

DOI: 10.11779/CJGE201912001

液化场地—群桩基础—结构体系动力响应分析 ——大型振动台模型试验研究

许成顺¹, 豆鹏飞¹, 杜修力^{*1}, 陈 苏², 李 霞³

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;
3. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

摘 要: 进行了液化场地—结构体系动力相互作用大型振动台试验, 对土体和桩基的加速度反应、饱和砂土层的孔压反应等进行了测试。重点阐述了土体和群桩基础的加速度地震响应特征和饱和土体的孔压发展规律, 并对土体侧向变形规律进行了分析。试验研究结果表明: 0.05g 拍波输入时, 土体和桩基对加速度反应有着明显放大作用, 土体各处孔压比增长幅度不大, 土体侧向位移较小; 0.3g 汶川地震卧龙台地震记录输入时, 桩基加速度反应规律与土体反应基本一致, 土体孔压比增长明显, 上部土体完全液化; 土体水平侧向变形较大。本文成果可为液化场地—群桩基础动力相互作用研究做对比分析和验证数值模拟工作提供参考。

关键词: 液化; 群桩基础; 振动台试验; 动力响应; 孔压比

中图分类号: TU411.93

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)12-2173-09

作者简介: 许成顺(1977—), 女, 博士, 教授, 主要从事土动力学及地下结构抗震方面的科研工作。E-mail: xuchengshun@bjut.edu.cn。

Dynamic response analysis of liquefied site-pile group foundation-structure system —large-scale shaking table model test

XU Cheng-shun¹, DOU Peng-fei¹, DU Xiu-li¹, CHEN Su², LI Xia³

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China; 3. Beijing Urban Construction Design Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: In this large-scale shaking table model test, the acceleration responses of soil and structures and pore water pressures and other signals are measured. The seismic responses of soil and pile group foundations, the development of pore water pressure of liquefiable soil are introduced, and the lateral deformation of soil is analyzed. The results show that when 0.05g beat wave is input, the acceleration responses of soil and pile foundation are enlarged obviously, and the pore pressure ratio increases slightly throughout the soil. Besides, the lateral displacements of soil are small. When 0.3g Wenchuan Earthquake seismic record is input, the law of acceleration response of pile foundation is basically the same as that of soil. The pore pressures rise rapidly and the soil has been liquefied, and lateral displacements of soil are large. The results of this paper are dynamic response of liquefied non-free site test in a series of large-scale shaking table tests on soil-pile group-superstructure system. The results can be used for comparative analysis and verification of numerical simulation in the future.

Key words: liquefaction; pile group foundation; shaking table test; seismic response; pore pressure ratio

0 引 言

桩基是目前世界上广泛采用的一种深基础类型, 如今桩基础也成为高层建筑、桥梁工程、海上平台、大型厂房等重要工程中最常用的基础形式^[1]。在历次大地震中由于场地液化引起的桩基破坏造成了大量建筑物倒塌、损坏。国内外众多学者在桩基的理论分析、数值计算以及模型试验方面开展了大量研究工作^[2-19]。

国外学者 Liyanapathirana 等^[2-3]、Novak 等^[4]、Naggar 等^[5]、Matlock^[6]、Reese 等^[7]和国内学者黄茂松等^[8]、唐亮^[9]、胡育佳等^[10]、王建华等^[11]在连续介质力学分

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51578026); 国家自然科学基金优秀青年基金项目(51722801); 国家自然科学基金创新研究群体项目(51421005)

收稿日期: 2018-04-08

*通讯作者(E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn)

析方法与广义 Winkler 地基梁模型等桩基非线性动力学特性研究以及有关桩-土动力相互作用的数值模拟研究方面取得了许多成果。模型试验是桩基力学特性研究的重要方法,大型振动台试验技术是桩基地震响应动力特征研究的一种有效手段,受到国内外土木工程学术界的极大关注。

国内外学者 Motamed 等^[12, 14-15]、Tabata 等^[13]、Haeri 等^[16]、吕西林等^[17]、凌贤长等^[18]、Tang 等^[19]近几年来利用大型地震模拟振动台试验技术对动力荷载下桩基力学特性相关问题进行了大量研究工作,在桩-土动力相互作用试验研究方面得到了许多有益的结论。

Motamed 等^[12, 14-15]、Tabata 等^[13]于 2006 年利用世界上最大的振动台 Edefense(台面尺寸 20 m×15 m)地震模拟试验装置开展了两组针对液化场地发生侧向滑动时码头岸壁桩基动力破坏特征的大型振动台试验,再现了码头岸壁后的可液化场地发生侧向滑动时桩基的实际震害现象。Haeri 等^[16]采用矩形刚性土箱开展了一组研究桩基在液化引起的侧向大变形场地中地震响应的大型振动台试验,研究单桩和群桩基础在发生液化大变形时的反应规律和破坏机理。吕西林等^[17]开展了结构-地基动力相互作用体系的振动台模型试验,探讨了不同土性条件下的结构-地基动力相互作用效果及规律,结果表明在不同地基土性条件下,结构-地基动力相互作用具有相似的规律。凌贤长等^[18]、Tang 等^[19]开展了以 1976 年唐山地震中倒塌的胜利桥为原型的 1:10 模型液化场地桩-土-桥梁结构动力相互作用大型振动台模型试验,再现了自然地震触发地基砂土液化的各种主要宏观震害现象,分析了非自由场地条件下震害特点和规律。

且在已有的振动台试验研究中,液化场地一般只由黏土覆盖层以及饱和砂土层构成,对于含有饱和砂土层的多层土地基中土层交界处有可能发生的错动、滑移等及其对桩基础的产生影响研究较少;且以往的试验将桩基悬置于饱和砂土层中或直接铰接在模型箱体底部,缺乏对可液化场地条件下嵌固在密实土层中的桩基动力反应研究。

为了系统研究土-结构动力相互作用,本文介绍系列试验中液化场地-群桩基础-上部结构动力体系振动台试验的主要试验结果。液化场地-群桩基础-上部结构动力体系中可液化场地为含有饱和砂土层、密砂嵌固层等成层土地基,上部结构简化为两层集中质量的模型,桩基为 2×2 群桩基础,桩端嵌固在密实砂土层中。试验主要获取了土体加速度和孔压、桩基加速度和变形、土体水平位移和沉降、上部结构加速度等试验数据。由于篇幅有限,本文重点分析场地动力响应

及桩基加速度反应规律,为研究基础结构的存在对饱和砂土地震反应的影响等提供了对比资料。

1 试验介绍

1.1 振动台系统

模型试验依托中国建筑科学研究院大型地震模拟振动台系统开展,该地震模拟振动台采用美国 MTS 公司的电液伺服加载与控制系统,其主要技术参数:振动台台面尺寸为 6 m×6 m,工作频率为 0.1~50 Hz,最大负荷为 80 t,标准负荷为 60 t,其为目前国内投入使用的几何尺寸最大、承载能力最高、技术最先进的三向六自由度大型模拟地震振动台之一。

1.2 层状剪切模型土箱

根据中国建筑科学研究院抗震实验室地震模拟振动台的相关技术性能指标及此次可液化场地地震响应振动台试验目的,本次模型试验采用中国建筑科学院研究院地基研究所设计研制的单向层状剪切模型箱。层状剪切模型箱的尺寸:长 3.2 m,宽 2.4 m,高 2.2 m,模型箱内填土高度为 2 m。为防止试验时土或水的渗漏,试验土箱内壁贴厚度为 2 mm 预制的橡胶模,组装完成的层状剪切模型土箱如图 1 所示。试验前,利用白噪声对模型箱进行扫频,箱体自振频率为 0.85 Hz。



图 1 模型体系整体实景图

Fig. 1 Photo of shaking table model test system

1.3 模型结构与模型地基设计制作

模型桩基为由嵌固于承台中的 4 根桩组成的 2×2 群桩基础,其尺寸:桩长 1750 mm,桩身直径 100 mm,伸入密砂层的长度为 400 mm(4 倍桩径)。桩基嵌固于承台内长度为 50 mm,模型承台尺寸:长 800 mm,宽 800 mm,高 250 mm。桩基模型的材料主要由微粒混凝土、钢筋和镀锌铁丝网组成。测定微粒混凝土试块的抗压强度为 17.1 MPa,其弹性模量为 15340 MPa。承台采用钢筋混凝土结构。上部结构为高度 3 m 的两层集中质量模型,每层配重 410 kg。试验中根据第一次白噪声扫频结果可知上部结构自振频率为 1.33 Hz。整体模型体系实景图如图 1 所示。

本次试验使用阵列式位移计 (SAA) 进行整个土体的主要加速度信号测试^[21], 模型地基设计与传感器布设如图 2 所示。

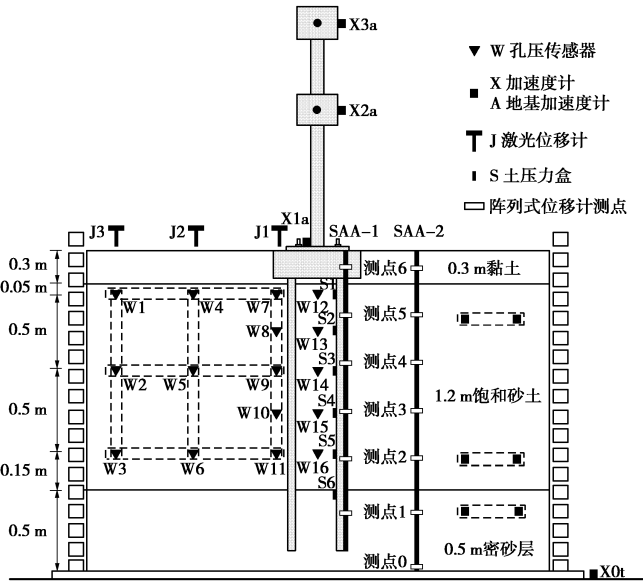


图 2 振动台试验传感器布置图
Fig. 2 Layout of shaking table tests

为保证模型地基土层与实际场地土层分布较好吻合, 模型地基土层自下而上由 0.5 m 密实砂土层、1.2 m 饱和砂土层 (可液化土层)、0.3 m 黏土覆盖层构成。饱和砂土层采用改进的水沉法制备。饱和砂土层制备完毕后静置 6 h, 在砂土表面铺 30 cm 黏土层作为覆盖层, 静置一段时间。最终水位线与黏土层表面齐平。砂土颗粒级配表如图 3 所示。

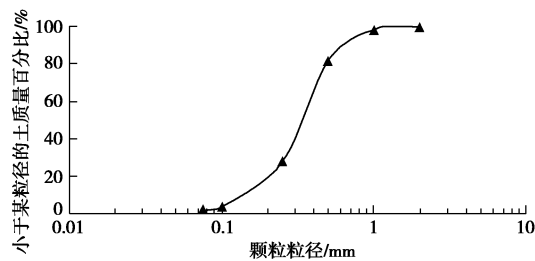


图 3 试验用砂颗粒级配曲线
Fig. 3 Grain-size distribution curve of test sand

1.4 试验加载方案

本次试验选用白噪声、正弦拍波与汶川地震卧龙

台地震记录作为输入地震动。输入白噪声以获取模型体系的自振频率与阻尼比等动力特性; 正弦拍波为波形规整的地震动 (加速度时程曲线见图 4), 对模型体系小震反应进行研究, 其频率为根据白噪声扫频结果得到的模型地基第一阶自振频率; 汶川地震卧龙台地震记录为本次试验主要输入地震动, 峰值为 0.3g (加速度时程曲线与傅里叶谱见图 5), 试验加载方案如表 1 所示。

表 1 试验加载工况表

Table 1 Loading events			
工况 序号	地震动	激励 方向	输入地震动 PGA/g
1	第一次白噪声扫频	X	0.05
2	正弦拍波	X	0.05
3	汶川地震卧龙台地 震记录	X	0.3
4	第二次白噪声扫频	X	0.05

2 试验结果分析

2.1 非自由场模型体系的自振频率和阻尼比

根据非自由场试验工况安排, 在试验的不同加载阶段中采用幅值为 0.05g 的白噪声对模型体系进行扫频, 利用加速度传感器 X0t 与 A3 计算模型体系的自振频率和阻尼比, 其中对非自由场模型体系两次扫频的自振频率和阻尼比如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 第二次白噪声扫频 (试验前扫频) 所得模型体系自振频率与第一次白噪声扫频 (试验后扫频) 时所得自振频率相比降低 0.59 Hz, 而阻尼比在地震动输入结束后有所增大。

表 2 模型体系动力特性

Table 2 Dynamic characteristics of model system		
加载工况	自振频率/Hz	阻尼比/%
第一次白噪声扫频	5.43	3.9
第二次白噪声扫频	4.84	4.2

2.2 宏观现象分析

图 6 中给出了试验前、0.3g 汶川地震卧龙台地震记录 (工况 3) 输入结束时土体表面情况。试验过程中, 0.05g 正弦拍波输入时 (工况 2), 结构振动幅度小, 无出水现象, 承台和上部结构也无明显倾斜; 从图 5 中可以发现: 0.3g 汶川地震卧龙台地震记录输入

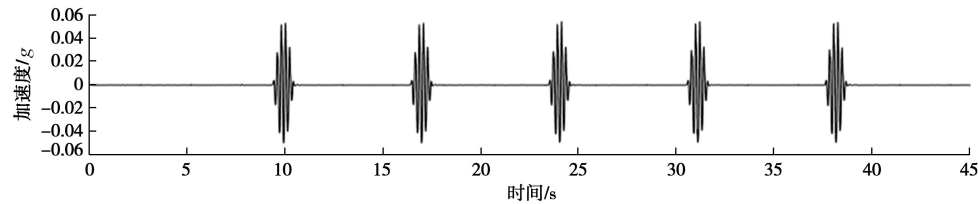


图 4 正弦拍波加速度时程曲线
Fig. 4 Time-history curve of acceleration of sine beat wave

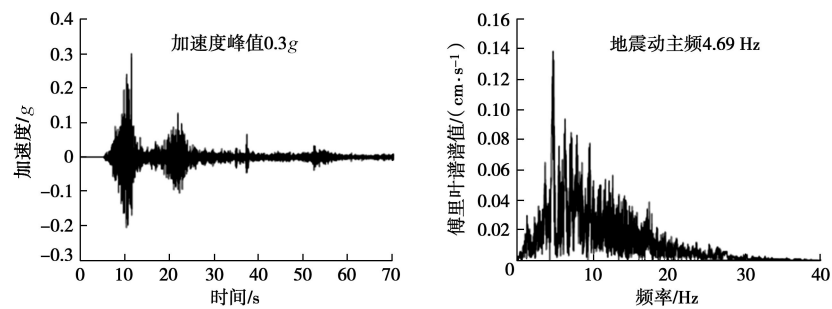


图5 汶川地震卧龙台地震记录加速度时程曲线与傅里叶谱

Fig. 5 Time-history curves of acceleration and Fourier spectra of Wenchuan Earthquake record

后（工况3），土体表面出现大量积水，也出现“喷砂”现象，说明饱和砂土发生液化。同时可以看出大震过后，承台和上部结构发生明显的倾斜。

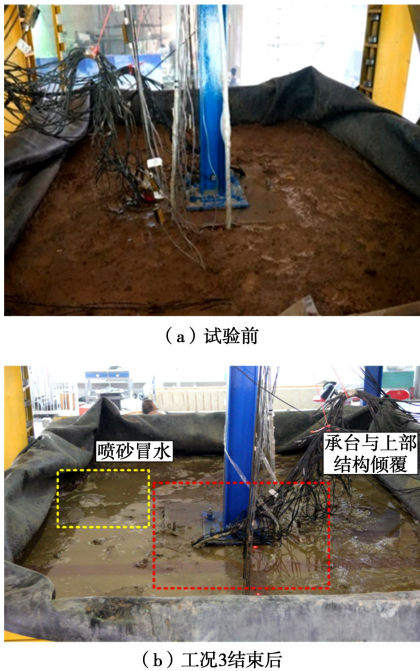


图6 试验前以及工况3结束后土体表面情况

Fig. 6 Soil surface condition before test, and water accumulation after Condition 3

2.3 场地与桩基加速度反应分析

本次试验中埋设两根阵列式位移计（SAA1 与 SAA2）测试桩基、承台与土体中的加速度反应。其中

SAA1-1 至 SAA1-5 为桩基上测点，SAA1-6 为承台中测点，SAA2-1 至 SAA2-6 为土体中测点。表3 为各个测点处加速度峰值。图7，8 为 0.3g 汶川地震卧龙台地震记录输入时桩基、承台与土体加速度测点时程曲线与相应的反应谱。

从表3 及图7 中可看出：0.05g 拍波输入时，加速度反应沿桩身向上不断放大，桩顶加速度峰值（测点 SAA1-5）约为桩端（测点 SAA1-1）的 2.5 倍；0.3g 汶川地震卧龙台地震记录输入时，桩基加速度反应表现为：整体上看，桩基除最下部测点外的各处测点加速度峰值均小于基底输入的地震动加速度峰值；桩基加速度反应在饱和砂土层中下部（对应桩基测点 SAA1-2、SAA1-3）有着明显减小，靠近桩顶处，桩基嵌固于承台中，桩顶处和承台加速度反应由于上部结构动力反馈而又有增大至 0.25g 以上，桩基中加速度反应为桩顶处与桩身下部较大、桩身中部较小。

从表5 和图8 中可看出：由于密砂层密实度较高，地震动在密砂层中的传播近似在刚体中传播，因此密砂层中加速度测点（SAA2-1）测得的加速度峰值和基底输入地震动接近。输入 0.05g 拍波时，土体中除密砂层外，加速度峰值自下而上不断增大，在饱和砂土层与黏土层对加速度表现出明显的放大效应，饱和砂土层最上部测得的加速度峰值约为基底输入加速度峰值的两倍；黏土层中测得的加速度峰值最大，达到 0.118g。

表3 SAA-1 各个测点测得加速度峰值

Table 3 Peak values of acceleration at every point

桩基与承台加速度峰值			土体加速度峰值		
测点序号	0.05g 正弦拍波/g	0.3g 汶川地震卧龙台地震记录/g	测点序号	0.05g 正弦拍波/g	0.3g 汶川地震卧龙台地震记录/g
SAA1-6	0.079	0.259	SAA2-6	0.118	0.222
SAA1-5	0.104	0.255	SAA2-5	0.109	0.227
SAA1-4	0.096	0.255	SAA2-4	0.071	0.169
SAA1-3	0.070	0.189	SAA2-3	0.056	0.203
SAA1-2	0.052	0.205	SAA2-2	0.047	0.254
SAA1-1	0.037	0.322	SAA2-1	0.051	0.262

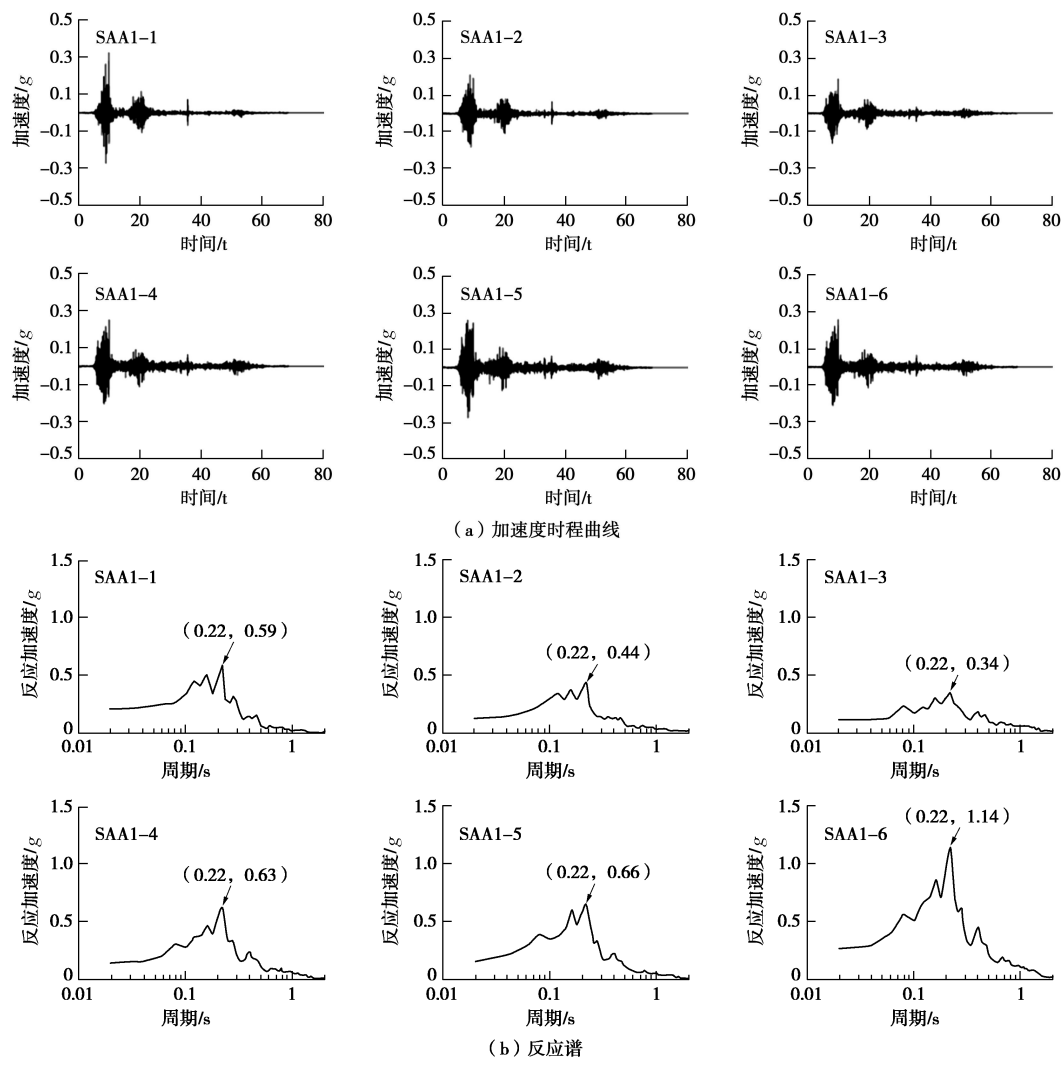
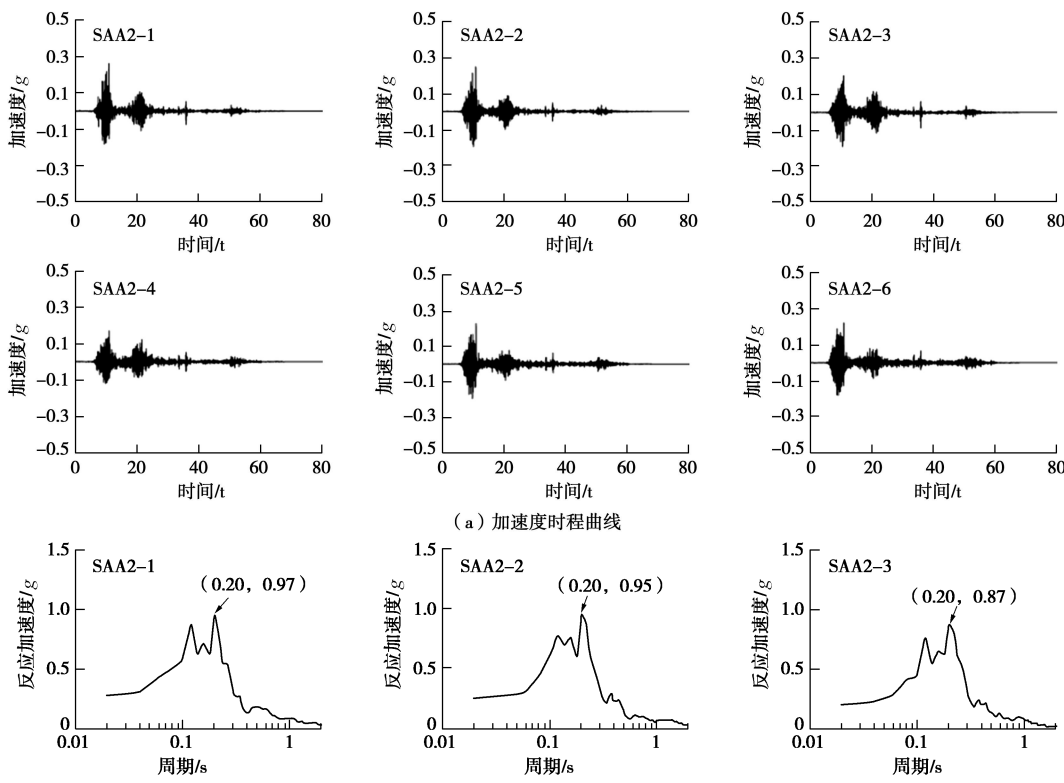


图 7 0.3g 汶川地震卧龙台地震记录激励时桩基及承台加速度反应时程曲线与反应谱

Fig. 7 Time-history curves of acceleration response of pile and pile caps for Wenchuan Earthquake seismic record



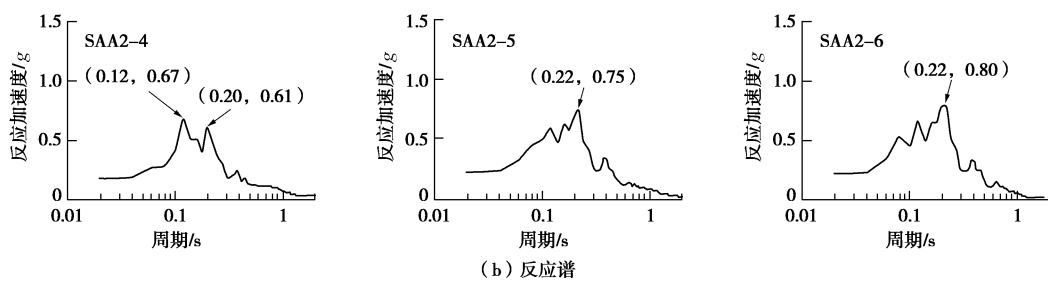


图 8 0.3g 汶川地震卧龙台地震记录激励时土体加速度反应时程曲线与反应谱

Fig. 8 Time-history curves of acceleration response in site for Wenchuan Earthquake seismic record

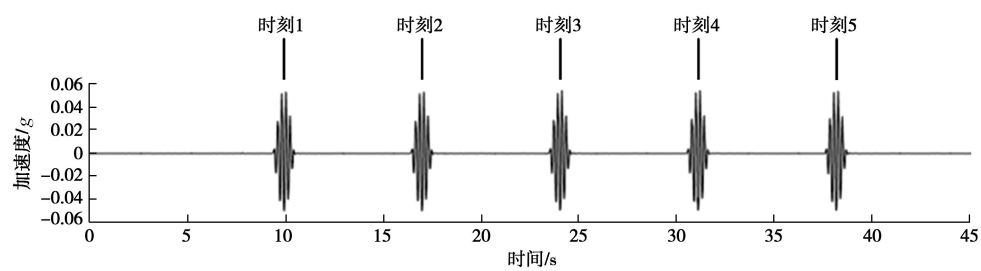


图 9 0.05g 正弦拍波输入时刻分布

Fig. 9 Distribution of time points when inputting sine beat wave

从图 8 中可以看出，由于饱和砂土层土体发生液化(见下文孔压反应分析)，因此在 SAA2-2 至 SAA2-4 测点反应谱中土体卓越周期对应的加速度动力反应会不断减小，而在靠近上部完全液化的饱和砂土的土体中各测点（SAA2-4 至 SAA2-6）对应反应加速度反而有所增大，这是由于承台与桩基加速度在此处反应增大，附近的饱和砂土受到其振动的影响。

3 孔压反应分析

3.1 孔压峰值分布与发展云图

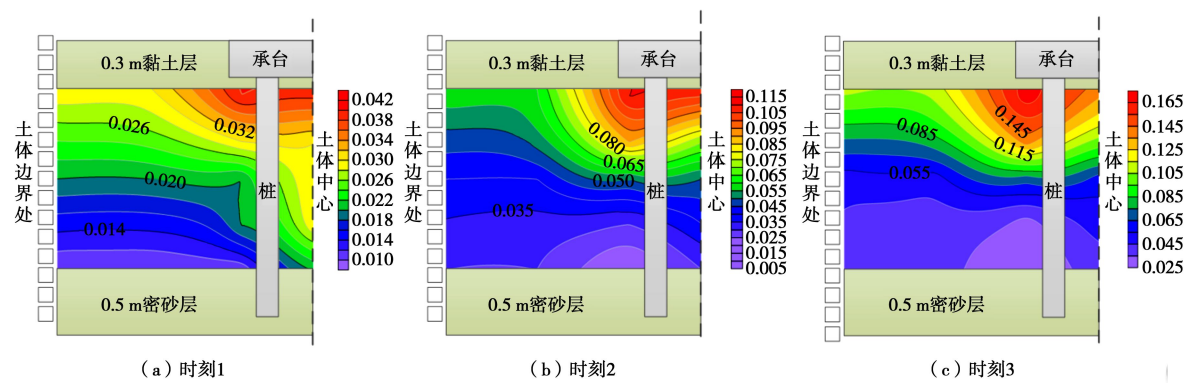
图 9, 11 分别定义了 0.05g 拍波输入时的 5 个峰值点和 0.3g 汶川地震卧龙台地震记录输入时 3 个主要峰值点所对应的时刻。图 10 和图 12 分别为 0.05g 正弦拍波输入时及 0.3g 汶川地震卧龙台地震记录输入时，相应各个时刻的孔压比分布云图。

从图 9, 10 中可以看出：0.05g 正弦拍波输入时，各个测点孔压比峰值较小，同深度的地基土中相应的

孔压比峰值基本相等；最上层各孔压测点孔压比均小于 0.3，这说明土体未发生液化。在饱和砂土层上部，因为上覆荷载较大，承台正下部各个测点孔压比峰值与桩基外侧的同深度孔压比峰值相比，普遍偏小。

整体输入过程中看，桩顶位置附近孔压积累明显，桩基顶部附近孔压比大于远离桩基的土体孔压比，从振动脉冲的逐次输入后孔压发展来看，承台边缘下部孔压比要大于承台正下方土体孔压比；第五个振动脉冲输入后各测点孔压比达到峰值；拍波输入完毕 40 s 后，各处孔压比均有所消散。

根据图 12 可看出，0.3g 汶川地震卧龙台地震记录输入时，时刻 1 桩顶位置附近孔压积累明显，孔压比较大，桩基顶部、承台边缘下方孔压比大于远离桩基的土体孔压比，而桩基中下部附近孔压比明显小于远离桩基的自由场土体孔压比；整体输入过程中看，时刻 1 处加速度幅值最大，但大部分测点孔压比却未达到峰值，而在时刻 2 土体整体孔压比基本达到最大值。



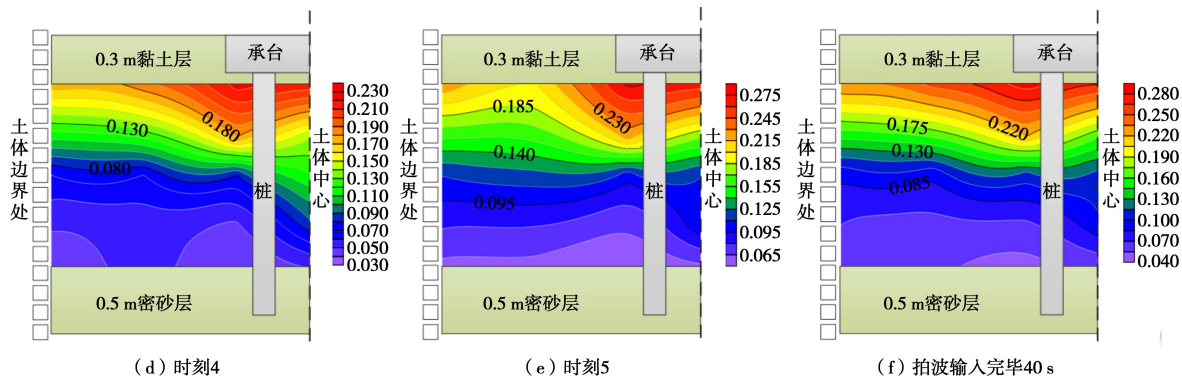


图 10 0.05g 拍波输入时对应各时刻孔压比发展趋势云图

Fig. 10 Distribution of peak pore pressure at each time point

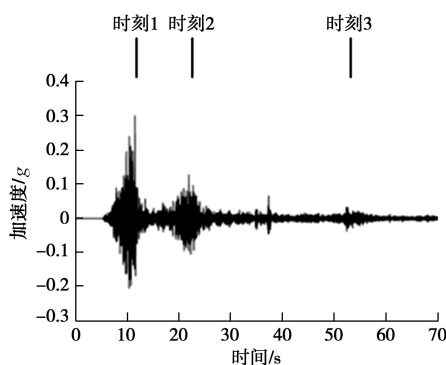
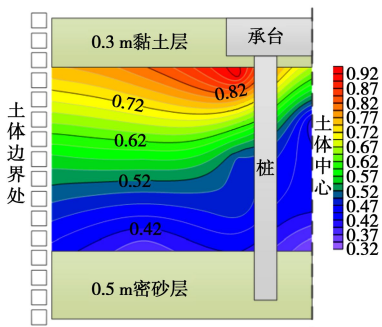
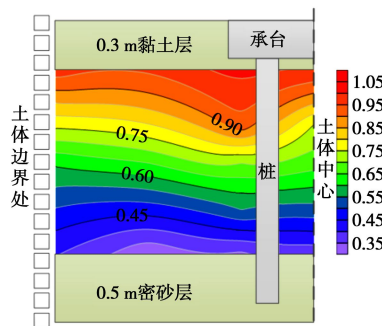


图 11 0.3g 汶川卧龙台地震记录输入时刻分布

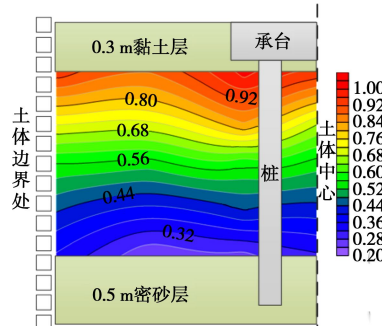
Fig. 11 Distribution of time points when inputting Wenchuan Earthquake seismic record



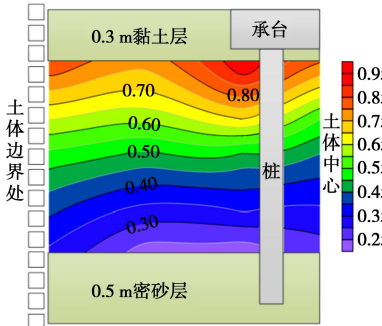
(a) 时刻1



(b) 时刻2



(c) 时刻3



(d) 0.3g输入完毕时

图 12 0.3g 汶川地震卧龙地震记录输入时孔压比发展趋势云图

Fig. 12 Distribution of peak pore pressure at each time point

3.2 土体侧向位移

本次系列试验中,采用阵列式位移计(SAA)测试土体侧向位移和桩基变形,阵列式位移计的测试原理在自由场试验相关文章中已经作介绍。本文中给出了各个工况输入下的土体位移时程曲线(桩基变形等相关内容将于其他文章中再作阐述)。

SAA-2 为土体埋置的阵列式位移计。图 13, 14 给出了 0.05g 拍波输入时以及 0.3g 汶川地震卧龙台地震记录输入时 SAA-2 测得的土体位移时程曲线。

从图 13 中可以看出,0.05g 正弦拍波输入时,不同深度处的土体侧向位移均较小,最下部土体位移(SAA2-1 测点)最小;土体侧向位移最大处发生在黏土层中(SAA2-6 测点);饱和砂土层中的 4 个测点

(SAA2-2 至 SAA2-5) 测得的土体位移均在 4 mm 左右。

和砂土层中 (SAA2-3)。

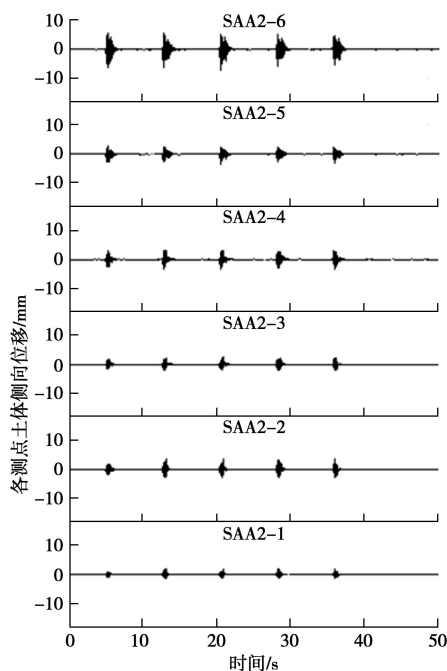


图 13 0.05g 拍波输入时土体水平位移

Fig. 13 Time-history curves of horizontal displacement of soil for 0.05g sine beat wave

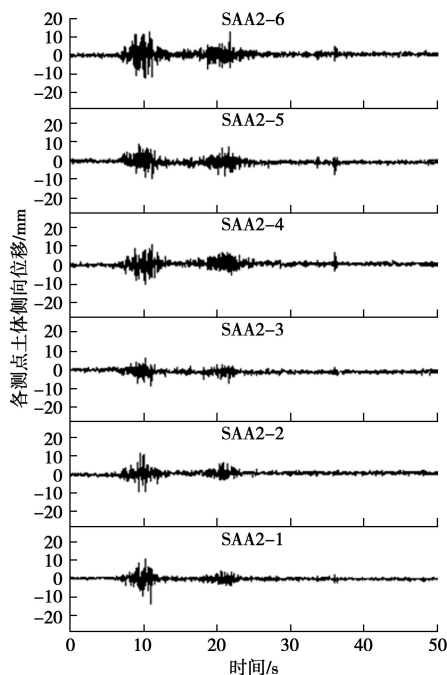


图 14 0.3g 汶川地震卧龙台地震记录输入时土体水平位移
Fig. 14 Time-history curves of horizontal displacement of soil for Wenchuan Earthquake seismic record

从图 14 中可以看出, 0.3g 汶川地震卧龙台地震记录输入时, 土体侧向位移明显比 0.05g 正弦拍波输入时要大, 所有测点测得土体位移均超过 9 mm。黏土层中土体位移比下部土层中各个测点测得土体位移稍大, 达到 13 mm; 试验中测得土体位移最小处位于饱

4 结 论

通过开展本次液化场地-群桩基础-上部结构动力相互作用大型振动台试验, 分析了含一定厚度饱和砂土层的液化非自由场地震响应特征和孔压比发展与分布变化规律, 探讨了桩基与土体加速度的分布特征。具体结论如下:

(1) 输入 0.05g 拍波时, 土体和桩基均处于弱非线性反应阶段, 对加速度反应表现出明显的放大效应; 0.3g 汶川地震卧龙台地震记录输入时, 各测点处土体加速度峰值均小于基底输入加速度峰值, 土体和桩基加速度反应均呈先减小后增大的趋势。

(2) 0.05g 正弦拍波输入时, 各个测点孔压比峰值较小, 孔压比时程曲线均呈“阶梯式”增长, 在桩顶位置处孔压积累明显; 0.3g 汶川地震卧龙台地震记录输入时, 土体发生液化, 桩基顶部附近孔压比大于远离桩基的自由场土体孔压比; 而桩基中下部附近孔压比明显小于远离桩基的自由场土体孔压比。

(3) 0.05g 拍波输入时, 黏土层中土体侧向位移明显大于下部各个测点土体位移, 饱和砂土层中土体位移相接近; 0.3g 汶川地震卧龙台地震记录输入时, 饱和砂土层中土体侧向位移均超过 9 mm, 黏土层中土体侧向位移稍大。

参考文献:

[1] 程昌钧, 胡育佳, 朱媛媛, 等. 桩基的数学建模、理论分析与计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1 - 3. (CHENG Chang-jun, HU Yu-jia, ZHU Yuan-yuan, et al. Mathematical modeling, theoretical analysis and calculation method of pile foundation[M]. Beijing: Science Press, 2009: 1 - 3. (in Chinese))

[2] LIYANAPATHIRANA D S, POULOS H G. Seismic lateral response of piles in liquefying soil[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2005, 131: 1466 - 1479.

[3] LIYANAPATHIRANA D S, POULOS H G. Behavior of pile groups in liquefying soil[C]// Proceedings of GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age. Reston, Virginia, USA: ASCE Press, 2006: 1 - 6.

[4] NOVAK M, EI SHARNOUBY B. Stiffness constants of single piles[J]. J Eng, 1983, 109(7): 961 - 974.

[5] EL NAGGAR M H, NOVAK M. Nonlinear analysis for dynamic lateral pile response[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1996, 15(4): 233 - 244.

- [6] MATLOCK H. Correlation for design of lateral loaded piles in soft clay[C]// Proceedings of the 2nd Offshore Technology in Civil Engineering. Reston, Virginia, USA, 1970: 577 - 594.
- [7] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay[C]// Proceedings of the 7th Offshore Technology in Civil Engineering. Reston, Virginia, USA, 1997: 245 - 256.
- [8] 黄茂松, 吴志明, 任青, 等. 层状地基中群桩的水平振动特性[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(1): 32 - 38. (HUANG Mao-song, WU Zhi-ming, REN Qing, et al. Lateral vibration of pile groups in layered soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(1): 32 - 38. (in Chinese))
- [9] 唐亮. 液化场地桩-土动力相互作用 $p-y$ 曲线模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. (TANG Liang. $p-y$ model of dynamic pile-soil interaction in liquefying ground[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese))
- [10] HU Yu-jia, ZHU Yuan-yuan, CHENG Chang-jun, et al. EFGM for nonlinear mechanical behaviors of single pile and pile group[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Nonlinear Mechanics. Shanghai: Shanghai University Press, 2007: 429 - 437.
- [11] 王建华, 陆建飞. 层状地基中考虑固结和流变的垂直单桩的理论分析[J]. 水利学报, 2001, **32**(4): 57 - 61. (WANG Jian-hua, LU Jian-fei. Theoretical study on single pile in layered saturated soil considering the consolidation and theology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, **32**(4): 57 - 61. (in Chinese))
- [12] MOTAMED R, TOWHATA I, HONDA T. Pile group response to liquefaction-induced lateral spreading: E-defense large shake table test[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, **51**(3): 35 - 46.
- [13] TABATA K, SATO M. E-defense shaking table test on the behavior of liquefaction-induced lateral spreading of large-scale model ground with a pile-foundation structure behind quay wall[C]// International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 2010: 1 - 6.
- [14] MOTAMED R, TOWHATA I, HONDA T, et al. Behavior of pile group behind a sheet pile quay wall subjected to liquefaction-induced large ground deformation observed in shaking test in E-defense project[J]. Soils and Foundations, 2009, **49**(3): 459 - 475.
- [15] MOTAMED R, TOWHATA I, TOWHATA I. Shaking table tests on pile groups behind quay wall model undergoing lateral spreading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2010, **136**(3): 477 - 489.
- [16] HAERI S M, KAVAND A, RAHMANI I, et al. Response of a group of piles to liquefaction-induced lateral spreading by large scale shake table testing[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, **38**: 25 - 45.
- [17] 吕西林, 陈跃庆, 陈波, 等. 结构-地基动力相互作用体系振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, **20**(4): 20 - 29. (LÜ Xi-lin, CHEN Yue-qing, CHEN Bo, et al. Shaking table testing of dynamic soil-structure interaction system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, **20**(4): 20 - 29. (in Chinese))
- [18] LING Xian-zhang, GAO Xia, TANG Liang, et al. Effect of shaking intensity on interactive behavior of soil-pile group foundations in liquefiable soil during shaking table tests[C]// International Efforts in Lifeline Earthquake Engineering, 2013: 616 - 623.
- [19] TANG Liang, LING Xian-zhang, XU Peng-ju, et al. Shake table test of soil-pile groups-bridge structure interaction in liquefiable ground[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, **9**(1): 39 - 50.
- [20] 倪克闯. 成层土中桩基与复合地基地震作用下工作性状振动台试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2013. (NI Ke-chuang. Shaking table test of pile and composite foundations' dynamic behavior in layered soils subjected to earthquake excitation[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2013. (in Chinese))
- [21] BENNETT V, ZEGHAL M, ABDOUN T, et al. Wireless shape-acceleration array system for local identification of soil and soil structure systems[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2007: 60 - 66.