

文章编号: 1000-7598-(2006)01-0007-05

# 液化场地桩基桥梁震害响应大型 振动台模型试验研究

凌贤长<sup>1</sup>, 郭明珠<sup>2</sup>, 王东升<sup>3</sup>, 王 臣<sup>1</sup>, 王丽霞<sup>1,5</sup>, 王志强<sup>4</sup>(1.哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 2.北京工业大学 土木工程学院, 北京 100022;  
3.大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 大连 116026; 4.同济大学 桥梁工程系, 上海 20092; 5.吉林建筑工程学院 交通工程系, 长春 130021)

**摘 要:** 采用大型振动台进行液化场地桩基桥梁震害响应模型试验, 很好再现了自然地震触发场地液化及结构破坏的各种宏观现象。0.15gEl Centro 波输入下, 上部砂层局部液化, 桩-柱墩加速度主要表现为低频反应, 桩动应变幅值自下而上很快增大、到达地表则大幅度减小。0.5gEl Centro 波输入下, 整个砂层全部液化, 桩被折断且加速度也主要表现为低频反应, 桩动应变幅值自下而上很快增大、到达地表则大幅度减小。砂层液化与否, 对桩-柱墩动力反应影响很大。

**关 键 词:** 液化场地; 桩基桥梁; 震害响应; 大型振动台模型试验

中图分类号: U 441<sup>+</sup>.3

文献标识码: A

## Large-scale shaking table model test of seismic response of bridge of pile foundation in ground of liquefaction

LING Xian-zhang<sup>1</sup>, GUO Ming-zhu<sup>2</sup>, WANG Dong-sheng<sup>3</sup>, WANG Chen<sup>1</sup>, WANG Li-xia<sup>1,5</sup>, WANG Zhi-qiang<sup>4</sup>

(1.School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2.School of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

3.Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian University of Maritime Affairs, Dalian 116026, China;

4.Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

5.Department of Traffic Engineering, Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021, China)

**Abstract:** The proportional model test of seismic response of bridge of pile foundation in liquefaction ground is done by a large-scale shaking table, which can commendably recurrence the main phenomenon of ground liquefaction and structure breakage arisen from natural earthquake. In input of 0.15gEl Centro wave, the upside of the saturation sand stratum is partly liquefied; the low-frequency response of acceleration appears on pile and pillar frusta; and the peak value of pile dynamical strain fastly aggrandizes from bottom to top; and moreover, largely minishes up to toft surface. In input of 0.5gEl Centro wave, the saturation sand stratum is entirely liquefied; the low-frequency response of acceleration also appears on pile and pile is broken; and the peak value of pile dynamical strain fastly aggrandizes from bottom to top, and moreover, largely minishes up to toft surface. It has importantly influence upon dynamic response of pile and pillar frusta that the saturation sand stratum is liquefied or not.

**Key words:** liquefaction ground; bridge of pile foundation; response of seismic destroy; large-scale shaking table model test

## 1 引 言

场地液化是桩基桥梁震害的主要原因之一<sup>[1-3]</sup>。考虑液化场地桩-土-桥梁结构地震相互作用, 对于预测桩基桥梁震灾响应具有重要意义<sup>[3-5]</sup>。大型振动台模型试验是研究这一问题的有效手段, 日益引起

广泛关注<sup>[3, 5]</sup>, 国外已取得不少颇有价值的试验成果<sup>[3, 5-9]</sup>, 而国内尚罕见相应研究的文献报道<sup>[5]</sup>。鉴于此, 国家自然科学基金 2001 年在国内首次资助了此项研究, 2003 年又跟踪资助同类研究。在土木工程防灾国家重点实验室成功进行了大型振动台模型试验, 并针对小震输入下的试验过程进行桩-柱墩动

收稿日期: 2004-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.50378031, 50178027)。

作者简介: 凌贤长, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土地震工程、地下岩土工程、冻土工程、岩土工程灾害防治方面研究。

E-mail: Xianzhang\_Ling@263.net

反应数值模拟，积累了若干有益的经验。因篇幅所限，仅介绍“非自由场地液化 1:10 模型振动台试验”的研究成果。振动台和土箱性能、原型概况、模型制作与传感器布置见文献[4]，模型相似设计见文献[10]。

## 2 试验宏观现象

15gEl Centro 波输入下，砂层上部发生局部液化，出现冒水现象，见图 1，桩-柱墩轻微晃动。



图 1 0.15 g El Centro 波输入试验现象

Fig.1 The test phenomena of 0.15 g El Centro wave input

0.5gEl Centro 波输入下，整个砂层全部液化，强烈喷砂冒水，地基下沉 13~15 cm，桩在上覆粘土层与下伏砂层分界附近被折断、破裂范围 51 cm（如此大的破裂范围，说明桩破坏发生于砂层液化中且随砂层液化扩展桩的嵌固点一直下移），桩的折断位置之下部分仍保持原有垂直状态，见图 2。

## 3 试验结果分析

### 3.1 桩-柱墩加速度反应

0.15gEl Centro 波输入下，桩-柱墩加速度时程曲线、傅立叶谱见图 3，动力放大系数峰值随测点高度变化见图 4。体系卓越频率为 1.5Hz，自下而上，桩-柱墩加速度反应明显增大，其中桩反应先由低频向中高频扩展（出现多峰值）、再由中高频向低频扩展（多峰值逐步消失），柱墩主要为低频反应（无多峰值），这是由于桩-柱墩刚度足以抵抗小震激励而呈线性动力变形，并且砂层局部液化对桩的负面影响未体现，土层对桩嵌固作用较大，桩-土动力相互作用突出，体系动力耗能作用较小，所以对输入波动力放大作用较大。

0.5gEl Centro 波输入下，动力放大系数峰值随测点高度变化见图 4。桩-柱墩加速度时程曲线、傅立叶谱见图 5。桩-柱墩沿竖向动力放大作用复杂，桩加速度反应明显不同于柱墩，折断位置桩反应最

大，折断位置之下桩反应自下而上较大幅度增加且主要限于低频段，这是由于桩折断、倒塌所致，并且桩-柱墩刚度不足以抵抗较大震激励、液化砂层抗剪力极低而使得桩几乎失去嵌固与侧向支撑，加之液化与非液化土层对桩作用之差异及墩顶存在配重水平惯性力与地运动双重作用，因而体系非线性动力耗能作用很大，对输入波动力放大作用较小，且沿竖向变化复杂，桩相对反应较小。

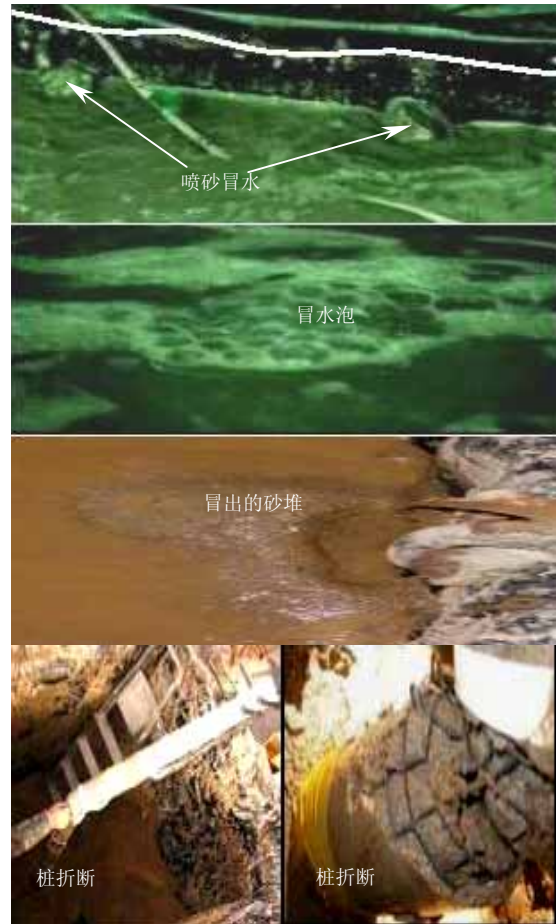


图 2 0.5 g El Centro 波输入试验现象

Fig.2 The test phenomena of 0.5 g El Centro wave input

### 3.2 桩动应变

0.15gEl Centro 波输入下，桩动应变时程曲线见图 6，动应变幅值随埋深变化见图 7。桩动应变多峰值相当明显，动应变幅值在地基内部自下而上快速增大、而到达地表则大幅度减小，这是由于桩反应下部主要由土层反应控制、而上部受土层与上部结构反应双重影响，并且上部结构断桩前积极加大桩反应、而断桩后对桩反应有较大负面影响。此外，动应变幅值的最大值存在于断桩位置，说明上覆非液化土层对桩的嵌固作用非常有效。

折断位置之下桩动应变自下而上出现“增大→减小→增大”趋势。0.5gEl Centro 波与 0.15gEl Centro 波输入下，动应变幅值随埋深变化规律基本一致，只是前者大于后者，这是由于小震输入下的初始液化土层对桩反应有较大约束作用，而较大震输入下的完全液化砂土层对桩反应几乎失去约束作用，并且桩又受到上部配重水平惯性力和地运动双重作用。若折断位置动应变的极大值发生于桩折断之同时，则桩应属于延性破坏，对于桥梁延性抗震具有重要意义。

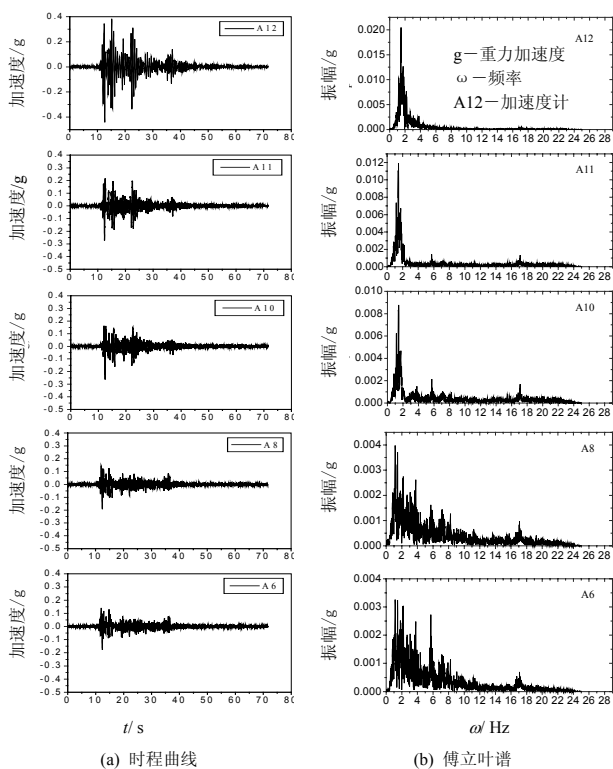


图 3 0.15gEl Centro 波输入下加速度反应特征曲线  
Fig.3 The curve of acceleration response in input of 0.15gEl Centro wave

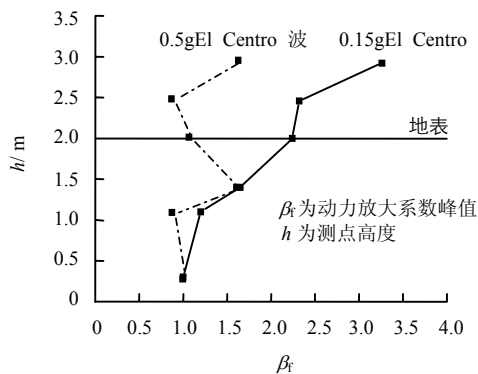


图 4 动力放大系数峰值分布曲线  
Fig.4 The curve of peak value of dynamic magnifying modulus

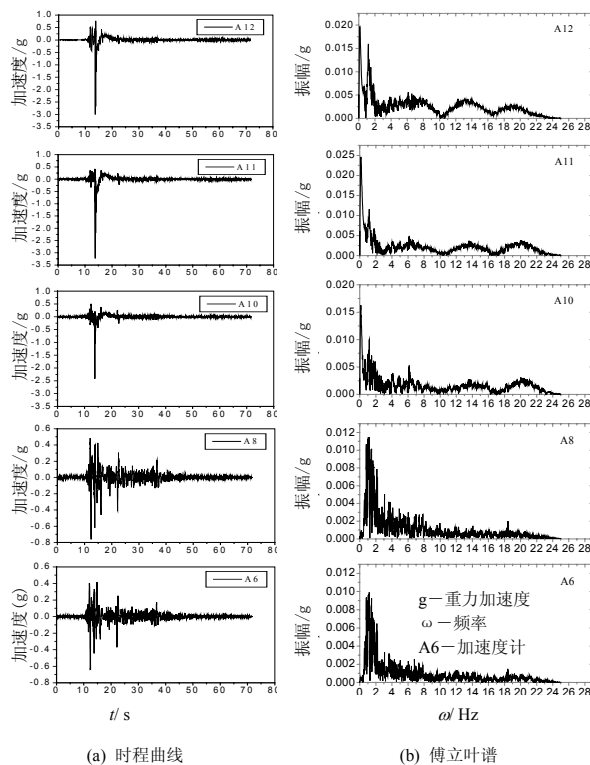


图 5 0.5gEl Centro 波输入下加速度反应特征曲线  
Fig.5 The curve of acceleration response in input of 0.5gEl Centro wave

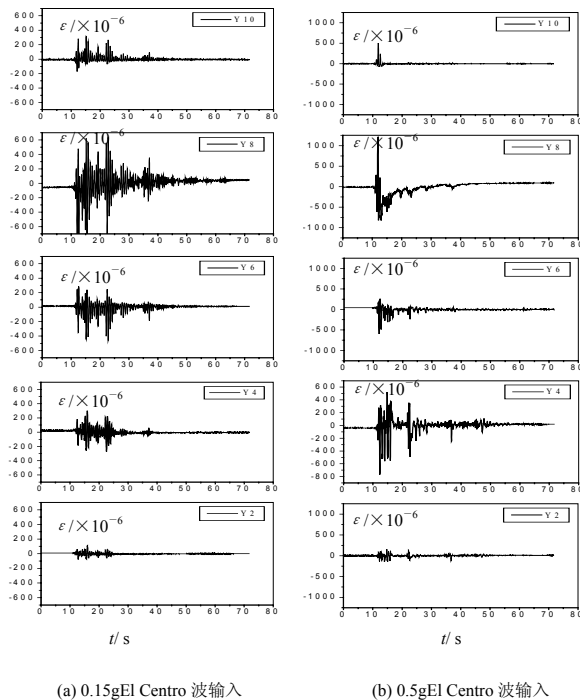


图 6 桩动应变时程曲线  
Fig.6 The relations of pile dynamical strain and time

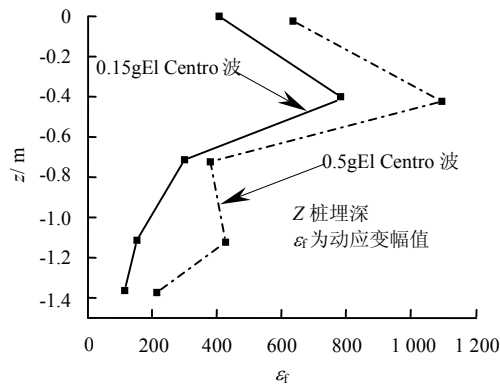


图7 桩动应变幅值分布曲线

Fig.7 The curve of peak value of pile dynamic strain

## 4 结 语

(1) 振动台试验很好地再现了自然地震触发场地液化及结构破坏的各种宏观现象。桩的破坏应发生于砂层液化中且随砂层液化扩展桩的嵌固点一直下移；并且，折断位置动应变的极大值也发生于桩折断之同时，则桩应属于延性破坏，对于桥梁延性抗震具有重要意义。

(2) 0.15gEl Centro 波输入下，砂层上部发生局部液化，且出现冒水现象，桩-柱墩轻微晃动且主要表现为低频加速度反应，峰值放大系数自下而上较大幅度连续增大，桩的反应出现明显多峰值，而柱墩则无多峰值。0.5gEl Centro 波输入下，整个砂层全部液化，且强烈喷砂冒水，桩-柱墩沿竖向动力放大作用复杂，桩被折断，桩加速度也主要表现为低频反应且明显不同于柱墩，折断位置反应最大；桩的破坏发也许生于砂层液化过程中，并且随砂层液化的扩展桩的嵌固点一直下移。

(3) 0.5gEl Centro 波与 0.15gEl Centro 波输入下，桩动应变幅值随埋深变化规律基本一致，只是前者大于后者，动应变的多峰值相当明显，动应变幅值自下而上很快增大，到达地表则大幅度减小。

(4) 砂层液化与否，对桩-柱墩动力反应影响很大。例如，未液化砂层或局部液化砂层对桩嵌固作用较大，桩-土动力相互作用突出，因而桩-柱墩动力放大作用明显；液化砂层抗剪力极低，而使得桩几乎失去嵌固与侧向支撑作用，桩相对反应较小，所以桩-柱墩动力放大作用较小。

(5) 应该指出，本次试验虽然认真考虑了模型与原型的相似比问题，但是绝非定量试验，而只是含有一定量化的定性试验，因为就目前此项研究的发展水平而言，尚存在一些重要的试验技术问题难以解决，尤其涉及地基的动力模型试验更是如此，如

自振特性及动泊松比等很难模拟，加之土-结动力相互作用及场地液化的复杂性。

**致谢：**振动台试验得到了国家自然科学基金项目(50378031, 50178027, 50308027)、国家重大项目(59895410)、土木工程防灾国家重点实验室访问学者基金的联合资助，哈尔滨工业大学也提供了一定的配套经费。中国工程院院士范立础教授、中国地震局工程力学研究所石兆吉研究员对试验提出了许多有益的指点。土木工程防灾国家重点实验室的同仁积极配合且优先安排试验。在此，一并表示由衷的感谢！

## 参 考 文 献

- [1] 国家地震局地质研究所. 中国八大地震震害摄影图集[M]. 北京: 地震出版社, 1983.
- [2] Mizuno H, Iiba M, Hirade T. Pile Damage During the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake in Japan[A]. **Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering**[C]. Acapulco: [s.n.], 1996. 977.
- [3] Kagawa T, Minowa C, Abe A. Earthquake damage to underground structures[A]. **Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering**[C]. New Zealand: [s.n.] 2000.
- [4] 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 Zi-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.
- [5] 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 Xian-zhang, WANG Dong-sheng. Study on shaking table test for seismic interaction of soil-pile-bridge structure in case of soil liquefaction caused by earthquake[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2002, 22(4): 53—59.
- [6] Kagawa T, Minowa C, Mizuno H, Abe A. Shaking-Table tests on piles in liquefying sand[A]. **Proc 5<sup>th</sup> U S Natl Conf Earthquake Engineering**[C]. Chicago: [s.n.], 1994, 107—116.
- [7] Funahara H, Fujii S, Tamura S. Numerical simulation of pile failure in liquefied soil observed in large-scale shaking table test[A]. **Proc 12<sup>th</sup> World Conf Earthquake Engineering**[C]. New Zealand: [s.n.], 2000. 927.

需更换新井<sup>[15]</sup>, 采用该措施需造价 21.71 万元。

上述 3 种型式可达到控制渗流的目的, 施工以截渗墙较复杂、减压井次之, 盖重最简单, 工程投资以减压井最少, 减压井仅在管理上比盖重、截流墙不便。综合分析比较减压井经济效益较突出, 因此, 荆隆宫历史口门堤段加固设计方案推荐有减压井的方案。

## 6 结 论

堤防历史口门渗流研究应在查清工程地质条件和水文地质条件的基础上, 建立合理的地质模型, 通过公式解析法或者有限元法进行计算, 解析法和有限元法可以相互验证、相互校核。加固设计诸方案分析论证时应以渗流控制措施的技术性和经济合理性为依据, 选择出科学的渗控方案, 达到根治堤防历史口门隐患、保证堤防安全的目的。

### 参 考 文 献

- [1] 李广诚, 司富安, 杜忠信. 堤防工程地质勘察与评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [2] 李国英. 治理黄河思辨与践行[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [3] 徐福龄. 黄河下游河道历史变迁概述[J]. 人民黄河, 1982, 71(5): 46-49.
- [4] 董哲仁. 堤防抢险实用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [5] 董哲仁. 堤防除险加固实用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [6] 李金都. 大堤历史口门边界的确定方法[J]. 人民黄河, 1992, 81(5): 38-39.
- [7] 李金都, 唐辉明, 滕伟福. 黄河大堤历史口门的勘察方法研究[J]. 工程地质学报, 2002, 10(4): 425-420.
- [8] 张金良, 孙振谦. 黄河防汛基本资料[R]. 郑州: 黄河防总办公室, 2002.
- [9] 顾慰慈. 渗流计算原理及应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000.
- [10] GB50286-98, 堤防工程设计规范[S].
- [11] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [12] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [13] 周志芳, 王锦国. 裂隙介质水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [14] GB50287-99, 水利水电工程地质勘察规范[S].
- [15] 周汾, 李春华. 堤坝下游的排水减压井[M]. 北京: 水利电力出版社, 1979.

上接第 10 页

- [8] Yasuda S, Ishihara K, Morimoto I, et al. Large-scale shaking table tests on pile foundations in liquefied ground[A]. **Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering**[C]. New Zealand: [s.n.], 2000. 1 474.
- [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[A]. **Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering**[C], New Zealand: [s.n.], 2000. 903.
- [10] 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 Xian-zhang, WANG Chen, WANG Cheng. Scale modeling method of shaking table test of dynamic interaction of soil-pile-bridge structure in ground of soil liquefaction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 450—456.