可液化场地桩基桥梁结构地震响应振动台试验

徐鹏举,凌贤长,唐 亮,高 霞,张勇强,胡庆立

(哈尔滨工业大学 土木工程学院,哈尔滨 150090,hit_tl@163.com)

摘 要: 实施了可液化场地桩-土-桥梁结构地震相互作用振动台试验,研究桩基桥梁结构地震响应特征.试验再现了自然地震触发场地液化与结构破坏的主要宏观现象.小震输入下,地基动力反应较小,孔压在输入波峰值到达后几秒内达到峰值,并很快进入消散阶段,近桩区与远桩区峰值孔压差别很小,砂层上部轻微液化;桩-柱墩表现为弹性动力变形,地基对桩地震反应约束效应较大,桩在砂层中动应变大于粘土层中动应变;由于上覆粘土层对桩的嵌固与墩顶配重惯性力的共同作用,致使桩在上覆粘土层中动应变远大于柱墩动应变.大震输入下,砂层很快全部液化且发生强烈剪切流动,孔压在输入波峰值到达瞬间增大,而后缓慢上升至峰值,消散也很慢,近桩区峰值孔压远大于远桩区峰值孔压;墩顶配重产生较大惯性力作用,加之砂层全部强烈液化使得桩-柱墩动力反应十分强烈,导致桩上部嵌固点发生大幅度上移,且在砂层与上覆粘土层过渡带附近出现大范围破裂、在粘土层中折断.

关键词: 可液化场地;桩基础;桥梁结构;地震响应;振动台试验

中图分类号: U473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)08-1189-05

Shake table test for seismic response of pile foundation and bridge structure in liquefiable ground

XU Peng-ju, LING Xian-zhang, TANG Liang, GAO Xia, ZHANG Yong-qiang, HU Qing-li

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, hit_tl@163.com)

Abstract: The shake table test for studying the pile-soil-structure seismic interaction in liquefiable ground was carried out, and the characteristics of seismic response of the structure were investigated. Results show that under small seismic input, the dynamic response of foundation is relatively small, while the pore pressure reaches its peak within several seconds after the peak input acceleration time and then, almost immediately, begins to dissipate. Slight liquefaction occurs in the upper sand layer, and the difference of peak pore pressure between far-pile area and near-pile area is very little. The dynamic deformation of pile-pier manifests specific elasticity, and the confinement effect of foundation on the seismic response of the pile cannot be neglected. The dynamic strain of pile in sand is larger than that in clay. On the other hand, the dynamic strain of pile in clay is much larger than that of pier, due to the co-action of confinement effect of upper clay on the pile and counterweight inertia effect of the pier top. While inputting the large seismic wave, complete liquefaction, accompanied by strong shear flow, occurs in a short time. The pore pressure increases immediately after the peak input acceleration time, then increases to its peak gradually, and the dissipation rate is also very low. The peak pore pressure of near-pile area, different from the case of small seismic input, is much larger than that of far-pile area. Dynamic response of pile-pier is quite violent, and the fixing point of pile greatly moves upwards, as a result of large counterweight inertia effect together with complete liquefaction in sand. A large range of damage locates around the interface of sand and upper clay layers, and the pile breaks in the clay layer.

Key words: liquefiable ground; pile foundation; bridge structure; seismic response; shake table test

场地液化是导致桩基桥梁震害的主要原因[1-3].振动台试验是研究可液化场地桩基桥梁地震反应的一种有效手段,日、美等国已取得较多

收稿日期: 2009-01-28.
基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90815009);
国家自然科学基金资助项目(50378031;50178027).
作者简介: 徐鹏举(1967—),男,副教授,博士研究生;
凌贤长(1963—),男,教授,博士生导师.

重要的研究成果[4-6],特别是日本 E-Defense 目前世界最大的三维地震模拟地震台(台面积 20 m×15 m,最大承载 1 200 t)的建成与投入使用,为更大比例尺模型的振动台试验研究提供了很好的手段. 2002 年以来,在国家自然科学基金连续资助下,针对可液化场地桩-土-桥梁结构地震相互作用问题,我们分别考虑单桩与群桩、低承台群桩与高承台群桩、液化场地与非液化场地、场地不同地层结构等,先后完成了多个试验体的振动台试验研究. 本文报道可液化场地单桩-土-桥梁结构地震相互作用振动台试验研究成果.

1 试验概况

试验体设计与传感器布置见图 1:采用缩尺模型桩-柱墩直径 0.1 m、长度 2.52 m、入土深度 1.7 m,由微粒混凝土配镀锌铁丝预制[7-8];地基为 3 层土结构,上覆、下伏均为湿粘土层,中间为可液化砂层(不均匀系数 3.5,平均粒径 0.35 mm,最大粒径 2 mm. 改进的水沉法制备);墩顶配 120 kg质量块,以模拟上部桥梁结构. 在同济大学土木工程防灾国家重点试验室完成试验,采用美国 MTS 电液伺服驱动式三向模拟地震振动台装置,土箱为由范立础院士课题组研制的长 2 m×宽 1.5 m×高 2 m 层状剪切变形土箱[9],在与振动方向垂直的两侧内壁各设置一层厚 10 cm 海绵垫以减少土箱边界反射效应;同时,控制模型结构平面尺寸与模型地基的平面尺寸之比小于一定倍数,本试验取地基平面长度 D 与结构平面尺寸 d 之比为4.33. 试验工况:0.02g白噪声,压缩

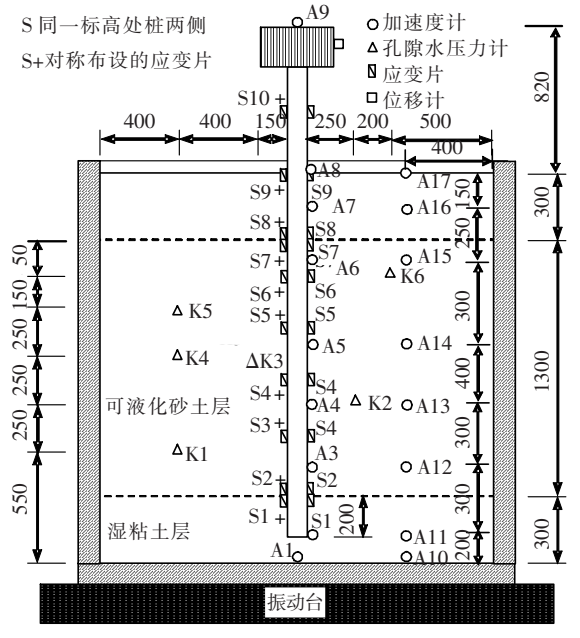


图 1 传感器布置图(mm)

0.15gEl Centro 波(时间压缩系数为 1:$\sqrt{10}$. 小震),0.15gEl Centro 波(小震),0.5g El Centro 波(大震),前一工况加载结束,待孔压基本消散后,进行后一工况加载.

2 土-结体系自振特性

土-结体系基频的白噪声扫描值为 2.55 ~ 6.45 Hz,而土箱自振频率的理论计算值为 1.36 Hz、环境小幅激振实测值为 1.40 Hz、人工大幅激振实测值为 1.20 Hz,所以土箱的自振频率远离试验体的基频,因此土箱的自振不影响土-结体系的振动. 由大振幅(约 5 cm)自由振动衰减法测得土箱的阻尼比为 3.5%,而地基的阻尼比为 12.71% ~ 21.2%,因此土箱的阻尼显然不对地基动力反应产生不良影响[9].

3 试验宏观现象

压缩 0.15gEl Centro 波输入下,地表和桩-柱墩轻微振动. 0.15gEl Centro 波输入下,砂层上部轻微液化,地表局部有水渗出,桩-柱墩振动较小. 0.5gEl Centro 波输入下,砂层全部液化,强烈喷砂冒水,地表下沉 5 ~ 8 cm(局部达 15 ~ 18 cm);桩-柱墩强烈振动,并在输入波峰值到达时桩在粘土层与砂层分界以上 16 cm 处折断(位于粘土层中);桩在砂层与上覆粘土层过渡带发生范围长达 31 cm 破裂,说明桩的破坏发生于砂土液化过程中,并随砂土液化的发展,桩的嵌固点一直在移动且破裂逐步扩展;排水后,可见地表分布较多喷出的小砂堆.

4 砂层孔压反应

砂层中孔压与孔压比时程见图2 ~ 4. 压缩

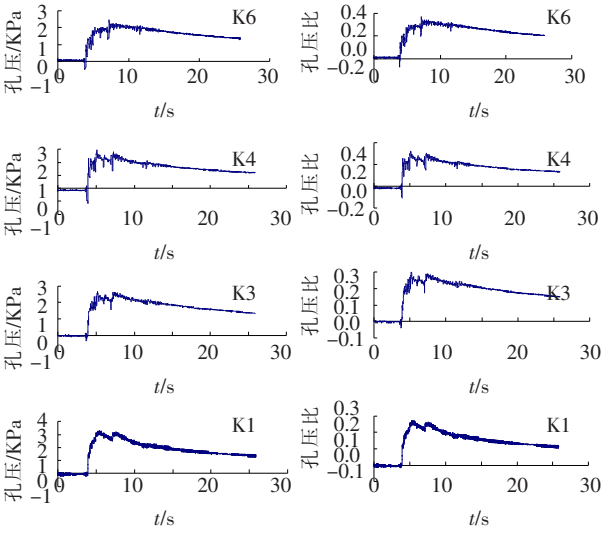


图 2 压缩 0.15gEl Centro 波输入孔压与孔压比

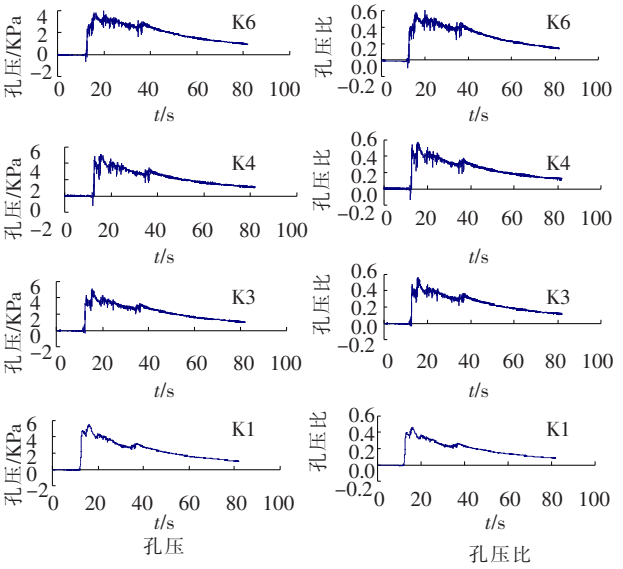


图 3　0.15gEl Centro 波输入孔压与孔压比

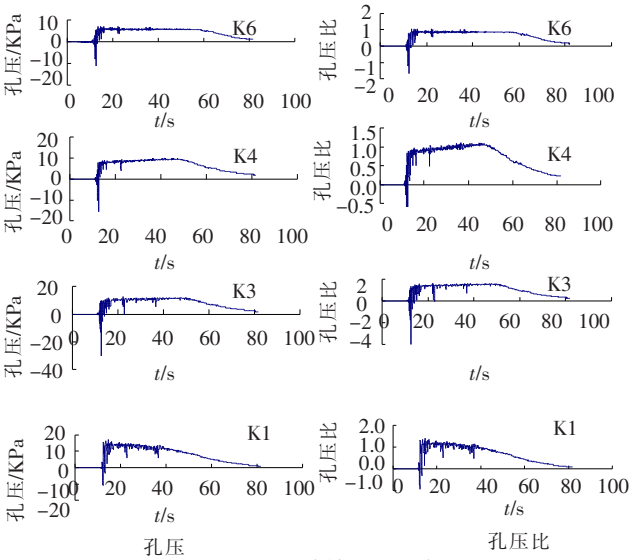
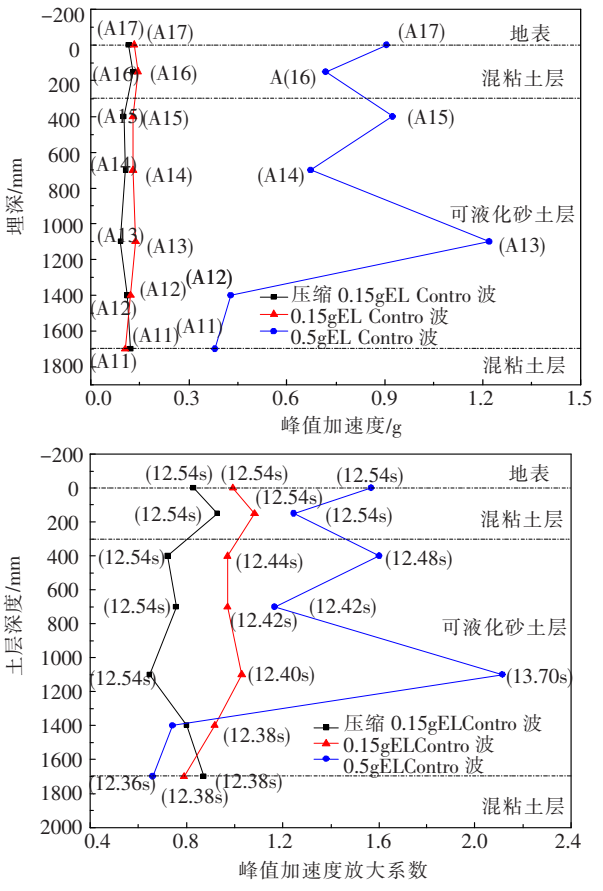


图 4　0.5gEl Centro 波输入孔压与孔压比

0.15gEl Centro 波输入下，自下而上，峰值孔压不断减小（土层减震引起），而峰值孔压比明显递增，但未超过 0.3. 0.15gEl Centro 波输入下，自下而上，峰值孔压不断减小（土层减震引起），但是峰值孔压比明显递增且上部达到 0.6（砂层上部轻微液化的原因）. 0.5gEl Centro 波输入下，自下而上峰值孔压、峰值孔压比均有递减趋势（与小震输入下的规律不同. 这是由于上部孔压水易于排出地表，试验现象也如此），但是，峰值孔压比均达到或超过 1 且持续 30 ~ 50 s，因此砂层全部强烈液化. 3 种波输入下，孔压均瞬间达到峰值. 小震输入下，孔压在输入波峰值之后 5 s 内达到峰值，并很快进入消散阶段. 大震输入下，孔压在输入波峰值到达时刻瞬间增大，而后缓慢上升至峰值，峰值后消散也很慢，主要原因是大震的加速度足以使孔压较长时间维持较高的水平. 比较测点 K3、K4 可见，小震输入下近桩区峰值孔压与远桩区峰值孔压差别很小，而大震输入下近桩区峰值孔压远大于远桩区峰值孔压，因此桩距对孔压的影响很大程度上取决于输入波的强度. 输入波峰值到达时，出现瞬时负孔压现象，大震输入下尤其突出（负孔压峰值甚至远大于正孔压峰值），文献认为这是由于土体瞬时剪胀所致[7-8, 10]. 3 种 El Centro 波输入砂层产生最大负压的时刻也近似满足 1：$\sqrt{10}$ 的时间相似计算结果.

5　地基加速度反应

根据试验加速度记录，绘制的地基反应的峰值加速度、峰值加速度放大系数沿深度分布见图 5. 压缩 0.15g El Centro 波和 0.15g El Centro 波输入下，自下而上，相应各点的峰值加速度基本相同；但是，在砂层和上覆粘土层中，0.15g El Centro 波较压缩 0.15g El Centro 波输入下峰值加速度偏大，特别是前者的峰值加速度放大系数明显大于后者（前者≥1，后者为 0.63 ~ 0.91），说明地基对 0.15gElCentro 波输入的反应更强烈，而对压缩



注：峰值加速度放大系数：反应加速度峰值与输入加速度峰值之比. 峰值加速度分布图中 A11 为加速度计编号. 峰值加速度放大系数分布图中括号内数据为峰值加速度发生时刻，单位为 s.

图 5　地基峰值加速度及其放大系数沿深度分布

0.15g El Centro 波输入有明显减震作用，吻合于试验宏观现象（0.15g El Centro 波较压缩 0.15g El Centro 波输入下砂层上部液化现象更明显）和砂层孔压反应记录. 0.5g El Centro 波输入下，自下而上，峰值加速度和峰值加速度放大系数均呈很有意义的“增加－减小”波动变化，下伏粘土层对输入波有较大衰减作用，而砂层在较大震激励下很快完全液化而发生强烈剪切流动作用，致使地基加速度记录显示砂层和上覆粘土层对输入波具有显著放大效应的假象，也就是说，图 5 中砂层和上覆粘土层对 0.5g El Centro 波输入的放大作用实际为液化砂层发生强烈剪切流动所致（土层中加速度计随之往返剪切运动），并非土层对输入波的真正放大作用.

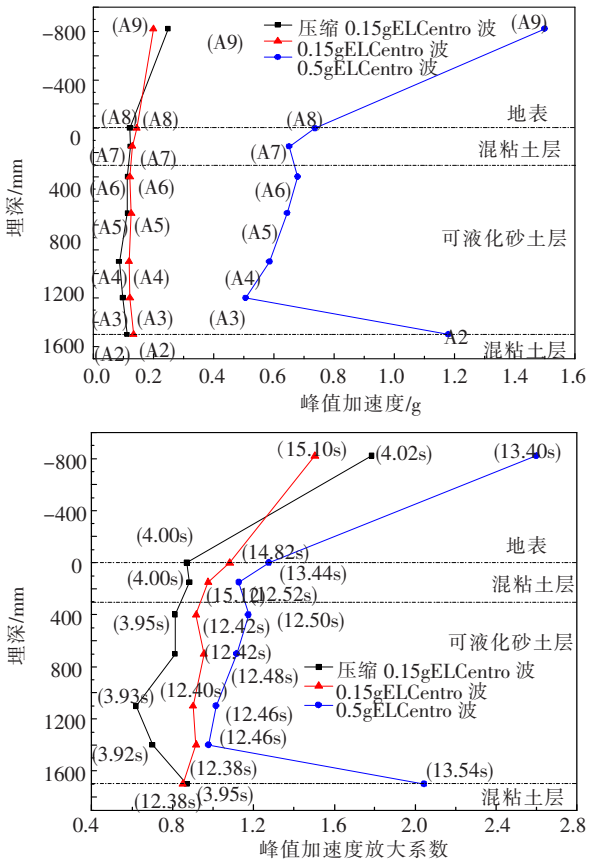


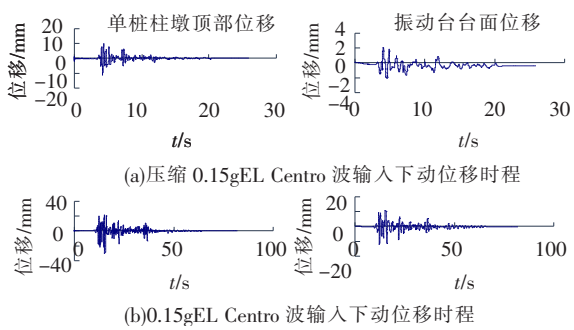
图 6 桩－柱墩峰值加速度及其放大系数沿深度分布

6 桩－柱墩加速度反应

根据试验加速度记录，绘制的桩－柱墩反应的峰值加速度、峰值加速度放大系数沿深度分布见图 6. 压缩 0.15g El Centro 波和 0.15g El Centro 波输入下，自下而上，桩体相应各点的峰值加速度基本相同、峰值加速度放大系数 <1，墩顶峰值加速度偏大、峰值加速度放大系数超过 1.5，说明小震输入下地基对桩的较大约束效应而限制桩的地震反应（对输入波的放大作用）；两种波输入下，桩底的峰值加速度、峰值加速度放大系数均近似相同，说明下伏粘土层对桩具有显著的嵌固作用；但是，在砂层和上覆粘土层中，0.15g El Centro 波较压缩 0.15g El Centro 波输入下峰值加速度偏大，特别是前者的峰值加速度放大系数明显大于后者，说明桩体对 0.15g El Centro 波输入的反应更强烈，吻合于试验宏观现象（0.15g El Centro 波输入下桩－柱墩振动幅度较大）. 0.5g El Centro 波输入下，桩底的峰值加速度（1.17g）、峰值加速度放大系数（2.03）均很大，但是进入砂层和上覆粘土层，桩的峰值加速度、峰值加速度放大系数均大幅度减小，特别是桩下段的峰值加速度放大系数 <1，而上段（上覆粘土层中折断位置以下）的峰值加速度放大系数也不过 1.05. 这是由于大震输入下，上部结构配重的较大惯性力作用，加之砂层全部强烈液化（致使桩体上部嵌固点发生大幅度滑移. 据桩体上部破裂范围达 31 cm 判断桩体上部嵌固点发生大幅度下移），桩底因此发生瞬间滑移（下伏粘土层对桩的嵌固作用失效）导致加速度记录很大（并非桩底对输入波的实际放大作用）；另一方面，砂层发生强烈液化而导致桩体上部嵌固点发生大幅度下移，加之桩底瞬间滑移，致使砂层和上覆粘土层中桩的峰值加速度、峰值加速度放大系数均大幅度减小. 墩顶的的峰值加速度、峰值加速度放大系数均十分大，这是由于大震输入下桩折断倒塌所致.

7 柱墩动位移

试验记录的柱墩顶部动位移时程见图 7. 小震输入下，柱墩顶部动位移峰值出现稍滞后于输入波峰值到达时刻，并在输入波结束后柱墩自上而下的动位移很快恢复到初始状态，说明不仅桩－柱墩为弹性动力变形作用，而且地基也主要为可恢复变形；而柱墩顶部动位移幅值，0.15g El Centro 波输入下的约为压缩 0.15g El Centro 波输入下的两倍，这是由于原型波持时较长所致；但



(a)压缩 0.15gEL Centro 波输入下动位移时程

(b)0.15gEL Centro 波输入下动位移时程

图 7 柱墩和台面动位移

是，压缩 0.15g El Centro 波输入下柱墩顶部动位移约为台面动位移5倍，而0.15gElCentro波输入下柱墩顶部动位移仅为台面动位移约两倍，表明压缩波由于频率高而有利于刚性较大结构对地震反应的放大作用，这一点值得工程抗震的注意. 0.5gEl Centro 输入下，桩很快折断倒塌，墩顶动位移记录已失真，无讨论意义.

8　桩－柱墩动应变

试验记录的桩－柱墩动应变时程见图 8～9.

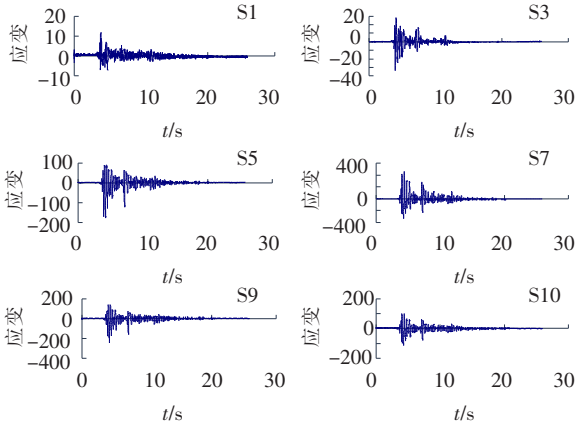


图 8　压缩 0.15g El Centro 波输入桩－柱墩动应变

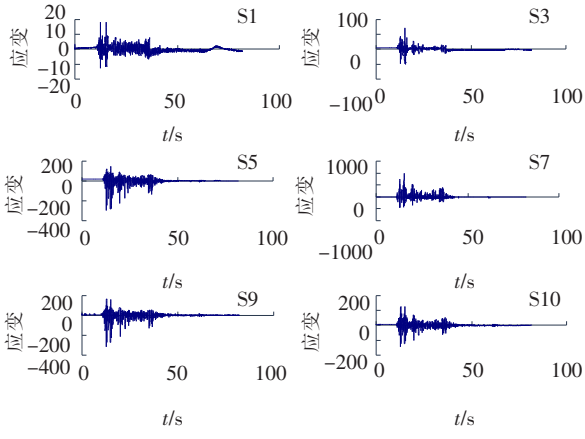


图 9　压缩 0.15g El Centro 波输入桩动应变

小震输入下，自下而上，桩－柱墩的动应变不断增加，但是桩在砂层较粘土层中动应变显著增大，这也是砂层中桩体较粘土层中桩体更易发生震害的原因之一；0.15gEl Centro 波较压缩 0.15gEl Centro 波输入下桩－柱墩的动应变幅值大得多，这是由于原型波持时较长所致；由于下伏粘土层对桩的嵌固作用，两种波输入下，下伏粘土层与砂层分界附近桩的动应变未出现突变（比较测点 S1、S3）；而在地基上部，由于上覆粘土层对桩的嵌固与墩顶配重惯性力的共同作用，致使上覆粘土层中桩的动应变远大于柱墩的动应变（出现突变. 比较测点 S7 与 S9、S10），故 0.5gEl Centro 波输入下桩折断发生于上覆粘土层中，因此实际地震中桩基破坏与上部桥梁结构的惯性力作用关系密切. 0.5gEl Centro 输入下，桩很快折断倒塌，桩－柱墩动应变记录已失真，无讨论意义.

9　结　论

1）振动台试验很好再现了自然地震触发场地液化及结构破坏的主要宏观现象. 桩在砂层与上覆粘土层过渡带发生大范围破裂且在粘土层中折断倒塌，说明桩的破坏发生于砂土液化过程中，并随液化的发展，桩的嵌固点一直上移且破裂逐步扩展，这一点对于桩的配筋设计具有一定指导意义.

2）小震输入下，地基自下而上峰值加速度基本相同，但是对非压缩波输入的反应更强烈，而对压缩波输入有一定减震作用；孔压在输入波峰值到达后几秒内达到峰值，并很快进入消散阶段，近桩区与远桩区峰值孔压差别很小. 大震输入下，地基自下而上峰值加速度和峰值加速度放大系数均呈“增加－减小”变化. 桩距对孔压的影响主要取决于输入波的强度.

3）桩－柱墩地震反应主要取决于场地条件、结构材性、上部结构配重和输入波的强度、持时、频率等. 小震输入下，桩－柱墩表现为弹性动力变形且自下而上动应变不断增加，压缩波由于频率高而有利于放大作用，非压缩波由于持时长而使得地震反应更强烈；地基对桩地震反应的约束效应较大，桩在砂层较粘土层中动应变明显增大；上覆粘土层中桩的动应变远大于柱墩的动应变. 大震输入下，桩－柱墩加速度反应十分强烈，由于墩顶配重较大惯性力作用，加之砂层全部强烈液化，致使桩上部嵌固点发生大幅度上移，桩上段出现大范围破裂且于粘土层中折断倒塌，下伏粘土层对桩的嵌固失效而使桩底发生瞬间滑移.

参考文献：

[1] 凌贤长，王东升. 液化场地桩－土－桥梁结构动力相互作用振动台试验研究进展[J]. 地震工程与工程振动，2002，22(4)：53－59.

[2] ABDOUN T, DOBRY R. Evaluation of pile foundation response to lateral spreading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22: 1051－1058.

[3] FINN W D L, FUJITA N. Piles in liquefiable soils: seismic analysis and design issues[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22: 731－742.

（下转第 1198 页）