

# 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

凌贤长

(哈尔滨工业大学土木学院 冻土工程国家重点实验室)

王东升 王志强 王成 王臣  
(大连理工大学) (同济大学) (重庆交通学院) (哈尔滨工业大学)

**摘要:** 大型振动台模型试验是目前研究土-结构动力相互作用的一种极其有效的手段。以1976年唐山地震中倒塌的胜利桥为原型,开展1:10模型的液化场地桩-土-桥梁结构动力相互作用大型振动台模型试验研究,很好地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,并且模型桩的试验破坏状况与其原型的实际震害情况也比较吻合。主要介绍有关此次大型振动台模型试验的相似设计、操作技术及试验结果等方面的若干关键科学问题,以飨同仁。

**关键词:** 桩-土-桥梁结构动力相互作用; 液化场地; 大型振动台模型试验; 地震

中图分类号: U422.5<sup>+</sup>3 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X(2004)11-0067-06

## LARGE-SCALE SHAKING TABLE MODEL TEST OF DYNAMIC SOIL-PILE-BRIDGE STRUCTURE INTERACTION IN GROUND OF LIQUEFACTION

Ling Xianzhang

(Harbin Institute of Technology State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering)

Wang Dongsheng

Wang Zhiqiang

(Dalian University of Science and Engineering) (Tongji University)

Wang Cheng

Wang Chen

(Chongqing Traffic Institute) (Harbin Institute of Technology)

**Abstract:** Nowadays a Large-scale shaking table model test is an effective means to study soil-structure interactions. The Victory Bridge collapsed in the 1976 Tangshan earthquake was taken as a prototype to develop a 1:10 scale shaking table model test, which could recover the main phenomena of natural soil liquefaction resulted from earthquake and the damaged status of the prototype piles. This paper mainly introduces the similitude design of large-scale shaking table model test, operation techniques and analysis of testing results.

**Keywords:** seismic interaction of pile-soil-bridge structure; ground of liquefaction; large-scale shaking table model test; earthquake

## 1 引言

20世纪70年代以来,在一些城市破坏性地震中,许多现代化桥梁的震害均与场地液化直接相关<sup>[1~3]</sup>。桥梁地基中往往含很厚的可液化土层,地震中是否会因场地液化而引起桥梁破坏就成为一个重要的工程问

题。因而,最近十几年来,各国学者对液化场地桥梁抗震问题的研究均十分重视,并且大型离心机试验和模型振动台试验得到了较多的应用,如美、日两国自1992年起合作进行了EDUS研究<sup>[4]</sup>。由于模型振动台试验不存在离心机试验中的科利奥利效应问题,可以在短期内进行为数较多的模型试验以消除一些随机因素的影响,可以研究边界条件的变化对模型动力响应的约束作用,可以得到与离心机模型试验十分一致的结果,以及可以进行二维、三维振动模拟等优点,所

以是研究液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用的一种极其有效的方法, 备受国内外学术领域及工程界的极大关注<sup>[9]</sup>。国外, 在液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用大型振动台模型试验研究方面已取得了不少颇有价值的研究成果<sup>[5~7]</sup>。而国内, 近年来虽然陆续开展了土—结构动力相互作用大型振动台模型试验研究(范立础和韦晓, 1999; 吕西林和陈跃庆, 2000; 范立础和伍小平, 2002), 但是迄今尚未涉及液化场地条件。

鉴于上述, 2001 年国家自然科学基金在国内首次资助了《液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验研究》的立项申请。2002 年 10 月—11 月在土木工程防灾国家重点实验室完成了大型振动台模型试验, 分别做了“自由场地液化 1:10 模型试验”和“非自由场地液化 1:10 模型试验”各一个。积累了一些有益的经验, 对于在国内进一步开展同类研究提供了一些良好的借鉴。因篇幅所限, 本文只阐述“非自由场地液化 1:10 模型振动台试验”的若干关键科学问题。

## 2 试验研究目的

非自由场地液化 1:10 模型振动台试验的目的是以钢筋混凝土桩基独柱式桥墩为对象, 主要研究: (1) 场地液化条件下, 地基、桩基及桥梁上部结构的地震反应规律; (2) 场地液化过程中, 钢筋混凝土桩、桥墩的失效过程与破坏机理; (3) 非自由场地条件下, 可液化地基的地震响应特性及液化过程; (4) 场地液化条件下, 桩—土—桥梁结构动力相互作用的基本机理; (5) 探索液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用模型振动台试验技术, 为今后开展此类试验提供一般的研究思路。

## 3 原型简介

非自由场地液化 1:10 模型振动台试验基于的原型为 1976 年唐山地震中倒塌的胜利桥。地基上部为 3m 厚的硬塑亚粘土层、中部为 21.5m 厚的冲积饱和砂土层(以粗砂土为主)、下部为厚度超过 80m 的轻亚粘土层, 粘土层的密度为  $1.699\text{g}/\text{cm}^3 \sim 2.063\text{g}/\text{cm}^3$ 、孔隙比为 1.14, 砂土层的密度为  $1.732\text{g}/\text{cm}^3 \sim 2.034\text{g}/\text{cm}^3$ 、孔隙比为 1.161。试验考察的桥墩位于河道, 属于三柱式单排钻孔桩墩, 柱为高 6.2m、直径 0.8m~1m 的变截面式, 桩为长 18m、直径 1m 的摩擦桩, 主梁为长 11m 的 5 孔装配式钢混筒支 T 型梁, 每孔上部结构总重 128t, 每根帽梁重 25t。桩—柱均配 12 根  $\phi 19\text{mm}$  的钢筋, 配筋深度至地下 1.2m。地震时, 桩发生折断, 引起桥墩整体倒塌, 如图 1 所示。



图 1 1976 年唐山地震中胜利桥震害  
Fig. 1 Damage of the Victory bridge  
in the 1976 Tangshan earthquake

## 4 振动台和土箱性能

采用美国 MTS 三向模拟地震振动台, 电液伺服驱动式, 台面尺寸为  $4\text{m} \times 4\text{m}$ , 最大载重为 25t, 运行频率范围为 0.1~50Hz, 控制自由度为 X、Y、Z 三向六自由度, 振动波形包括循环波、随机波、地震波, 台面最大加速度为 X 向 1.2g、Y 向 0.8g、Z 向 0.7g。

土箱为一长 2.0m×宽 1.5m×高 2.0m 的层状剪切变形钢制容器, 如图 2 所示, 能够自由发生沿振动方向的水平剪切变形, 对土激振下剪切变形的约束作用很小。据伍小平(2001)研究结果, 距离土箱四周边界 40cm 处可以忽略边界的影响, 土箱自振频率的理论计算值为 1.3617Hz、实测值为 1.2Hz~1.4Hz, 阻尼比的实测值为 3.5%。本次试验对模型微幅白噪声扫描的基频为 13.29Hz、阻尼比为 13.82%。所以, 土箱的自振特性远离模型的基频、阻尼, 将不对模型动力反应产生不良影响。此外, 又在与振动方向垂直的土箱两侧内壁各设置一厚 100.0mm 海绵, 以减少土箱边界对波的反射作用。



图 2 土箱照片  
Fig. 2 Photo of the soil vessel

## 5 模型相似设计与制作

本次试验模型相似设计的详细内容作者已有另文(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相似设计方法)发表于《岩石力学与工程学报》2004 年第 4 期上。在此, 仅简要介绍模型相似

设计的若干要点。相似设计的基本原则是：(1) 强调地基和结构遵循统一相似关系；(2) 近似考虑重力模拟，对结构附加人工质量块以补足其重力效应和惯性力效应，尽可能使地基重力不失真；(3) 结构模型材料为微粒混凝土且配镀锌铁丝，通过调配以满足降低弹性模量等要求；(4) 控制动荷载输入，以满足振动台性能要求；(5) 注意模拟材料本构关系及桩—土相互作用；(6) 认真考虑场地液化条件；(7) 满足试验装备能力及施工条件。鉴于上述，决定采用 1:10 模型，并根据三方面联合求解相似比：(1) 基于 Buckingham  $\pi$  定理的量纲分析法；(2) 基于材料本构关系的量纲分析法，桩—柱墩的材料本构关系为  $\sigma = k\varepsilon^n$  (非线性弹性材料)，地基的材料本构关系为  $\sigma = \varepsilon / (a + b\varepsilon)$  (双曲线模型)；(3) 基于桩—土接触面 Goodman 单元 (力系平衡条件) 的量纲分析法。通过受力等效换算的办法，从三柱式桩墩中取出独柱墩作为试验研究对象。

制作地基的砂土为普通上海黄砂，粘土也为就地采取的轻亚粘土。考虑所模拟原型地基的砂土层以粗砂土为主，所以只用 2mm 孔径的筛子筛去砂中的砾石，而不过分追求砂子粒度的均匀性。粘土要保证干净、无杂物、颗粒级配良好，并且为了使粘土具有良好的含水及结构均匀性，需将原状土充分风干、碾碎、过筛，测定初始含水量，然后按试验设计含水量 23.4% 的要求将土加水湿润 24 小时，再测定含水量。地基总厚度为 2m，下伏砂土层厚 1.7m，上覆粘土层厚 0.3m。采用水沉法制作砂土层以使之充分饱水且结构均匀，由分层碾压、夯实法铺设粘土层。铺设粘土层一是为了模拟原型地基的地层结构，另一方面在于使砂土层形成自然地震不排水条件，有利于在短期内形成很高的孔隙水压力，发生砂土液化且出现喷砂冒水等宏观液化现象。模型地基土的物性指标如表 1 所示。由于所原型地基粘土层的密度为  $1.699\text{g}/\text{cm}^3 \sim 2.063\text{g}/\text{cm}^3$ 、砂土层的密度为  $1.732\text{g}/\text{cm}^3 \sim 2.034\text{g}/\text{cm}^3$ ，而模型地基粘土层的密度为  $1.96\text{g}/\text{cm}^3$ 、砂土层的密度为  $2.07\text{g}/\text{cm}^3$ ，即原型地基土的密度与模型地基土的密度十分接近，所以基本保证了对地基重力加速度的模拟；但是，原型地基砂土层的孔隙比为 1.161、模型地基砂土层的孔隙比为 0.5994，即原型地基砂土层为松砂、而模型地基砂土层为密砂，所以模型地基的砂土层更不容易液化，就以地基振动液化为主要目的的试验而言，这显然冒一定风险。待模型地基在自重条件下固结 36 小时，进行试验。试验开始时，确保模型地基中的水位超过砂层表面适当高度。

桩—柱墩用微粒混凝土且配镀锌铁丝预制 (直径 100mm、长 2620mm)，施工捣振方式、养护条件与普通混凝土一样，自然养护 47 天。桩的入土深度为 1700mm，桩底至箱底的间距为 300.0mm，预留这一间距的目的是模拟实际的摩擦桩，并且使桩在土层液化过程中有足够的沉陷余地。试验开始时，在墩顶一次性配 120kg 的质量块。

制作的模型如图 3 所示。



图 3 非自由液化场地 1:10 模型照片

Fig. 3 Photo of 1:10 scale model of non-greenfield liquefaction ground

## 6 传感器标定与布置

孔压计、位移计、加速度计、应变片等均应在所要求的压力、变形范围等试验条件和初始状态下进行标定，并且尽可能做动力标定，以避免或减小仪器的系统误差。如何避免传感器在振动过程中发生滑动与损坏、导致记录数据出现零点漂移是仪器布置的关键之所在。布置于模型桩—柱墩上的加速度计和应变片在吊装就位之前完成，要求二者与桩—柱墩之间牢固粘贴且加胶带捆绑；布置于地基中的加速度计和孔压计在模型地基制作过程中进行；位移计布置于垂直振动方向的土箱壁外侧。各种传感器的布置如图 4 所示。

由于模型地基土处于饱水状态，土层中的加速度计长时间浸水易损坏；又因为加速度计的质量密度 ( $78.0\text{kN}/\text{m}^3$ ) 远较地基土的质量密度大，所以振动过程中加速度计将与土发生动力耦合作用，从而影响数据测量的准确性。为了解决这种动力耦合作用及防水问题，采用特制的有机玻璃盒子，将加速度计牢固粘贴在盒子内壁上、并引出导线，然后将盒子可靠密封；为了减轻装有加速度计的有机玻璃盒子与土之间的动力相互作用，在确定盒子尺寸时，应使装有加速度计的有机玻璃盒子的当量质量密度与土的质量密度相等。土层中的孔压计也必须做严格的防水处理。

表 1 模型地基土物性指标测定结果

Table 1 Measured property values for model foundation soils

土样编号: G2-2					砂土			
粒度组成 (mm)					含水量	饱和度	密度	孔隙比
>2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.074	0.074~0.005	24.0%	100.0%	2.07g/cm <sup>3</sup>	0.5994
5.8%	44.3%	39.7%	8.3%	1.9%				
土样编号: G2-1					轻亚粘土			
含水量	液限	塑限	液性指数	液性指数	密度			
28.1%	31.8%	19.4	12.4%	0.7	1.96g/cm <sup>3</sup>			

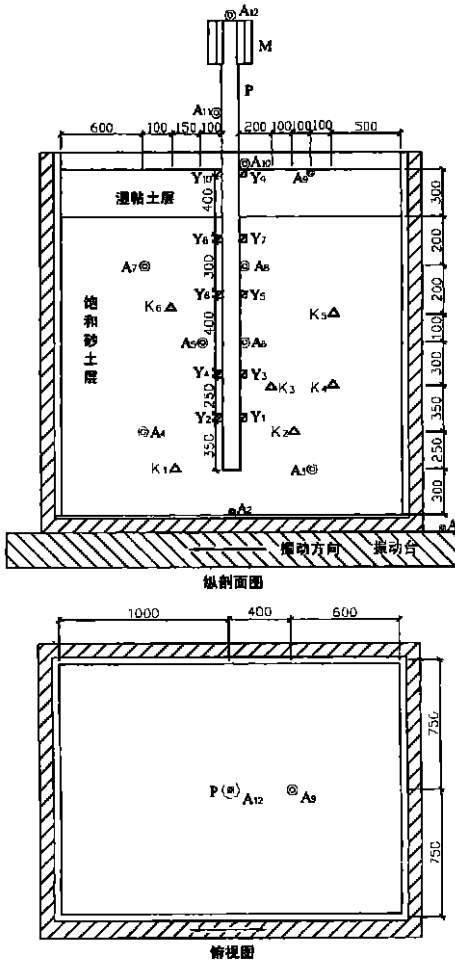


图 4 非自由场地 1:10 模型传感器布置图

Fig. 4 Sensor layout in 1:10 scale model of non-greenfield ground

### 7 试验概况

#### 7.1 试验加载方案

从一般科研角度来说, 同一模型的试验加载工况越多越好, 可以获得不同工况下的采集数据。但是, 由于本次试验要求实现地基动力液化作用, 并且又是模拟自然地震过程, 所以输入动载的工况不宜过多 (过多的动载工况既不利于土层液化, 也与自然地震

过程不符)。试验输入 El Centro 波 (NS)。基于数值模拟结果, 决定采用四种动载工况, 如表 2 所示。输入微幅白噪声目的是测定模型自振特性。每一工况加载均需待孔压基本消散后方可进行。土层液化的判别依据是: (1) 土层中孔隙水压力的监测值; (2) 土层液化的宏观现象。

表 2 试验加载工况

Table 2 Loading schemes for the test

工况	输入波形	加速度峰值
1	白噪声 (x 向)	0.02g
2	El Centro 波 (x 向)	0.15g
3	El Centro 波 (x 向)	0.5g
4	白噪声 (x 向)	0.02g

#### 7.2 模型动力响应宏观现象

0.15g El Centro 波输入下, 地表出现小裂缝, 上部砂土层开始液化且有冒水现象, 如图 5 (a) 所示, 桩一柱墩未破坏。砂土层下部孔压极其微小, 中部孔压稍大, 但未达到砂土液化所需的孔压比, 上部孔压

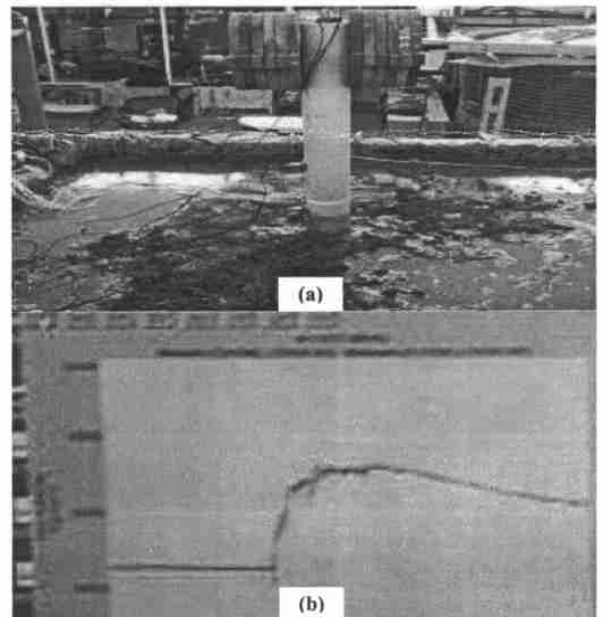


图 5 0.15g El Centro 波输入下地基液化现象

Fig. 5 Sand liquefaction under 0.15g El Centro Wave

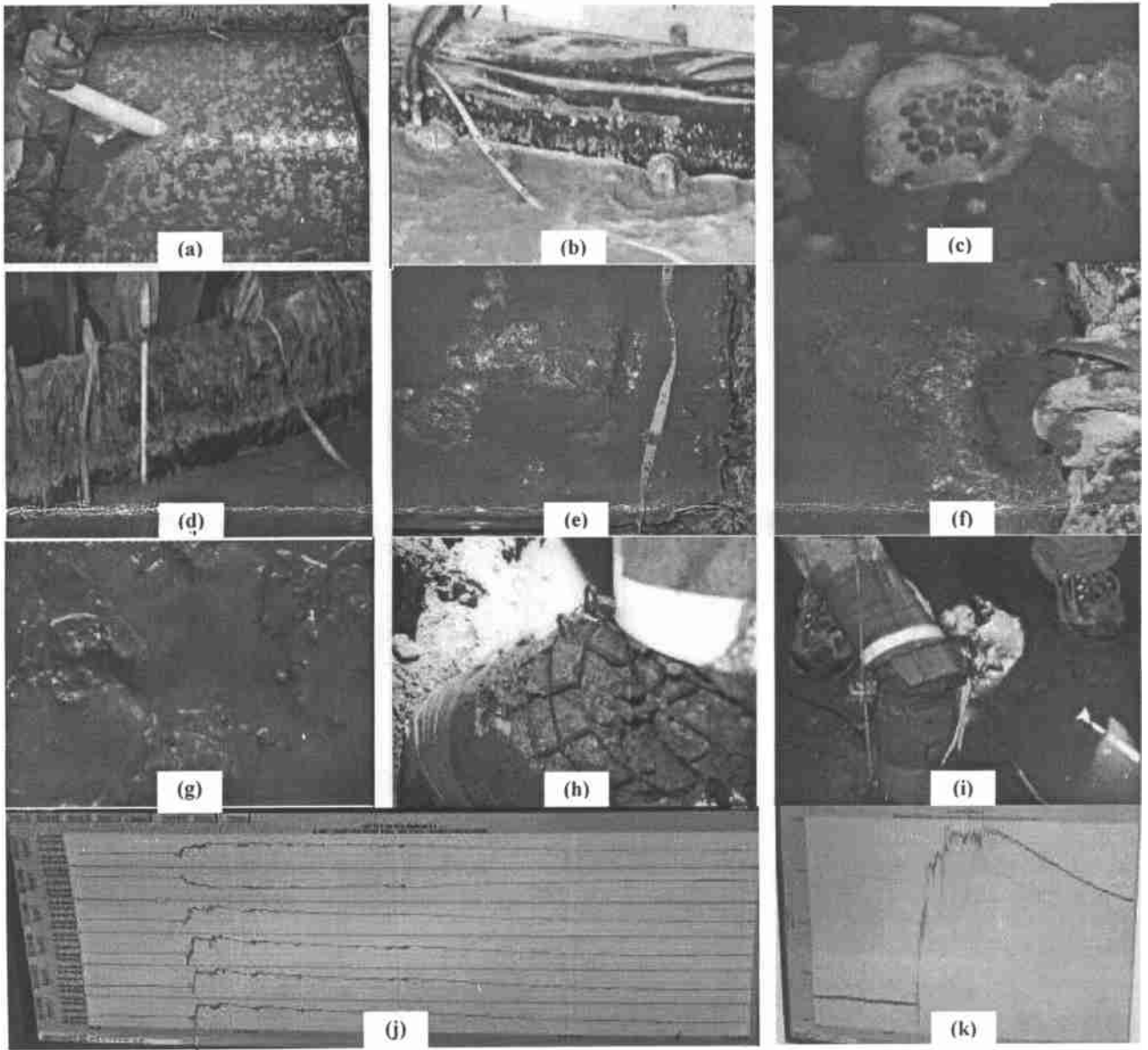


图 6 0.15g El Centro 波输入下地基液化现象  
 Fig 6 Sand liquefaction under 0.15g El Centro Wave



图 7 模型桩与原型桩震害对比  
 Fig 7 Comparison of seismic damages between model and prototype piles

很快达到较大值、最大孔压比为 1, 如图 5 (b) 所示。

0.5gEl Centro 波波输入下, 地表大面积出现裂缝, 整个砂土层全部液化、强烈喷砂冒水, 如图 6 (a, b) 所示; 试验结束 6 小时仍多处冒水泡, 如图 6 (c) 所示, 18 小时后仍见下伏砂层表面局部冒水, 如图 6 (g) 所示; 地基下沉 13cm~15cm, 如图 6 (d) 所示, 喷出的水深 8cm~10cm; 地表出现许多喷出的小砂堆, 如图 6 (e, f) 所示。桩—柱墩破坏、倒塌, 如图 6 (h, i) 所示; 在粘土层与砂土层分界面附近桩被折断, 破裂范围为 51cm (主要属于横裂隙), 如此大的破裂范围, 说明桩的破坏发生于土层液化过程中, 并且随砂土层液化自上而下扩展, 桩的嵌固点一直下移。砂土层中自上而下的孔压均很快达到最大值、最大孔压比全部为 1, 如图 6 (j, k) 所示。

### 7.3 模型与原型震害对比

1976 年唐山地震中, 胜利桥震害现场也出现喷砂冒水现象且地基下沉达 40cm~60cm, 按地基沉降量的相似比为 0.314 计, 换算成模型沉降量为 12.6cm~18.8cm, 与 13cm~15cm 的试验检测值比较接近。原型桩在河床以下 668cm 被折断, 按桩的相似比为 1:10 计, 换算成模型折断位置为地面以下 66.8cm, 与 40cm 的试验检测值差别较大; 原型桩的破裂分布范围为 593cm, 同样按 1:10 相似比计, 换算成模型破裂分布范围为 59.3cm, 与 51cm 的试验检测值比较接近。原型桩和模型桩在折断位置之下至桩底均保持原有垂直状态, 如图 7 所示。综上所述, 模型的试验破坏与原型的实际震害相当吻合。

## 8 结 束 语

本次试验很好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, 并且模型桩的试验破坏与原型桩的实际震害情况相当吻合。试验成功的关键在于: (1) 重视模型与原型之间的相似设计, 并且强调同时考虑基于 Buckingham  $\pi$  定理的量纲分析法、土和结构的材料本构关系、桩—土相互作用等三方面量纲分析法联合求解相似比; (2) 试验之前, 基于相似设计结果, 直接针对振动台试验过程, 进行充分的数值模拟, 以便为模型制作及确定动力加载方案等提供一定依据; (3) 采用水沉法制作地基砂土层而使之充分饱水且结构均匀; (4) 在砂土层上覆盖湿粘土层, 以形成自然地震不排水条件, 有利于在短期内形成很高的孔隙水压力而发生砂土液化; (5) 特别注意使土箱充分发挥沿振动方向剪切变形的动力性能; (6) 为了

使模型地基很好再现自然地震液化作用, 并且尽可能接近于自然地震过程, 没有过多设计动荷载的输入工况; (7) 为了获得满意的试验数据, 对传感器的标定立足于在所要求的压力及变形范围等试验条件和初始状态下进行, 并且布置传感器特别注意解决了记录数据零点漂移、防水、加速度计与土之间动力耦合作用等问题; (8) 通过适当降低模型地基砂土层孔隙比的办法, 以近似保证地基重力不失真。

应该指出, 严格意义上说, 本次试验虽然认真考虑了模型与原型之间的相似设计, 但是绝非定量试验、而只是含有一定量化的定性试验。因为基于此项研究的目前发展水平, 只能近似考虑对重力加速度的模拟, 并且尚存在一些重要的其他试验技术问题难以解决, 而涉及地基的动力模型试验尤其如此, 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: 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] Kawashima K, Unjoh S. Impact of Hanshin/Awaji Earthquake on Seismic Design and Seismic Strengthening of Highway Bridges [J]. *Strural Eng. /Earthquake Eng. JSCE*, 1996, 13 (2): 211~240
- [2] Buckle I G, Cooper J D. Mitigation of Seismic Damages to Lifelines, Highways and Railroads [J]. Schiff A. T. Edited. *Critical Issues and State of Art in Lifeline Earthquake Engineering*. New York: ASCE, 1995: 121~126
- [3] 刘恢先. 唐山大地震震害 (三) [M]. 北京: 地震出版社, 1986: 147~151
- [4] Kagawa T, Minowa G, Abe A. EDUS Project (Earthquake Damage to Underground Structures) [R]. 12WCEE, New Zealand, 2000, Reference NO. 0329
- [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 [J]. *地震工程与工程振动*, 2002, 22 (4): 53~59
- [6] 范立础, 韦晓. 桩—土—结构动力相互作用试验研究现状 [A]. 大型复杂结构的关键科学问题研究文集 (C), 大连理工大学, 1999: 43~49
- [7] 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 [J]. 12WCEE, New Zealand, 2000, Reference NO. 0903

(下转 84 页)