

# 可液化场地桥梁群桩基础地震响应振动台试验研究

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. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 大连海事大学道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 针对上覆黏土层、下部饱和砂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, 完成了可液化场地群桩—土—桥梁结构地震相互作用振动台试验。试验表明: 在小幅震动阶段孔压仅有少量积累, 孔压积累主要发生在强烈震动阶段; 孔压随震动幅值增大、持时延长而变得更高; 最强烈液化作用滞后于峰值加速度时刻。砂层加速度反应受场地液化影响较大; 随着砂层液化的发展, 土层位移峰值时刻与输入地震波峰值时刻、土层加速度峰值时刻之间表现出明显的时滞特征, 而土层位移对桩的弯矩反应起着越来越明显的作用, 且液化砂层位移对桩土相互作用力影响效应已凸显; 完全液化砂层的承载力并未全部丧失; 无论砂层液化与否, 桩与砂层加速度反应规律保持一致; 地震中土层分界附近桩的加速度、弯矩出现突变。振动台试验无疑为可液化场地桥梁群桩抗震性能研究提供必要铺垫。

**关键词:** 可液化场地; 地震反应; 桥梁低承台群桩基; 振动台试验

**中图分类号:** TU473.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2010)05-0672-09

**作者简介:** 唐亮(1981-), 河南信阳人, 博士研究生, 从事土动力学与岩土地震工程的研究。E-mail: hit\_tl@163.com。

## Shaking table test on seismic response of pile groups of bridges in liquefiable ground

TANG Liang<sup>1</sup>, LING Xian-zhang<sup>1</sup>, XU Peng-ju<sup>1</sup>, GAO Xia<sup>1</sup>, WANG Dong-sheng<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Research Centre of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** Shaking table test on seismic low-cap pile groups-soil-bridge structure interaction in liquefiable ground with the overlying clay layer and the lower saturated sand layer is completed. The test indicates that pore pressure caused by the slight vibration during earthquake is only a small amount of accumulation, and pore pressure accumulation mainly occurs at the stage of strong vibration. The pore pressure gradually increases as the input motion amplitude becomes larger and the shaking duration becomes longer. It's obtained that the strongest liquefaction lags behind the peak acceleration time. Acceleration of the sand is remarkably influenced by soil liquefaction. With the development of soil liquefaction, the time-delay characteristics between the peak soil displacement time and the peak input motion time, and the peak acceleration time of soil are significantly displayed, and soil displacement plays an increasingly prominent role in the bending moment of the pile. Similarly, the displacement of liquefied sand has a specially obvious effect on pile-soil interaction. The fully liquefied sand doesn't completely lose the bearing capacity. Whether the sand is liquefied or not, the acceleration law of the pile and the sand maintains consistent. During the earthquake, the jump reaction of the acceleration and the bending moment on the pile is observed near the soil interface. It's no doubt that the shaking table test provides the necessary groundwork to study seismic performance of pile groups of bridges.

**Key words:** liquefiable ground; seismic response; low-cap pile groups of bridge; shaking table test

## 0 引言

场地液化是导致桥梁桩基震害的主要原因<sup>[1-4]</sup>。振动台试验为研究可液化场地桩—土—桥梁结构地震相互作用且解决桥梁桩基抗震问题的一种有效手段而近年来备受关注<sup>[5-8]</sup>, 日、美已取得重要研究成果<sup>[7-8]</sup>。低承台群桩因能减轻可液化土层中结构的振动并改善桩的受力特性, 在桥梁工程中被广泛应用<sup>[9-10]</sup>。地震作用下桩周土发生液化时, 低承台群桩动力反应极

其复杂<sup>[10]</sup>, 因此, 有必要开展可液化场地桥梁群桩基础地震响应特性研究。笔者完成了可液化场地群桩—土—桥梁结构地震相互作用多个模型振动台试验, 获

**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); 交通部西部交通建设科技项目(2009318000100); 教育部留学回国人员科研启动基金项目(2010年第37批); 国家自然科学基金项目(50378031, 50178027)

**收稿日期:** 2009-02-06

得了大量宝贵的试验资料。本文仅介绍两层土可液化场地低承台群桩基地震响应振动台试验成果。

### 1 试验概况

试验体设计与传感器布置见图 1。模型桩、柱墩由微粒混凝土配以镀锌铁丝预制而成<sup>[10-11]</sup>：墩径 160 mm、长 820 mm，配 32Φ2 钢筋、箍筋 Φ1@20 mm，靠近承台 150 mm 范围内柱墩配 Φ1@10 mm 箍筋；桩径 80 mm、长 1750 mm，配 9Φ2 钢筋、箍筋 Φ1@20 mm，桩上段 600 mm 范围内箍筋 Φ1@10 mm，桩距 300 mm；承台长 460 mm、宽 460 mm、高 150 mm，双向均匀配筋 Φ0.8@3.5 mm，保护层厚 10 mm，混凝土设计标号为 C30（以确保桩、柱墩先于承台发生破坏）；桥梁结构采用质量块（360 kg）模拟。地基为上覆粉质黏土层、下伏饱和砂层（试验砂的不均匀系数 3.5、平均粒径 0.35 mm、最大粒径 2 mm，改进的水沉法制备）的形式。振动台试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室完成，采用长 2 m×宽 1.5 m×高 2 m 的层状剪切变形土箱，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箱两侧内壁设置一层厚 100 mm 的海绵以便有效地减少土箱边界效应<sup>[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，本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，0.15 g 压缩 El Centro 波（时间压缩率为√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 2 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。

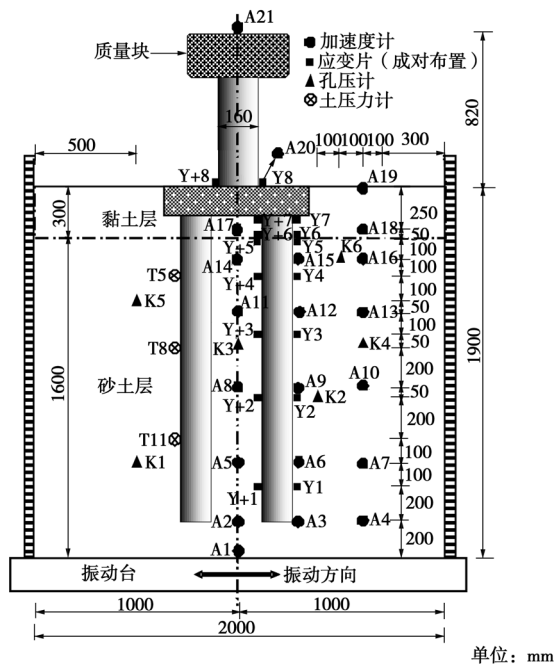


图 1 试验体设计与传感器布置图  
Fig. 1 Schematic sketch of test system

试验前，由微幅白噪声扫频获得试验体自振频率约为 12.3 Hz、阻尼比约为 14.6%（利用半功率带宽原理获得），而在环境小幅激振下测得土箱自振频率约为 1.4 Hz、人工大幅激振实测值约为 1.2 Hz，大振幅（约 5 cm）自由振动衰减法测得土箱阻尼比为 3.5%，因此，土箱动力特征不会对地基动力反应产生不良影响<sup>[13]</sup>。

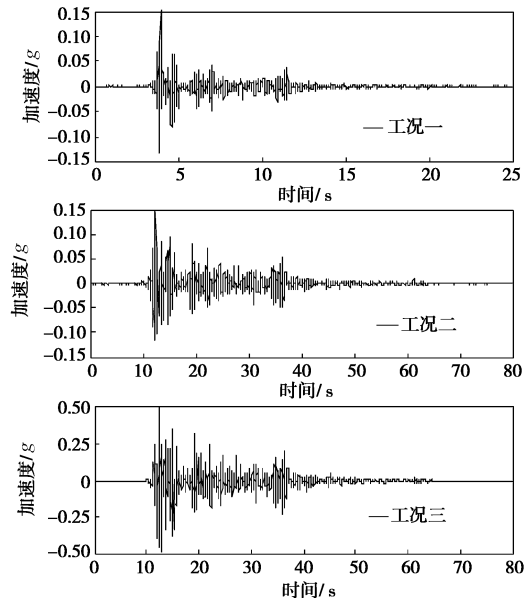


图 2 输入地震加速度  
Fig. 2 Input motion

### 2 宏观现象

工况一中，地表、桩—柱墩轻微振动。工况二中，地表局部有少量水渗出，柱墩振动幅度仍很小、但频率较工况一有所降低。工况三中：砂层全部液化，强烈喷砂冒水，如图 3；地基下沉 3~5 cm，与地基下陷量相比，基桩整体下陷深达 10~17 cm 不等；桩头附近出现了较宽裂缝，桩很低位置处（埋深 1000 mm）有裂缝产生，如图 3，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动力性能均起着重要作用；柱墩未破坏；排水后，可见地表分布较多喷出的小砂堆。

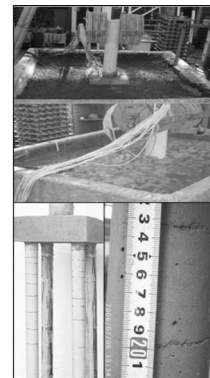


图 3 宏观现象  
Fig. 3 Test phenomenon

### 3 场地动力反应

三种工况中砂层孔压比时程曲线见图 4, 土层位移反应时程曲线见图 5, 以及地基加速度反应时程曲线见图 6~8。输入三种地震波峰值时刻附近, 孔压瞬间增至较大值, 但峰值孔压时刻滞后于输入地震波峰值时刻且工况三中这种滞后性尤为明显; 同一工况中, 整个砂层孔压几乎同时达到峰值。工况一、二中, 孔压达到峰值后很快消散, 自下而上孔压比逐渐变小。工况一较工况二中砂层孔压比要小, 可见地震持时对孔压发生起着较直接作用。由于工况一、二中孔压较小、土层结构破坏较轻, 砂层对输入地震波有一定衰减作用, 自下而上地基加速度反应逐渐变小。工况一中, 砂层位移峰值时刻与输入地震波峰值时刻基本一致; 而工况二中, 砂层位移时刻滞后于输入地震波峰值时刻。工况三中, 自下而上峰值孔压比很快达到砂层液化所需的孔压比 (0.75~1.0), 孔压达到峰值后长时间不消散, 土层液化持时长且最强烈液化作用滞后输入地震波峰值时刻; 由于砂层孔压迅速上升且较快进入完全液化状态, 土体基本丧失了结构性, 砂层加速度反应因液化砂土层间剪切运动加快而自下而上逐渐增大, 而砂层位移自下而上逐渐减小且位移峰值时刻滞后输入地震波峰值时刻。由上述分析得到, 在小幅振动输入时孔压仅有少量积累, 孔压 (比) 的

积累与土层液化程度更多取决于强震段振动作用, 而砂层加速度反应及土层位移峰值时刻受场地液化影响较显著。工况一中, 砂层加速度反应主要集中在低频段上且该频段上自下而上分量不断增大, 中高频段上分量自下而上变化稍小; 而工况三中, 砂层加速度反应在低频段上自下而上分量变化不大, 中高频段上分量自下而上逐渐变小, 说明了液化砂层对地震波的中高频段有一定滤波作用。

三种工况中, 输入振动加速度达到峰值时刻附近, 砂层出现“瞬时负孔压”, 特别是工况三中“瞬时负孔压”绝对值甚至远大于正峰值孔压, 此现象已被多次试验证实<sup>[7-8, 11]</sup>, 过去认为这是由于土体瞬时剪胀所致<sup>[7, 11]</sup>, 原因尚待进一步探究。

### 4 桩—柱墩加速度反应

三种工况中, 桩、墩顶的加速度反应时程曲线见图 9~11, 桩、墩顶的加速度峰值时刻与输入加速度峰值时刻几乎一致。工况一、二中, 试验体刚度足以抵抗小震激励而呈线性响应且砂层局部液化对桩的负面影响未体现、土层对桩的嵌固作用较大, 自下而上桩的加速度反应逐渐变小, 这与砂层加速度反应规律保持一致。工况三中, 自下而上桩的加速度反应总体上逐渐增大, 这也与液化砂层加速度自下而上变化规

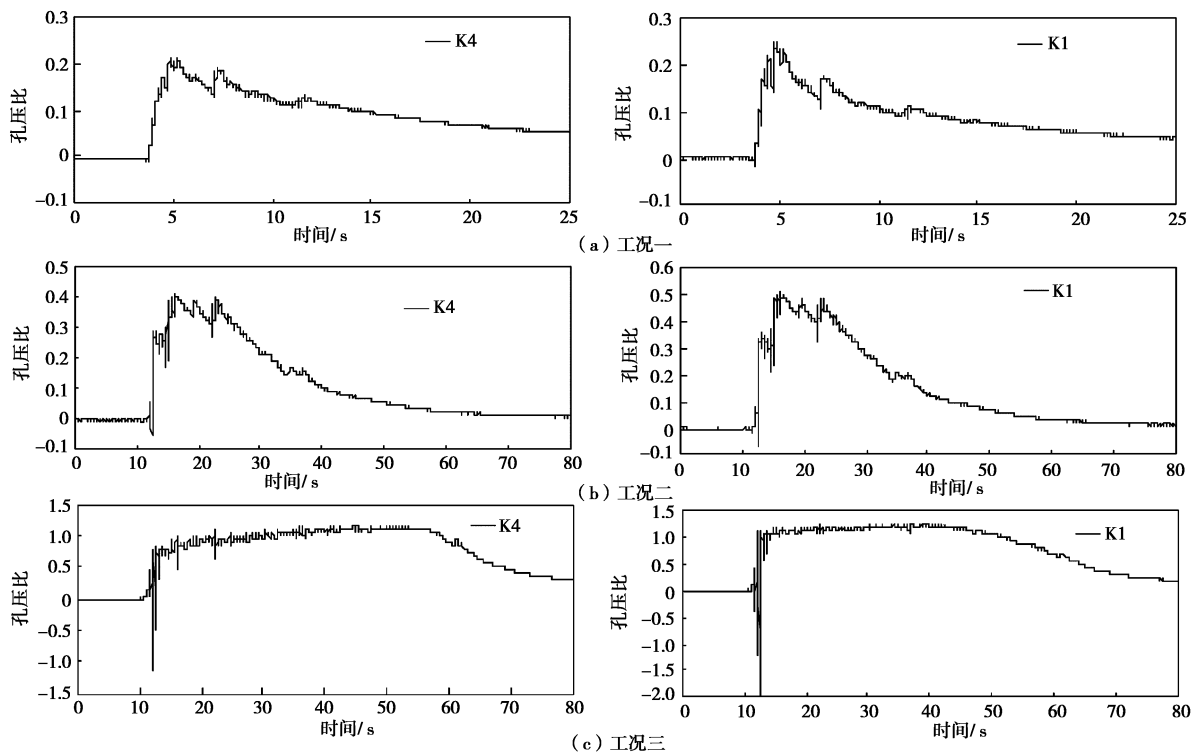


图 4 孔压比时程曲线

Fig. 4 Time histories of pore pressure ratio

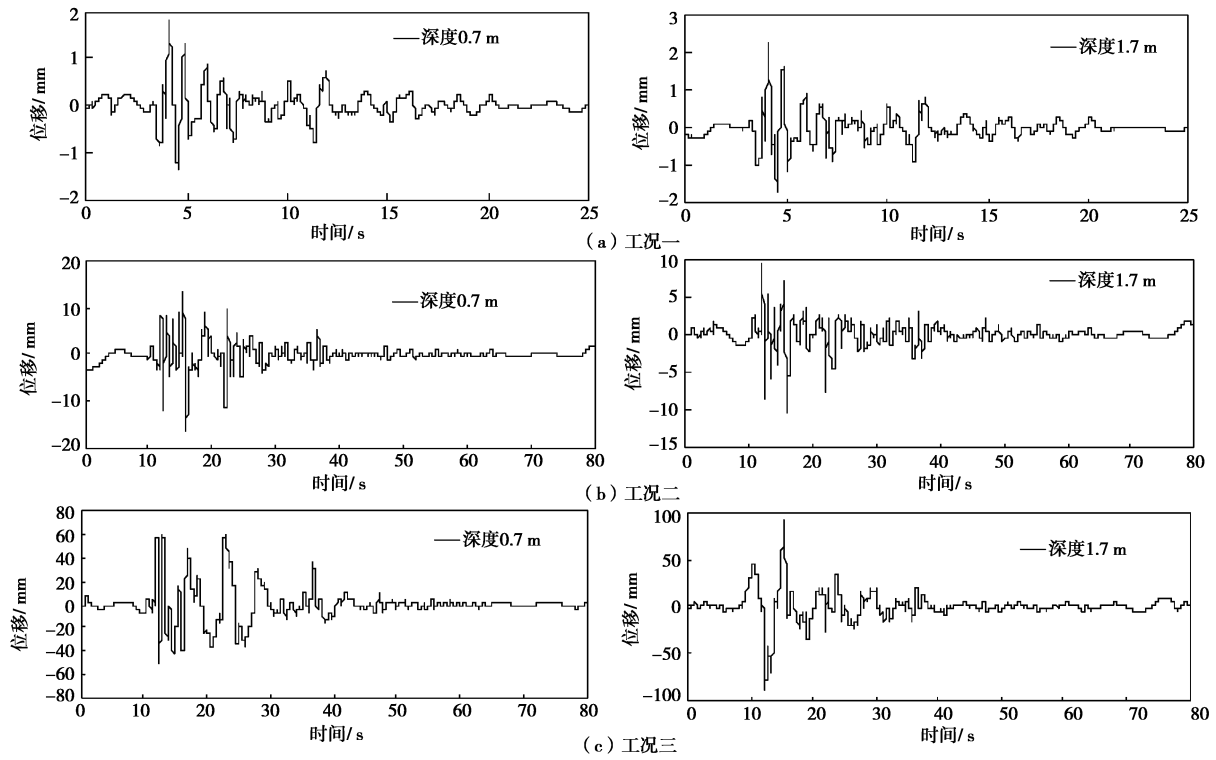


图 5 砂层位移时程曲线

Fig. 5 Displacement time histories of sand

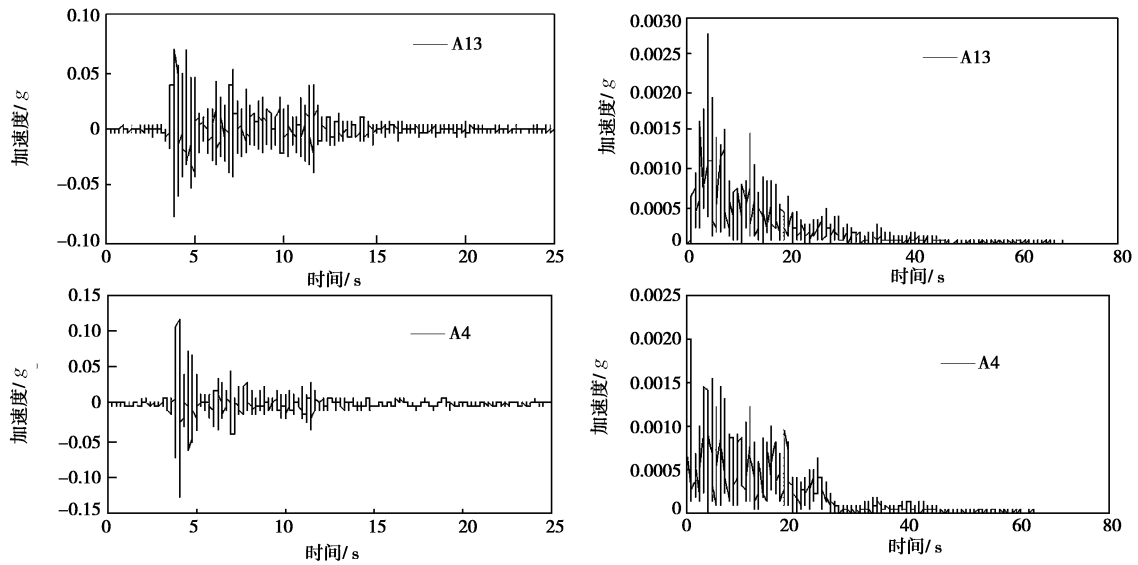
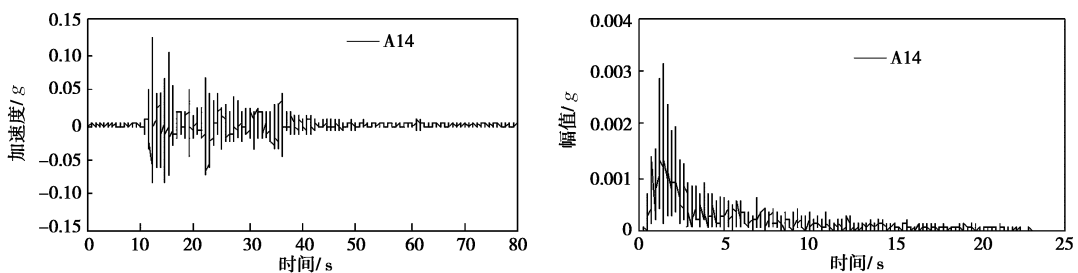


图 6 工况一中砂层加速度时程曲线

Fig. 6 Acceleration time histories of sand in event one



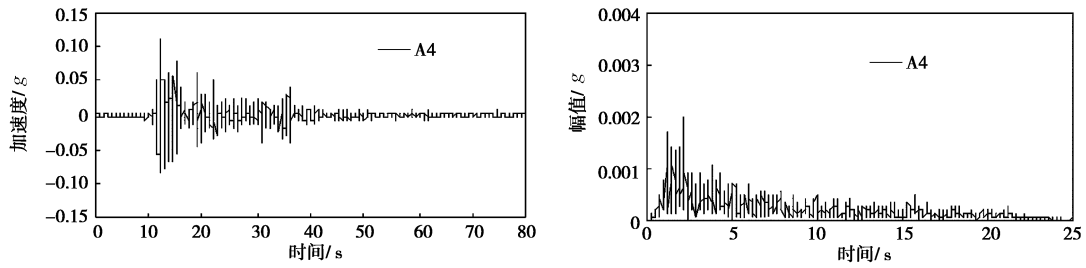


图7 工况二中砂层加速度时程曲线

Fig. 7 Acceleration time histories of sand in event two

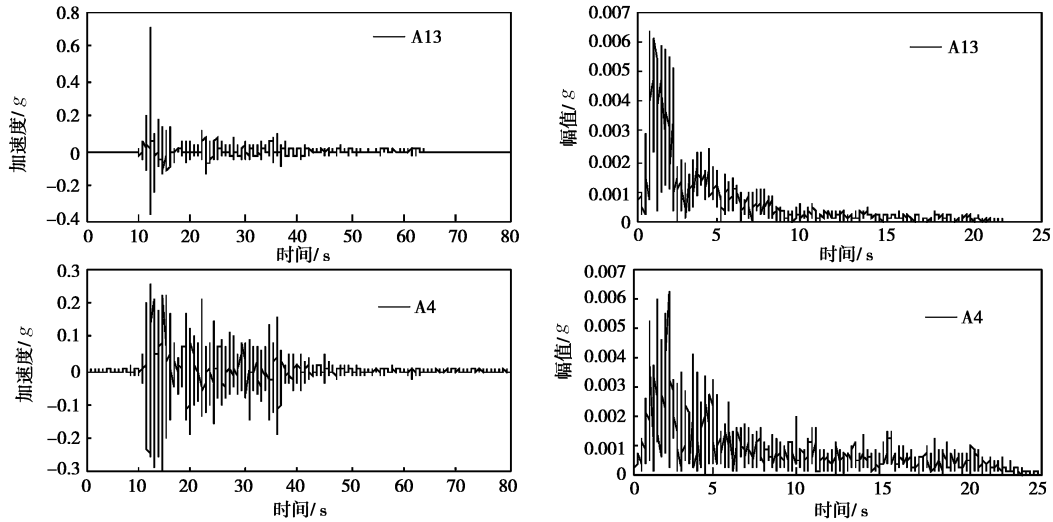


图8 工况三中砂层加速度时程曲线

Fig. 8 Acceleration time histories of sand in event three

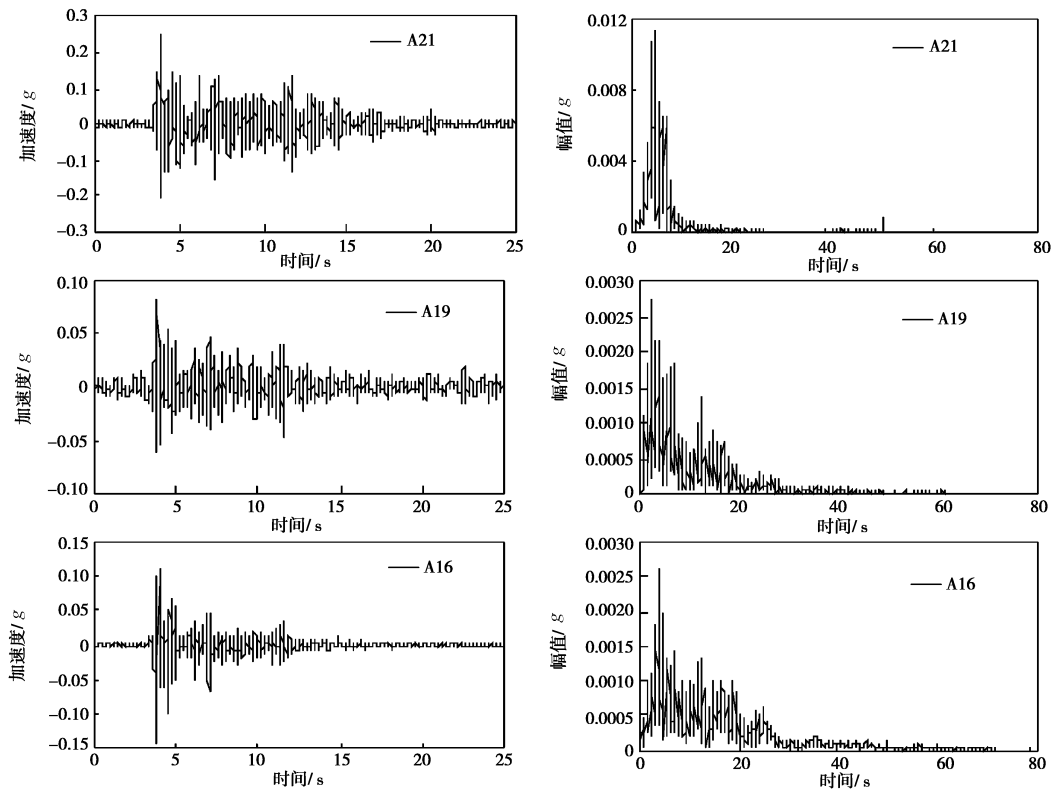


图9 工况一中桩的加速度时程曲线

Fig. 9 Acceleration time histories of piles in event one

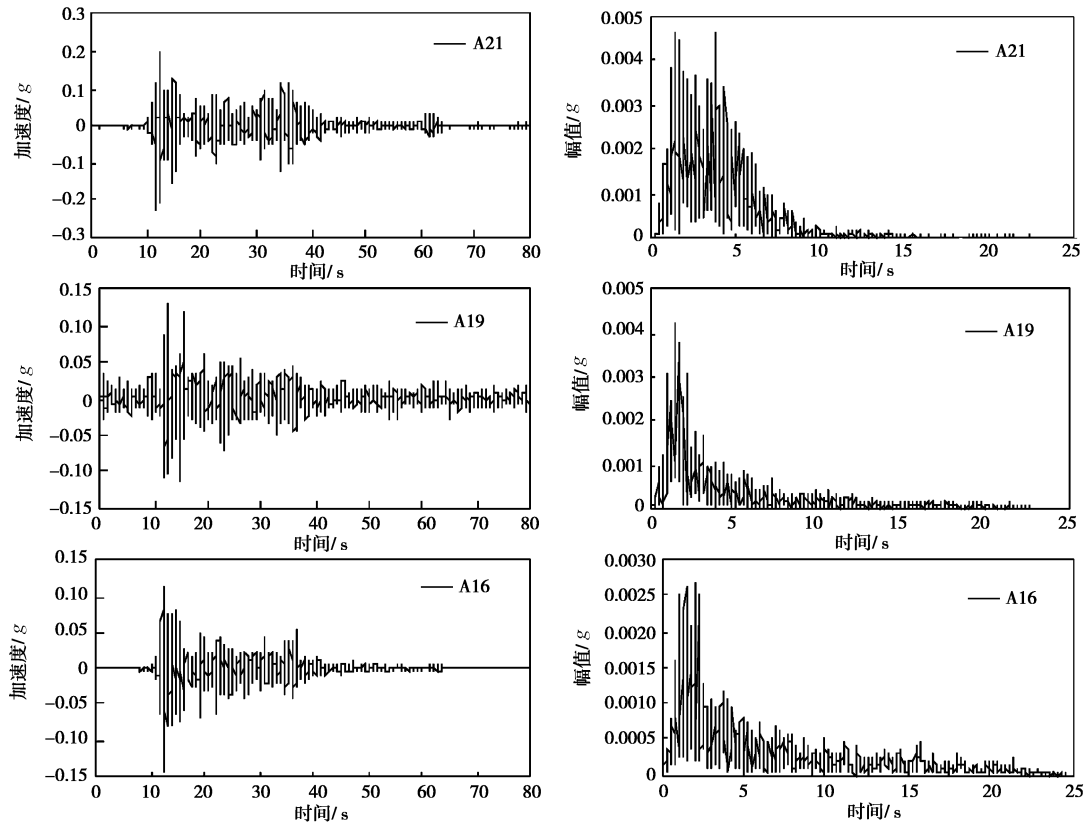


图 10 工况二中桩的加速度时程曲线

Fig. 10 Acceleration time histories of piles in event two

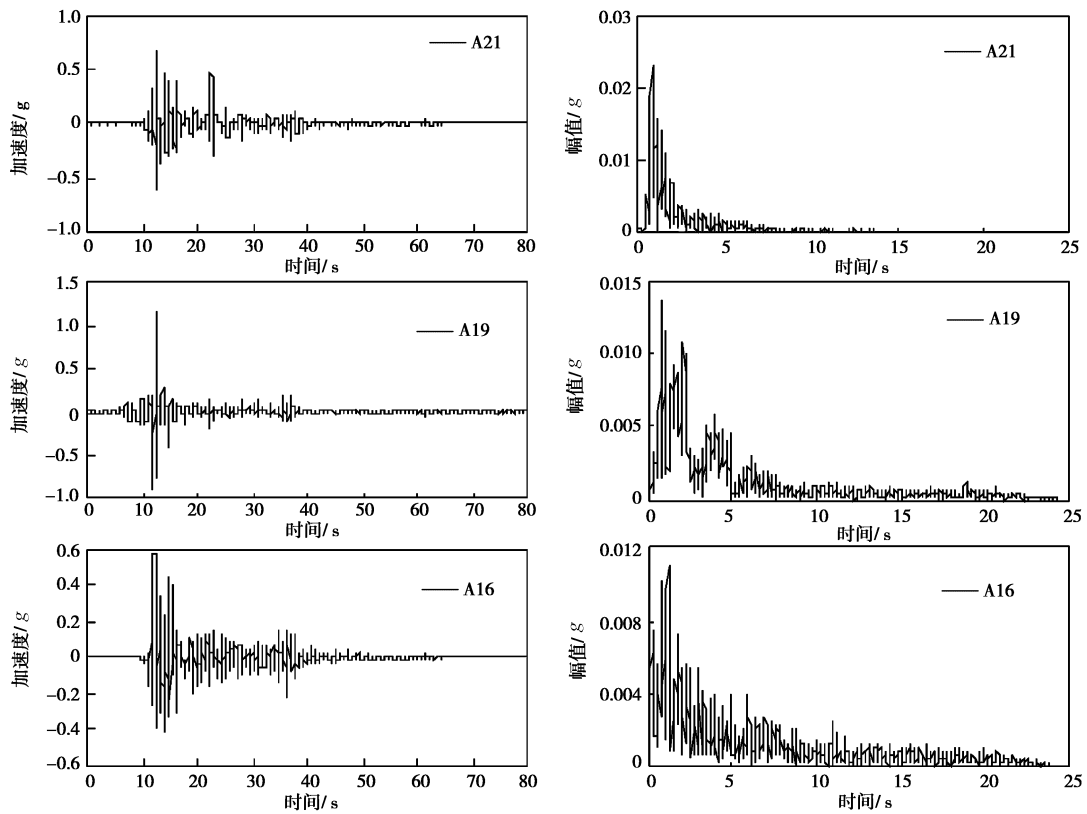


图 11 工况三中桩的加速度时程曲线

Fig. 11 Acceleration time histories of piles in event three

律一致,这可能是液化砂层层间剪切作用强烈,砂层对桩的约束效应减弱,而上部结构的惯性效应对桩的加速度反应影响较大等所致。可见,场地液化发展是引起桩的加速度反应转变的决定性因素。三种工况中,桩的加速度集中在低频段内(0~10 Hz)反应且在该频段上自下而上分量不断增大,中高频段上加速度分量变化不明显。

三种工况中,由于上部配重惯性效应、承台转动及土体运动,自下而上柱墩的加速度反应不断增大。与工况一相比,工况二中墩顶加速度反应更大。工况三中,墩顶加速度因场地液化而其放大效应有所减弱,这可能与液化砂层传递振动能力减弱所致。

## 5 桩动弯矩特征

三种工况中,桩的峰值弯矩沿埋深分布见图12,桩的弯矩反应时程曲线见图13。

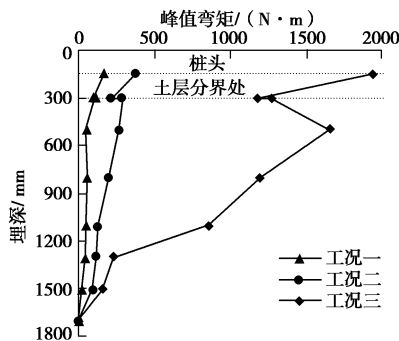


图12 桩沿埋深的峰值弯矩分布图

Fig. 12 Distribution of peak moment of pile along soil depth

工况一、二中,桩自下而上弯矩出现不断增大趋势,并以工况二中桩的弯矩更大;工况三中,自下而上砂层中桩的弯矩先增后减。工况一中,峰值弯矩时刻与输入地震波峰值时刻基本一致,而工况二、三中,峰值弯矩时刻则与输入地震波峰值时刻存在较大差别,而砂层位移峰值时刻对应的桩上弯矩具有较大值或峰值。三种工况中,桩底出现弯矩最小值,桩头出现峰值弯矩,土层分界处桩出现弯矩突变。峰值弯矩存在的位置,说明上覆黏土层与承台对桩头的嵌固作用非常有效。地震中,由于桩尖不固定使得桩下段弯矩较小。对比输入地震波峰值、砂层位移峰值与桩的弯矩峰值时刻并据此推断,工况一中砂层孔压比尚小(小于0.3),上部配重惯性作用对桩的弯矩影响较大,但工况二、三中,随场地液化加深,土体变形对桩的弯矩反应起着越来越明显的影响,并以工况三表现最突出。因此,液化场地低承台群桩抗震设计有必要考虑土体变形对桩的作用,同时,场地液化过程中桥梁群桩基础在桩头处抗震性能需特别加于校核。此外,注意到桩的峰值弯矩发生位置并不完全与土层位移峰值出现时刻一致,表明液化场地中桩的地震行为较复杂,

尚待深入研究。

## 6 桩土接触土动压力反应

桩上布置的土压力计(如图1,试验前土压力计读数调零)记录了三种工况作用下桩土接触土压力反应时程曲线见图14。三种工况中,砂层中桩土接触土压力沿埋深表现出先增后减的特征,砂层中部桩上出现土压力峰值,这与静力状态下桩上土压力分布规律并不一致;砂层上部桩上土压力较砂层下部桩上土压力较小。工况一中,桩土接触土压力峰值时刻与输入地震波峰值及土层加速峰值时刻保持一致,考虑此时砂层的孔压比小于0.3,此时桩-土相互作用受到输入地震波、上部配重惯性作用影响较大。工况二较工况一中桩土接触土压力峰值要高,考虑工况二中砂层的孔压比高、土体侧向刚度退化更多,而桩土相互作用力更大;同时,随着场地液化的不断发展,工况二中桩土接触土压力峰值反应并未出现在土层加速峰值时刻,而与土层位移峰值时刻几乎保持一致;可见土层位移对桩土相互作用力贡献明显大于土体刚度衰减引起桩土相互作用力的减小,即土层位移对桩土相互作用力起到越来越明显的作用。工况三中,砂层完全液化砂层的承载力并未全部丧失,且砂层中、下部桩上土压力峰值变化不大,这也许与土层液化过程中土体侧向刚度衰减、土层位移均有密切联系;虽然桩土接触土压力峰值时刻滞后于输入地震波峰值时刻,然而与土层的位移峰值时刻确相差较大,也从侧面反映了液化场地条件下桩土地震相互作用过程的复杂性。目前,涉及到液化砂层中桩土接触土动压力变化规律的研究尚不多见,限于篇幅与问题本身的复杂性,有待深入研究。

## 7 结论

(1) 小幅震动阶段孔压仅有少量积累,孔压积累主要集中在强烈振动段。孔压随震动幅值增大、持时延长而孔压更高。最强烈液化作用滞后于峰值加速度时刻。

(2) 砂层加速度反应受场地液化影响较大。随着砂层液化的发展,自下而上砂层的加速度反应从逐渐减小向着逐渐增大而转变;液化砂层对地震波的中、高频段分量有一定滤波作用。

(3) 砂层液化的不断加深,土层位移峰值时刻与输入地震波峰值时刻、土层加速度峰值时刻之间逐渐表现出明显的时滞特征。

(4) 无论砂层液化与否,自下而上桩的加速度反应与砂层加速度反应规律保持一致。砂层不液化或液

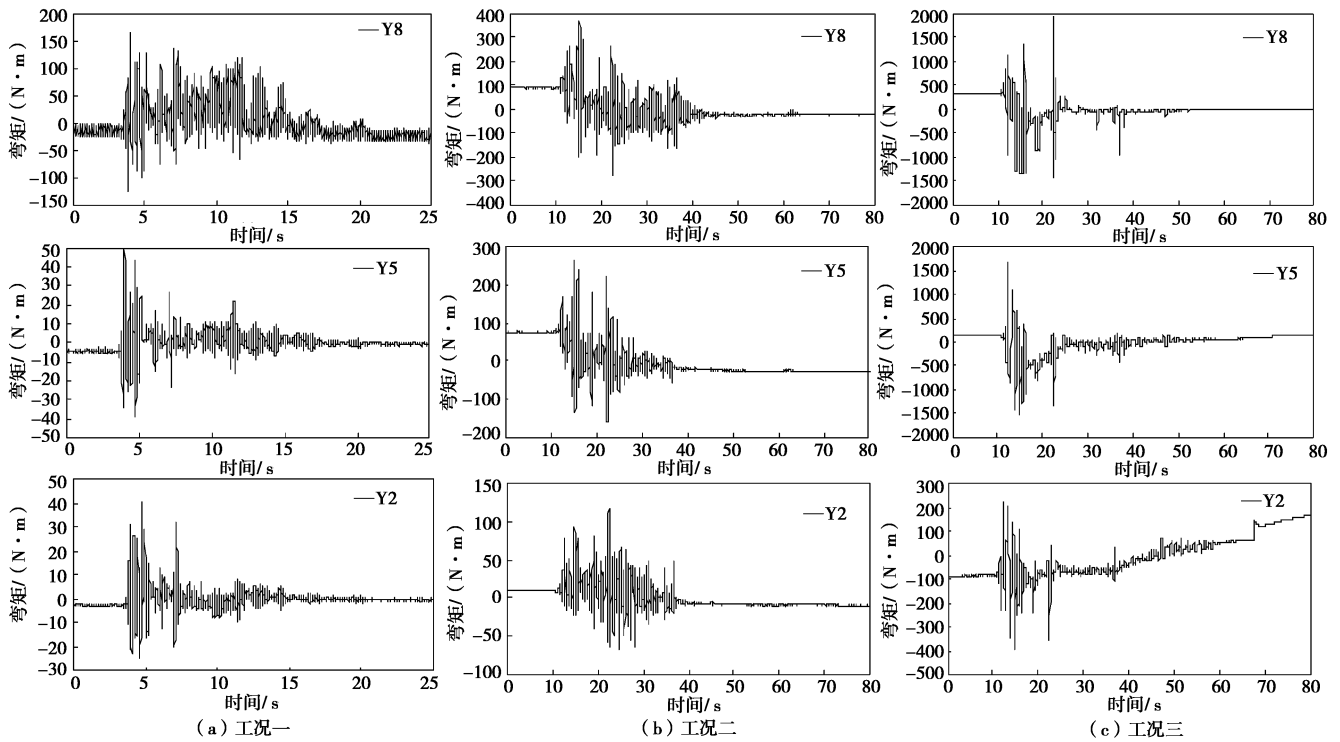


图 13 桩的弯矩反应时程曲线

Fig. 13 Moment time histories of piles

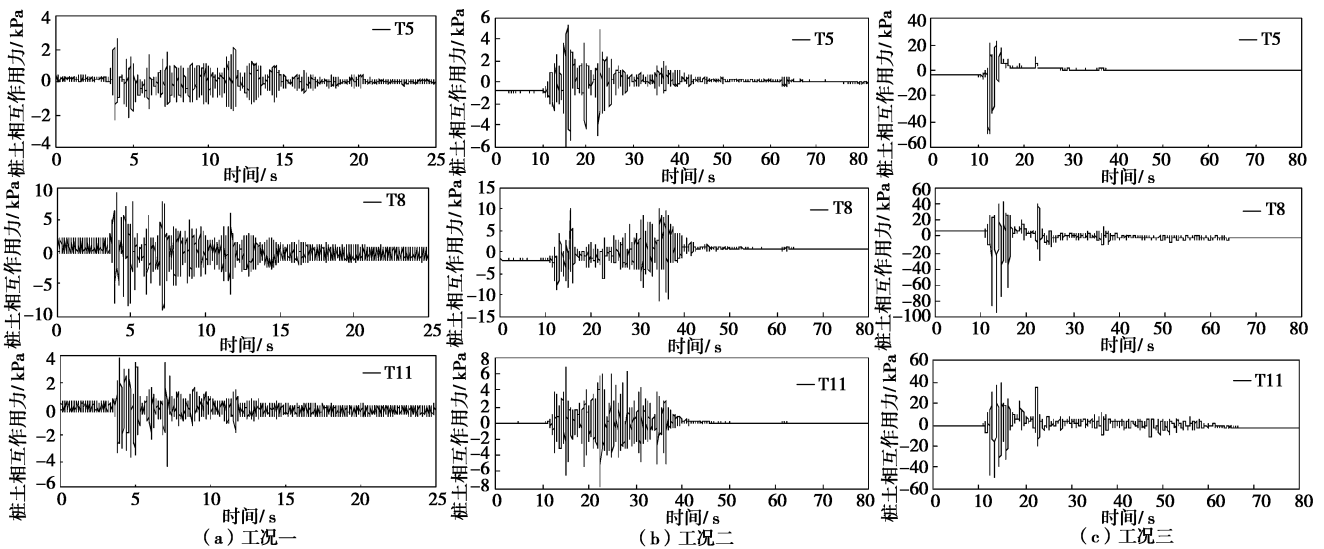


图 14 桩土接触土压力时程曲线

Fig. 14 Time history of earth pressure on piles

化不充分时, 自下而上桩的加速度反应逐渐减弱; 砂层液化完全时, 自下而上桩的加速度反应逐渐增大。

(5) 不管砂层液化与否, 桩的弯矩峰值均存在于桩头, 表明了两层土可液化场地中群桩桩头的抗震性能在设计中值得注意。

(6) 随着砂层液化的发展, 砂层位移对桩的弯矩反应起着越来越明显的作用, 揭示了可液化场地中桩的抗震设计考虑土体变形效应的必要性; 砂层位移增大对桩土相互作用力影响亦很显著, 并且完全液化的

砂层承载力并未全部丧失。

特别致谢: 振动台试验得到同济大学桥梁系范立础院士、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**: 731 - 742.
- [2] 刘惠珊, 乔太平. 可液化土中桩基设计计算方法的探讨[J]. 工业建筑, 1983(4): 19 - 24. (LIU Hui-shan, QIAO Tai-ping. Discussion of computation method on piles design in liquefied soil[J]. Industrial Construction, 1983(4): 19 - 24. (in Chinese))
- [3] WILSON D W. Soil-pile-superstructure interaction in liquefying and soft clay[D]. California: University of California, 1998.
- [4] 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 Yu-run, YUAN Xiao-ming. State-of-art of study on influences of liquefaction-induced soil spreading over pile foundation response[J]. World Earthquake Engineering, 2004, **20**(2): 17 - 22. (in Chinese))
- [5] 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, 2001, **22**(5): 75 - 78. (ZHANG Jian-min. Effect of large horizontal post-liquefaction deformation of level ground on pile foundation[J]. Journal of Building Structures, 2001, **22**(5): 75 - 78. (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 Jian-hua, FENG Shi-lun. Research on lateral resistance of pile foundation in liquefaction strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(10): 1597 - 1601. (in Chinese))
- [7] 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): 51 - 59. (LING Xian-zhang, WANG Dong-sheng. 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): 51 - 59. (in Chinese))
- [8] KAGAWA T, MINOWA C, MIZUNO H, et al. Shaking table testing on piles in liquefying sand[C]// Proc of 5th US National Conf on Earthq Eng, Chicago, 1994: 107 - 116.
- [9] TAMURA S, SUZUKI Y, TSUCHIYA T, et al. Dynamic response and failure mechanisms of a pile foundation during soil liquefaction by shaking table test with a large-scale laminar shear box (CD ROM paper No 0903)[C]// 12WCEE. New Zealand, 2000.
- [10] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997. (FAN Li-chu. Seismic design of highway bridges[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997. (in Chinese))
- [11] 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 Xian-zhang, WANG Dong-sheng, WANG Zhi-qiang, 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))
- [12] 凌贤长, 王 臣, 王 成, 等. 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 Xian-zhang, 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))
- [13] 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, 2002, **30**(7): 781 - 785. (WU Xiao-ping, SUN Li-min, HU Shi-de, et al. Development of laminar shear box used in shaking table test[J]. Journal of Tongji University, 2002, **30**(7): 781 - 785. (in Chinese))
- [14] 吕西林, 陈跃庆, 陈 波. 结构-地基动力相互作用体系振动台模拟试验研究[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))