

桩筏基础 - 土动力相互作用的离心机模型 试验研究

马 亢¹, 裴建良²

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 厦门 福建 361005; 2. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 通过开展离心机动力模型试验, 深刻地揭示桩筏基础与土之间的动力相互作用将造成基础和土体运动的非一致性, 土体的运动不能代表基础的运动, 两者在加速度时程、反应谱特征、共振周期等方面均存在显著的差异, 传统结构抗震设计中采用自由场土体的动力参数直接作为基础的动力参数是极不严格的; 基础与土之间的动力相互作用将导致周围土体发生重塑软化, 且基础附近的土体(近场)软化程度明显高于远场土体(自由场土体), 加之土体自身的应变软化和强度降低的内在机制将共同导致土体的周期明显延长; 然而, 在地震作用下, 桩筏基础几乎不发生软化, 这与土体有着本质的区别; 在相同条件下, 基础的共振周期小于土体周期(近场和远场), 远场土体(自由场土体)周期小于基础附近的土体周期(近场土体); 土体的动力软化对结构的影响甚微。

关键词: 桩基工程; 地震; 桩筏基础; 软黏土; 相互作用; 土体软化; 共振周期; 离心机模型试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2011)07 - 1488 - 08

STUDY OF DYNAMIC INTERACTION BETWEEN PILE-RAFT FOUNDATION AND SOFT CLAY BY CENTRIFUGE MODEL TESTS

MA Kang¹, PEI Jianliang²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: By conducting dynamic centrifuge model tests on the clay-pile-raft system, this paper investigated that a kind of dynamic interaction non-coincidence between soil and pile-raft foundation. This suggested that soil motion can not be representative of foundation motion, and that adopting free field soil seismic parameters directly as foundation parameters in traditional building aseismic design is unreasonable; differences on the acceleration time histories, response spectra, as well as resonance period between soil and pile-raft foundation are very obvious and can not be neglected in engineering aseismic design. The effects of modulus reduction and stiffness degradation are manifested as an increase in the resonance periods of the clay layers with the level of shaking and with successive earthquakes, while this is not the case for the pile-raft foundation since its resonance period is hardly affected by earthquake loadings. Furthermore, raft period is always lower than corresponding clay period and period of far field clay is lower than that of near field clay because of remolding softening effect under the same condition, and pile-raft dynamic behavior is hardly affected by the stiffness degradation of surrounding clay.

Key words: pile foundation; earthquake; pile-raft foundation; soft clay; interaction; soil softening; resonance period; centrifuge model test

收稿日期: 2010 - 12 - 03; **修回日期:** 2011 - 03 - 19

基金项目: 国家建设高水平大学公派研究生项目; 国家自然科学基金资助项目(10572122); 国家自然科学基金重大项目(2007DFB60100)

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, 现为助教, 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

1 引言

结构抗震设计是建筑物抵抗地震破坏作用的必要手段。在历次世界强震中, 作为在软土地区广泛应用且占有重要地位的深基础形式—桩筏基础均出现过各类严重的破坏现象。由于破坏的隐蔽性, 使得破坏桩基的修复极为困难且耗资巨大。不同于砂土液化问题, 桩筏基础在软黏土中的地震反应行为, 以及与软土之间的动力相互作用机制极其复杂, 目前国内外研究还十分有限, 由于机制上的认识不足, 以致实际工程中往往没有统一且实用的设计理念和办法。因此, 大多工程设计中往往是不考虑基础与土间的相互作用的, 即使考虑也只限于刚性地基假设下的折减方法和弹塑性变形验算, 这显然存在问题, 因而造成了工程设计的盲目性。

传统的结构抗震设计方法是将自由场地震反应确定的地表设计地震动参数直接作为上部结构基础的地震动参数, 忽略了基础对场地地震动的作用影响。这对于低层建筑可能正确, 因为其上部结构的质量与地基域土体的质量相比很小, 甚至可以忽略。然而对于高层高重建筑, 其上部结构的质量效应显著, 这种情况下, 土 - 基础的相互作用效应必须考虑。在以往许多土 - 基础的动力相互作用研究中, 包括许多场地域的大规模有限元计算在内(见 J. Tromp^[1]的研究), 基础的影响效应往往是未考虑的, 这显然是欠合理的。

目前, 在建筑物的抗震设计中, 大多采用不考虑桩 - 土 - 结构相互作用的分离设计方法。这种把桩基与上部结构分割开来, 各自独立设计的方法, 由于未考虑由各部分间相互作用引起的地震减弱效应, 可能会使得设计过于保守。我国的现行规范, 如《构筑物抗震设计规范》(GB50191-93), 《水工建筑物抗震设计规范》(DL5073-2000), 《水运工程抗震设计规范》(TJT225-98)等, 以及国外的一些抗震设计规范: 如 Uniform Building Code (ICBO, 1997), Eurocode(EN 1998-5), Indian Seismic code (IS1893-2002)等, 均未指明桩 - 土动力相互作用的具体计算规定。我国仅有《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)对 8, 9 度时建造于 III, IV 类场地, 采用桩箱联合基础的钢筋混凝土高层建筑, 当结构基本自振周期处于特征周期的 1.2~1.5 倍范

围时, 地震惯性作用根据高宽比是否小于 3.0 分别采用常数折减和沿高度的线性折减。而桩基设计一般不作抗震验算, 仅对较差地基或存在液化土层的低承台桩基进行抗震验算, 验算亦不考虑相互作用。目前大多工程设计中考虑相互作用的范围很小。这种设计比较脱离实际, 或造成浪费, 或由于盲目保守有时并不能保证结构的安全性, 这一点被许多实际地震中桩基础的震害现象所证实^[2-7]。

桩筏基础与土的动力相互作用是一个极其复杂的研究课题, 是结构动力学、土动力学和地震工程学的交叉学科, 目前已成为土木工程领域中的研究热点和难题之一。目前, 我国在该领域的研究非常有限, 主要存在以下两方面的问题:

(1) 尚未有任何关于桩(筏) - 土体系的动力试验成果, 在很大程度上仍处于简化模型和数值仿真的研究层面上, 在公开发表的文献上未见有动力相互作用机制的揭示和阐述。

(2) 基于桩(筏) - 土动力相互作用的研究成果, 尚未有任何服务于实际工程设计的图表与公式, 桩基础的动力学设计还很大程度上停留在经验和拟静力学方法的层面上。

因此, 研究地震条件下的软土与桩筏基础的动力相互作用机制, 基于机制上的认识可提出桩基础的普适抗震设计图表对我国软土地区的高层建筑、城市高架桥、越江跨海大桥、港口码头、海上采油平台与堤防工程等领域具有广阔的工程应用前景。

2 试验系统及传感器布置

2.1 试验系统

试验是在新加坡国立大学岩土离心机上完成的, 试验加速度水平为 50 g。试验前首先需要将振动台安装至离心机的负载吊篮内并调试, 试验安装细节可详见 S. Banerjee 等^[8-11]的研究, 试验布局见图 1。本文除特别的说明外, 均以原型单位作讨论。

2.2 桩筏模型

试验使用的桩筏模型由 4 根长度为 260 mm(原型为 13 m), 直径为 10 mm(原型为 0.5 m)的不锈钢实心圆柱桩, 与一个用于固定桩头(本次研究的是固定桩头情况, 有些桩基础桩头是自由的), 厚度为 10 mm(原型为 0.5 m)的钢质筏板组成(见图 2)。桩与桩的间距大于 5 倍桩直径, 从而桩与桩之间的影响

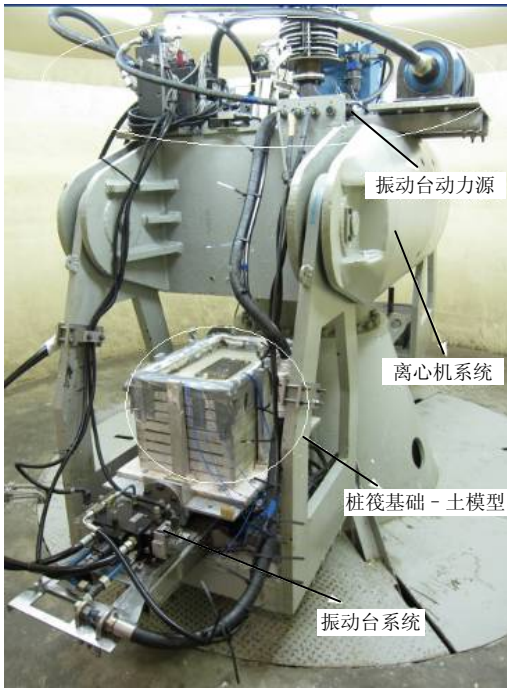


图1 桩筏基础 - 土体系的离心机 - 振动台模型试验布局
Fig.1 Layout of centrifuge shaking table test for pile-raft-clay system



图2 桩筏模型
Fig.2 Pile-raft model

效应基本可以忽略,因此,本文研究的是单桩效应。为了模拟上部结构的荷载效应,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)的荷载水平,试验方案见表1。

由于担心地震中可能造成模型中桩筏连接处发生震松或变形影响试验结果,因此,为防止这种桩筏连接处的地震剪断变形(这也是地震中桩基础最为常见的破坏部位,通常为最大弯矩发生处),同时

表1 不同荷载下的试验方案
Table 1 Test cases under different loads

荷载工况	荷载	模型筏板质量/kg	原型筏板质量/t
Load 1	筏板	2.95	368
Load 2	筏板+1个铁块	4.84	605
Load 3	筏板+2个铁块	6.90	863

为保证试验地震过程中模型的正常运行状态,适当地增加桩筏连接处的刚度能取得较好效果(即桩体顶部焊接一高强螺丝旋进筏板钢板钻孔内),这种做法可为今后类似地震模型制作积累相关经验。

2.3 土样制备

试验采用的软黏土是由高岭土粉末和水按质量比1:1.2混合搅拌而成的。首先,在真空搅拌机内充分搅拌4h,然后将混合均匀的高岭土灌入事先装好橡皮袋(防漏水)的层状剪切模型箱内(各层间可自由滑动,目的是允许不同土层间在地震过程中发生剪切变形),在此之前,需先在橡皮袋底部铺设一层约0.2m的砂层作为固结排水路径并插好排水软管,同时预埋好加速度传感器用于测量土体内不同深度的加速度反应,高岭土的基本工程性质见表2。

表2 高岭土的基本工程性质
Table 2 Basic engineering properties of kaolin clay

容重 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水 率/%	液限 /%	塑限 /%	渗透系数 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	初始 空隙比	内摩擦角 ($^{\circ}$)
16	66	80	40	1.36×10^{-8}	1.74	25

土样装好后,需要一个固结过程以获得期望的强度和应力历史。通常土体的自然固结过程需要经历漫长的地质年代,首先将模型箱内的土样在重力条件下(1g)预固结一周左右,以形成少许初期剪切强度,然后将桩筏模型放入土体合适位置并用支架固定后,启动离心机加速至50g进行超重力场条件下的固结过程,固结后的土体见图3。根据以往试验经验和Terzaghi一维固结理论计算可知,整个固结时间约为10h。

2.4 传感器布置

试验中传感器的布置见图4。其中,加速度传感器A1位于土体底部用于测量输入的地震加速度时程;A2与A4位于土表,A2靠近桩筏基础,



图 3 固结后的土体

Fig.3 Clay after consolidation

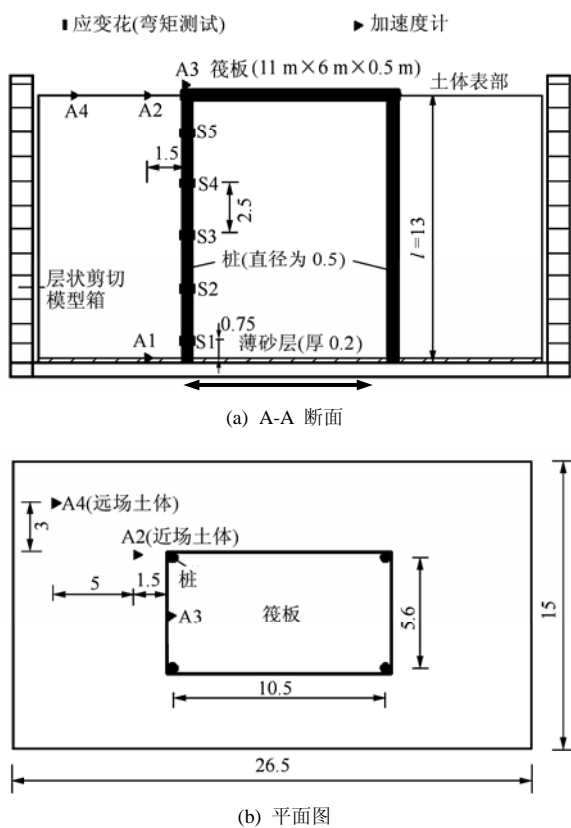


图 4 传感器布置(单位: m)

Fig.4 Sensors layout(unit: m)

用于测量近场土体的地震反应, 近场土体将受桩筏基础的影响即存在基础与土体的相互作用; A4 远离桩筏基础, 用于测量远场土体的地震反应, 此部位土体受桩筏基础的影响相对较小, 类似于自由场土体的行为; A3 固定于筏板表部, 用于测量基础的地震反应。

沿着桩身不同部位贴有应变片, 分别标记为 S1~S5, 用于测量桩身弯矩, S1 位于桩底, 距桩底 0.75 m, 然后依次向上各点间距均为 2.5 m。

2.5 输入地震动

根据新加坡深软黏土地实测的历次地震反应(主要是由苏门答腊断层破断引起的远场地震), 具有持时与周期都相对较长以及峰值强度较弱的典型远场地震特征。采用这些地震的反应谱, 可人工合成本次研究的输入地震加速度时程曲线^[12]。3 次地震事件(小震、中震和大震)只是按比例缩放, 峰值加速度(PGA)分别为 0.022 g, 0.052 g 和 0.130 g, 其他性质如频谱特性和持时等均相同。

基于加速度时程曲线, 采取二次积分可得到位移时程曲线, 然后各自缩小 50 倍(离心机加速度为 50 g), 并转换为数字信号输至振动台的伺服作动器, 这样模型试验就在期望的地震条件下进行, 与原型在真实地震作用下的情况相一致。

在每次试验中, 为了充分揭示地震强度和地震持续时间对桩筏基础 - 土体系动力行为的影响效应, 每次工况下的地震激励将由 2 组相同的地震系列 1 和 2 组成, 每组地震系列又由小震、中震和大震 3 次地震事件组成。图 5 为每次离心机试验所连续触发的地震事件。

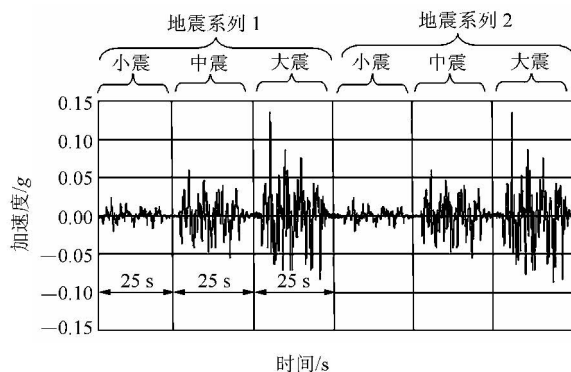


图 5 离心机试验所连续触发的地震事件

Fig.5 Sequential triggered earthquake events of centrifuge tests

3 试验结果与机制分析

3.1 桩筏基础与土的动力相互作用

图 6 分别为各加速度传感器实测的土底(A1)、近场土表(A2)、远场土表(A4)以及基础(筏板)(A3)的典型加速度时程曲线。该情况为桩筏基础 - 土体系在地震系列 1、中震(PGA = 0.052 g), 以及荷载工况为 Load 3 条件下的试验实测结果。

将 A2, A3 与 A4 测得的加速度峰值与 A1(土底输入)比较可知: 地震波从土体底部向土表传播时,

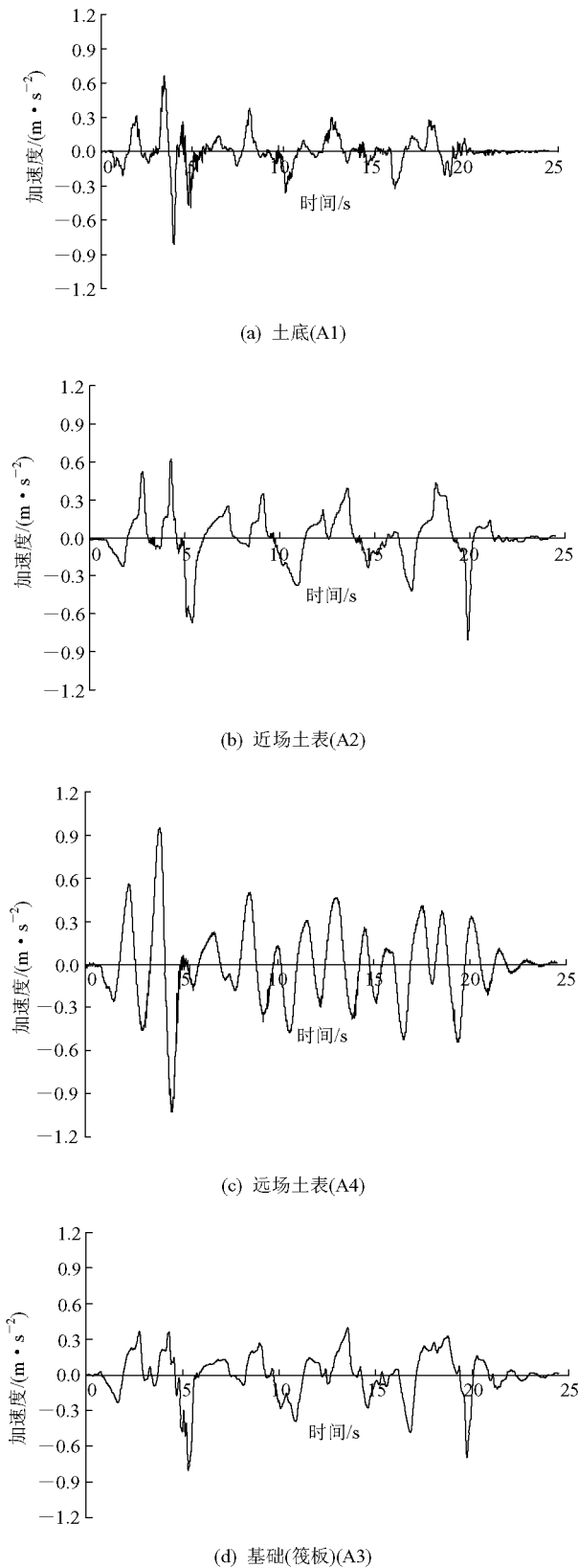


图6 试验实测的典型加速度时程曲线

Fig.6 Typical acceleration time-history curves measured in tests

在土表和基础(筏板)均得到了一定程度的放大,同时,土体和桩筏基础结构具有过滤地震波高频成分

的作用;尽管 A2, A3 与 A4 处于同一高程,但它们的时程曲线明显不同,这说明基础(筏板)与土体(近场和远场)的运动是非一致的,土体的运动不能代表基础的运动,它们之间是存在相互作用的。

图 7(a)为对应于 A2, A3 与 A4 加速度时程的反应谱曲线,可明显看出,与土底 A1 相比,土表和基础(筏板)的反应谱加速度幅值在周期 1~3 s 范围内得到了显著的放大;将每一周期下的土表与土底反应谱幅值的比值即放大系数绘于图 7(b)中,可见,筏板的最大放大系数约为 3.5,发生于周期约为 1.5 s 时。本研究中,将最大放大系数所对应的周期定义为土体或基础的共振周期,因此可以确定,近场土表的共振周期约为 2.3 s,稍高于远场土体的周期 1.9 s,这表明靠近和远离基础结构的土体反应是不同的,地震作用下桩筏基础与周围土体的相互作用将使近场土体发生显著的软化效应并导致刚度降低,以致共振周期高于远场土体($T = (M/K)^{0.5}$);基础(筏板)的共振周期为 1.5 s,低于土体的周期(近场和远场),这提供了另一个证据:无论远场(自由场)或近场土体的运动均不能代表基础结构的运动,基础与土之间是存在相互作用的。

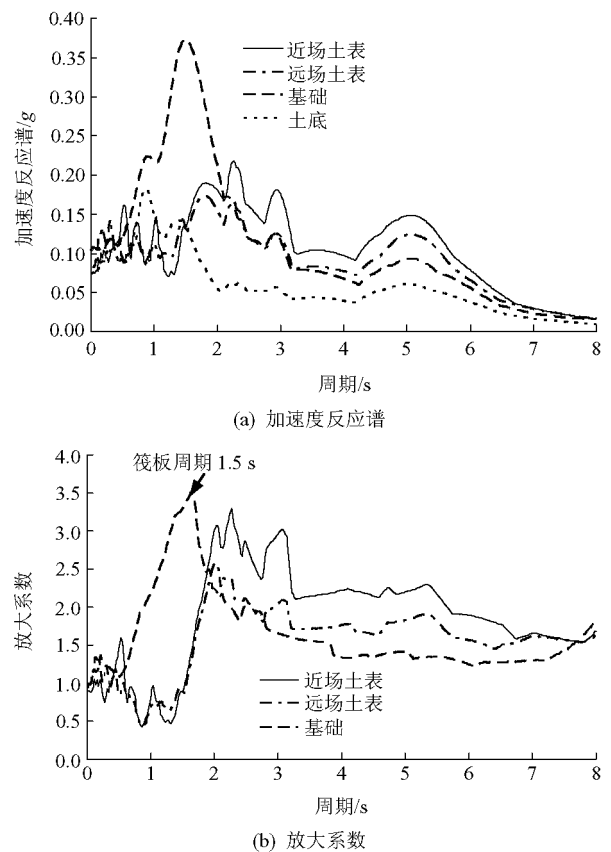


图7 试验确定的筏板周期和放大系数

Fig.7 Raft periods and amplifications measured from tests

3.2 土体周期

图8总结了土体在2个地震系列作用下以及不同筏板质量条件下的共振周期随地震强度(PGA)的变化规律。

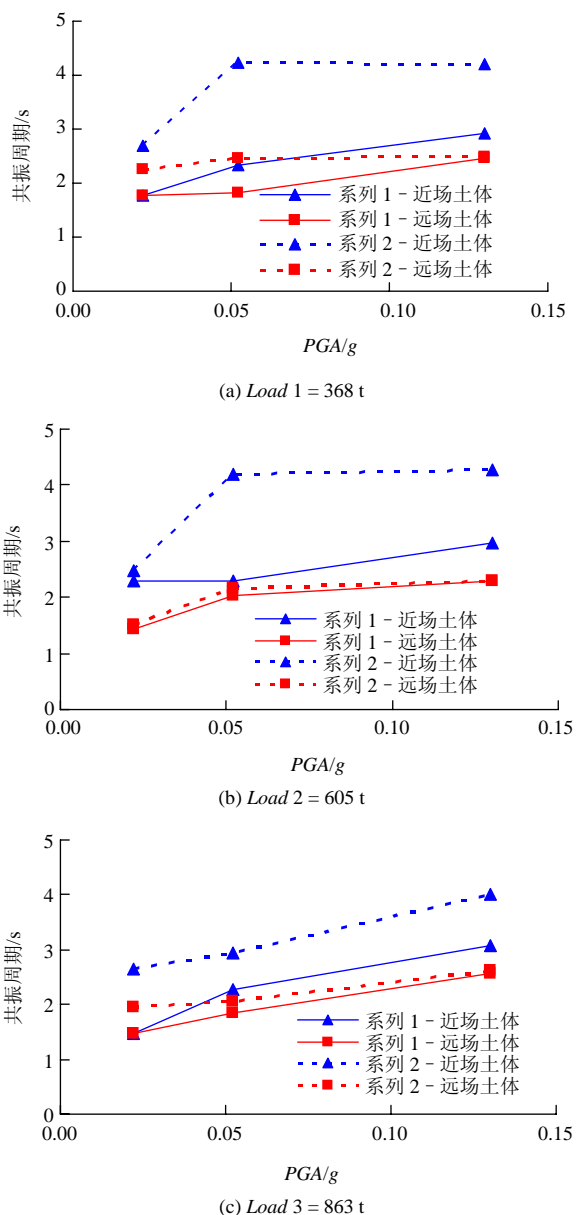


图8 土体共振周期

Fig.8 Resonance periods of clay surface

由图8可以看出,无论是近场还是远场土体,在各种筏板质量下,它们的共振周期随地震强度(PGA)的增大均呈增大趋势;且在相同条件下,地震系列2的土体周期均高于地震系列1时的周期,这是所期望的,因为在土体质量(地基域)和桩筏基础均未改变的前提下,只有土体在强度逐渐增大(PGA)或持续作用的地震条件下(从系列1到系列2),其自身发生了软化以致刚度降低才会使得周期变

长。这并非不合理,软化可源于两方面:土体本身的应变软化行为以及与基础发生相互作用时导致的软化,本研究定义为“重塑软化行为”。由于近场土体与基础结构的相互作用更为显著,重塑软化效应要强于远场土体,因此在相同的条件下,近场土体的软化程度大于远场土体,从而使共振周期在地震系列2较远场土体仍有更为明显的增长。W. D. L. Finn^[13]通过开展数值模拟研究,给出了与本文试验一致的结论,如图9所示,桩周土体的剪切模量明显降低。

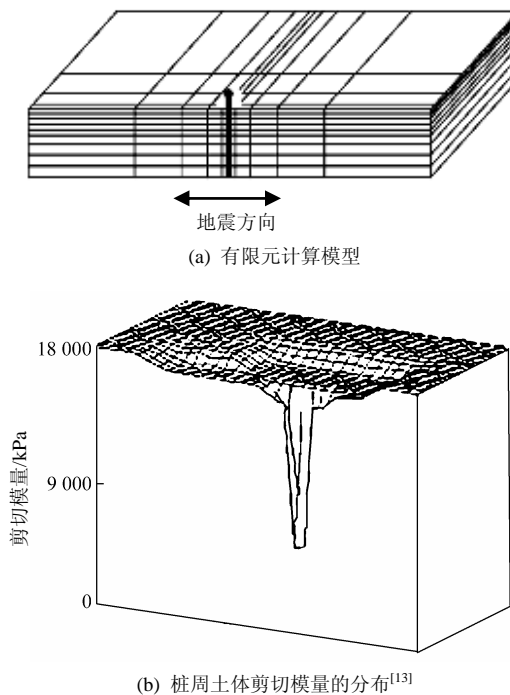


图9 桩周土体的软化效应

Fig.9 Soil softening effect around pile

3.3 基础(筏板)周期

图10为基础(筏板)在2个地震系列作用下以及不同筏板质量条件下的共振周期随地震强度(PGA)的变化情况。

由图10可以看出,与上述讨论的土体周期不同,在相同条件下,基础(筏板)在2个地震系列的周期几乎保持不变。当筏板质量较小(Load 1, Load 2)时,共振周期几乎与地震强度(PGA)非关联;然而,在筏板质量增大(Load 3)时,周期随PGA的增大呈缓慢增大的趋势。在相同筏板质量和相同PGA条件下,基础(筏板)的周期低于土体的周期(近场和远场)。这说明,至少在筏板质量较小(Load 1, Load 2)的情况下,桩筏基础的行为是弹性的,当筏板

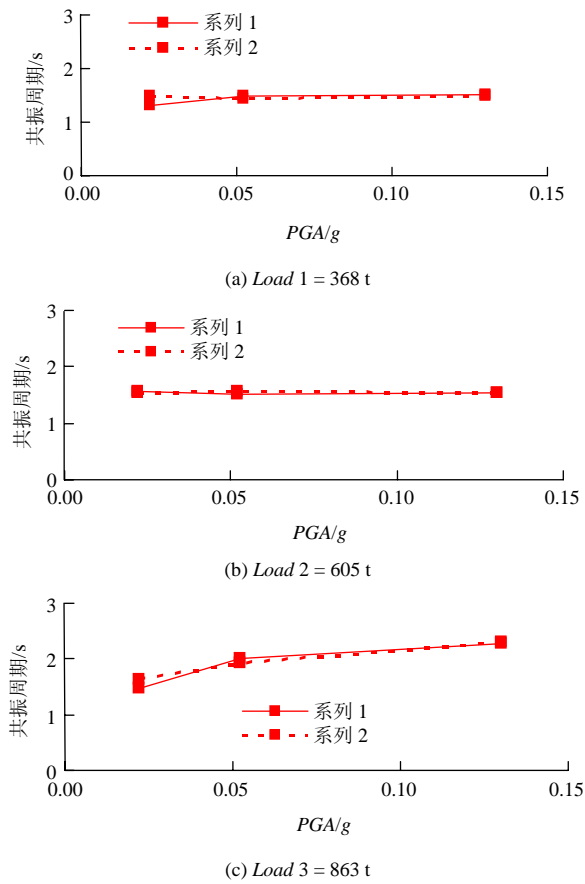


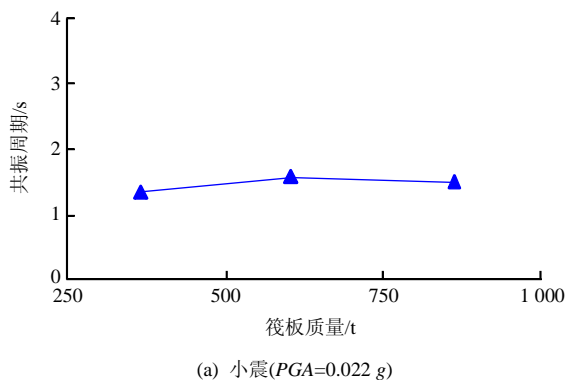
图 10 筏板共振周期

Fig.10 Resonance periods of raft

质量较大(Load 3)时, 周期随 PGA 呈缓慢增长, 这说明存在少许非线性和软化行为。但对于所有荷载情况而言, 桩筏基础在 2 个系列持续地震作用下(从系列 1 到系列 2)是几乎不发生软化的, 这与土体有着本质的区别。同时, 这也说明在地震作用下, 土体的动力软化效应对结构的影响很小。

3.4 筏板质量效应

对于桩筏基础, 上部结构传递给基础的荷载水平不可忽视, 以下将对筏板质量水平进行讨论。从图 11 可以看出, 在相同地震强度(PGA)条件下, 基



(a) 小震($PGA=0.022\text{ g}$)

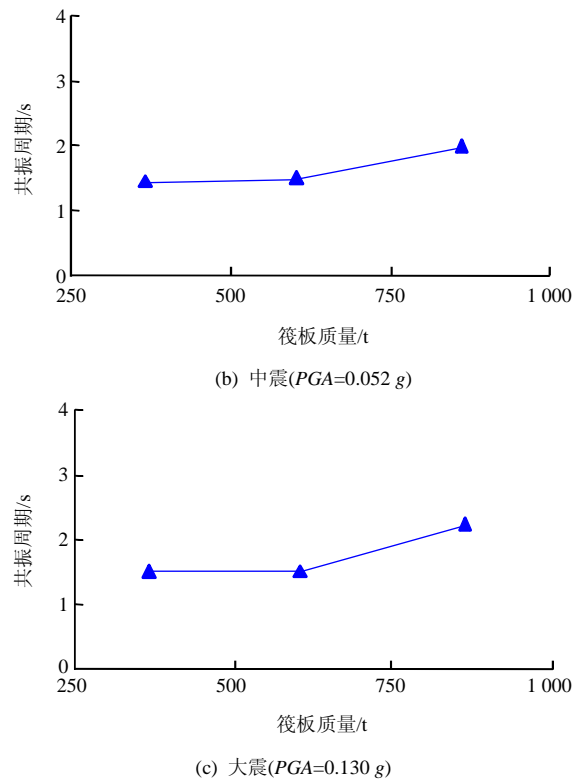


图 11 不同地震强度下筏板周期与其质量的关系

Fig.11 Relationships between raft period and raft masses under different earthquake intensities

础(筏板)周期均随筏板质量的增大而增大, 这是合理的, 因为筏板的质量越大, 桩筏体系的惯性越大, 从而周期变长。然而土体周期与基础(筏板)的质量水平关系不明显。

4 结 论

地震条件下桩筏基础与软黏土的动力相互作用是一个非常复杂的问题, 涉及的知识层面诸多, 对两者相互作用的机制以及对工程的影响程度, 目前还没有统一和肯定的结论, 在大多工程设计中往往被忽视。本文通过开展一系列试验和相关研究, 取得了以下主要创新成果:

(1) 本文深刻地揭示了桩筏基础与土的相互作用将造成基础和土体运动的非一致性, 即土体的运动不能代表基础(筏板)的运动, 两者在加速度时程、反应谱特征、共振周期等方面均存在显著的差异, 因此, 目前大多结构抗震设计中采用自由场土体的运动直接作为基础的运动是不严格的。

(2) 桩筏基础与土之间的动力相互作用效应将致使基础附近土体发生显著的重塑软化效应, 加之土体自身的应变软化和强度降低共同导致共振周期

明显增大, 然而基础结构的软化效应不显著。

(3) 在地震的持续作用下, 土体发生的软化效应对既有桩筏基础结构的影响很小, 结构的动力行为主要取决于自身刚度和质量特性。

致谢 本研究得到了新加坡国立大学离心机实验室提供的试验资源; 在课题研究中得到了谢和平院士和李福豪教授的悉心指导, 在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] TROMP J. A basic introduction to quantitative seismic hazard assessment[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2007, 1(2): 99 - 118.
- [2] 肖晓春. 地震作用下土 - 桩 - 结构动力相互作用的数值模拟[博士学位论文][D]. 大连: 大连理工大学, 2003.(XIAO Xiaochun. Numerical modeling of soil-pile-structure dynamic interaction under seismic excitation[Ph. D. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.(in Chinese))
- [3] 孔德森. 桩 - 土相互作用计算模型及其在桩基结构抗震分析中的应用[博士学位论文][D]. 大连: 大连理工大学, 2004.(KONG Desen. Study on dynamic computational model of pile-soil interaction and applications in seismic response analysis of pile-supported structures [Ph. D. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.(in Chinese))
- [4] WILSON D. Dynamic centrifuge tests of pile supported structures in liquefiable sand[Ph. D.Thesis][D]. California, USA: University of California, 1998.
- [5] 贺 斌. 地震作用下海洋环境码头桩 - 土动力相互作用分析[博士学位论文][D]. 武汉: 武汉大学, 2004.(HE Bin. Study on the dynamic interaction of pile-soil for the sea wharf in earthquake[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.(in Chinese))
- [6] MEYMAND P J. Shaking table scale model tests of nonlinear soil-pile-superstructure interaction in soft clay[Ph. D. Thesis][D]. California, USA: University of California, 1998.
- [7] KUENZA K. Study on early warning system for tsunami[Ph. D. Thesis][D]. Singapore: National University of Singapore, 2009.
- [8] 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.
- [9] 马 亢. 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))
- [10] ZHAO P. Centrifuge modeling of seismic amplification in some Singapore soil conditions[M. S. Thesis][D]. Singapore : National University of Singapore, 1999.
- [11] NIU J X. Centrifuge modeling of earthquake effects on sand and soft clay strata[M. S. Thesis][D]. Singapore : National University of Singapore, 1997.
- [12] YU Y, LEE F H. Seismic response of soft ground[C]// Proceedings of Physical modeling in geotechnics-ICPMG. Canada: [s.n.], 2002: 519 - 524.
- [13] FINN W D L. A study of piles during earthquakes: issues of design and analysis[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2005, 3(2): 141 - 234.

浙江省有色金属地质勘查局招聘简讯

招聘单位: 浙江省有色金属地质勘查局(浙江地勘实业发展有限公司)

招聘岗位: (1) 地质灾害治理工程设计; (2) 矿产地质勘查

专业素质要求: 具有大学本科及以上学历, 且有从事本专业3年以上工作实践经验的男性, 具体专业方向为: (1) 岩土工程、工程地质等相关专业; (2) 地质、资源勘查专业。

工资待遇: 年收入8万以上

招聘人数: 每个岗位2~3名

单位地址: 浙江省绍兴市环城东路2082号

联系人: 王先生

电话: 0575 - 85090880

邮箱: 27304587@qq.com