULHAWY F. Analysis and design of drilled shaft foundations socketed into rock[R]. New York: Cornell University Press, 1988.
- [11] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995: 225 - 235.(Pile Foundation Engineering Handbook Committee. Pile foundation engineering handbook[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1995: 225 - 235.(in Chinese))