

University of Wollongong

Research Online

Faculty of Engineering and Information
Sciences - Papers: Part A

Faculty of Engineering and Information
Sciences

1-1-2014

Centrifuge tests for seismic response of caisson-pile composite foundation

Rui Zhong

University of Wollongong, rzhong@uow.edu.au

Mao-song Huang

Tongji University

Follow this and additional works at: <https://ro.uow.edu.au/eispapers>



Part of the [Engineering Commons](#), and the [Science and Technology Studies Commons](#)

Recommended Citation

Zhong, Rui and Huang, Mao-song, "Centrifuge tests for seismic response of caisson-pile composite foundation" (2014). *Faculty of Engineering and Information Sciences - Papers: Part A*. 4732.
<https://ro.uow.edu.au/eispapers/4732>

Research Online is the open access institutional repository for the University of Wollongong. For further information contact the UOW Library: research-pubs@uow.edu.au

Centrifuge tests for seismic response of caisson-pile composite foundation

Abstract

Dynamic centrifuge tests are carried out to study seismic response of caisson-pile composite foundation. With Shanghai sandy silt chosen as test soil, laminar shearing box used to eliminate reflection at the boundary, and Shanghai artificial middle wave is taken as the input motion, three tests with different foundation types are conducted under the centrifuge acceleration of 50g. Single pile, caisson and caisson-pile composite foundation are the foundation types for those three tests, and all the superstructures in these tests are simplified as mass points and connecting columns. Test results indicate that, for soil with low stiffness acceleration decays in the process of earthquake wave propagating upwards; adding piles under the caisson could decrease the earthquake responses of both the foundation and structure, so the reinforcement of the system in resisting earthquakes is expected; frequency characteristics of the responses at soil surface, foundation and structure are all different from each other depending on their own natural vibration characteristics; and for the interaction between soil and foundation, or foundation and structure, only the earthquake component with similar frequency with both interacting sides can cause remarkable earthquake interaction.

Disciplines

Engineering | Science and Technology Studies

Publication Details

Zhong, R. & Huang, M. (2014). Centrifuge tests for seismic response of caisson-pile composite foundation. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 35 (2), 380-388.

文章编号: 1000-7598 (2014) 02-0380-09

沉箱加桩复合基础地震响应离心试验

钟 锐^{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: 针对沉箱加桩复合基础地震响应问题开展动力离心试验研究。采用砂质粉土作为地基土, 上部结构简化为质点和柱体, 基础类型包括单桩、沉箱、沉箱加桩复合基础, 利用层状剪切模型箱消除边界反射, 以上海人工中波为输入波, 在 50 g 离心加速度场下进行水平地震试验。根据基础形式的不同进行 3 组试验, 试验结果表明: 对于刚度较小的土, 地震波向上传播过程中具有加速度衰减的特征; 沉箱底部加桩对于降低基础和结构地震响应有积极的效果, 有利于增强其抗震能力; 地表、基础、结构的地震响应频率特性各不相同, 这取决于其各自不同的自振特性; 土与基础、基础与结构之间均会发生地震相互作用, 但只有与相互作用对象自振频率均较接近的地震频域分量才能引起明显的相互作用。

关 键 词: 沉箱加桩复合基础; 离心试验; 地震; 相互作用; 频率特性

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Centrifuge tests for seismic response of caisson-pile composite foundation

ZHONG Rui^{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 Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Dynamic centrifuge tests are carried out to study seismic response of caisson-pile composite foundation. With Shanghai sandy silt chosen as test soil, laminar shearing box used to eliminate reflection at the boundary, and Shanghai artificial middle wave is taken as the input motion, three tests with different foundation types are conducted under the centrifuge acceleration of 50g. Single pile, caisson and caisson-pile composite foundation are the foundation types for those three tests, and all the superstructures in these tests are simplified as mass points and connecting columns. Test results indicate that, for soil with low stiffness acceleration decays in the process of earthquake wave propagating upwards; adding piles under the caisson could decrease the earthquake responses of both the foundation and structure, so the reinforcement of the system in resisting earthquakes is expected; frequency characteristics of the responses at soil surface, foundation and structure are all different from each other depending on their own natural vibration characteristics; and for the interaction between soil and foundation, or foundation and structure, only the earthquake component with similar frequency with both interacting sides can cause remarkable earthquake interaction.

Key words: caisson-pile composite foundation; centrifuge test; earthquake; interaction; frequency characteristic

1 引 言

沉箱加桩复合基础是一种在沉箱底部增加桩基而形成的新型基础形式, 基础的总体埋深的增加及共振性能的改变有望提高抗震能力。

该基础形式的提出见于工程报告——《同(江)三(亚)国道主干线琼州海峡跨海公路通道工程前期工作第二阶段研究报告》^[1], 黄茂松等^[2]采用解

析方法研究了该基础对侧向动力荷载的抵抗能力。由于该基础形式比较新颖, 目前国内外对其研究较少。

在基础-结构地震相互作用问题的研究中, 包括理论及简化分析方法(王霓等^[3]、Stewart 等^[4-5]、Mylonakis 等^[6-7]、Tsigginos 等^[8])、数值方法(Jeremic 等^[9-10]、Guin 等^[11])及试验方法(Chau 等^[12])等。动力离心机试验能够还原原型应力条件, 因而被广

收稿日期: 2012-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 90915011); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题(No. 2013CB036304)。

第一作者简介: 钟锐, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事土动力学和基础抗震方面的研究。E-mail: esopo@163.com

通讯作者: 黄茂松, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的研究与教学工作。E-mail: mshuang@tongji.edu.cn

泛应用于土木工程地震问题的研究中。Curras 等^[13]采用动力离心机试验，对土-桩-结构地震相互作用进行了研究，并用实验数据对采用动力非线性 Winkler 地基梁的简化方法进行了验证。Boulanger 等^[14]采用动力非线性 $p-y$ 曲线方法对土-桩-结构地震响应进行解析计算，通过与动力离心机试验结果的对比使该方法得到了验证。Wilson^[15]对液化砂土和软黏土中土-桩-上部结构地震相互作用问题进行了动力离心试验研究，并对该问题进行了拟静力研究。

本文针对土-基础-结构地震响应问题中沉箱加桩复合基础的加桩作用进行动力离心机试验研究，试验对象包括自由场、沉箱和沉箱加桩复合基础。测试内容包括土体、基础及结构的加速度响应和结构的应变响应等，通过沉箱和复合基础响应峰值的对比研究了加桩的作用。另外对土、基础和结构时域响应结果进行频谱分析，研究了土-基础-结构相互作用的内在规律。

2 试验设计

2.1 试验仪器与设备

本试验采用同济大学 TLJ-150 型岩土离心试验机，动力试验中最大离心加速度为 50 g，振动台最大振动加速度为 20 g，最大持时为 1 s，振动频率为 20~200 Hz。为尽可能地消除应力波在土体边界的反射影响，试验模型箱采用叠环式层状剪切箱，如图 1 所示，由 22 层铝环组成，层间允许 5 mm 的相对变位。

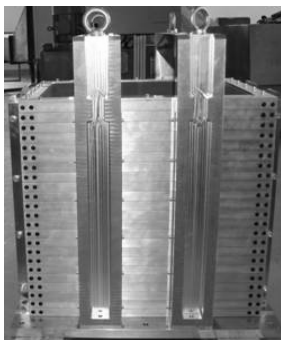


图 1 层状剪切箱
Fig.1 Laminar box

2.2 试验用土

本试验采用上海②₃层砂质粉土，级配曲线如图 2 所示，按 7% 含水率配置水分，试验填土及应力条件下平均剪切波速为 66.7 m/s，密度为 1.467 g/cm³。

2.3 输入地震波

选取上海人工地震中波，在波形再现数控系统

中对地震波进行缩放，原型峰值加速度调整为 0.34 g（本试验采用 50 g 离心加速度场，故振动台峰值加速度为 17 g）。由于振动台的振动频率范围限制，需要对输入地震波进行滤波处理，最终得到原型输入地震波及其 Fourier 幅值谱如图 3 所示，地震持时为 20 s。由于地震发生后结构仍会有一段时间的自振，因而本文地震响应结果输出均选择持时为 30 s，以详细捕捉结构震后响应信息。为了分析地震波不同频率特性对土-基础-结构动力特性的影响，研究不同频率地震分量下的土-基础-结构动力相互作用，将输入地震波 4 个主要峰值频率标识出来，分别命名为 1 号、2 号、3 号和 4 号峰值，分别对应频率 0.391、1.123、1.709、3.613 Hz。

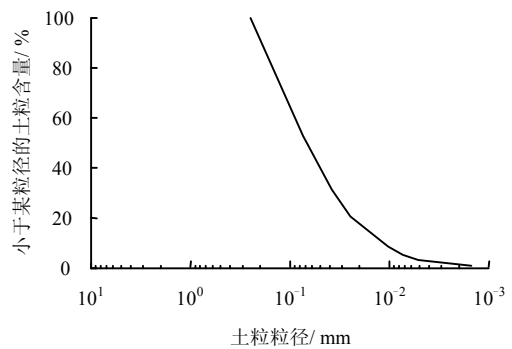


图 2 砂质粉土级配曲线
Fig.2 Grain-size distribution of sandy silt

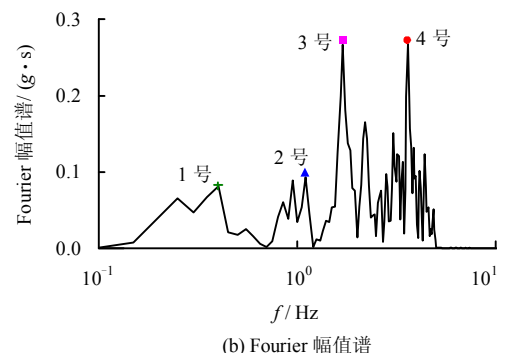
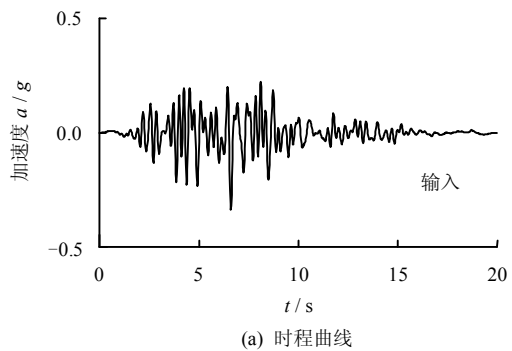


图 3 试验输入波形
Fig.3 Input motion in tests

2.4 试验方案及传感器布置

共进行3组试验, 试验研究内容如表1所示。基础及结构模型均采用铝合金材料, 桩截面统一为直径10 mm, 壁厚2 mm; 圆柱形沉箱直径为8 cm, 高12 cm, 侧壁厚为0.5 cm, 顶、底板厚为1.5 cm。上部结构质点用立方体模拟, 单桩上立方体棱长为2.5 cm, 沉箱、复合基础及群桩上立方体棱长为4 cm。连接质点与基础的柱的截面与桩相同。

表1 离心试验方案

Table 1 Centrifuge testing programs

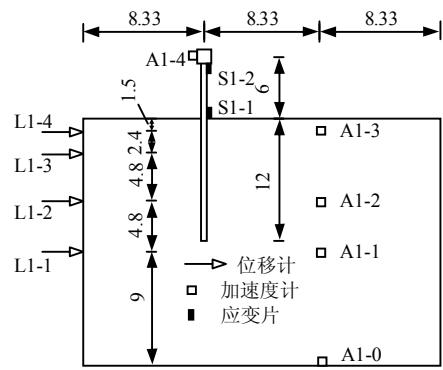
试验编号	研究内容
1	自由场及单桩-结构地震响应
2	沉箱-结构地震响应
3	沉箱加桩复合基础-结构地震响应

试验中使用了加速度计、位移计和应变片3种传感器, 为方便标识, 传感器一律以“ $X\alpha-\beta$ ”格式表示: X 表示传感器类别($X=A, S, L$ 分别表示加速度计、应变片、位移计); α 表示试验编号; β 表示传感器编号。例如A3-2表示第3组试验的2号加速度传感器。其中位移计只用于监测层状模型箱的侧向位移, 不计入试验结果数据。3组试验的传感器布置如图4所示, 图中尺寸为50 g离心加速度场下根据相似原理换算的原型尺寸。

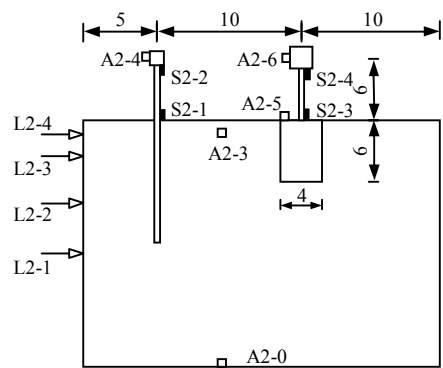
试验1主要研究单桩与自由场响应, 由于单桩平面尺寸较小, 因而可忽略其对旁边较远自由场的影响。试验2和试验3分别采用了沉箱和沉箱加桩复合基础, 本文将研究比较试验2和试验3采用不同基础形式后地震响应的差别, 因而在两组试验中均设置一个单桩-结构系统作为监控, 对比两组试验中其结果是否相近, 从而判断不确定因素影响的大小。

2.5 离心试验相似关系

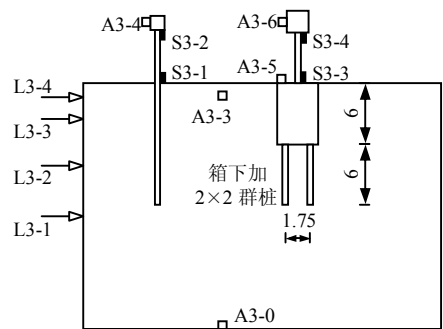
本试验离心加速度为50 g, 模型-原型长度相似比尺为50。试验用土以剪切波速和密度控制, 相似比为1:1, 由于本试验关注对象为沉箱加桩效果, 且土体含水率很低, 因而可忽略渗流参数的影响。基础和结构中, 不同的构件具有不同的变形机制, 因而需要考虑不同的物理量相似控制。桩和柱主要为抗弯构件, 以截面抗弯刚度相似控制, 兼顾截面抗压刚度, 如表2所示; 沉箱主要发生整体平移和摇摆, 因而以质量和侧向转动惯量相似控制, 如表3所示; 同理, 上部结构质点亦以质量和侧向转动惯量相似控制, 如表4所示。表2~4中相似比小括号中数值为该物理量的理论相似比。



(a) 试验1: 自由场与单桩-结构地震响应



(b) 试验2: 沉箱-结构地震响应(单桩做参考)



(c) 试验3: 沉箱加桩复合基础-结构地震响应(单桩做参考)

图4 试验模型及传感器布置(单位: m)

Fig.4 Layouts of the modes and sensors in tests (unit: m)

3 试验结果与分析

3.1 自由场及单桩-结构地震响应(试验1)

3.1.1 地层加速度及结构加速度

图5为试验1土层及结构加速度测试结果。其中A1-0为振动台上自带加速度测试计, 用以测试实测波与目标波输入是否吻合。本图显示试验1实测波与目标波吻合较好。A1-1~A1-3为由深至浅自由场加速度响应, A1-4为单桩上部结构加速度响应。表5列出各加速度峰值大小以及其相对于A1-0峰值的放大系数, 表中以地表为标高0点。图6为加速度放大系数折线图。

表 2 桩、柱相似关系
Table 2 Similarity relationships of piles and columns

	外径 D / m	壁厚 t / m	模量 E / Pa	抗弯刚度 EI / (N·m ²)	EI 相似比	抗压刚度 EA / N	EA 相似比	桩距 s / m	s 相似比
模型 (铝合金)	0.01	0.002	7.00×10^7	29.908	1	3.5186×10^6	1	0.035	1
原型 (钢结构)	0.50	0.021	2.06×10^{11}	1.8706×10^8	$50^4 (50^4)$	6.5098×10^9	$43^2 (50^2)$	1.750	$50 (50)$

表 3 沉箱相似关系
Table 3 Similarity relationships of caisson

	直径 D / m	高 H / m	顶、底板厚 t_1 / m	侧壁厚 t_2 / m	密度 ρ / (g/cm ³)	质量 m / kg	m 相似比	侧向转动惯量 J / (kg·m ²)	J 相似比
模型 (铝合金)	0.08	0.12	0.015	0.005	2.70	0.693 4	1	1.6881×10^{-3}	1
原型 (混凝土)	4.00	6.00	0.800	0.300	2.50	88 624	$50.4^3 (50^3)$	5.2070×10^5	$50.3^5 (50^5)$

表 4 上部结构质点相似关系
Table 4 Similarity relationship of mass of superstructure

密度 ρ / (g/cm ³)	单桩上质点					沉箱等上质点					
	棱长 L / m	质量 m / kg	m 相似比	侧向转动惯量 J / (kg·m ²)	J 相似比	棱长 L / m	质量 m / kg	m 相似比	侧向转动惯量 J / (kg·m ²)	J 相似比	
模型 (铝合金)	2.70	0.025	0.042 19	1	4.3945×10^{-6}	1	0.04	0.172 8	1	4.6080×10^{-5}	1
原型 (混凝土)	2.50	1.250	4 882.8	$48.7^3 (50^3)$	1271.6	$49.2^5 (50^5)$	2.00	20 000	$48.7^3 (50^3)$	13 333	$49.2^5 (50^5)$

由图 6 可知, 加速度在从基岩向地表传播过程中有衰减的趋势。根据地震波的传播规律: 加速度为高频特征量、位移为低频特征量, 因而在地震波向上的传播过程中, 对于自振频率高的硬土, 加速度常放大而位移则减小; 相反, 对于自振频率较低的软弱土, 加速度常减小而位移则放大。本文地震响应显示出加速度减小的特征, 正是因为本试验用土刚度相对较小。

通过 A1-4 可知, 上部结构地震响应有很大程度的放大。由图 3 (a) 可知, 输入波的有效部分主要在 0~10 s, 10 s 之后激振加速度很小。因而 A1-4 响应在 0~10 s 曲线明显不光滑, 具有较明显的输入波特征; 而 10 s 以后曲线则较为光滑且振动周期单一, 主要为结构自振响应。值得注意的是, A1-4 响应的最大值并非出现在 0~10 s, 而是出现在 15 s 左右的自振时间段, 这是因为在地震过程中结构积蓄了能量, 10 s 以后的激振虽然很小, 但仍有能量供应, 能量供应速率大于耗散速率, 因而强迫振动继续加强, 在 15 s 处达到最大值。在 15 s 后激振力几乎为 0, 不再有能量供应, 因而在阻尼作用下结构发生阻尼振动, 能量逐渐耗散。

3.1.2 结构应变响应

设置于单桩上部结构连接柱上、下两端的应变片记录了地震时连接柱上、下两端应变时程曲线, 如图 7 所示。连接柱上端应变很小, 而下端应变较大, 峰值分别为 58 和 434 个微应变 (10^{-6})。应变时程曲线形状与 A1-4 结构加速度响应曲线十分相

似, 这是因为连接柱上应变主要由上部结构惯性力及力矩导致。

3.2 沉箱基础-结构地震响应 (试验 2)

3.2.1 加速度响应

试验 2 加速度响应时程曲线如图 8 所示。其中 A2-0 为振动台实测波, A2-3 为自由场地表响应, A2-4 为参考单桩上部结构响应, A2-5 和 A2-6 分别为沉箱基础和上部结构响应。

可以看到, 上部结构 A2-6 响应与单桩结构响应 A2-4 有很大不同, A2-6 直到 17 s 以后才完全呈现出自振特性, 前面 17 s 的响应主要体现激振的特征, 而且峰值出现时间在 7 s 左右, 也与激振波相近。与单桩相比, 沉箱刚度较大, 约束了结构体系的自振, 使得 A2-6 响应以运动响应为主, 而非惯性响应。直到 17 s 以后 A2-6 才显现明显的自振特性。

3.2.2 应变响应

试验 2 应变响应曲线如图 9 所示。其中 S2-1 和 S2-2 分别为参考单桩上连接柱底部和顶部应变, S2-3 和 S2-4 为沉箱上连接柱底部和顶部应变。

3.3 沉箱加桩复合基础-结构地震响应 (试验 3)

3.3.1 加速度响应

试验 3 加速度响应时程曲线如图 10 所示。其中 A3-0 为振动台实测波, A3-3 为自由场地表响应, A3-4 为参考单桩上部结构响应, A3-5 和 A3-6 分别为沉箱加桩复合基础和上部结构响应。试验 3 曲线特性与试验 2 相似。

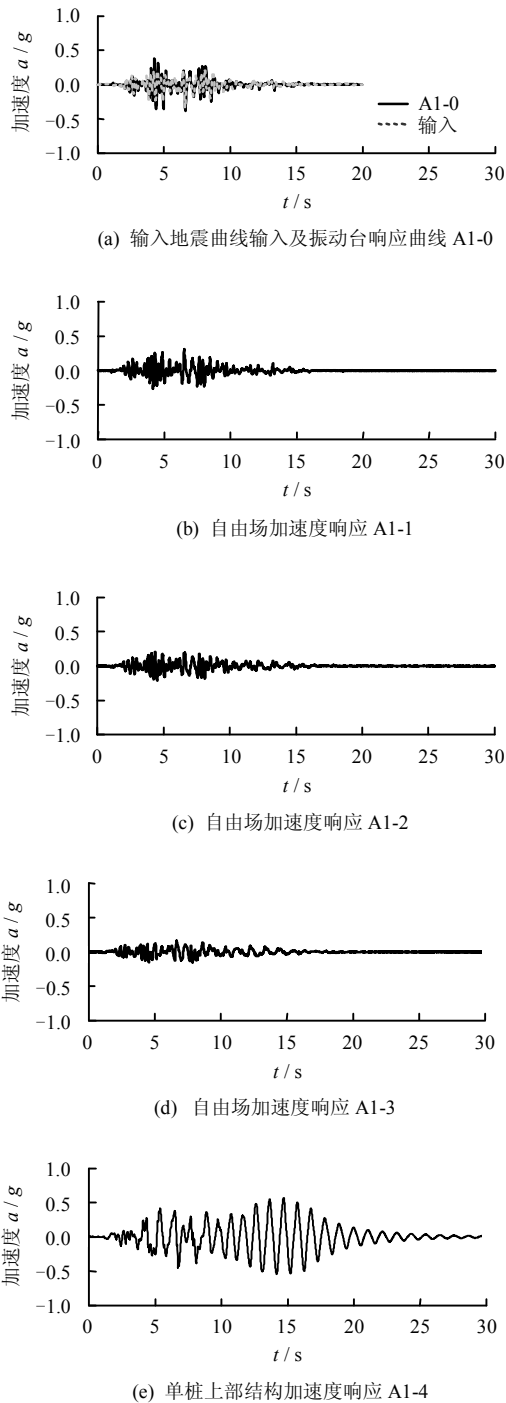


图5 试验1自由场及结构加速度响应
Fig.5 Accelerations of free field and structure in test 1

表5 试验1加速度峰值
Table 5 Peak values of accelerations in test 1

加速度计号	标高 / m	峰值 / g	放大系数
A1-4	6.0	0.566	1.455
A1-3	-1.5	0.163	0.420
A1-2	-3.9	0.212	0.544
A1-1	-13.5	0.314	0.808
A1-0	-22.5	0.389	1.000

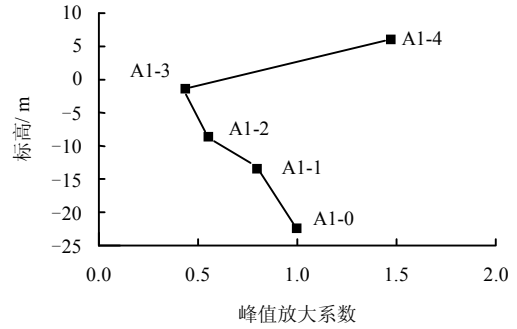


图6 试验1加速度峰值放大系数
Fig.6 Amplifying factors of peak values of accelerations in test 1

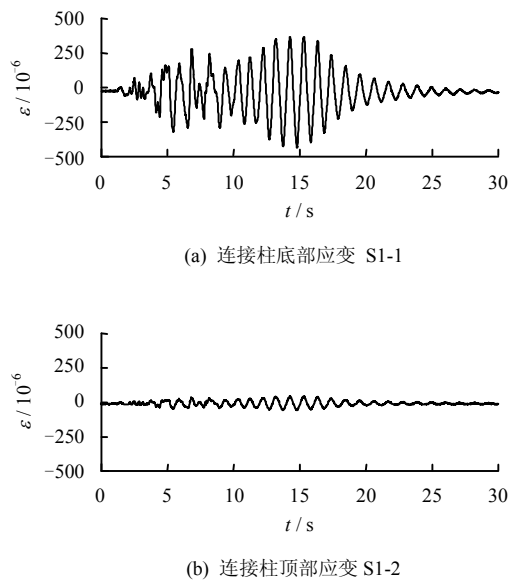


图7 试验1结构柱两端应变
Fig.7 Strains at connecting column ends in test 1

3.3.2 应变响应

试验3应变响应曲线如图11所示。其中S3-1和S3-2分别为参考单桩上连接柱底部和顶部应变，S3-3和S3-4为沉箱加桩复合基础上连接柱底部和顶部应变。

3.4 试验2和试验3响应峰值比较

3.4.1 加速度峰值比较

试验2和试验3中各加速度峰值如表6所示。根据基岩响应Aα-0、自由场表响应Aα-3和监控单桩响应Aα-4的比较可知，两组试验基本上符合较好，说明不确定因素影响较小。为就基础加速度Aα-5和上部结构加速度Aα-6峰值进行各组试验间的对比，进行以下两种归一化方式，并分别作图。

(1) 以基岩加速度Aα-0为标准1，比较不同试验(α=2, 3)地表Aα-3、基础Aα-5、结构

$A\alpha$ -6 放大系数，如图 12 所示。

(2) 以地表加速度 $A\alpha$ -3 为标准 1，比较不同

试验 ($\alpha=2、3$) 基础 $A\alpha$ -5 和结构 $A\alpha$ -6 放大系数，如图 13 所示。

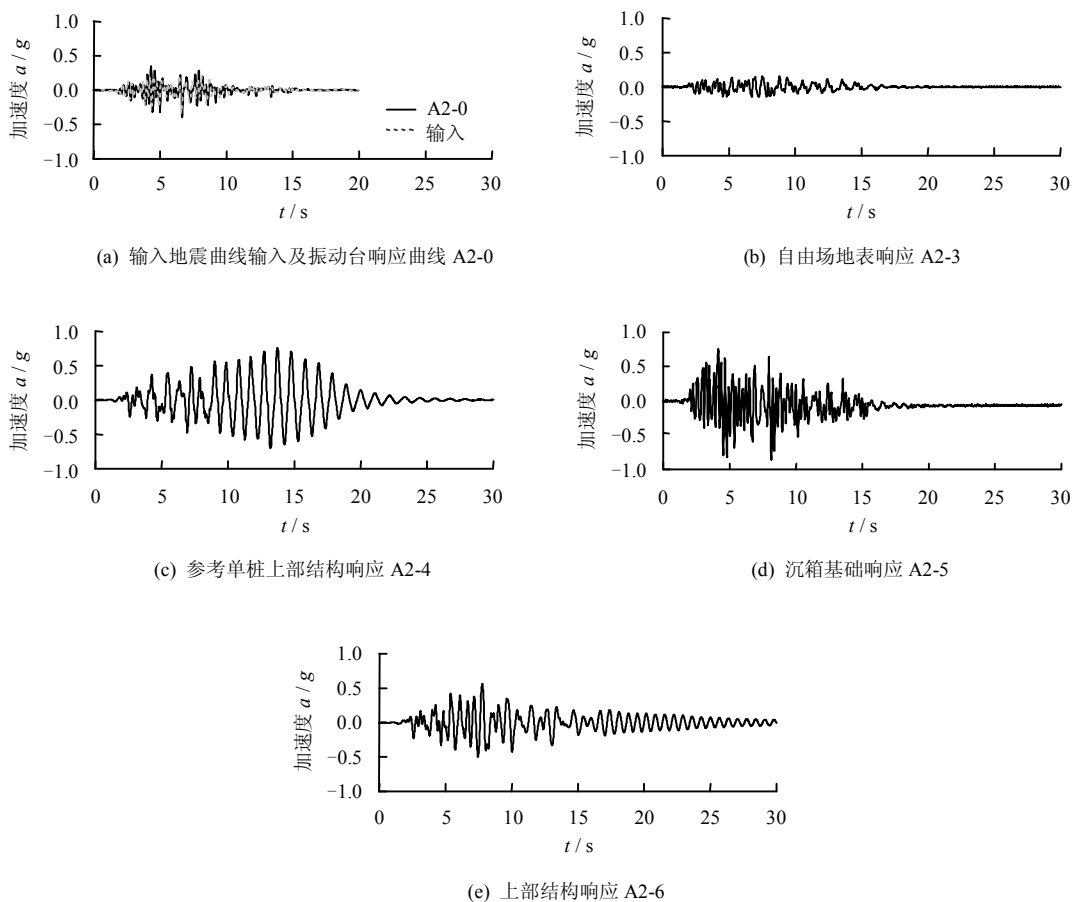


图 8 试验 2 自由场及结构加速度响应
Fig.8 Accelerations of free field and structure in test 2

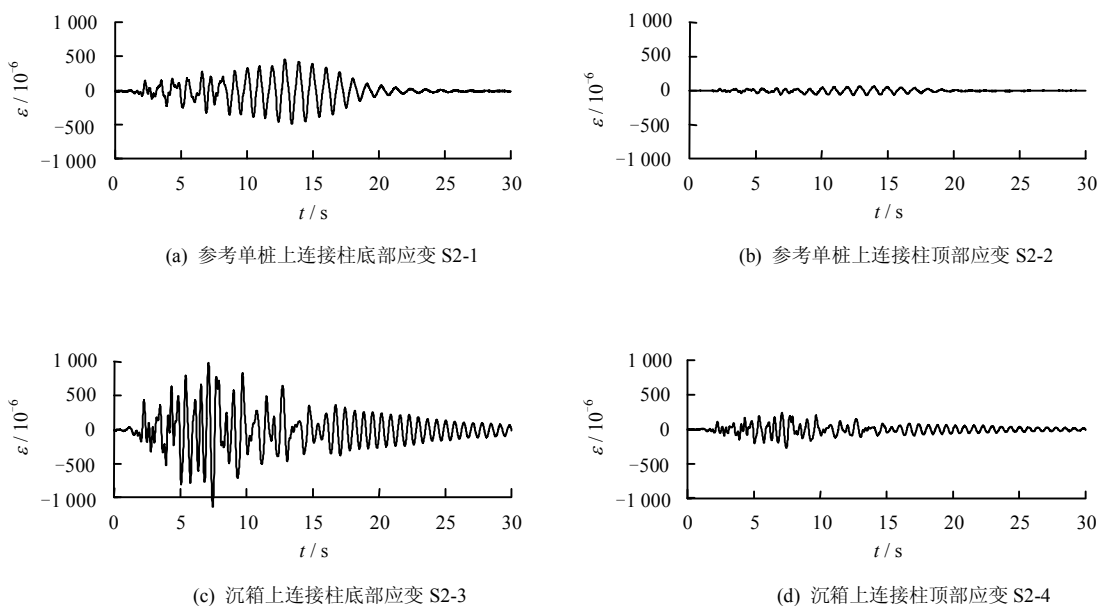


图 9 试验 2 连接柱应变响应
Fig.9 Strains at connecting column ends in test 2

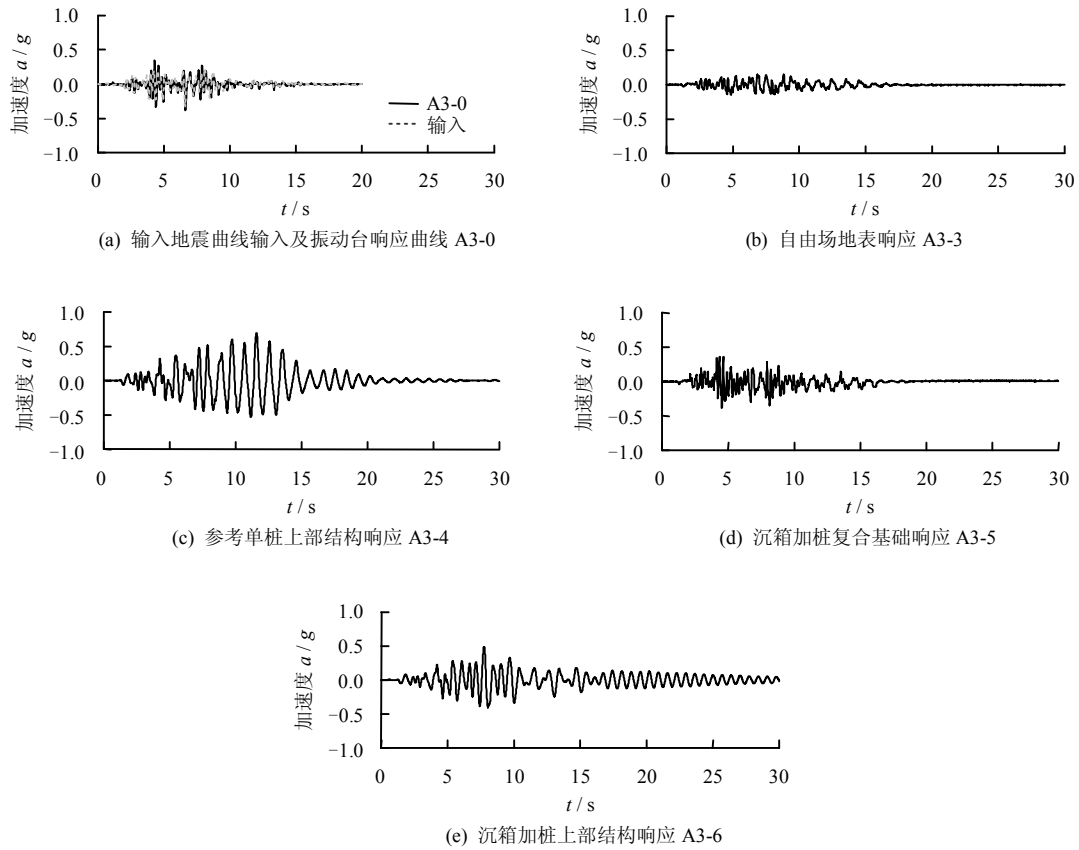


图 10 试验 3 自由场及结构加速度响应
Fig.10 Accelerations of free field and structure in test 3

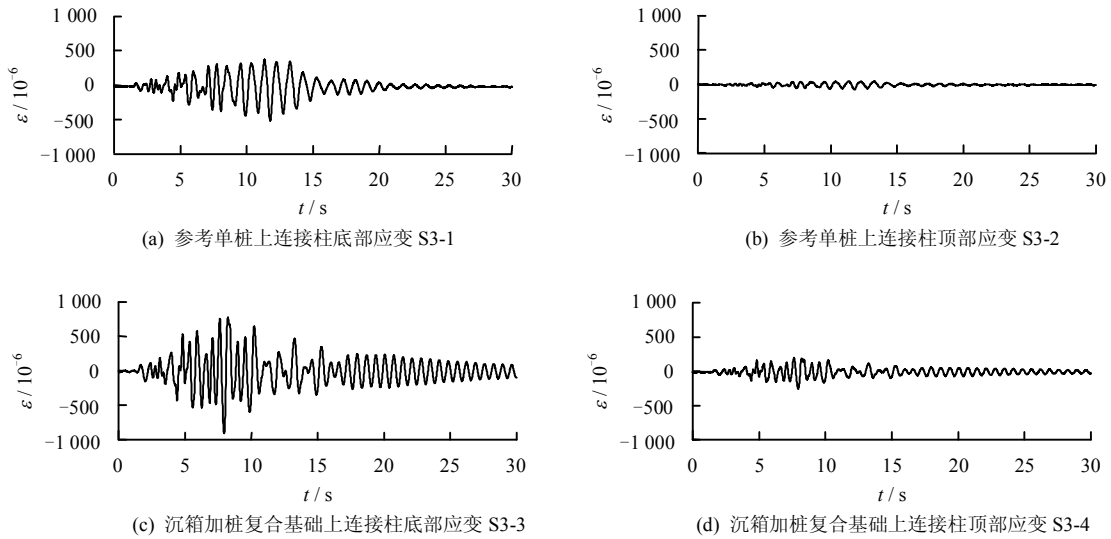


图 11 试验 3 连接柱应变响应
Fig.11 Strains at connecting column ends in test 3

表 6 试验 2 和试验 3 加速度峰值
Table 6 Peak values of accelerations in test 2 and 3

试验 2 (沉箱)		试验 3 (沉箱加桩)	
编号	峰值/g	编号	峰值/g
A2-6	0.565	A3-6	0.484
A2-5	0.428	A3-5	0.381
A2-4	0.757	A3-4	0.696
A2-3	0.156	A3-3	0.147
A2-0	0.391	A3-0	0.384

方式 (1) 显示, 在沉箱加桩复合基础 ($\alpha = 3$) 响应小于沉箱基础 ($\alpha = 2$), 但基岩响应 $A\alpha - 0$ 归一后两组试验 $A\alpha - 3$ 并未完全重合, 说明试验填土条件有略微误差。方式 (2) 以地表响应 $A\alpha - 3$ 归一, 消除了填土误差的影响, 仍可见加桩具有较好的效果。

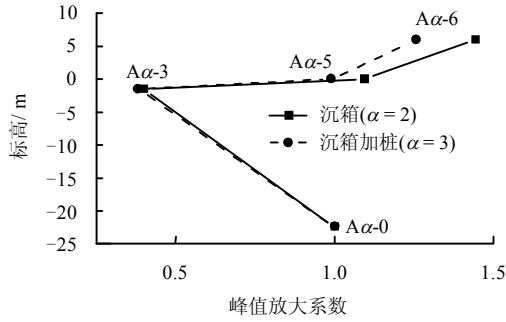


图 12 相对于基岩的加速度峰值放大系数
Fig.12 Amplifying factors of acceleration peak values relative to bedrock

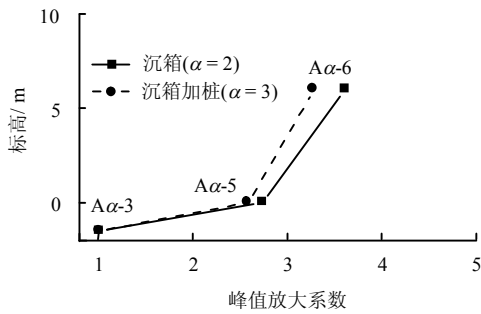


图 13 相对于地表的加速度峰值放大系数
Fig.13 Amplifying factors of acceleration peak values relative to ground surface

3.4.2 应变峰值比较

试验 2 和试验 3 中各应变峰值如表 7 及图 14 所示。与试验 2 相比，试验 3 中连接柱的应变有明显降低，尤其是实值最大的柱底加速度 Sα-3，显示出加桩的效果。

表 7 试验 2 和试验 3 应变峰值
Table 7 Peak values of strains in test 2, 3 and 4

试验 2 (沉箱)		试验 3 (沉箱加桩)	
编号	峰值/10 ⁻⁶	编号	峰值/10 ⁻⁶
S2-4	269	S3-4	255
S2-3	1 144	S3-3	913
S2-2	69	S3-2	75
S2-1	494	S3-1	513

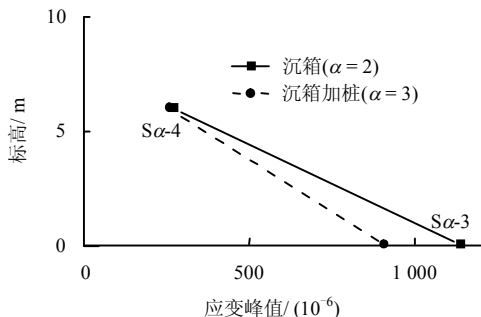
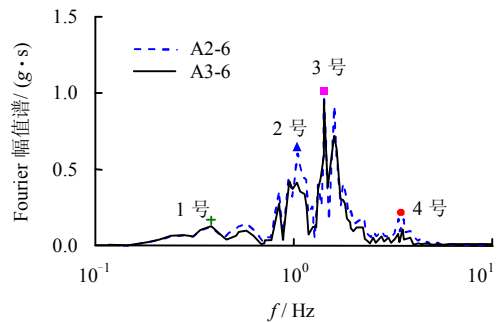


图 14 连接柱的相对应变峰值
Fig.14 Relative peak values in connecting columns

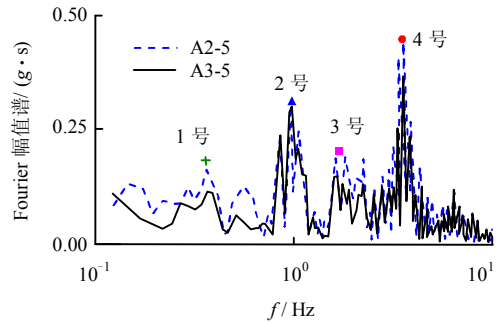
总体上，沉箱加桩后，对减小基础和结构响应有较好的贡献，因而，作为一种新型基础形式，沉箱加桩复合基础具有较好的前景。

3.5 加速度响应频率特性分析

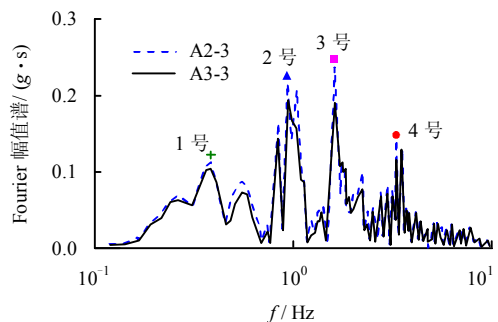
前面给出了加速度响应时程曲线，并进行了峰值比较。但仅通过时程曲线难以对地震响应特性及地震波-土-基础-结构之间的相互作用进行分析，因而本节对 3 组试验加速度响应进行频率分析，并针对输入波的 4 个峰值频率进行对比研究，如图 15 所示。



(a) 上部结构加速度 Fourier 幅值谱



(b) 基础加速度 Fourier 幅值谱



(c) 自由场表加速度 Fourier 幅值谱

图 15 试验 4 自由场及结构加速度响应

Fig.15 Accelerations of free field and structure in test 4

由图可知，不同位置的加速度响应具有不同的频率特征，且与输入地震波不同，其中蕴含以下规律：

- (1) 输入波具有 4 个峰值频率，其中以第 3、4 号最强，1、2 号为弱（见图 3），而地表加速度 Aα-3 (α=2、3) 的 2、3 号峰值较强，而 4 号峰值较弱。

这是由于地层本身自振频率近于2号峰值频率的缘故。

(2) 上部结构加速度 $A\alpha-6$ ($\alpha=2、3$) 以3号峰值为主, 说明上部结构自振频率与3号峰值频率接近。基础最大的峰值响应为4号峰值, 说明基础本身的自振频率近于4号峰值频率。

(3) 沉箱基础响应 A2-5 以4号峰值为主, 2号为辅, 而沉箱加桩复合基础响应 A3-5 中2号峰值与4号峰值近乎持平, 说明沉箱底部加桩后, 基础的自振频率特性有一定的改变, 消除了4号峰值上沉箱基础发生共振的可能性。

4 结 论

(1) 与沉箱相比, 采用沉箱加桩复合基础, 基础和结构的加速度及应变响应峰值均有一定程度的降低, 显示出加桩的积极效果, 说明了沉箱加桩复合基础具有较好的抗震性能。

(2) 上部结构加速度有很大程度的放大。但对于单桩结构来讲, 上部结构的振动特性主要体现为自身频率特性; 而对沉箱、复合基础及群桩上的上部结构, 其自振特性仅在地震后期才体现出来, 说明基础刚度的增加可有效约束结构, 避免发生危害严重的共振现象。

(3) 在地震作用下, 地表、基础、结构等不同位置的响应特征各不相同, 分别具有独特的频率特性, 这与土体、基础和结构的自振特性相关。相互作用常常发生在与各部分自振频率均相近的地震频率分量上。工程设计上基础和上部结构常常分开设计, 因而本文建议基础的设计上应避免出现与上部结构自振频率相近的情况, 以免地震时发生严重的相互作用而致使整体发生严重共振。

参 考 文 献

- [1] 中国公路学会专家委员会课题组, 广东虎门技术咨询有限公司. 同(江)三(亚)国道主干线琼州海峡跨海公路通道工程前期工作第二阶段研究报告[R]. [S. 1.]: [s. n.], 2002.
- [2] 黄茂松, 钟锐, 任青. 层状地基中沉箱加桩复合基础的水平-摇摆振动[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 790—797.
HUANG Mao-song, ZHONG Rui, REN Qing. Lateral vibration of caisson-pile composite foundation in layered soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(5): 790—797.
- [3] 王霓, 严士超. 土-群桩-结构系统动力特性及相互作用地震反应分析[J]. 建筑结构学报, 1990, 11(3): 61—80.
WANG Ni, YAN Shi-chao. Dynamic behavior and earthquake response analysis of soil-pile group-structure interaction system[J]. *China Academy of Building Research*, 1990, 11(3): 61—80.
- [4] STEWART J P, FENVES G L, SEED R B. Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical methods[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(1): 26—37.
- [5] STEWART J P, SEED R B, FENVES G L. Seismic soil-structure interaction in buildings. II: Empirical findings[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(1): 38—48.
- [6] MYLONAKIS G, NIKOLAOU S, GAZETAS G. Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006, 26(9): 824—853.
- [7] MYLONAKIS G, NIKOLAOU A, GAZETAS G. Soil-pile-bridge seismic interaction: Kinematic and inertial effects. Part 1: Soft soil[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1997, 26(3): 337—359.
- [8] TSIGGINOS C, GEROLYMOS N, ASSIMAKI D, et al. Seismic response of bridge pier on rigid caisson foundation in soil stratum[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2008, 7(1): 33—44.
- [9] JEREMIĆ B, KUNNATH S, XIONG F. Influence of soil-foundation-structure interaction on seismic response of the I-880 viaduct[J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(3): 391—402.
- [10] JEREMIĆ B, JIE G Z, PREISIG M, et al. Time domain simulation of soil-foundation-structure interaction in non-uniform soils[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2009, 38(5): 699—718.
- [11] GUIN J, BANERJEE P K. Coupled soil-pile-structure interaction analysis under seismic excitation[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124(4): 434—444.
- [12] CHAU K T, SHEN C Y, GUO X. Nonlinear seismic soil-pile-structure interactions: Shaking table tests and FEM analyses[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(2): 300—310.
- [13] CURRAS C J, BOULANGER R W, KUTTER B L, et al. Dynamic experiments and analyses of a pile-group-supported structure[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(7): 585—596.
- [14] BOULANGER R W, CURRAS C J, KUTTER B L, et al. Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(9): 750—759.
- [15] WILSON D W. Soil-pile-superstructure interaction in liquefying sand and soft clay[D]. Davis: University of California, Davis. 1998.