

# 可液化场地桥梁群桩独柱墩结构地震反应 振动台试验研究

唐亮<sup>1</sup> 凌贤长<sup>1</sup> 徐鹏举<sup>1</sup> 高霞<sup>1</sup> 王东升<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江哈尔滨 150090 2. 大连海事大学, 辽宁大连 116026)

**摘要:** 针对两种土层结构的可液化场地条件, 采用 2×2 低承台群桩独柱墩结构形式, 完成了两个试验体的群桩独柱墩结构地震反应振动台试验, 很好地再现了自然地震触发场地液化及结构反应的各种宏观现象。结果表明, 桩的最大加速度反应位置与地层结构关系密切且随场地液化发展而不断变化; 低承台条件下, 三层土场地较二层土场地对墩顶的加速度反应放大作用更显著; 场地液化过程中, 承台附近或液化与非液化土层分界处桩发生最大或较大动应变; 低承台下, 二层土场地中柱墩反应较小, 桩反应较强, 三层土场地中柱墩反应较强。

**关键词:** 可液化场地; 低承台群桩独柱墩结构; 桥梁; 地震反应; 振动台试验

**中图分类号:** U442.5<sup>+</sup>5 TU435 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-131X(2009)11-0102-07

## Shaking table tests for seismic response of pile-supported bridge structure with single column pier in liquefiable ground

Tang Liang Ling Xianzhang Xu Pengju Gao Xia Wang Dongsheng

(1. Harbin Institute of Technology Harbin 150090 China; 2. Dalian Maritime University Dalian 116026 China)

**Abstract:** Two shaking table tests for seismic pile-soil-bridge interaction in liquefiable ground with a low cap 4-pile group and two typical soil profiles were performed. The tests reproduced the macroscopic phenomena of soil liquefaction and seismic response of the structures in liquefiable ground. It is observed that the portions of the piles with maximum acceleration were in close contact with the soil layers and varied with the development of soil liquefaction. For the low cap pile-supported bridge structure, the ground with three soil layers exerted more significant amplification effect on the acceleration response of the pier top than the ground with two soil layers. During soil liquefaction, the strains of the piles near the cap and the soil interface between liquefied soil and non-liquefied soil were comparatively greater than those at other positions. For the low cap pile groups, the response of the pier was comparatively less significant and the pile strongly responded to the input motion of the ground with two soil layers, while the response of the pier was more significant under input motion of the ground with three soil layers.

**Keywords:** liquefiable ground; low cap pile groups with single column pier; bridge; seismic response; shaking table test

E-mail: hit\_163.com

## 引 言

场地液化是桩基桥梁震害的主要原因<sup>[1-3]</sup>。振动台试验是研究并解决可液化场地桩基桥梁抗震问题的一种有效手段<sup>[3-6]</sup>, 近年来备受关注, 日、美已取得了重要研究进展<sup>[7-8]</sup>。建于可液化土层中的低承台群

桩因能减轻结构振动并改善桩的受力特性等优点在桥梁工程中被广泛应用<sup>[9-10]</sup>。地震激励下桩周土发生液化使得群桩动力反应极其复杂<sup>[11]</sup>。为了深入研究可液化场地低桩承台基础地震响应规律, 以及群桩与柱墩的地震反应机理, 采用 2×2 低承台群桩独柱墩基础形式, 设计了两类土层结构的地基条件, 完成了两个试验体的可液化场地群桩土桥梁结构地震相互作用振动台试验。本文仅报道结构地震反应的部分试验成果。

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划“重大工程的动力灾变”项目(90815009)、西部交通建设科技项目(2009318000100)和国家自然科学基金项目(50378031 50178027)

作者简介: 唐亮, 博士研究生

收稿时间: 2008-09-08

### 1 试验概况

试验体一、二的设计与传感器布置见图 1、图 2。以 1976 年唐山地震中倒塌的胜利桥为原型<sup>[12]</sup>，采用 1:10 缩尺比例<sup>[13]</sup>，桩、承台、柱墩由微粒混凝土配以镀锌铁丝预制，柱墩直径 160 mm，长度 820 mm，配 32 $\phi$ 2 钢筋、箍筋  $\phi$ 1@20 mm，墩底至承台顶 150 mm 范围配  $\phi$ 1@10 mm 箍筋；桩径 80 mm，长度 1550 mm，配 9 $\phi$ 2 钢筋、箍筋  $\phi$ 1@20 mm，顶部 600 mm 范围箍筋  $\phi$ 1@10 mm，桩距 300 mm，承台尺寸为 460 mm $\times$ 460 mm $\times$ 150 mm，双向均匀配筋  $\phi$ 0.8@3.5 mm，保护层厚 10 mm，墩顶配 360 kg 质量块，模拟上部桥梁结构。两次试验地基为湿黏土层与可液化砂土层（不均匀系数 3.05，平均粒径 0.315 mm，最大粒径 2 mm，改进的水沉法制备，饱和砂土层的相对密度约为 30%，渗透系数约为 0.0035 cm/s 的不同组合，详见图 1、图 2 上覆粉质黏土层均厚 30 mm，试验体二下伏粉质黏土层厚 40 mm，黏土的液限 45 和塑限 28，塑性指标 17。

置一层厚 100 mm 的海绵进一步减少土箱边界反射效应<sup>[12-13]</sup>；同时，控制模型结构平面尺寸与模型地基的平面尺寸之比，试验取地基平面长度  $D$  与结构平面尺寸  $d$  之比为 4.33<sup>[14]</sup>。试验工况为：0.002 g 白噪声，压缩 0.15 g El Centro 波（时间压缩率为  $\sqrt{10}$ :1，简称“工况一”），0.15 g El Centro 波（简称“工况二”），0.5 g El Centro 波（简称“工况三”），如图 3 所示，前一工况加载结束，待孔压基本消散后进行后一工况加载。

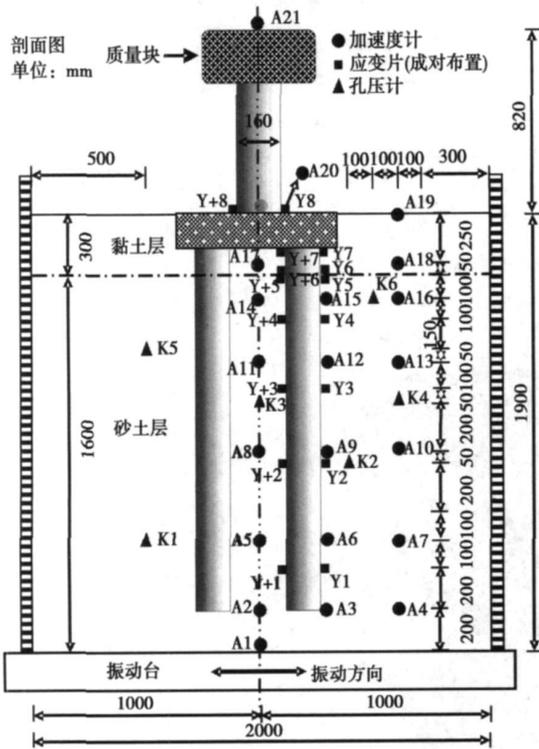


图 1 试验体一设计与传感器布置图

Fig. 1 Design and layout of transducers for test one

试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室完成，采用美国 MTS 电液伺服驱动式三向模拟地震振动台装置，土箱为范立础院士课题组研制的长 2 m $\times$ 宽 1.5 m $\times$ 高 2 m 层状剪切变形土箱，内设一层厚 5 mm 橡胶内衬以防渗漏，并在与振动方向垂直的两侧内壁设

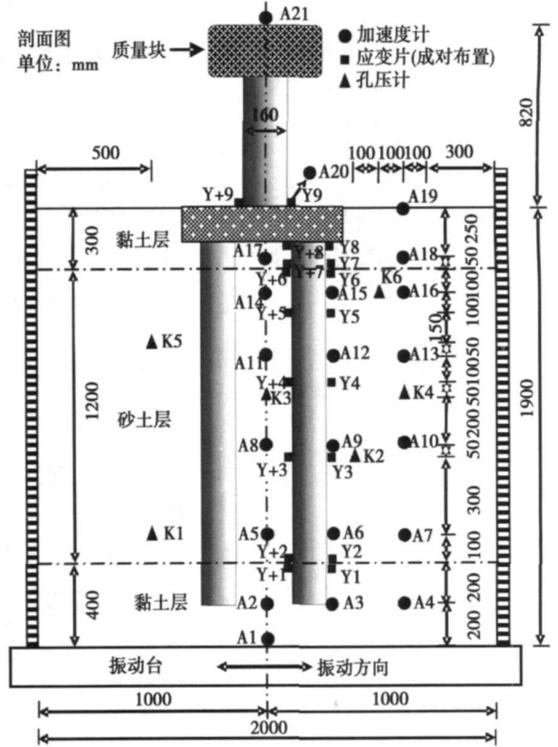


图 2 试验体二设计与传感器布置图

Fig. 2 Design and Layout of transducers for test two

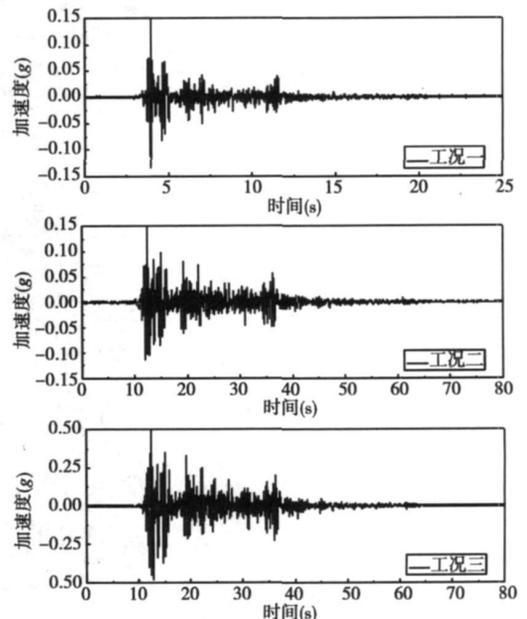


图 3 输入地震加速度

Fig. 3 Input motion

## 2 试验宏观现象

两试验体中,砂层孔压反应规律基本一致,限于篇幅,以下结合试验体二中孔压比情况(如图4)对试验现象加以介绍。试验体一、二,工况一、二作用下,地表和柱墩轻微振动,地表局部有少许水渗出,砂层顶部轻微液化;由图4可得出,工况一、二中,自下而上,砂层峰值孔压比明显递增且顶部超过 $0.3 \sim 0.4$ <sup>[15]</sup>,这也是观察到砂层顶部轻微液化的佐证。试验体一、二,工况三作用下,地表出现较宽地裂,砂层全部液化,强烈喷砂冒水,地基下沉 $5 \sim 10$  mm如图5所示;由图4可知,工况三作用下,自下而上,砂层峰值孔压比均递减(这是上部孔压水易排出地表的原因),孔压比很快达到或超过砂土液化所需的孔压比( $0.75 \sim 1.0$ )且持时长达 $30 \text{ s} \sim 50 \text{ s}$ <sup>[15]</sup>,因此砂层发生强烈液

化、持时长,且最强烈液化作用滞后于输入峰值加速度时刻;排水后,地表分布较多喷出的小砂堆;试验后,承台下陷明显,见图5桩上部 $30 \text{ m}$ 内集中分布宽度不等的裂缝,桩头处出现较明显裂缝,桩很低位置处(桩下 $100 \text{ m}$ )仍有裂缝,表明了上部结构惯性力与桩土运动相互作用对可液化场地中桩的力学性能均起着重要作用。所不同的是,试验体一柱墩完好,而试验体二中墩底混凝土保护层破碎剥落(剥落长达 $4 \sim 10 \text{ m}$ )、纵筋压曲且部分箍筋拉断,见图5。由图4可知,输入波峰值时刻,出现了瞬间“负孔压比”,工况三中负孔压比峰值绝对值远大于孔压峰值,过去认为这是由于土体瞬时剪胀所致<sup>[12-16]</sup>,本文推测是振动中孔压计与土体相对运动引起了孔压计腔内压力大幅减小所致。总之,振动台试验较好再现了自然地震触发场地液化及结构地震响应特征。

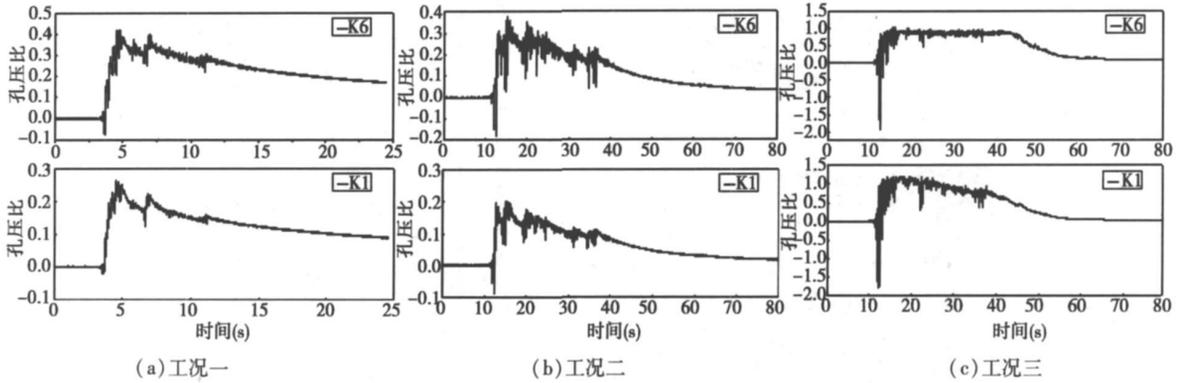


图4 砂层孔压比时程曲线(试验体二)

Fig. 4 Time histories of pore pressure ratio for test two

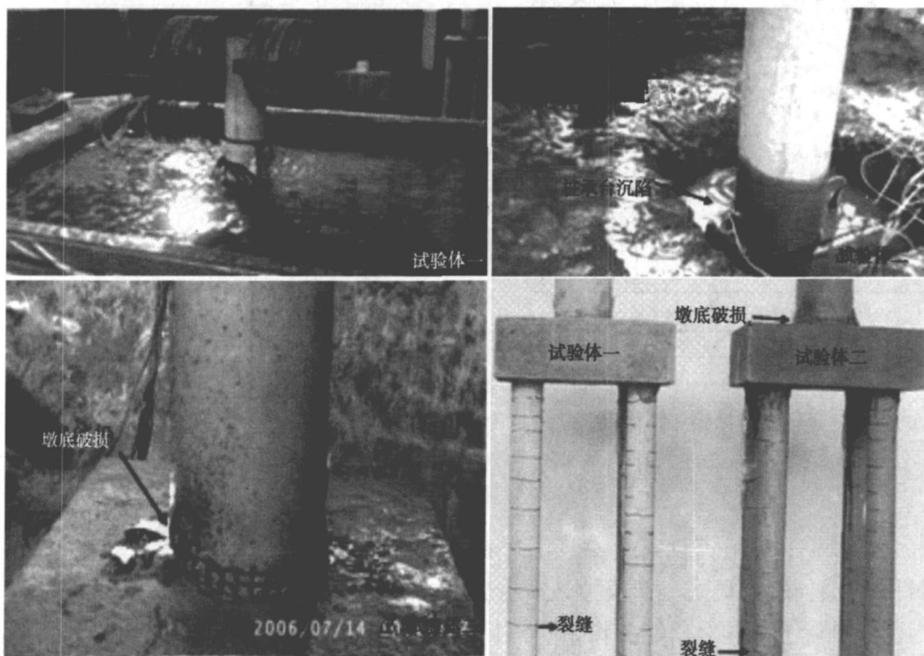


图5 试验宏观现象

Fig. 5 Macro-phenomenon

### 3 桩 柱墩加速度反应

工况一、二中, 桩 柱墩自下而上峰值加速度、峰值加速度放大系数沿深度分布见图 6、图 7。峰值加速度放大系数定义为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括号内数据为峰值加速度时刻(单位为 s), 峰值加速度放大系数分布图中 A 为加速度计编号。工况一、二中, 试验体一、二, 由于砂层局部液化对桩的负面影响未体现, 承台在桩头处及土层对桩身约束作用均较强, 桩 土动力相互作用不突出, 自下而上, 桩的峰值加速度, 峰值加速度放大系数呈递减规律; 墩顶的加速度对输入波放大作用明显(峰值加速度放大系数超过 1.5), 说明较小地震输入下地基结构破坏轻微, 承台 群桩体系受到土体约束较强, 上部结构惯性力对柱墩作用显著, 具体表现为柱墩加速度对输入波有较强的放大作用。

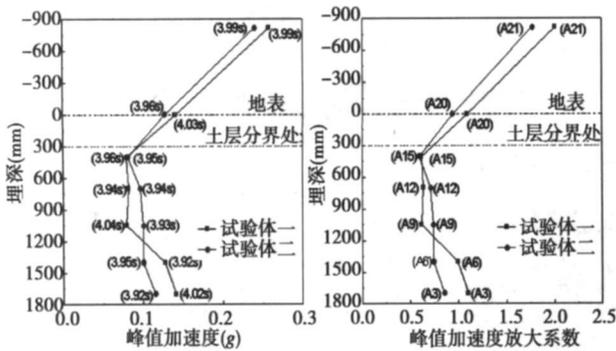


图 6 工况一中桩-柱墩峰值加速度沿深度分布

Fig. 6 Peak acceleration of the pile and pier in event one

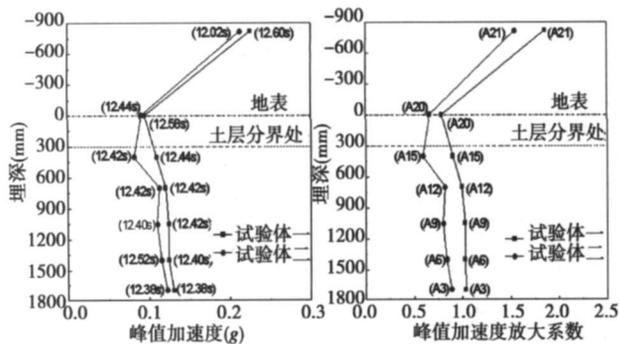


图 7 工况二中桩-柱墩峰值加速度沿深度分布

Fig. 7 Peak acceleration of the pile and pier in case two

工况一中, 试验体一、二, 自下而上, 桩体各点(试验体一中桩端除外)的峰值加速度放大系数均未超过 1; 工况二中, 试验体一, 桩下段(深度 700mm 以下)的峰值加速度放大系数大于 1, 而桩上段峰值加速度放大系数则小于 1。说明了试验体二中桩端伸入下伏黏土层中, 黏土层对桩具有较强的嵌固作用, 自下而上,

桩的加速度对输入波具有衰减作用; 试验体一中由于桩端位于下伏砂层中, 桩下段缺少有效嵌固作用而使得桩的加速度对输入波具有放大作用。同一试验体, 与工况一相比, 工况二中墩顶的峰值加速度及其放大系数更大, 说明柱墩对输入的压缩波反应更强烈, 主要取决于原型波(持时更长)较同幅值的压缩波输入下砂土液化更显著, 地基的动力耗能更显著。可见, 地震持时对可液化场地中桥梁结构加速度反应影响主要通过地震触发场地液化的程度体现。

工况三中, 桩 柱墩自下而上峰值加速度、峰值加速度放大系数分布见图 8。试验体一、二, 工况三中, 砂层完全液化, 桩 土运动相互作用显著增强(砂土强烈流动作用), 且桩受到上部结构惯性作用, 致使桩的加速度反应对输入加速度有较强的放大作用(峰值放大系数均大于 1), 显示了液化砂层中桩的加速度对输入波具有显著放大作用。地层结构的不同导致了砂层中桩的加速度反应差别显著。首先, 试验体一, 由于液化砂层剪切流动作用较大且桩端处缺少有效约束, 而桩头受到承台、土体约束作用较强, 自下而上桩上各点的峰值加速度及其放大系数逐渐递增, 靠近上部土层分界处则有所减小。试验体二, 由于地基下伏黏土层对桩的嵌固效应, 加之下部液化与非液化土层对桩作用之差异, 桩从黏土层进入砂层的加速度反应增大, 对输入波有很明显的放大作用; 同时, 由于上部黏土层、承台对桩上段的约束作用, 以及下伏黏土层对桩端的嵌固效应(即使砂层完全液化时, 这种约束作用也较强), 使得砂层中部桩的加速度反应最小, 自下而上, 峰值加速度及其放大系数呈现递减趋势。可见, 地层结构特征对桩的加速度反应影响主要通过地基对桩的约束程度表现出来。

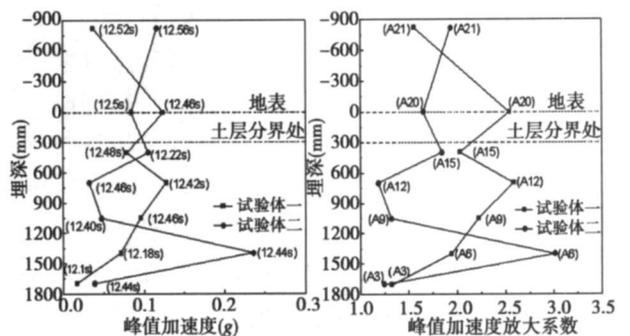


图 8 工况三中桩-柱墩峰值加速度沿深度分布

Fig. 8 Peak acceleration of the Pile and Pier in case three

试验体一、二, 三种工况中, 桩 柱墩峰值加速度时刻基本上与输入波峰值时刻保持一致。试验体一、二, 工况三作用下, 墩顶未因场地完全液化而峰值加

速度放大系数增大,相反有所减小,比工况一、二中墩顶峰值加速度放大系数还要小,这可能与液化后砂层抗剪力极低、减震作用密切相关。目前,桩基抗震设计中未考虑液化砂层减震效应,尚待进一步探讨。对比试验体一、二,工况一、二中,墩顶峰值加速度及其放大系数以试验体一的反应更大;工况三中,墩顶的峰值加速度放大系数以试验体二的反应更大。由此得出,低桩承台,场地轻微液化时,二层土场地较三层土场地更趋于放大上部结构(墩顶)加速度反应,场地液化完全时,二层土场地表现出更有助于降低上部结构(墩顶)加速度反应。

#### 4 桩柱墩动应变反应

三种工况作用下,桩与墩底(地表处)峰值应变自下而上分布见图9。试验体一、二,三种工况作用下,自下而上,桩两侧峰值应变的对称性(大小相等、方向相反)较好,在土层分界处(试验体二有上、下部土层

分界处)发生突变,其中以工况三作用下试验体二中部土层分界处桩的应变最突出,说明了低桩承台形式条件下,场地完全液化时,三层土场地较两层土场地更有利于土层分界处桩的应变突变。考虑应变突变的影响,得到:试验体一,三种工况下,由于两层土中桩的反应很大程度由下部砂层控制,桩上段受上覆黏土层、承台等嵌固尚强,即使砂层完全液化,嵌固作用同样很有效,且桩还受到包括承台、柱墩与上部结构配重惯性力的作用,故,自下而上桩的峰值应变(拉应变与压应变)呈现有意义的“增大减小增大”的变化;工况一、二中,桩的应变最大值出现在桩头,工况三作用下,桩的应变最大值出现在砂层中部(深度800mm),这也是液化砂层中桩体较黏土层中桩体更易发生震害的直接体现;桩出现应变最大值的位置说明了两层土条件下,当砂土液化尚轻时,上部结构惯性作用起着更主要作用,随着砂层液化不断发展,桩土运动相互作用影响逐渐显现。

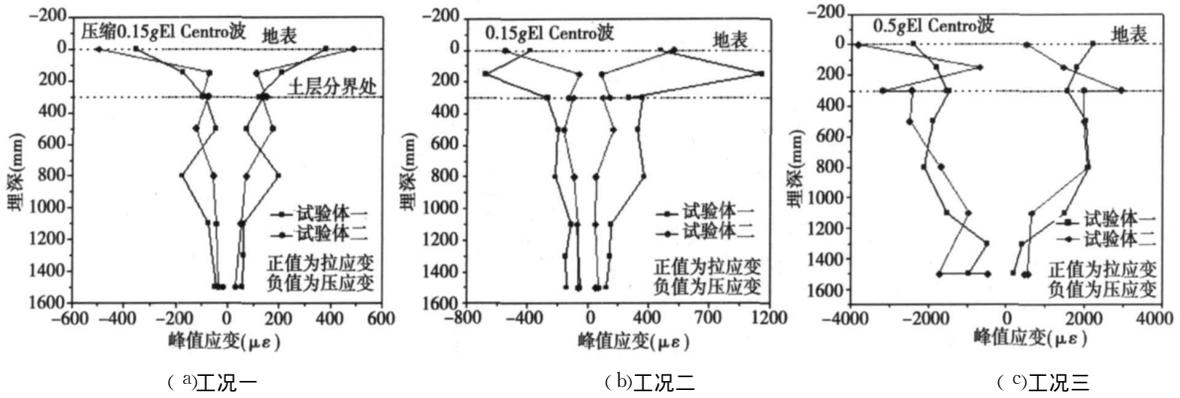


图9 桩柱墩动应变峰值沿深度分布

Fig 9 Distribution of peak strain along pile and pier in three cases

试验体二,三种工况下,即使砂层完全液化时,三层土中桩头、桩端受到嵌固作用仍很有效,桩的应变反应受砂土夹层的影响显著,随着液化的发展,砂层中桩的应变反应也更强烈,因此,自下而上,桩的峰值应变出现先增后减的规律;工况一、二中,桩的应变最大值出现在砂层上部(深度500mm);工况三中,桩的应变最大值出现在上部土层分界处附近。对比试验体一、二桩出现应变最大值的位置,发现场地地层特征、液化程度对桩的应变均有影响,而地层结构的影响主要体现在桩端是否伸入到稳定下伏黏土层中。过去认为液化与非液化土层分界处桩的应变会出现较大(或最大)应变突变值,试验表明,液化与非液化土层分界处桩的应变是否出现较大(或最大)突变值也取决于场地液化条件与地层结构,有待深入研究。

比较试验体一、二,工况一、二中墩底应变峰值以试验体二反应大,这与下伏黏土层对桩端有较大嵌固

作用有关。工况三作用下,墩底拉应变峰值以试验体一更大,压应变以试验体二更大,结合试验体二中墩底破坏的事实,推断出:三层土场地桥梁墩底以压弯破坏为主,这对于桥梁独柱墩抗震研究无疑具有启示。

#### 5 结论

(1) 二层土场地中桩未发生折断、柱墩破损现象,三层土场地中桩未折断,但是墩底发生压弯破坏;二次试验体中,桩下很低位置均出现裂缝,表明了上部结构惯性作用与桩土运动相互作用对可液化场地中桩的力学性能均起重要作用。这对于可液化场地桩基桥梁结构抗震研究提供重要启示并具有一定指导意义。

(2) 较小震激励下,场地液化尚不充分时,桩出现加速度最大值的位置受地层结构影响尚不明显,随着场地完全液化,地层结构对其影响逐渐显现,与二层

土场地中桩的加速度最大值出现在砂层上部不同, 由于下伏黏土层对桩端较大的嵌固作用, 三层土场地中桩的加速度最大值发生在砂土夹层下部。

(3) 桩的应变反应受场地地层结构、液化程度的影响显著。液化与非液化土层分界处桩的应变是否出现较大(或最大)突变值很大程度取决于场地液化情况与地层结构, 这与传统认识存在一定差异。

(4) 场地轻微液化, 二层土场地较三层土场地更有助于放大上部桥梁结构加速度反应; 0.5g E1 Centro 波输入下, 场地完全液化, 三层土中下伏黏土层对桩端约束作用效应显现, 三层土场地条件中墩顶反应更强, 二层土场地将更有利于降低上部结构加速度反应。

致谢 振动台试验得到同济大学桥梁系范立础院士、袁万诚教授、王志强博士, 土木工程防灾国家重点实验室卢文胜教授等多位专家、老师及工作人员的大力支持, 在此一并表示感谢!

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Finn W D L, Fujita N. Piles in liquefiable soils: seismic analysis and design issues [ J ]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2002, 22 (9): 731-742
- [ 2 ] 张建民. 水平地基液化后大变形对桩基础的影响 [ J ]. 建筑结构学报, 2004, 22 (5): 75-78 ( Zhang Jianmin. Effect of large horizontal post-liquefaction deformation of level ground on pile foundation [ J ]. Journal of Building Structures 2004, 22 (5): 75-78 ( in Chinese ) )
- [ 3 ] 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 ( Ling Xianzhang, Wang Dongsheng. Study on shaking table test for seismic interaction of pile-soil-bridge structure in case of soil liquefaction caused by earthquake [ J ]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration 2002, 22 (4): 53-59 ( in Chinese ) )
- [ 4 ] Kagawa T, Minowa C, Mizuno H, et al. Shaking table testing on piles in liquefying sand [ C ] // Proceedings of 5th US National Conference on Earthquake Engineering, Chicago, 1994, 107-116
- [ 5 ] 李雨润, 袁晓铭. 液化场地上土体侧向变形对桩基影响研究评述 [ J ]. 世界地震工程, 2004, 20 (2): 17-22 ( Li Yurun, Yuan Xiaoming. State of art of study on influences of liquefaction induced soil spreading over pile foundation response [ J ]. World Information on Earthquake Engineering 2004, 20 (2): 17-22 ( in Chinese ) )
- [ 6 ] 王建华, 冯士伦. 液化土层中桩基水平承载特性分析 [ J ]. 岩土力学, 2005, 26 (10): 1597-1601 ( Wang Jianhua, Feng Shilun. Research on lateral resistance of pile foundation in liquefaction state [ J ]. Rock and Soil Mechanics 2005, 26 (10): 1597-1601 ( in Chinese ) )
- [ 7 ] Abdoun T, Dohry R. Evaluation of pile foundation response to lateral spreading [ J ]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2002, 22 (9): 1051-1058
- [ 8 ] Boulanger R W, Curras C J, Kutter B L, et al. Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analysis [ J ]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 1999, 125 (9): 750-759
- [ 9 ] Curras C J, Boulanger R W, Kutter B L, et al. Dynamic experiments and analysis of a pile group supported structure [ J ]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 2001, 127 (7): 585-596
- [ 10 ] 胡人礼. 桥梁桩基础设计 [ M ]. 北京: 人民铁道出版社, 1976
- [ 11 ] Scott R F, Hushmand B, Mirza K. Interaction of a pile group with a liquefiable soil [ C ] // Proceedings of the 9th International Symposium on Earthquake Engineering, India, 1990
- [ 12 ] 凌贤长, 王东升, 王志强, 等. 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研究 [ J ]. 土木工程学报, 2004, 37 (11): 67-72 ( Ling Xianzhang, Wang Dongsheng, Wang Zhiqiang, et al. Large scale shaking table model test of dynamic soil-pile-bridge structure interaction in ground of liquefaction [ J ]. China Civil Engineering Journal 2004, 37 (11): 67-72 ( in Chinese ) )
- [ 13 ] 凌贤长, 王臣, 王成. 液化场地桩土桥梁结构动力相互作用振动台试验模型相似设计方法 [ J ]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (3): 450-456 ( Ling Xianzhang, Wang Chen, Wang Cheng. Scale modeling method of shaking table test of dynamic interaction of pile-soil-bridge structure in ground of soil liquefaction [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004, 23 (3): 450-456 ( in Chinese ) )
- [ 14 ] 伍小平, 孙利民, 胡世德, 等. 振动台试验用层状剪切变形土箱的研制 [ J ]. 同济大学学报: 自然科学版, 2002, 30 (7): 781-785 ( Wu Xiaoping, Sun Limin, Hu Shide, et al. Development of laminar shear box used in shaking table test [ J ]. Journal of Tongji University Natural Science 2002, 30 (7): 781-785 ( in Chinese ) )
- [ 15 ] 石兆吉, 王兰民. 土壤动力特性——液化势及危害性评价 [ M ]. 北京: 地震出版社, 1999
- [ 16 ] 凌贤长, 王丽霞, 王东升, 等. 非自由液化场地地基动力性能大型振动台模型试验研究 [ J ]. 中国公路学报, 2005, 18 (2): 34-39 ( Ling Xianzhang, Wang Lixia, Wang Dongsheng, et al. Study of large scale shaking table proportional model test of the dynamic property of foundation in unfreedom ground of liquefaction [ J ]. China Journal of Highway and Transport 2005, 18 (2): 34-39 ( in Chinese ) )

唐 亮 (1981-) 男, 博士研究生。主要从事岩土地震工程、土 结构动力相互作用研究。

凌贤长 (1963-) 男, 博士, 教授。主要从事岩土地震工程与液化场地桩基桥梁地震反应、冻土力学与冻土工程、路基与防护工程、岩土工程新材料技术开发等方面研究。

徐鹏举 (1967-) 男, 博士研究生, 副教授。主要从事岩土地震工程方面科研与教学工作。

高 霞 (1984-) 女, 博士研究生。主要从事岩土工程减灾、土 结构动力相互作用研究。

王东升 (1974-) 男, 博士, 教授。主要从事桥梁结构抗震研究。

## 《建筑结构学报》2010年征订启事

《建筑结构学报》(邮发代号: 2-190)是由中国科学技术协会主管, 中国建筑学会主办的国家一级学术性刊物, 创刊于 1980年, 自 1992年起入选为中文核心期刊, 2007年起被 EICompndex收录, 期刊影响因子连续多年在国内同类期刊中名列前茅。

《建筑结构学报》旨在报道和交流建筑结构领域中代表我国学术水平的最新研究成果, 反映本学科发展最新动态和趋势, 推动国内外的学术交流, 主要刊登建筑结构、抗震防振、地基基础等学科的基础理论研究、应用研究和科学实验技术的学术论文, 研究报告及最新进展动态, 为我国建筑科学技术研究的发展服务。

《建筑结构学报》读者对象为相关专业的高等院校师生和科研设计施工单位的工程技术人员, 以及相关科技工作者。

为了进一步扩大期刊的载文量, 《建筑结构学报》自 2010年起变更为月刊, 大 16开本, 120页, 每期定价 20.00元 (含邮寄费), 全年共 240.00元。

欢迎您直接汇款至《建筑结构学报》编辑部订阅本刊, 通过编辑部订阅可享受九折优惠, 即 216元/年!

欢迎国内外读者订阅!

地 址: 北京市三里河路 9号住房和城乡建设部内《建筑结构学报》编辑部

邮 编: 100835 电 话: (010)58933734 E-mail: ascjxh@126.com