

DOI: 10.11779/CJGE201612006

大间距桩筏基础地震响应离心模型试验研究

杨 敏^{1, 2}, 杨 军^{*1, 2}

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

摘 要: 针对饱和软土地基中大间距摩擦型桩筏基础抗震问题, 采用离心振动台开展了桩筏基础地震响应的试验研究。为模拟实际软土地浅部超固结黏土和深部正常固结黏土的地层特征, 试验在高岭土土样表面预铺砂层, 然后在 50g 离心加速度下进行固结。上部结构简化为质点和杆构件, 基础形式包括桩头刚接和桩头自由 2 种类型的大间距桩筏基础模型。试验分析了模型的加速度和位移、土层内部孔隙水压力以及桩身应变等响应。试验结果表明: 在软土地自振频率范围内, 结构-基础-地基三者相互作用十分明显, 基础与结构加速度放大系数高于其它频率范围; 桩头刚接与桩头自由的基础在地震时均产生了较周围地表土体更大的竖向沉降, 但震后较长时间内基础与地表沉降速率基本一致; 地震结束时, 桩头刚接的上部结构侧向位移与基础倾斜值均较桩头自由时减少一半以上, 但上部结构加速度放大作用更加明显; 桩筏基础承载能力因土体软化行为有所降低, 震后部分上部荷载由群桩转移到筏板, 但桩筏荷载分担比例总体变化不大。试验揭示了软土震陷时桩基的变形控制机理, 为软土地基减沉桩基础的抗震设计提供参考。

关键词: 桩筏基础; 软土; 震陷; 减沉桩; 地震响应; 离心试验; 荷载分担比

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)12-2184-10

作者简介: 杨 敏(1960-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为桩基础和基坑工程。E-mail: yangmin@tongji.edu.cn。

Centrifuge tests on seismic response of piled raft foundation with large spacing

YANG Min^{1, 2}, YANG Jun^{*1, 2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Centrifuge tests are performed to study the seismic response of piled raft foundation with large spacing in saturated soft clay. By laying sand on clay surface before centrifuge consolidation under 50g, the soil layer with upper over-consolidated clay and lower normally-consolidated clay is simulated. Structural models are simplified to mass points and members. Two foundation types of connected and non-connected piled rafts are considered in tests. The responses of earthquake acceleration, displacements, pore water pressures and pile strains are investigated. The test results show that in the natural vibration frequency range of soft clay ground, the interaction of superstructure-foundation-soil is very remarkable, and the acceleration amplification factors of structure and foundation are higher than those in other frequency ranges. The earthquake induced instant settlements of the connected and non-connected piled rafts are larger than those of the surrounding ground, but a long time after the earthquake the settlement velocities of foundation and ground are almost the same. At the end of the earthquake, more than half of lateral displacement of superstructure and foundation inclination of the connected piled raft are reduced compared with those of the non-connected piled raft, but with higher acceleration amplification effects of superstructure. After the earthquake some loads transfer from pile group to raft on account of soil degradation and loss of bearing capacity of piled raft. However, there are generally few changes of load sharing ratio between piles and raft. The research has revealed the deformation control mechanisms of pile foundation under seismic subsidence in soft clay, and it may provide evidence for the design of settlement-reducing piles.

Key words: piled raft foundation; soft clay; seismic subsidence; settlement-reducing pile; seismic response; centrifuge test; load shearing ratio

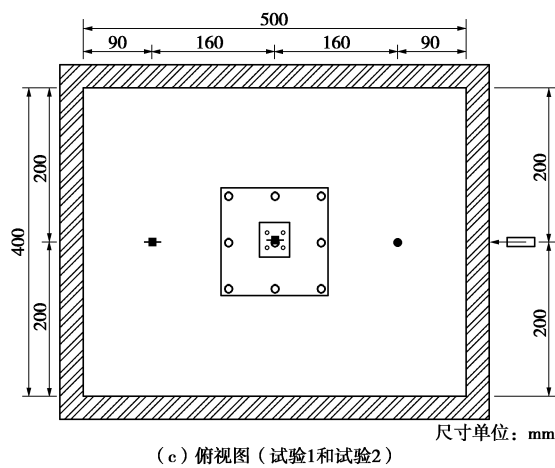
0 引 言

桩筏基础是介于天然地基浅基础和传统桩基础之

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372274)

收稿日期: 2016-02-29

*通讯作者(E-mail: yangjun851113@163.com)



(c) 俯视图 (试验1和试验2)

图 1 传感器和模型布置图

Fig. 1 Layout of sensors and models in tests

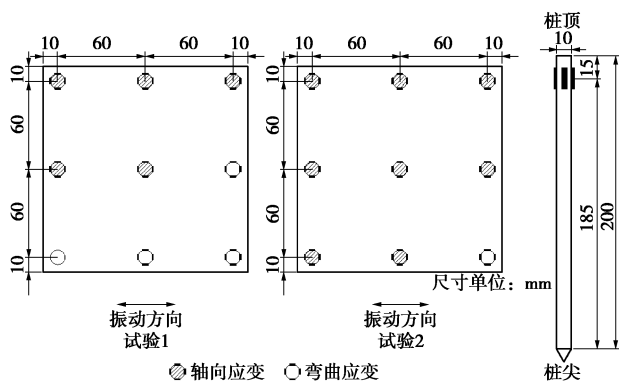
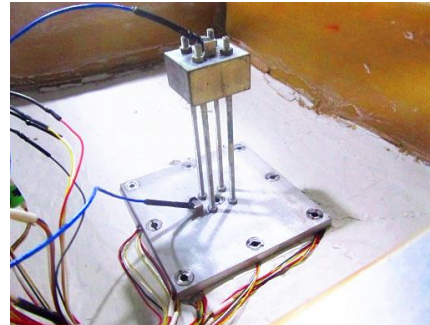
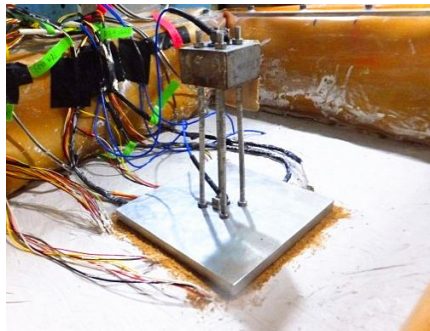


图 2 桩身应变片布置

Fig. 2 Layout of strain gauges for model piles



(a) 试验 1



(b) 试验 2

图 3 桩筏基础和结构模型照片

Fig. 3 Photo of piled raft and structural models

本次试验离心加速度为 50g，模型与原型尺寸相似比为 50。模型包括简化的上部集中质量、立柱（4 根）、筏板和管桩。筏板、管桩模型采用铝合金材料，上部结构集中质量和立柱模型采用钢材制成。立柱与筏板、集中质量模型之间采用刚性连接，模型的结构自振周期约为 0.44 s。不同构件变形机制的差异将影响其物理量相似控制，水平地震荷载作用下桩和柱主要以抗弯刚度进行相似控制，筏板和上部结构质点主要以质量进行相似控制。表 2~5 中给出了模型和原型尺寸及相似比关系，其中小括号中数值为该物理量的理论相似比。

表 2 模型桩相似关系

Table 2 Similarity relationships of model piles		
物理量	模型 (铝合金管桩)	原型 (钢管桩)
外径/m	0.01	0.50
壁厚/m	0.001	0.014
杨氏模量/GPa	70	206
抗弯刚度 $EI/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$	20.3	1.27×10^8
EI 相似比	1	50^4 (50^4)
抗压刚度 EA/N	1.98×10^6	4.28×10^9
EA 相似比	1	46.5^2 (50^2)

表 3 模型柱相似关系

Table 3 Similarity relationships of model columns		
物理量	模型 (钢材)	原型 (钢材)
直径/m	0.005	0.25
杨氏模量/GPa	210	210
抗弯刚度 $EI/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$	103.03	643.9×10^6
EI 相似比	1	50^4 (50^4)

表 4 筏板模型相似关系

Table 4 Similarity relationships of model rafts		
物理量	模型 (铝合金)	原型 (混凝土)
边长/m	0.14	7.00
厚度/m	0.01	0.50
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2700	2500
质量 m/kg	0.53	61216
m 相似比	1	48.7^3 (50^3)

表 5 集中质量模型相似关系

Table 5 Similarity relationships of model lumped masses		
物理量	模型 (钢材)	原型 (混凝土)
体积/ m^3	4.5×10^{-5}	5.625
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7850	2500
质量 m/kg	0.353	40772
m 相似比	1	48.7^3 (50^3)

1.3 地基模型制备

本次试验采用高岭土模拟软黏土地基，试验测得的土体物理参数见表 6。模型箱底部铺设厚度 2 cm 的中砂（硅砂）作为排水层，上部为厚度 38 cm 的饱和和高岭黏土层。试验在 50g 离心加速度下进行黏土层双向排水固结，初始静孔隙水压力沿深度呈梯形分布，由 Terzaghi 单向固结理论估算的黏土层固结时间约 22 h（平均固结度达到 90%）。

表 6 高岭土基本物理参数
Table 6 Physical parameters of kaolin clay

土体参数	G_s /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	平均粒径 /mm	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	w /%	e	w_L /%	w_p /%	I_p /%	c_v /($\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1}$)	k /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
数值	2.67	0.038	16.4	69	1.73	54	26	28	12.5	1.13×10^{-7}

注： c_v 和 k 分别为 100 kPa 时的土体固结系数和渗透系数。

图 4 (a)、(b) 分别为试验 1 离心固结过程实测的模型箱中心位置地表沉降和土体孔压 (P2) 发展曲线。在固结时间超过 20 h 以后, 地表沉降和孔隙水压力值均随时间变化很小, 土体固结过程基本完成。

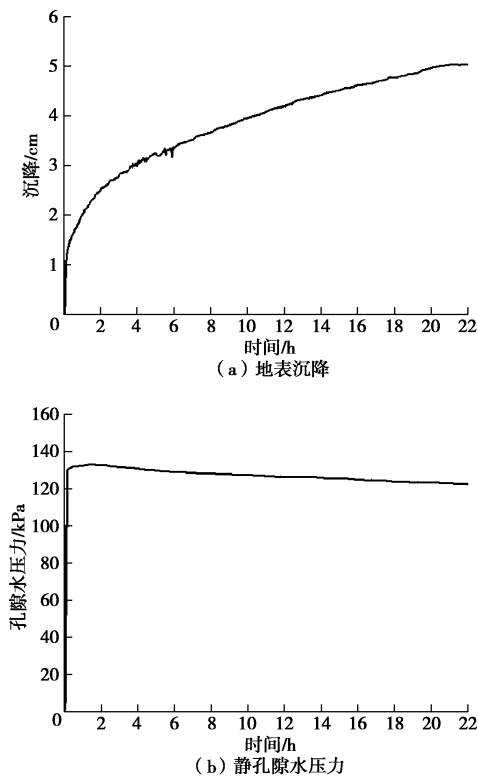


图 4 离心固结过程地表沉降和孔压曲线
Fig. 4 Ground settlement and pore water pressure during centrifuge consolidation

1.4 T-bar 贯入试验

软土地基表层土层通常为性质较好的超固结硬壳层, 该层土普遍被当作多层建筑天然地基浅基础的持力层, 这对于减沉桩基础在软土地区的应用十分关键。由文献^[10]可知, 高岭土在离心固结后土体强度随深度逐渐增大, 但地表附近土体强度始终较低, 无法满足筏板基础单独承担荷载的要求。为此, 本次试验在黏土层表面铺设一层厚度为 3 cm 的中粗砂 (重度 15 kN/m³), 待离心固结完成后移除。该层砂土既可作为超载加速黏土层排水固结, 又可增大浅部高岭土的地基强度。

高岭土离心固结完成后进行了 50g 条件下的 T-bar 贯入试验, 平均贯入速率为 1.3 mm/s。图 5 为实测的高岭土不排水剪切强度 c_u 与贯入深度 (对应原型尺寸) 的关系。2 组试验土体 c_u 值随深度变化规律基

本一致, 表层砂土对提高浅部土体强度作用显著, 距离上下排水边界最远的中部黏土强度最低, 靠近箱底砂土层的黏土强度增加十分明显。比较地表附近土体 c_u 值和模型基底压力 (约 23 kPa) 可知, 筏板下地基土强度能够满足承载力要求, 桩基主要用于控制基础沉降。

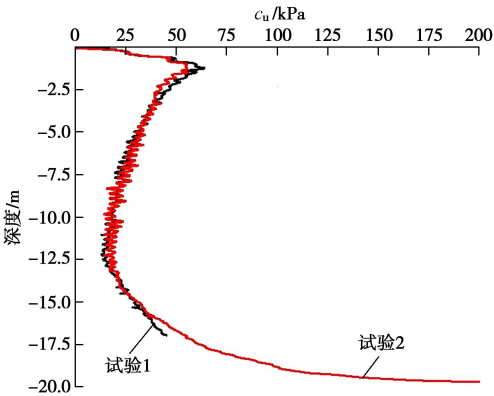


图 5 高岭土 c_u 分布
Fig. 5 Distribution of c_u for kaolin clay

1.5 试验步骤

- (1) 将高岭土粉末和水按 1 : 0.8 的比例 (含水率 80%) 混合, 置于真空搅拌机内进行抽真空搅拌, 真空度不低于 80 kPa, 搅拌时间约 4 h。
- (2) 在模型箱底部铺设 2 cm 砂层, 砂层顶面铺设滤纸, 将搅拌均匀的高岭土倒入模型箱, 并在土体预定深度埋置微型孔压计和加速度传感器, 在黏土层表面铺设滤纸, 其上为厚度 3 cm 的中粗砂。
- (3) 吊装模型箱至离心机吊篮, 进行 50g 下土体离心固结, 待地表沉降和孔压变化趋于稳定后, 离心机停转并移除顶面砂土。
- (4) 安装 T-bar 试验设备, 再次启动离心机至 50g, 进行 T-bar 贯入试验。
- (5) 在 1g 条件下将模型桩压入土体预定位置, 进行 50g 条件下模型自重固结, 待基础沉降稳定后, 进行动力试验。

1.6 地震波选取

本次试验输入波形采用上海市《建筑抗震设计规程》^[12]中的人工模拟地震波, 该地震波持时约 30 s, 为满足离心试验相似比和振动台振动频率要求, 将原型地震波按时间和幅值进行缩放, 并进行滤波处理。图 6 给出了满足振动台输入要求的原型地震加速度时程曲线及相应的 Fourier 幅值谱。输入地震波低频成分居多, 6 个频率峰值 (P1~P6) 主要位于 0.1~2 Hz

范围内, 各峰值对应的频率依次为 0.18, 0.26, 0.32, 0.56, 0.99 和 1.85 Hz。

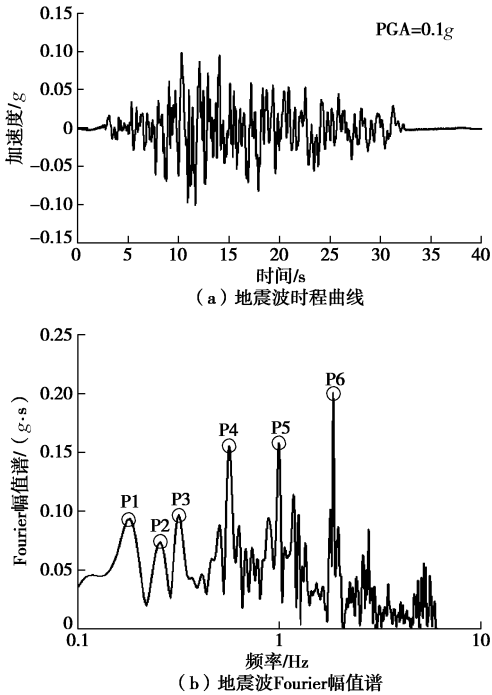


图 6 上海人工地震波
Fig. 6 Shanghai artificial earthquake waves

2 试验结果分析

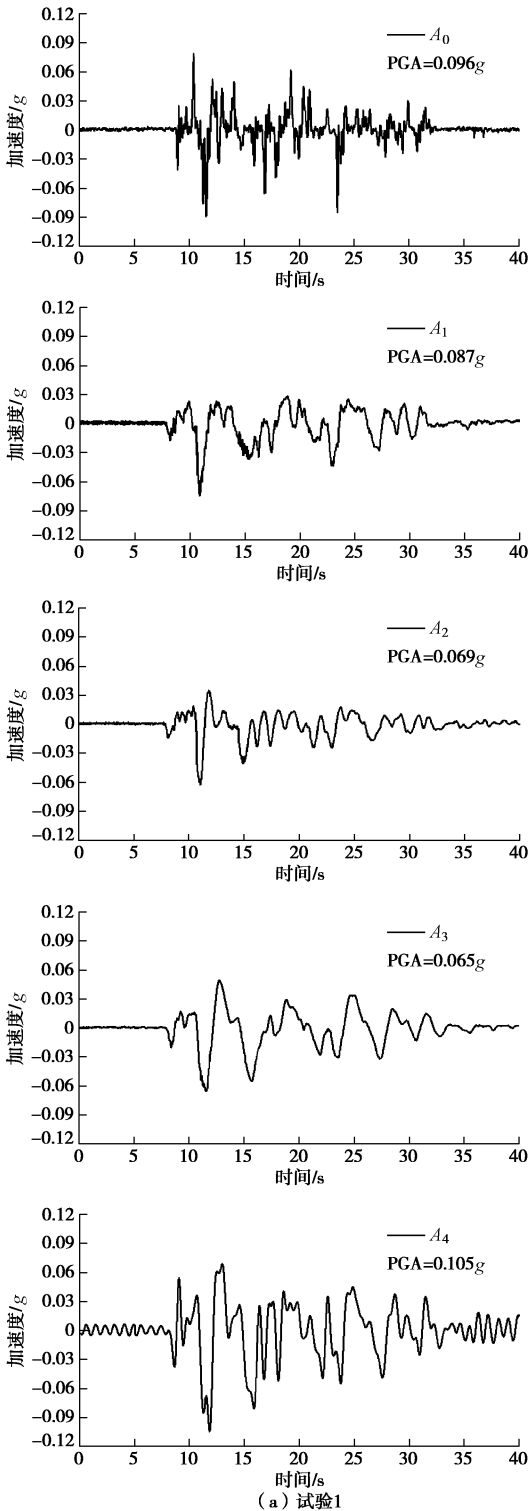
以下对试验结果的分析与讨论均基于原型尺寸。

2.1 地震加速度响应

图 7 为两组试验在不同位置测得的地震加速度响应时程曲线。由 $A_0 \sim A_2$ 可知, 加速度在从土体底部、中部传递到地表的过程中逐渐衰减, 正是因为自振频率较低的软土场地对加速度具有减小作用。比较 A_3 和 A_4 可知, 上部结构加速度响应较基础和地表有一定程度的放大, 并且桩头刚接比桩头自由时放大程度更高。上部结构加速度在输入运动结束后, 可以看到有较明显的往复规则振动出现, 是因为地震力引起的能量在结构中逐渐累积, 并且能量耗散速率要低于输入速率, 结构在地震后发生阻尼振动, 这与文献[13]的结构振动响应非常类似。

采用底部输入峰值加速度进行归一化处理, 得到不同位置的加速度峰值放大系数。由图 8 可以看出, 地震峰值加速度在向上传递过程中逐渐减小, 地表峰值加速度为输入时的 60%~70%, 惯性运动使上部结构峰值加速度较筏板顶面明显增大。两组试验土体中部(近桩端位置)的加速度峰值放大系数并非完全一致, 主要是因为桩顶与筏板刚接时, 基础-结构体系整体刚度较大, 周围土体水平运动受桩群-地基相互作用影响明显, 当桩顶与筏板用垫层隔开时, 桩群-地基相

互作用对周围土体的影响有所减弱, 地基中部土体运动与自由场运动更加接近。进一步采用地表峰值加速度对上部结构加速度进行归一化, 求得 2 组试验结构加速度放大系数分别为 1.53 和 1.40, 说明桩头和筏板用垫层隔开时, 地震力主要依靠基底摩擦传递到上部结构, 砂垫层起到了一定的基底隔震作用。值得一提的是, 文献[9]试验结果表明, 干燥砂土中桩筏连接形式对上部结构动力响应影响很小, 这与试验采用的土体材料不同有关。



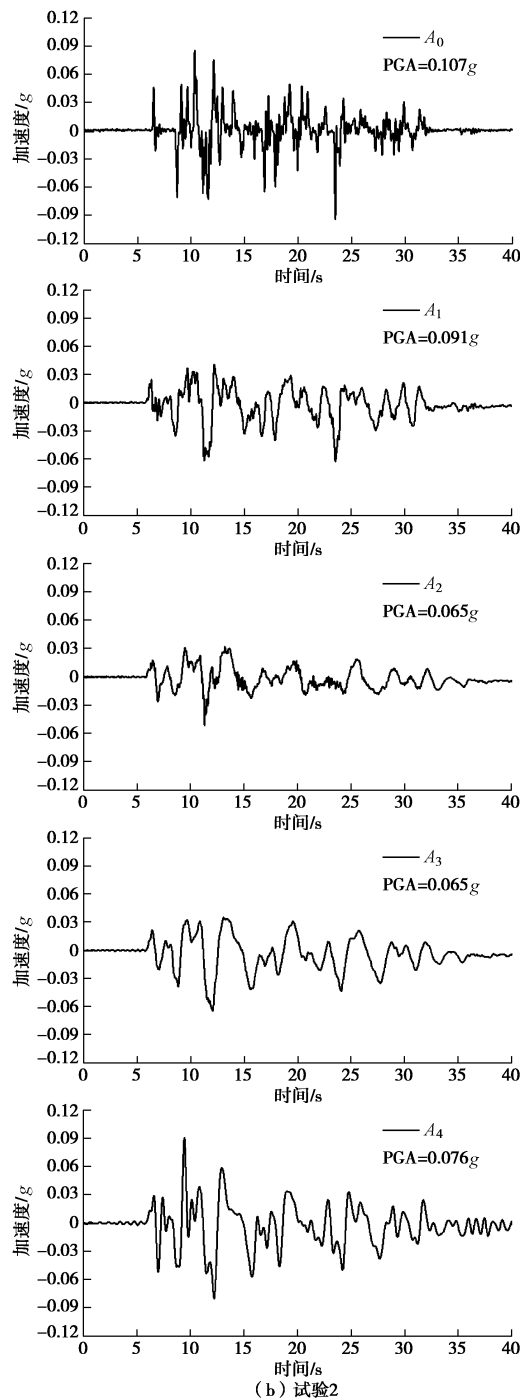


图 7 地震加速度时程

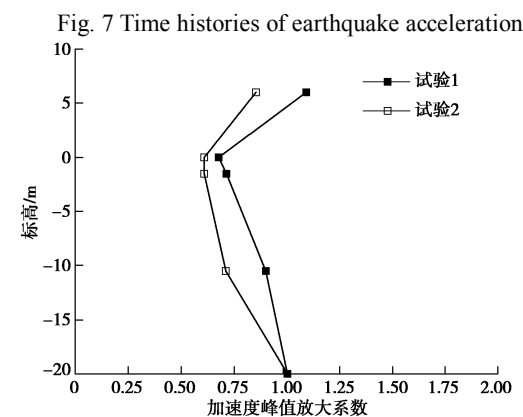
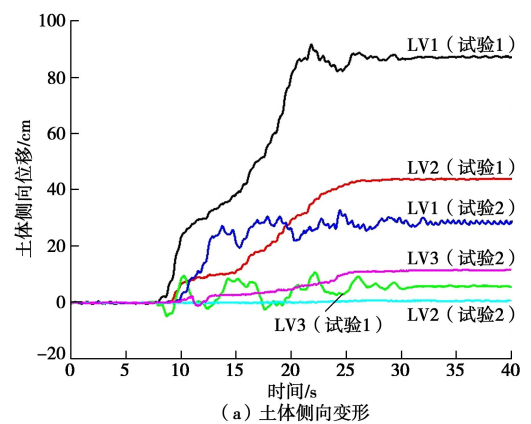


图 8 加速度峰值放大系数

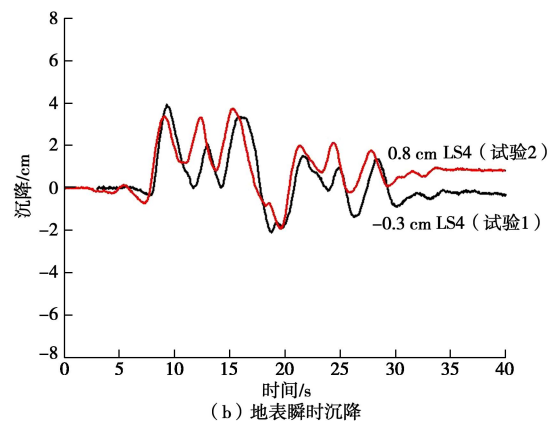
Fig. 8 Peak acceleration amplification factors

2.2 地基变形和孔压

图 9 (a)、(b) 分别为地震时模型箱侧面记录的土体侧向位移和地表竖向沉降。由图 9 (a) 可以看出, 两组试验中地表附近土体侧向位移 (LV1) 均超过了中部土体位移 (LV2 和 LV3), 这与浅部土体受到的竖向约束作用较小有关。不同深度土体侧向位移随地震发生过程逐渐累积, 说明地震作用下软黏土侧向位移累积具有明显的增大趋势。T-bar 贯入试验结果表明, 土体中部 (LV2 和 LV3 所在深度范围) 的固结效果不如顶面和底部土体, 地震时中部土层表现出一定的减震和隔震作用, 加上不同类型基础对土体侧向运动影响存在差异, 中部土体水平运动规律十分复杂, 故 LV2 和 LV3 对应的土体侧向变形大小关系并不完全一致。由图 9 (b) 可以看出, 地震发生时地表沉降在竖直方向变化明显, 是因为位移计测试点位于基础模型和模型箱侧壁之间, 并且与二者距离均比较接近, 水平地震作用下基础模型和模型箱侧壁同时发生水平往复运动, 二者水平位移的非一致性引起地表软土在竖直方向发生隆起和沉降。由于地震作用时间较短, 土体超孔隙水压力不能及时消散, 震后地表瞬时沉降较小。



(a) 土体侧向变形



(b) 地表瞬时沉降

图 9 软土地基地震变形

Fig. 9 Seismic deformations of soft clay

图 10 为地震时土体超孔隙水压力时程曲线。软黏土中超孔隙水压力随地震发生过程逐渐累计上升, 在

地震事件结束（约 33 s）时达到最大值，并在短时间内保持不变。土体中部孔压（ P_2 ， P_4 ）均有所升高，但上升程度十分有限，最大超孔隙水压力不超过 3 kPa。筏板底部孔压（ P_1 ）略微有所升高，而同一深度位置土体孔压（ P_3 ）基本未发生变化。图 11 为试验 1 记录的土体中部孔隙水压力消散曲线。地震引起的超孔压在震后 50 d 内持续降低，未见有明显减缓趋势出现，说明孔隙水压力受软黏土低渗透性影响消散缓慢，地基再固结过程在震后还将持续较长一段时间。

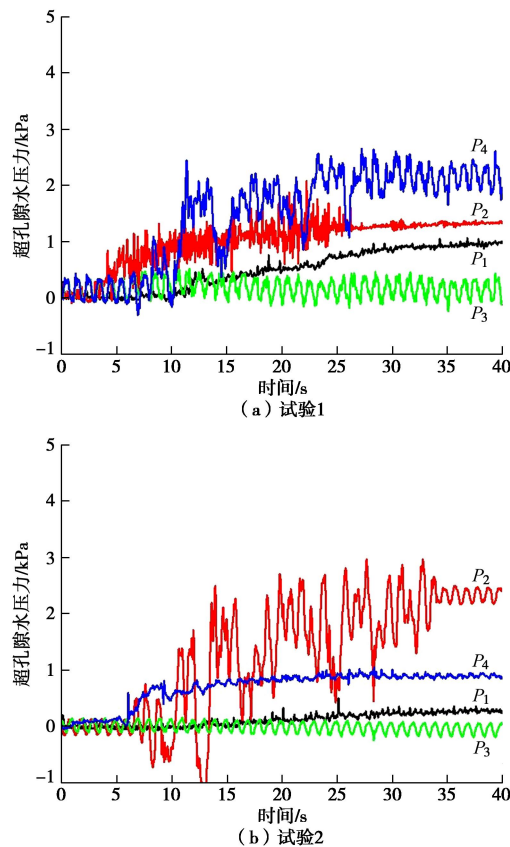


图 10 地震瞬时超孔隙水压力

Fig. 10 Excess pore water pressures during earthquake

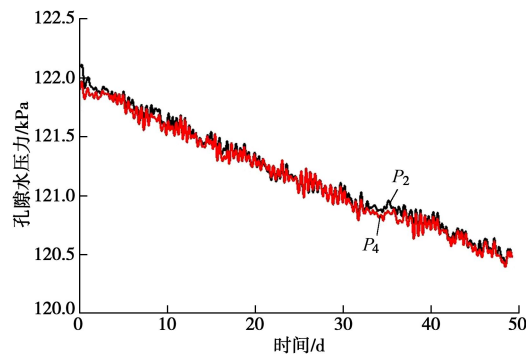


图 11 震后孔隙水压力消散（试验 1）

Fig. 11 Pore water pressure dissipation after earthquake (Test 1)

2.3 结构瞬时和长期变形

图 12 为位移计（LS1）测得的上部结构侧向位移时程曲线。两组试验上部结构位移响应具有明显的一

致性，结构侧向位移在 10 s 附近（对应峰值加速度位置）达到最大值，之后位移振幅随时间逐渐减小，地震结束时试验 1 水平残余变形为 6.6 cm，比试验 2（17 cm）减少 60%。

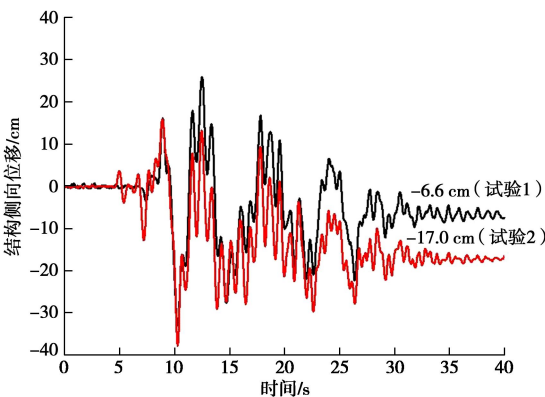


图 12 结构水平位移时程曲线

Fig. 12 Time-history curves of lateral displacements of superstructure

图 13 给出了根据筏板两侧竖向位移计算的基础倾斜值，即筏板两侧竖向位移（由 LS2 和 LS3 测得）的差值与二者水平距离之比。两组试验基础倾斜均随时间发展逐渐积累，但桩头刚接时基础倾斜水平较桩头自由时更小，震后倾斜稳定值仅为后者的 1/3。

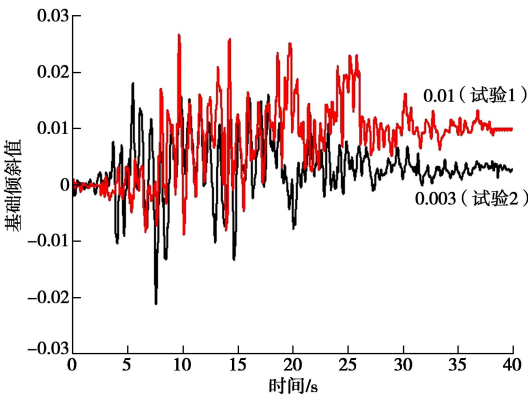


图 13 基础倾斜时程曲线

Fig. 13 Time-history curves of foundation inclination

图 14 为筏板两侧和周围地表沉降时程曲线。受结构与基础体系附加地震力作用的影响，桩筏基础沉降均较周围地表发生了更大沉降。桩头刚接时基础两侧竖向沉降较桩头自由时更加均匀，并且平均沉降也更小，这与桩头刚接时具有相对更大的基础竖向刚度有关。

为揭示软土地发生震陷后结构物和地基的长期沉降变化规律，试验记录了震后一段时间内桩筏基础平均沉降（LS2 和 LS3 的平均值）和地表再固结沉降（LS4）。由图 15 可知，地震结束后软土地基地表沉降持续发展，2 种类型桩筏基础的平均沉降速率与周围地表沉降十分接近，基础相对沉降（基础平均沉降

与地表沉降之差)几乎为零,说明大间距桩筏基础能很好地控制基础震后长期附加沉降。

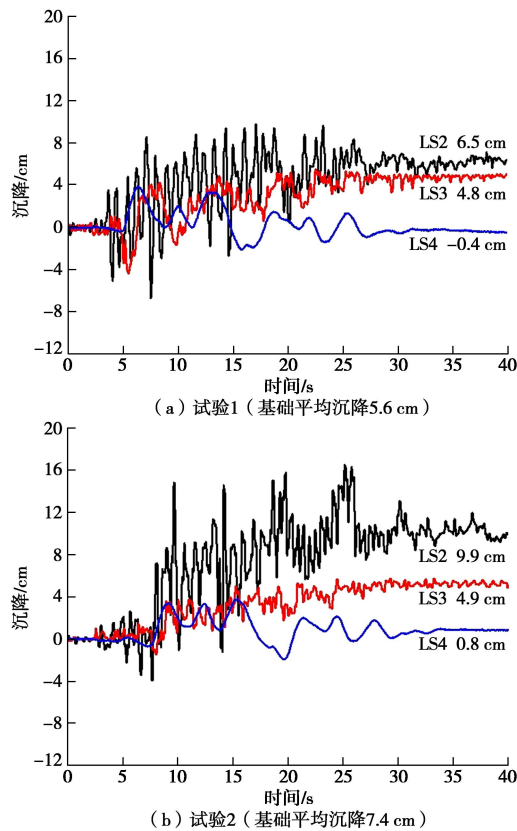


图 14 基础和地表瞬时沉降

Fig. 14 Instant settlements of piled raft and ground after earthquake

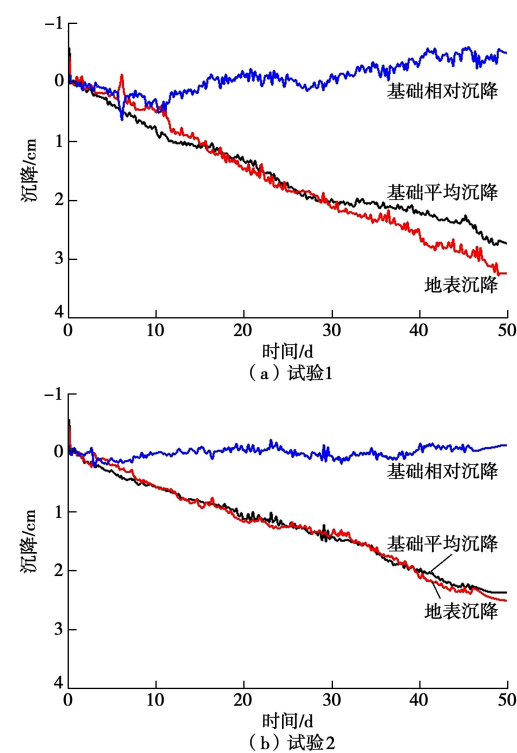


图 15 基础和地表震后长期沉降

Fig. 15 Long-term settlements of piled raft and ground after earthquake

2.4 群桩荷载分担比

桩土荷载分担是桩筏基础设计人员十分关心的问题,尤其是按极限承载力设计的减沉桩基础在地震前后桩群和筏基的荷载分担变化规律。

表 7 为地震前和地震结束时按模型桩轴向应变值估算的群桩竖向总荷载与相应的荷载分担比。桩筏连接形式对群桩荷载分担比例有一定影响,桩头刚接时群桩承担的竖向荷载比例较桩头自由时高出 15%,这与设置垫层后桩顶相对周围土体向上发生刺入变形,在桩身浅部引起负摩阻力有关。地震发生时,土体水平剪切作用使地基土出现软化行为,桩筏基础承载力和刚度均有所降低,部分荷载由群桩转移到筏板,但桩筏荷载分担比例变化总体不大,该规律与文献[7, 14, 15]的试验和实测结果基本一致。由于震后筏板对上部荷载的分担比例有所增大,结构模型比黏土层表面发生更大的竖向变形,不太可能出现筏板与地基土脱空的现象,有利于减轻地震水平剪力对桩筏连接部位基础结构强度的不利影响。

表 7 地震前后群桩荷载分担比

Table 7 Load bearing ratios of pile groups before and after earthquake				
试验编号	地震工况	总荷载 /kN	群桩荷载 /kN	群桩荷载分担比/%
1	地震前	1100	494	45
	地震后	1100	459	42
2	地震前	1100	328	30
	地震后	1100	284	26

3 加速度频谱分析

地震加速度频谱分析通过不同频率对应的加速度响应值评价场地和结构的卓越频率和共振频率。图 16 为两组试验测得的土体底部、中部和地表附近的加速度 Fourier 幅值谱。中部和地表位置土体输出运动的高频分量均受到抑制,低频分量有所放大,但地表附近提高程度不如土体中部明显,这与中部土体强度低于上下相对较硬土层,在较强的地震作用下发生明显软化有关。比较输入和输出运动峰值频率可以发现,地表加速度在 P1~P3 三个频率分量位置被放大,而在其它峰值频率位置则有所减小,说明场地自振频率在 0.2~0.3 Hz 附近。

根据黏土地表附近、筏板顶面和上部结构的实测加速度绘制两组试验的反应谱曲线(5%阻尼比),并按基底输入运动归一化后得到地表、基础和上部结构的谱加速度放大系数(定义为同一周期时不同位置谱加速度与输入加速度之比)。

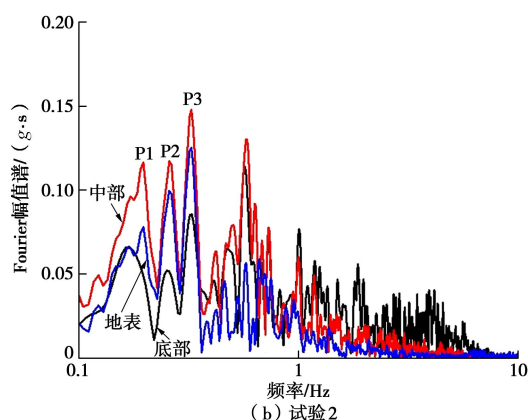
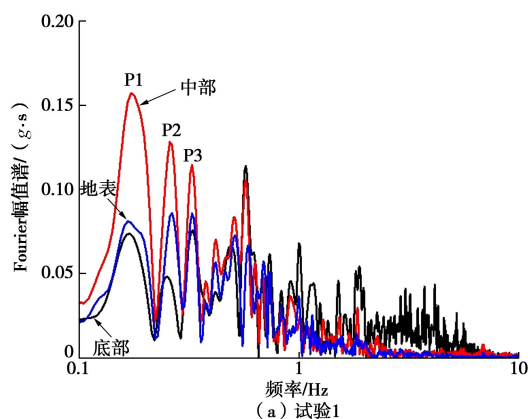


图 16 加速度 Fourier 幅值谱

Fig. 16 Fourier amplitude spectra of acceleration

由图 17 可以看出,地表土体加速度在较长的周期范围(3 s 以后)均被放大,筏板基础和结构加速度在图示周期范围内几乎都被放大,并且筏板加速度放大系数总体大于地表。两组试验地表位置加速度在周期分别为 3.7 和 4.1 s 时对结构有较大影响,筏板和结构加速度在周期为 4.4 和 4.2 s 时,加速度放大水平最大。比较 2 组试验基础和结构的响应曲线能够发现,二者在图示周期范围内的曲线分布情况十分接近,表明基础和结构具有类似的振动特性。进一步能够看出,试验 1 上部结构谱加速度放大系数曲线普遍高于筏板基础,试验 2 中上部结构与筏板基础放大系数曲线在大部分周期内几乎完全重合,说明桩筏连接形式差异对上部结构运动响应影响显著。

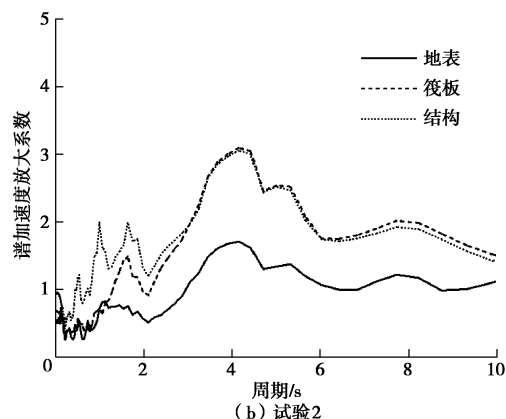
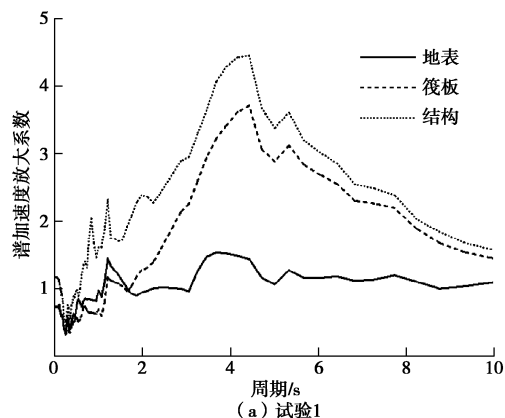


图 17 谱加速度放大系数

Fig. 17 Amplification factors of spectral acceleration

4 结 论

为分析软土地基中大间距摩擦型桩筏基础的地震响应问题,通过动力离心模型试验研究了不同桩筏连接形式(桩头刚接和桩头自由)下结构-基础体系的加速度和位移变化规律以及地震动对桩筏竖向荷载分担的影响,得到以下 3 点结论。

(1) 由于上部结构-基础-地基相互作用,在软土地场地自振频率范围内,桩筏基础和上部结构的加速度放大系数明显高于其它频率范围。当桩头刚接时,上部结构加速度放大程度更大,但震后结构侧向位移与基础倾斜均较桩头自由时减小超过一半。

(2) 在地震作用时,软黏土发生不排水剪切作用,孔隙水压力上升,土体出现软化现象,地基土承载力降低。在模型自重作用下,筏板两侧比附近地表产生相对更大的竖向沉降。地震结束后较长一段时间内,筏板平均沉降与地表沉降速率基本一致,无明显附加沉降产生。

(3) 地震作用使软黏土发生软化行为,桩头刚接和桩头自由的桩筏基础竖向承载力均有所降低。桩土荷载分担比发生改变,表现为部分荷载由群桩转移到筏板,但桩筏竖向荷载分担比例变化很小。对于减沉桩基础来讲,筏板与地基之间不发生脱开并有效分担上部荷载,可减轻地震水平剪力对基础结构强度的不利影响。但是,震后桩筏荷载分担随超孔压消散的变化规律及其对桩基设计的影响尚有待进一步研究。

致 谢: 研究生王宇、张开洋参加了本课题的试验研究工作,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] DGJ 08—11—2010 上海市地基基础设计规范[S]. 2010. (DGJ 08—11—2010 Foundation design code of Shanghai[S].

2010. (in Chinese))
- [2] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 2008. (JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. 2008. (in Chinese))
- [3] YANG M. Study on reducing-settlement pile foundation based on controlling settlement principle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(4): 481 - 486.
- [4] 宰金珉. 塑性支承桩——卸荷减沉桩的概念及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(3): 273 - 278. (ZAI Jin-min. Concept of plastically bearing pile and its practical application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(3): 273 - 278. (in Chinese))
- [5] POULOS H G. Piled raft foundations: design and applications [J]. Géotechnique, 2001, **51**(2): 95 - 113.
- [6] REUL O, RANDOLPH M F. Piled rafts in overconsolidated clay: comparison of in situ measurements and numerical analyses[J]. Géotechnique, 2003, **53**(3): 301 - 315.
- [7] HORIKOSHI K, MATSUMOTO T, HASHIZUME Y, et al. Performance of piled raft foundations subjected to dynamic loading[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2003, **3**(2): 51 - 62.
- [8] MATSUMOTO T, FUKUMURA K, HORIKOSHI K, et al. Shaking table tests on model piled rafts in sand considering influence of superstructures[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2004, **4**(3): 21 - 38.
- [9] NAKAIA S, KATO H, ISHIDA R, et al. Load bearing mechanism of piled raft foundation during earthquake[C]// Proceedings of 3rd UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, March, 2004: 29 - 30.
- [10] BANERJEE S, GOH S H, LEE F H. Earthquake-induced bending moment in fixed-head piles in soft clay[J]. Géotechnique, 2014, **64**(6): 431 - 446.
- [11] 马 亢, 许 强, 李庶林, 等. 高低承台桩基地震行为差异研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(6): 1250 - 1258. (MA Kang, XU Qiang, LI Shu-lin, et al. Difference of seismic behavior of high and low caps of pile foundations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(6): 1250 - 1258. (in Chinese))
- [12] DGJ 08—9—2013 上海市建筑抗震设计规程[S]. 2013. (DGJ 08—9—2013 Code for seismic design of buildings of Shanghai[S]. 2013. (in Chinese))
- [13] 钟 锐, 黄茂松. 沉箱加桩复合基础地震响应离心试验[J]. 岩土力学, 2014, **35**(2): 380 - 388. (ZHONG Rui, HUANG Mao-song. Centrifuge tests for seismic response of caisson-pile composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(2): 380 - 388. (in Chinese))
- [14] YAMADA T, YAMASHITA K, KAKURAI M, et al. Long-term behaviour of tall building on raft foundation constructed by top-down method[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Deep Foundation Practice. Singapore, 2001: 411 - 417.
- [15] YAMASHITA K, HAMADA J, WAKAI S, TANIKAWA T. Settlement and load sharing behavior of piled raft foundations based on long-term monitoring[J]. Takenaka Technical Research Report, 2014, **70**: 29 - 40.