

高低承台桩基地震行为差异研究

马 亢^{1,2}, 许 强², 李庶林¹, 陈东霞¹, 方 军¹, 窦翰杰¹

(1. 厦门大学 岩土工程与灾害监测研究所, 福建 厦门 361005;

2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 对于采用桩基的各类结构, 按承台埋没于地基土体与否, 可区分之高、低承台桩基形式。在许多实际工程中, 因回填土或欠固结土地基的继续沉降, 或因土体流变或场地震陷等后沉降效应, 均可致使承台与土体接触解除, 即先前按设计采用的低承台桩基可能转为高承台形式。在静力条件下, 这将导致桩身产生负摩阻力而降低其部分竖向承载能力; 然而, 在地震作用下, 通过开展离心机地震模型试验和 ABAQUS 计算分析发现: 当承台与地基土体脱离时, 桩基最大弯矩设计值将会增大, 且弯矩有效深度也将变深; 并且, 基础(承台)周期明显延长, 充分表明高、低承台桩基形式地震行为差异迥然, 高承台桩基形式较之相应低承台情况更为不利, 在抗震设计时应充分予以认识、考虑。

关键词: 桩基础; 地震; 高低承台; 离心机地震模型试验; ABAQUS 计算分析

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)06-1250-09

DIFFERENCE OF SEISMIC BEHAVIOR OF HIGH AND LOW CAPS OF PILE FOUNDATIONS

MA Kang^{1,2}, XU Qiang², LI Shulin¹, CHEN Dongxia¹, FANG Jun¹, DOU Hanjie¹

(1. *Institute of Geotechnical Engineering and Hazard Monitoring, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China*; 2. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China*)

Abstract: The pile foundation could be classified into the high or low types according to the position of cap relative to the surface of grounds. In many engineering practice, the settlement of unconsolidated clay or backfilled soil after construction, the soil rheology or the seismic field subsidence may lead to the separation of the cap from the clay surface, i.e., the cap was embedded originally into clay to a new state of high cap pile foundation. For the static condition, this kind of separation may result in the negative skin friction force along the piles and reduce the vertical bearing capacity of piles. However, under the seismic shaking condition, the centrifuge shaking table experiments and simulation with ABAQUS on both the cases indicated that piles underwent a higher maximum bending moment and a much larger active depth under high cap case than those at low cap case. This suggested that the embedding condition played an important role in the seismic response of pile-cap foundation. It becomes more disadvantageous when the embedding condition of the cap changes from the low cap case to the high cap case.

Key words: pile foundation; earthquake; high and low caps; centrifuge shaking table tests; ABAQUS simulation analysis

收稿日期: 2014-06-16; **修回日期:** 2014-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51209180); 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金(SKLG2012K014); 厦门大学大学生创新创业训练计划项目

作者简介: 马 亢(1981-), 男, 博士, 2003年毕业于南昌大学给排水专业, 现任讲师, 主要从事岩土地震工程方面的教学与研究工作。E-mail: makangscu@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0785

1 引言

桩基因整体性好、竖向承载力高、基础沉降小、调节不均匀沉降能力强、同时可承受地震或风载等引起的巨大横向作用，抗倾覆能力强，在软土地区得以广泛应用。通常承台嵌入地基以分担部分上部结构荷载来满足竖向承载力要求，此即低承台桩基形式：不仅桩与土，且承台与土之间均存在着相互作用。然而，实际工程中由于回填土或欠固结土地基在建筑物建设后期可能发生的继续沉降，或地震时场地的震陷效应(如湿陷性黄土)，或土体流变导致的次固结后沉降等，均可致使承台的埋设条件发生改变即承台与土体脱离而悬空，桩顶出露土表，这种情况下仅仅存在桩-土之间的相互作用，即高承台桩基情形，这在我国许多大桥塔墩桩基设计中多为采用，如泰州、润扬、苏通等通航主跨塔墩采用的高承台长大灌注群桩基础。

因地基土后期沉降效应致使桩基由低承台向高承台形式的转变，在静力条件下，将会导致桩身产生负摩阻力以致桩基丧失部分竖向承载能力。本文研究的关键为在地震作用下，桩基的动力行为将会发生何种改变。目前，关于桩基的研究很多，但大多主要集中于对某种特定形式或特殊地质环境下的各类静、动力分析研究上，如通常情况下(未区分高、低承台形式)的桩-土作用效应及其与上部结构(建筑结构或桥梁结构等)的联合作用^[1-2]、砂土液化及其侧扩流移之剪切效应^[3]，或其他诸如桩群效应^[4]、时间效应^[5-6]、倾斜效应^[7]、异形桩^[8]、地铁及基坑等近接桩基施工^[9]、桩基检测^[10]等相关工程问题研究。然而，关于高、低承台桩基的地震行为差异，相关研究成果十分匮乏，尚无查阅到相关研究成果，现行桩基设计规范及相关技术手册^[11-13]对该问题也仅限于对承台效应的粗略估算，即只考虑桩基距径比及承台宽度与桩长之比等几个简单因素，并按工程经验给出桩间土作用发挥效率。事实上，规范所给各类设计参数(或参数范围)均基于我国过去几十年的桩基工程经验总结，而目前我国基础建设大规模发展，超长、超大、地层复杂多变环境下的桩基工程屡屡出现，以往规范根本无法完全涵盖，因此，这种硬性参数规定的做法都是欠准确的，需要开展专门研究，以探索准确规律。

在马 亢等^[14-15]的研究基础上，针对桩基抗震问题，分别通过离心机地震模型试验，结合 ABAQUS

计算分析，初步形成了一套较为成熟可靠的研究方法与思路，马 亢等^[14-15]从理论层面上指出：因相互作用势必导致基础(承台)的地震反应不同于自由场土体，传统结构抗震设计中将自由场土体的地震动参数直接作为基底参数是不严格的；再者，因相互作用也必然导致桩基内部产生地震附加弯矩，并与诸多因素(如土性及其分布、桩基刚度、所承上部结构惯性荷载水平等)密切相关。马 亢等^[14-15]的研究结论明确强调：地震附加弯矩(包括最大弯矩设计值及有效深度)和基础(承台)周期是研究桩基乃至上部各类结构抗震反应的关键性指标，此即为桩基抗震设计的重要参数，并通过这些指标可进一步量化研究地下各类结构(不仅限于桩基)与土的相互作用机制，更好地解释因相互作用导致的结构和地基土的非一致地震反应，以及地质体(地基土)对结构体(桩基)的动力作用规律，这为本次研究奠定了良好基础，明确了研究内容和方向。马 亢等^[14-15]的研究主要侧重于桩-土地震相互作用的机制研究上，并未具体区别实际工程中的高、低承台形式，即未考虑承台的埋设效应对桩基地震行为的影响。本次研究是先前工作的进一步深化与拓展，是以实际工程为背景开展的研究，目的是力争形成针对桩基抗震问题的一套较为系统可靠的试验方法、数值计算方法及理论分析方法相结合的研究思路。

2 研究方法

2.1 离心机地震模型试验

该研究试验部分是在新加坡国立大学岩土离心机实验室完成的，试验前需将振动台安装于离心机铰接吊篮内并调试，试验加速度水平为 50 g。本次研究的试验方法、土样制备与固结、桩筏模型，以及地震激励方式等均在马 亢和裴建良^[14]中详细说明。除特别说明外，本文数据仍按原型单位讨论。

试验设计为 2 组：按土与承台接触与否，以分别模拟低承台桩基(承台埋没于土表)和高承台桩基(承台未埋没于土表)，此处按实际情况假定承台与土表之间的脱开距离为 1 m(后文还将研究 3 m 的情况)。模型布局及传感器布置点位(主要包括土表和承台加速度计、桩身弯矩应变片)如图 1 所示。地震试验前的桩-承台-土模型(土已预固结完成)如图 2 所示。本文桩-桩间距超过 $9d$ (d 为桩径)，因此研究的是单桩基础。

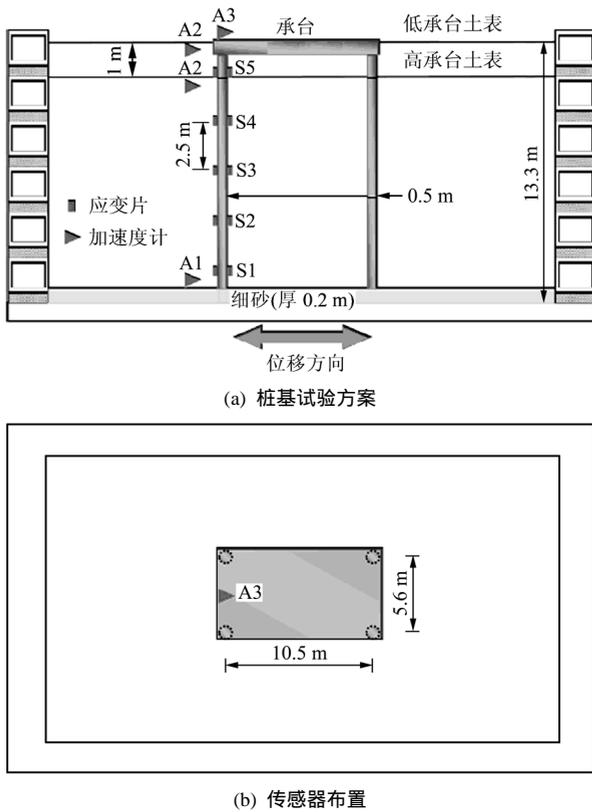
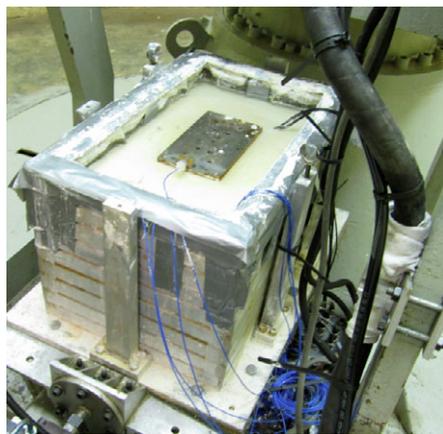
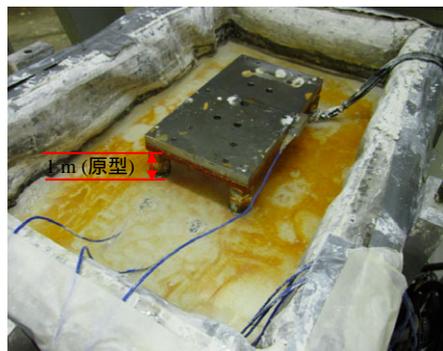


图1 高、低承台桩基试验方案及传感器布置图

Fig.1 Test cases for high and low raft and arrangement of sensors



(a) 低承台情况



(b) 高承台情况

图2 土体固结后的桩-承台-土模型

Fig.2 Pile-raft-soil model after clay consolidation

在图1中,加速度计 A1 位于土底用于测量输入的地震加速度时程,加速度计 A2 位于土表用于测量土表(包括高、低承台 2 种情况,此文不做重点)的地震加速度时程,加速度计 A3 固定于基础(承台)表面,用于测量基础(承台)的地震反应加速度。沿桩身不同部位黏贴应变片,分别标记为 S1 ~ S5 (每 2 点间隔 2.5 m),用于测量桩身弯矩,其中,应变片 S1 位于桩底,应变片 S5 位于桩顶,靠近承台。

为了模拟上部结构传至基础的荷载效应,额外的质量(用不锈钢质量块模拟)在试验中按不同工况 (Load1 ~ Load3)加载到承台上以模拟桩基所承担的上部结构惯性荷载效应,如表 1 所示;再者,为了揭示地震强度和持续时间对桩-承台-土体系地震行为的影响,与以往研究一致^[14],每次试验地震激励采用 1 个地震系列,即分别由小震、中震和大震 3 次连续地震事件组成,3 次地震事件频谱特性相同,只是按比例缩放,峰值加速度(PGA)分别为 0.022 g, 0.052 g 和 0.13 g,每次地震事件持时均为 25 s,如图 3 所示。

表 1 模拟不同上部结构荷载的试验工况

Table 1 Test cases for different superstructure loading simulations

荷载工况	施加荷载	模型承台荷载质量/kg	原型承台荷载质量/kg
Load 1	承台	2.95	368 000
Load 2	承台+1 铁块	4.84	605 000
Load 3	承台+2 铁块	6.90	863 000

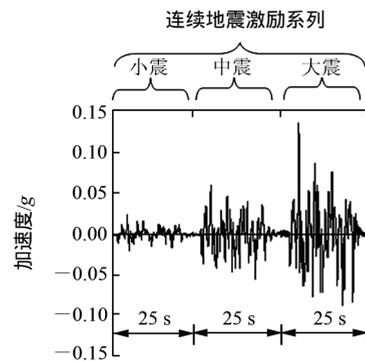
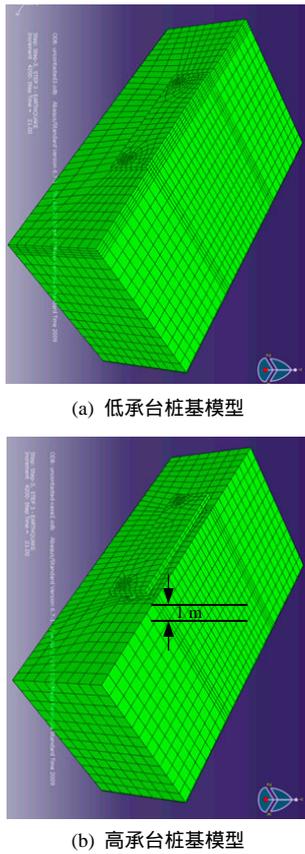


图3 每次试验所触发的连续地震事件

Fig.3 Sequential triggered earthquake events for each centrifuge tests

2.2 ABAQUS 计算分析

除试验研究之外,对应于上述高、低承台桩基的试验条件,辅之 ABAQUS 6.9 进行计算分析。与试验采用的模型几何尺寸一致,建立相应的 ABAQUS 计算模型(对称取 1/2)如图 4 所示,计算中关于主程



(a) 低承台桩基模型

(b) 高承台桩基模型

图 4 高、低承台桩基 ABAQUS 计算模型

Fig.4 ABAQUS simulated model for high and low raft cases of pile foundation

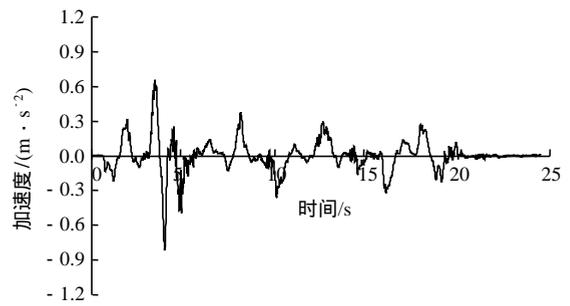
序串接使用二次开发的土体地震软化模型(Umat)、计算方法、模型底面节点地震加速度时程输入、模拟土体地震剪切变形的多点约束、桩土界面接触等处理方式均与马 亢和许 强^[15]的研究相同，此处不再赘述。

3 结果分析

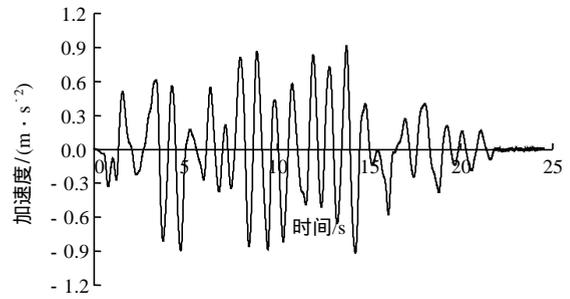
3.1 基础(承台)周期

按马 亢等^[14-15]的定义，将最大放大效应(即从试验实测加速度时程曲线确定的土表(加速度计 A2)、或基础(承台，加速度计 A3)的反应谱与土底(加速度计 A1)输入的反应谱比值最大)所对应的周期统一定义为共振周期(见图 5, 6)，若单指土体，即为场地(自由场)的卓越周期，此为工程抗震设计的重要参数之一。

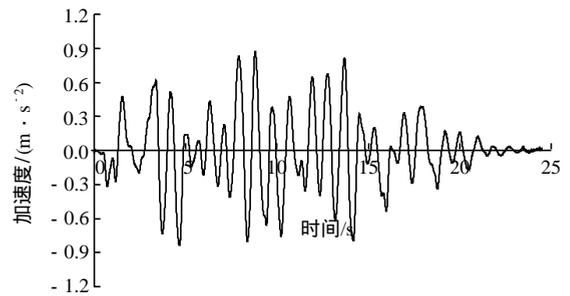
从图 5 可以看出，无论是高、低承台桩基形式，若选定某次典型试验工况($PGA = 0.052 g$, Load2)，对于从土底输入的同地震激励(见图 5(a))，实测的基础(承台)的加速度时程(见图 5(b)和(c))并不是完全相同的，这表明 2 类桩基形式的地震反应是不同



(a) 土底(加速度计 A1)输入的加速度时程



(b) 承台(加速度计 A3)实测的加速度时程(高承台桩基)

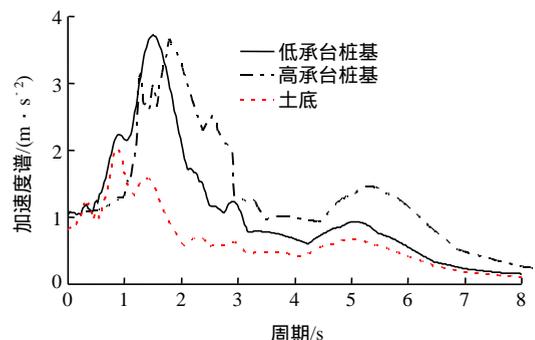


(c) 承台(加速度计 A3)实测的加速度时程(低承台桩基)

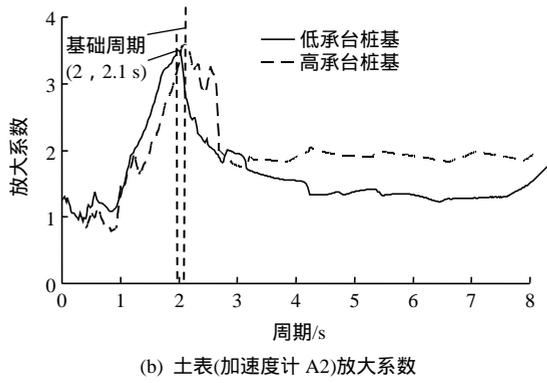
图 5 试验实测的某次典型地震加速度时程曲线

Fig.5 Time-histories of measured acceleration in typical earthquake shaking tests

的；图 6 为两者对应的反应谱(阻尼比 5%)和放大效应，尽管反应谱形式与所得周期十分相近(分别约为 2, 2.1 s)，但仍存在差异，再次证明两者的地震反应是不相同的，是存在一定差异的，以致必然造成上部结构的地震行为差异，可见针对 2 类桩基形式的地震反应研究是有必要的。



(a) 基础(加速度计 A3)与土底(加速度计 A1)加速度反应谱



(b) 土表(加速度计 A2)放大系数
 图 6 试验确定的基础(承台, A3)与放大系数
 Fig.6 Raft periods and amplifications from tests

同理,类似地,将 3 种地震强度(PGA)和 3 种荷载工况条件下,高、低承台 2 类桩基形式的基础(承台)的周期变化规律如图 7 所示。

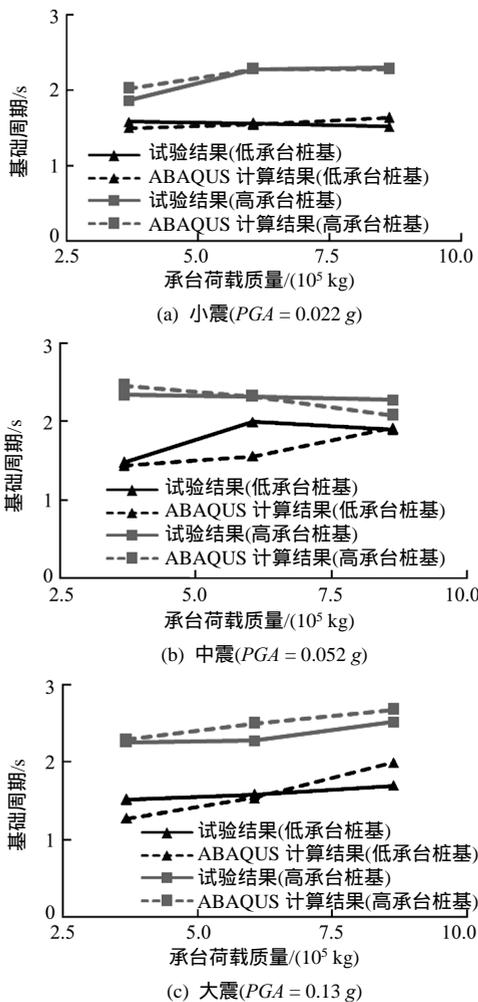


图 7 高、低承台基础(承台)周期对比

Fig.7 Comparison of summarized periods for both high and low raft pile foundations

显然,无论是试验结果还是 ABAQUS 计算结果(尽管两者存在差异,但总体上趋势与量值仍较为

接近),均反映出:在低承台桩基条件下,其基础(承台)周期比相应高承台桩基条件时的明显要高,不难理解,这主要是由于承台与土表的脱离,两者接触解除以致对整个桩-承台基础体系的约束作用减弱,致使整个基础结构的侧向刚度降低,按周期定义($T = (M/K)^{0.5}$, M, K 分别为质量和刚度),必然致使周期延长。

从实际工程角度言,试验及 ABAQUS 计算得出的 2 种桩基形式下基础(承台)的周期范围基本为 1~3 s,这正基本也在中高层建筑结构(可按楼层数量 N 计算周期 $T = 0.1N$ s 估算)的一阶周期范围附近,由于两者的周期相近,共振效应将会十分显著,从而对基础及上部结构的安全性带来不利,1985 年墨西哥城地震灾难即为一典型实例:该城深厚软土地场将距震中 400 km 以上的地震波(基岩波周期为 0.3~0.5 s)放大并过滤为周期较长(1~2 s)的远场地震波(地表),恰与当时城市主要建筑结构(7~10 层)的一阶周期相近,建筑结构几乎全部损毁。因此,鉴于承台埋设条件的改变,将很大程度上导致基础周期延长,这与深厚软土地场的地震效应类似,这尤其对长周期的高层结构更为不利,此为关键启示之一。

3.2 桩身弯矩

桩身弯矩通过 5 对应变片(S1~S5)测得。根据桩身各应变片所记录的弯矩时程曲线(见图 7,最大弯矩发生在 5.1 s 附近),依次将各最大弯矩值提出,即可绘出沿整桩的地震弯矩包络图,此为桩基结构设计的重要依据,如图 8 所示:桩基弯矩主要发生在一定深度范围 l_a 内,此深度以下弯矩很小,一定程度上可忽略不计。这主要是由于有效深度内的桩基,土体对桩基的动力作用效应显著,在地震过程中主要体现为对其施加附加惯性力,致使桩基弯曲应变较桩底更大,从而产生较大弯矩;此深度以下桩基部分,土体主要对其起固定约束作用,以致弯曲变形小,弯矩不显著。A. Tabesh 等^[16-17]也曾提出由于桩基有效深度 l_a 以下抗弯要求不高,建议可采用廉价材料替代以节省工程造价,但均未区分高、低承台桩基差异,事实上,其结论并不一定适用于高承台桩基;A. Nikolaou 等^[18-19]基于大量数值分析提出多因素条件下桩身最大弯矩的计算公式,也仍未区别 2 种桩基形式,这对许多诸如通航桥塔多采用的高承台桩基似感欠妥。

图 9 为高、低承台桩基在 3 种地震强度及 3 种

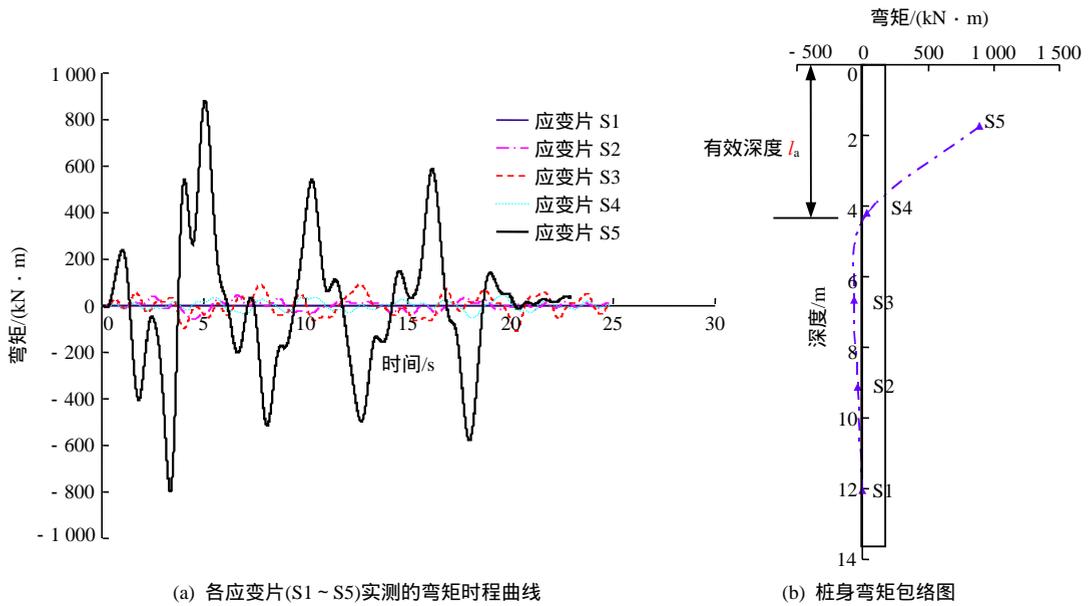
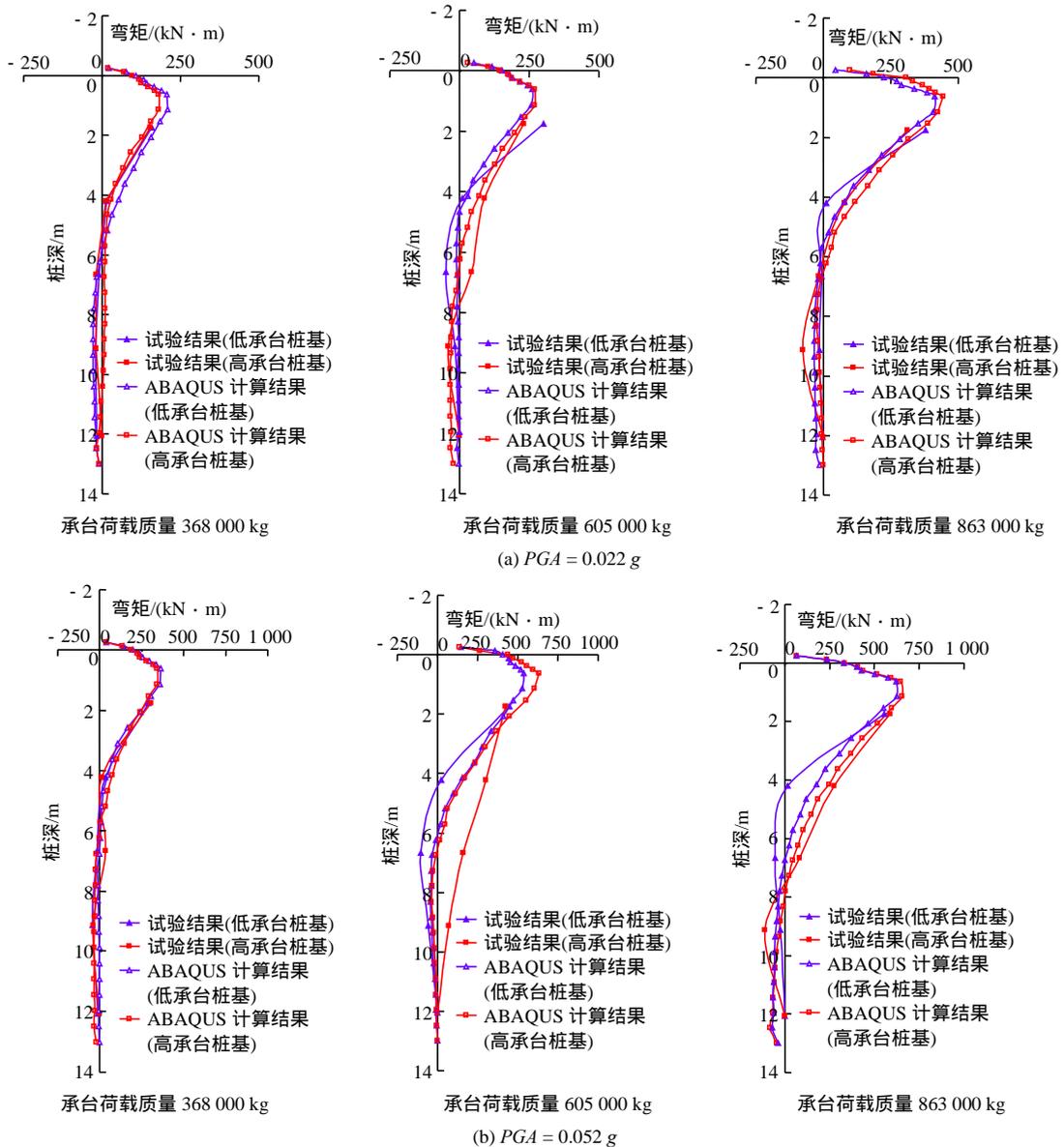


图 8 桩身弯矩时程曲线与包络图

Fig.8 Time-history and envelope diagram of pile bending moment



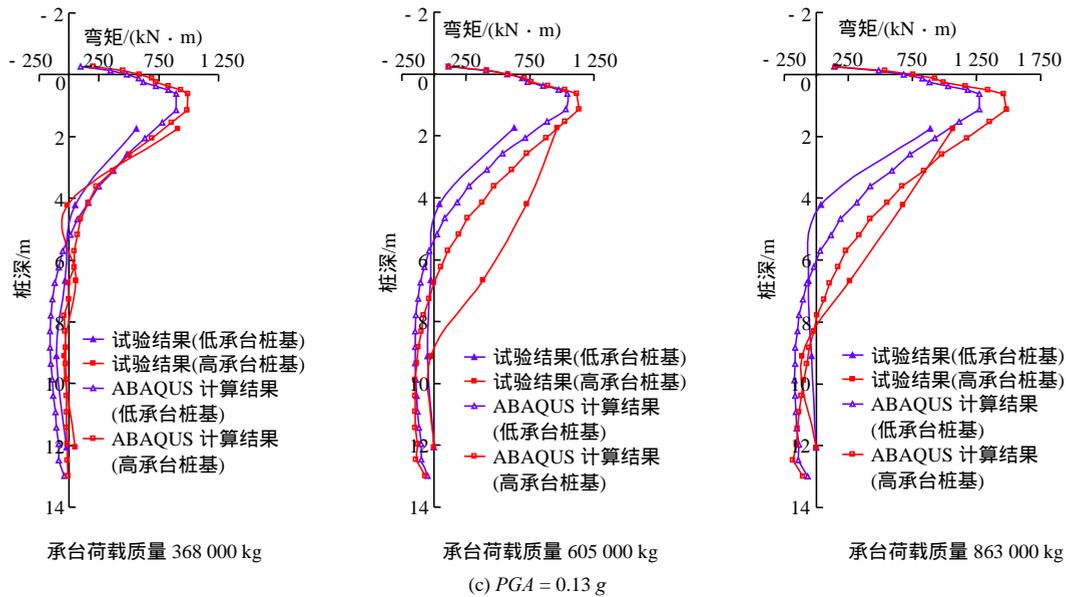


图9 所有地震和荷载工况下的桩身弯矩包络图

Fig.9 Envelope diagrams of bending moment of piles under different PGA and raft loadings

承台荷载工况下的弯矩包络图(虽然试验和 ABAQUS 计算结果两者存在差异,但总体上两者就量级、正负号及变化规律是基本一致的)。显然,当地震强度较弱时($PGA = 0.022\text{ g}$),高承台桩身最大弯矩值(应变片 S5)要比低承台桩基时的小,当地震强度逐步增强时($PGA = 0.052\text{ g}$),2 种情况下的最大弯矩值十分接近,当地震进一步增强时($PGA = 0.13\text{ g}$),高承台情况下的桩身最大弯矩值明显大于相应低承台情况值。从变化趋势看,当地震强度较强时(通常大于 0.15 g 时),高承台桩基弯矩峰值显著增大,若桩基先前按低承台情况设计,势必偏于不安全,这在许多震害调研中多有体现;更且,由于承台和土体的接触解除,致使高承台桩基弯矩有效深度 l_a 加深,即桩体在较深范围内仍能产生较大的弯矩,当承台荷载较大时更为明显,这与低承台桩基的弯矩分布特征差异迥然。

G. Gazetas^[20]基于不同土体模型提出桩基有效深度 l_a 的计算公式,结合本文结果(按试验取值)一并汇总于表 2 中。可见,若未区别高、低承台桩基形式,即按 G. Gazetas^[20]给出的公式计算,本文研究的桩基有效深度应处于 $5.10 \sim 6.43\text{ m}$ 范围内,然而试验揭示的 2 种桩基形式弯矩有效深度完全不同,低承台桩基为 $4.2 \sim 4.5\text{ m}$,而高承台桩基为 $4.5 \sim 8.8\text{ m}$,两者差异很大,不能一律按单一情况考虑。高承台桩基的弯矩影响范围更深,若先前按低承台桩基设计(规范规定在桩头一定深度加密箍筋来抵御地震横向剪切作用),势必偏不安全。

表 2 桩基有效长度 l_a

Table 2 Active length l_a of pile

土体模型	G. Gazetas ^[20] 公式	G. Gazetas ^[20] 公式计算值 l_a/m	本文试验结果 l_a/m	
			低承台桩基	高承台桩基
$E = E_s z/d$	$l_a = 3.2d(E_p/E_s)^{1/6}$	5.10	4.2 ~	4.5 ~
$E = E_s(z/d)^{0.5}$	$l_a = 3.2d(E_p/E_s)^{2/11}$	5.66	4.5	8.8
$E = E_s$	$l_a = 3.3d(E_p/E_s)^{1/5}$	6.43		

注: E_s 为土体变形模量, E_p 为桩基材料模量, z 为土体深度, d 为桩径。

因此,由各种因素(如地基土的流变、震陷或诸如爆破、堆载等引起的地表下沉等)导致的按先前设计的低承台桩基向高承台桩基形式的转变,必然造成桩基抗震性能弱化(峰值弯矩增大且有效深度加大),以此造成的不利影响,应在实际桩基抗震设计中充分考虑,此为关键启示之二。

4 脱开距离及地震频谱特性讨论

考虑到以上试验和 ABAQUS 计算结果均基于某一特定地震频谱条件下的弯矩规律,为了验证上述结论,在高、低承台 2 类桩基形式之上,再增算一模型情况(高承台条件下,承台与土表脱开距离增至 3 m ,记作模型 3,见图 10),并且地震激励改为 El-centro($PGA = 0.25\text{ g}$)和 Loma($PGA = 0.28\text{ g}$)地震^[21], El-centro 和 Loma 地震加速度时程及反应谱

曲线如图 11 所示，El-centro 和 Loma 地震作用下的桩身弯矩包络图(承台荷载质量为 368 000 kg)如图 12 所示。

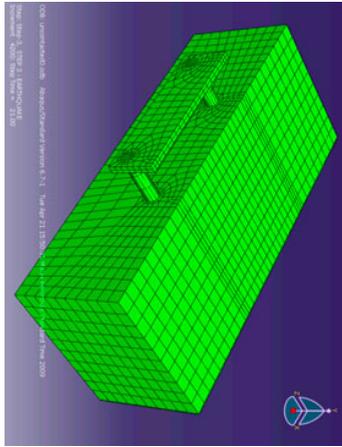
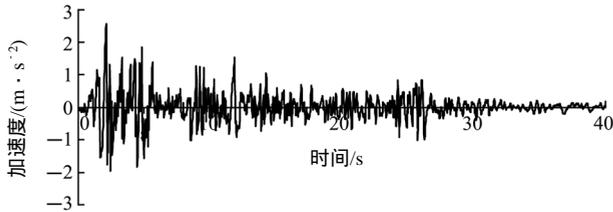
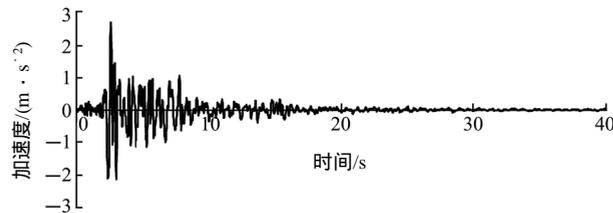


图 10 ABAQUS 模型 3

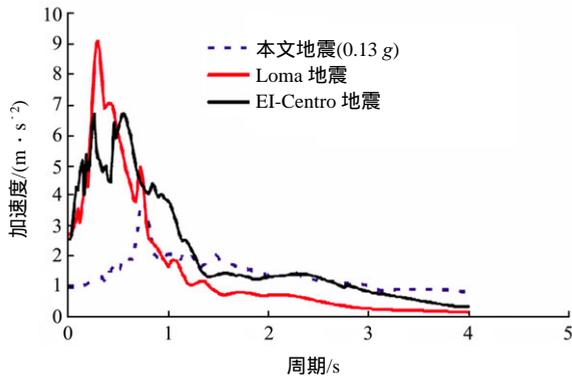
Fig.10 ABAQUS model 3 of pile foundation



(a) El-centro 地震加速度时程



(b) Loma prieta 地震加速度时程

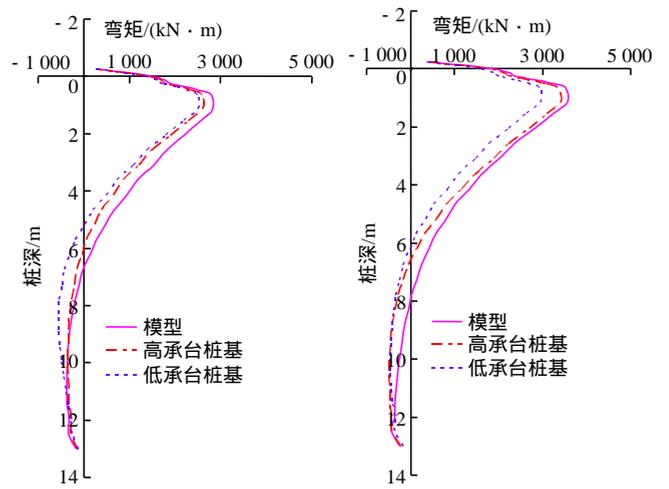


(c) 地震反应谱

图 11 El-centro 和 Loma 地震加速度时程及反应谱曲线

Fig.11 Time-history curves and response spectra of El-centro and Loma earthquake

从图 12 不难看出，3 种情况下(即模型 3、高承



(a) El-centro 地震

(b) Loma 地震

图 12 El-centro 和 Loma 地震作用下的桩身弯矩包络图

Fig.12 Envelopes of bending moment of piles under El-centro and Loma earthquakes

台桩基、低承台桩基)ABAQUS 计算得到的弯矩规律与上述讨论的脱开距离为 1 m 情况时的结论基本吻合，数值计算虽不能完全定量符合试验实测结果，但基于严格计算条件下的计算结果规律与试验是基本吻合的：当地震强度较大时，由于承台与土体的脱离，致使桩基承受的最大弯矩将较之低承台形式更大，当脱大距离增大时，尤为明显；更且，弯矩影响深度将会变大。

5 结 论

本文通过开展高、低承台桩基形式的离心机地震模型试验，并结合 ABAQUS 计算分析，讨论了两者地震行为差异及其工程设计启示，主要认识如下：

(1) 承台埋设条件对桩基地震行为的影响很大，高低承台两类桩基形式的地震反应规律需分别单独研究，不能混为一谈，不可笼统地按单一情况考虑。

(2) 地基土的继续沉降可能导致桩基承台埋设条件发生改变，即按设计采用的低承台桩基后期可能发展成为高承台形式，其基础(承台)的周期、最大弯矩及有效深度等关键指标均比相应低承台条件时更为不利。若先前仅按低承台设计施工的桩基工程可能偏于不安全，建议在其抗震设计中应将桩基演化为高承台条件时的不利因素(如周期、最大弯矩及其深度)考虑计及在内，不可忽视。

(3) 因高、低承台桩基的地震行为迥然，在实

际桩基工程完成后应予以关注,密切监测地基及周边土工环境造成的再沉降。

(4) 对于砂性土中桩基,其地震破坏机制主要是液化及其侧扩地基大变形,目前尚有较多研究成果可以借鉴,本文研究的是黏性土中桩基,可能对砂性土地不一定适用。

致谢 本研究试验部分是在新加坡国立大学岩土离心机实验室完成的,在此表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 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 between pile and soil for the sea wharf in earthquake[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.(in Chinese))
- [2] 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 its application in seismic response analysis of pile-supported structures[Ph. D. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.(in Chinese))
- [3] 戚玉亮. 地基土-群桩-悬索大桥体系抗震动力相互作用数值模拟与理论研究[博士学位论文][D]. 上海:同济大学,2010.(QI Yuliang. Numerical simulation and theoretical study on the seismic interaction of soil-pile group-suspension bridge system[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2010.(in Chinese))
- [4] 王东栋. 改进的广义剪切位移法在桥梁桩基沉降计算中的应用与研究[博士学位论文][D]. 上海:同济大学,2011.(WANG Dongdong. Application and research of improved generalized shear displacement method in bridge pile foundation settlement calculation[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2011.(in Chinese))
- [5] 曾庆有,周健,屈俊童. 考虑应力应变时间效应的桩基长期沉降计算方法[J]. 岩土力学,2005,26(8):1283-1287.(ZENG Qingyou, ZHOU Jian, QU Juntong. Method for long-term settlement computation of pile foundation in consideration of time effect of stress-strain relationship[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1283-1287.(in Chinese))
- [6] 贺武斌. 静荷载下单桩沉降的时间效应研究[博士学位论文][D]. 杭州:浙江大学,2003.(HE Wubin. Study on the time effect of the settlement of single pile under static load[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.(in Chinese))
- [7] 王新泉,陈永辉,安永福,等. 塑料套管现浇混凝土桩倾斜对承载性能影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(4):834-842.(WANG Xinquan, CHEN Yonghui, AN Yongfu, et al. Model test study of effect of inclination on bearing behaviors of plastic tube cast-in-place concrete pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 834-842.(in Chinese))
- [8] 刘汉龙,雍君,丁选明,等. 现浇X型混凝土桩的荷载传递机制初探[J]. 防灾减灾工程学报,2009,29(3):267-271.(LIU Hanlong, YONG Jun, DING Xuanming, et al. Study on load transfer mechanism of cast-in-place X-shaped piles[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(3): 267-271.(in Chinese))
- [9] YANG M, SUN Q, LI W C, et al. Three-dimensional finite element analysis on effects of tunnel construction on nearby pile foundation[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(3): 909-916.
- [10] 盛春陵,王守超,李仁民. 大直径嵌岩后注浆钻孔灌注桩试桩分析[J]. 岩土工程学报,2012,34(增1):567-573.(SHENG Chunling, WANG Shouchao, LI Renmin. Pile test analysis of large-diameter rock grouting bored piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(Supp.1): 567-573.(in Chinese))
- [11] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.(in Chinese))
- [12] 史佩栋. 桩基工程手册(桩和桩基础手册)[M]. 北京:人民交通出版社,2008:205-285.(SHI Peidong. Handbook for pile foundation engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 205-285.(in Chinese))
- [13] 张雁,刘金波. 桩基手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009:134-186.(ZHANG Yan, LIU Jinbo. Handbook for pile foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Industry Press, 2009: 134-186.(in Chinese))
- [14] 马亢,裴建良. 桩筏基础-土动力相互作用的离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(7):1488-1495.(MA Kang, PEI Jianliang. A study on the dynamic interaction between pile-raft foundation and soft clay during earthquakes by centrifuge tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1488-1495.(in Chinese))
- [15] 马亢,许强. 桩-筏-土体系的地震软化效应及ABAQUS计算分析研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(增1):126-132.(MA Kang, XU Qiang. A study on the seismic softening behavior and ABAQUS simulation of pile-raft-clay system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp.1): 126-132.(in Chinese))
- [16] TABESH A. Lateral seismic analysis of piles[Ph. D. Thesis][D]. Sydney, Australia: University of Sydney, 1997.
- [17] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1980: 455-481.
- [18] NIKOLAOU A, MYLONAKIS G, GAZETAS G. Kinematic bending moments in seismically stressed piles[R]. Buffalo: State University of New York, NCEER-95-0022USA, 1995: 122-157.
- [19] NIKOLAOU S, MYLONAKIS G, GAZETAS G, et al. Kinematic pile bending during earthquakes: analysis and field measurements[J]. Geotechnique, 2001, 51(5): 425-440.
- [20] GAZETAS G. Seismic response of end-bearing single piles[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1984, 3(2): 82-93.
- [21] BANERJEE S, GOH S H, LEE F H. Response of soft clay strata and clay-pile-r systems to seismic shaking[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2007, 1(3): 233-255.