

文章编号: 1000-1307(2003)06-0138-06

自由场地基液化大型振动台模型试验研究

凌贤长¹, 王 臣¹, 王志强³, 王东升², 王 成³(1. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;
3. 同济大学土木工程学院桥梁工程系, 上海 200092)

摘要: 目前, 大型振动台模型试验是研究液化场地的地基动力特性及土—结动力相互作用的一种有效手段。以 1976 年唐山地震中倒塌的胜利桥的地基为原型, 开展 1:10 模型的自由场地基液化的大型振动台模型试验研究, 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, 尤其是模型地基的试验破坏与其原型的实际震害情况比较吻合。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。

关键词: 自由场地基液化; 大型振动台模型试验; 地震

中图分类号: P315.98; P315.972

文献标识码: A

Study on large-scale shaking table proportional model test for free-ground liquefaction arisen from earthquake

LING Xian-zhang¹, WANG Chen¹, WANG Zhi-qiang³, WANG Dong-sheng², WANG Cheng³

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, Harbin 150080, China; 3. Department of Bridge Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The ground of Victory Bridge collapsed in Tangshan earthquake 1976 was taken as a prototype to develop a large-scale shaking table 1:10 model test for free-ground liquefaction arisen from earthquake, in which the main macroscopic phenomena of natural ground liquefaction arisen from earthquake could recur, and it could be seen that the status of scale model ground in the test nearly agrees with the actual phenomena of its prototype arisen from earthquake. Some key scientific problems of operation technique, scale design and test achievement are introduced.

Key words: free-ground liquefaction; large-scale shaking table proportional model test; earthquake.

1 引言

在一些破坏性地震中, 许多桥梁的震害均是由场地液化引起的^[1~3]。因此, 直接针对桥梁抗震的需要, 研究液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用便成为一个重要的工程问题^[5~8]。土—结动力相互作用研究主要存在两方面困难: (1) 有限元波动理论分析的数值稳定性和人工边界处理, 特别是引入土的非线性而产生的问题; (2) 缺少强震记录的验证和试验数据的支持, 尤其是下部结构和埋地土层。由于大型振动台模

收稿日期: 2003-08-10; 修回日期: 2003-11-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50378031, 50178027)

作者简介: 凌贤长(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土地震工程、土—结动力相互作用及冻土地震灾害响应方面研究工作。

型试验无科利奥利效应问题,可以在短期内做较多的试验以消除一些随机影响因素,可以研究边界条件对模型动力响应的约束作用,可以获得与离心机模型试验一致的结果,以及可以进行二维、三维模拟等优点,因而目前研究土—结动力相互作用的重要途径且已成为解决上述两方面困难的有效手段,尤其是在液化场地桩—土—桥梁结构地震相互作用研究方面日益获得越来越广泛的应用。国外早就开展此项试验研究工作,尤其是美、日两国近年来的发展速度相当快,如1992年美、日两国开始了EDUS联合项目^[4],日本的此项研究正走向“产业化”发展阶段,已取得了不少可用于桥梁工程抗震设计的科研成果。在上述研究中,1995年以前主要是小比例尺试验,1995年以后逐步开展大比例尺或原型试验。在国内,液化场地地基动力特性和土—结动力相互作用的研究过去曾在岩土工程、结构工程两个学科中分别发展。与国外相比,国内在土—结动力相互作用大型振动台模型试验方面的研究工作尚较有限,范立础和韦晓(1999)、吕西林和陈跃庆(2000)、范立础和伍小平(2002)、陈国兴等(2002)、刘惠珊(1991)、徐志英等(1993)、楼梦麟等(2000)相继进行了此项试验研究。在场地液化方面,王士凤(1979)、刘惠珊和乔太平(1979)、陈克景(1986)、李学宁(1990)、石兆吉(1994)进行了地震波输入下自由场地液化大型振动台模型试验;刘惠珊和乔太平(1984)、陈文化和门福录(1998)进行了考虑建筑地基影响的场地液化大型振动台模型试验。而此前尚未开展液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用大型振动台模型试验的研究工作。当然,液化场地桩—土—桥梁结构地震相互作用大型振动台模型试验研究仍是国际上公认的难点。2001年,国家自然科学基金首次资助了“液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验研究”的申请立项。本项目研究的大型振动台模型试验于2002年10月在同济大学土木工程防灾国家重点实验室完成,分别做了“自由场地液化1:10模型振动台试验”和“非自由场地液化1:10模型振动台试验”,积累了一些有益经验。因篇幅所限,本文仅介绍“自由场地液化1:10模型振动台试验”若干试验方面的问题,以供国内同类试验研究参考。

2 试验目的及研究内容

自由场地液化1:10模型振动台试验的主要目的及研究内容在于:(1)研究自由场可液化地基的动力特性与地震反应规律、液化过程、破坏机理等,包括场地液化前、后地基的自振特性;(2)验证土箱设计的合理性与有效性、测试仪器性能等;(3)土箱内模型地基的有效区域;(4)模型地基是否能够充分复制自然自由场可液化地基的动力响应特性与过程;(5)模型地基的砂土层是否存在除了剪切变形之外的其它变形作用;(6)地基液化前和液化过程中土层孔压的增长规律及其与埋深、输入地震动特性的关系,地基液化后土层孔压的衰减规律及其与埋深的关系;(7)探索自由场地液化大型振动台模型试验技术,为今后开展此类试验提供一般的研究思路,并且为非自由场地液化大型振动台模型试验的模型设计与制作、测试仪器布置、试验加载方案确定等提供必要的技术经验。

3 模拟的原型简介

本试验根据的原型为1976年唐山地震中倒塌的胜利桥。试验具体考察的桥墩位于河道,据河北交通规划设计院(1978)资料,地基上部为3.0m厚的硬塑亚粘土层、中部为21.5m厚的以粗砂为主的冲积饱和砂土层、下部为厚度超过80.0m的轻亚粘土层,粘土的密度为 $1.699\text{g}/\text{cm}^3 \sim 2.063\text{g}/\text{cm}^3$,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。桥的柱墩为三柱式单排钻孔桩墩,柱为变截面(柱高6.2m,柱径0.8m~1.0m);桩为摩擦桩,桩径为1.0m,桩长18.0m;桩、柱均配12根 $\phi 19\text{mm}$ 钢筋,配筋深度至地下1.2m。桥的主梁为5孔11.0m的装配式钢筋混凝土简支T型梁,每孔上部结构总重为1280kN,每根帽梁重为250kN。地震时,桩发生折断,引起桥墩整体倒塌,如图1所示。

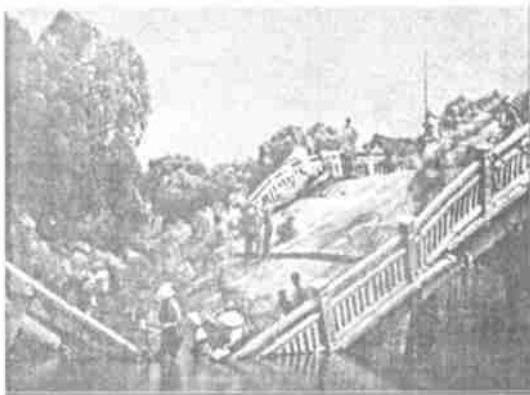


图1 胜利桥震害现场照片

4 振动台及土箱性能

本次试验采用由美国 MTS 公司生产的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 250kN , 运行频率范围为 $0.1\text{Hz} \sim 50\text{Hz}$, 振动波形包括循环波、随机波、地震波三种, 控制自由度为 X 、 Y 、 Z 三向六自由度, 台面最大加速度为 X 向 1.2g 、 Y 向 0.8g 、 Z 向 0.7g , 96 通道数据采集系统, 功率为 600kW 。

本次采用伍小平等(2001)研制的长 $2.0\text{m} \times$ 宽 $1.5\text{m} \times$ 高 2.0m 的层状剪切变形土箱, 如图 2 所示。据伍小平(2002)对其动力性能的研究结果, 该土箱能够自由发生沿振动方向的水平剪切变形, 因而对土激振下剪切变形的约束作用很小; 在距离土箱四周边界 40cm 处可以忽略其边界的影响; 该土箱自振频率的理论计算值为 1.3617Hz 、环境小幅振动激励下的实测值为 1.4Hz (空箱)、人工大幅振动激励下的实测值为 1.2Hz (空箱), 而本次试验对模型地基微幅白噪声扫描的基频为 6.45Hz , 显然土箱的自振频率远离模型地基的基频, 不会与土体发生共振; 基于自由振动衰减法, 大振幅(约 5cm)下测得空土箱的阻尼比为 3.5% , 本次试验对模型地基微幅白噪声扫描的阻尼比为 12.71% , 所以土箱的阻尼将不对模型地基的动力反应产生不良影响。由于本次试验对降低边界波反射作用的要求更高, 故特在与振动方向垂直的土箱两侧内壁各设置一厚 100.0mm 海绵, 以进一步减小土箱边界对波的反射作用。



图 2 土箱照片

5 模型相似设计

在动力模型试验中, 模型相似比是约束试验研究的一个重要而复杂的问题^[9-10]。本项目研究所做的“自由场地液化 $1:10$ 模型振动台试验”和“非自由场地液化 $1:10$ 模型振动台试验”属于平行试验, 并且遵循同一模型相似设计。在本次模型相似设计中, 直接针对液化场地条件下土—结构动力相互作用问题, 考虑振动台承载力、桩—土动力相互作用、场地液化条件、材料本构关系与动力性能、结构延性破坏、近似保证重力不失真、土层液化边界条件模拟等约束条件, 并基于 Buckingham π 定理、材料本构关系、桩—土接触面 Goodman 单元等三方面的量纲分析法联合求解相似比。此外, 因受限于试验条件, 在进行模型相似设计时, 通过受力等效换算的办法, 从实际的三柱式柱墩中取出独柱墩作为试验模拟的原型。由于土箱容积有限, 本次试验的模型只能采用 $1:10$ 的相似比。

6 模型地基制作

制作模型地基的砂土为上海黄砂, 粘土及杂质等较低。考虑原型地基的砂土层以粗砂土为主, 所以只用孔径 2mm 的筛子筛去砂中的砾石, 而不要求砂子粒度一定均匀。由于原型地基砂土层之上为一厚 3.0m 的硬塑亚粘土层, 又为了对模型地基砂土层形成自然地震不排水条件, 所以在模型地基砂土层上也覆盖一层湿粘土层, 就地取用湿轻亚粘土, 保证土料干净、无杂物。为了保证粘土具有良好的含水及结构的均匀性, 将原状土风干、碾碎、过筛, 测定初始含水量, 然后按照试验设计含水量的要求将土加水湿润 24 小时, 再测定含水量。模型地基的总厚度为 2.0m , 下伏砂土层厚度为 1.7m , 上覆粘土层厚度为 3.0m 。采用水沉法制作砂土层, 可以使砂土层充分饱水且结构均匀。采用分层碾压、夯实的办法在砂土层上铺设粘土层。由于实测模型地基粘土密度为 $1.91\text{g}/\text{cm}^3$ 、砂土密度为 $1.94\text{g}/\text{cm}^3$, 原型地基粘土密度为 $1.699\text{g}/\text{cm}^3 \sim 2.063\text{g}/\text{cm}^3$, 砂土密度为 $1.732\text{g}/\text{cm}^3 \sim 2.034\text{g}/\text{cm}^3$, 即原型地与模型地基土的密度很接近, 所以基本保证了对地基惯性力(重力)效应的近似模拟。但是, 由于原型地基砂土孔隙比为 1.161 、模型地基砂土孔隙比为 0.5955 。即原型地基砂土层为松砂, 而模型地基砂土层为密砂, 所以通过加大模型地基土密实度的办法以近似模拟其惯性力效

应, 当然对以地基振动液化为主要目的的试验而言, 这显然冒“不液化”的风险。模型地基砂土的实测饱和度为 74.76%, 没有达到完全饱和的程度。

7 测试仪器标定与布置

本次试验是在所要求的压力及变形范围等试验条件和初始状态下标定测试仪器。拟要求进行动力标定(以减小系统误差), 但因条件不许可, 即以静力法代替。各种测试仪器的布置均十分有讲究, 如何避免仪器在振动过程中因出现滑动与损坏而导致记录数据零点漂移是测试仪器布置的关键之一。布置于模型地基中的测试仪器特别注意解决了仪器的防水问题, 并消除振动过程中加速度计与土之间的动力耦合作用。各种测试仪器的布置情况见图 3。

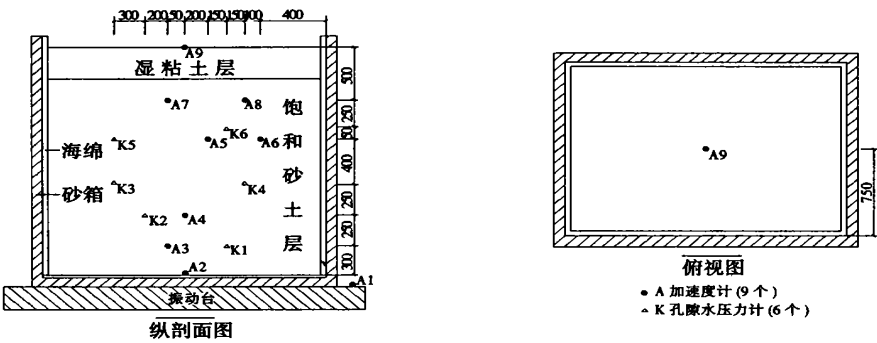


图 3 自由场地液化 1:10 模型振动台试验传感布置图

8 试验概况

8.1 试验加载方案

本次自由场地液化 1:10 模型振动台试验输入的地震动为 El Centro 波(NS)和微幅白噪声两种。所确定的试验加载情况如表 1 所示。每完成一个试验情况均要求待地基中孔隙水压力基本消散后, 才继续做下一情况的振动试验。模型地基砂土液化的判别依据是: (1)地基中孔压比的监测值; (2)土层液化的宏观现象。微幅白噪声扫描的目的在于获得模型地基的自振特性。

表 1 试验加载情况一览表

序号	输入波形	加速度峰值
1	微幅白噪声	0.05g
2	El Centro 波(NS)	0.15g
3	El Centro 波(NS)	0.5g
4	微幅白噪声	0.02g

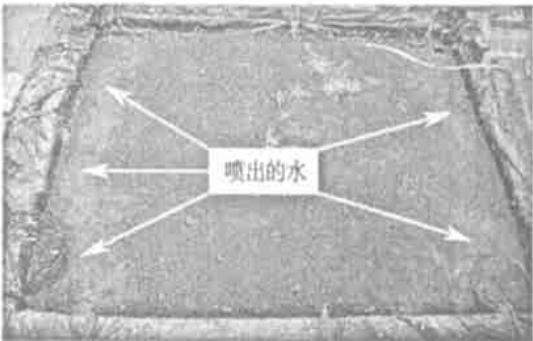
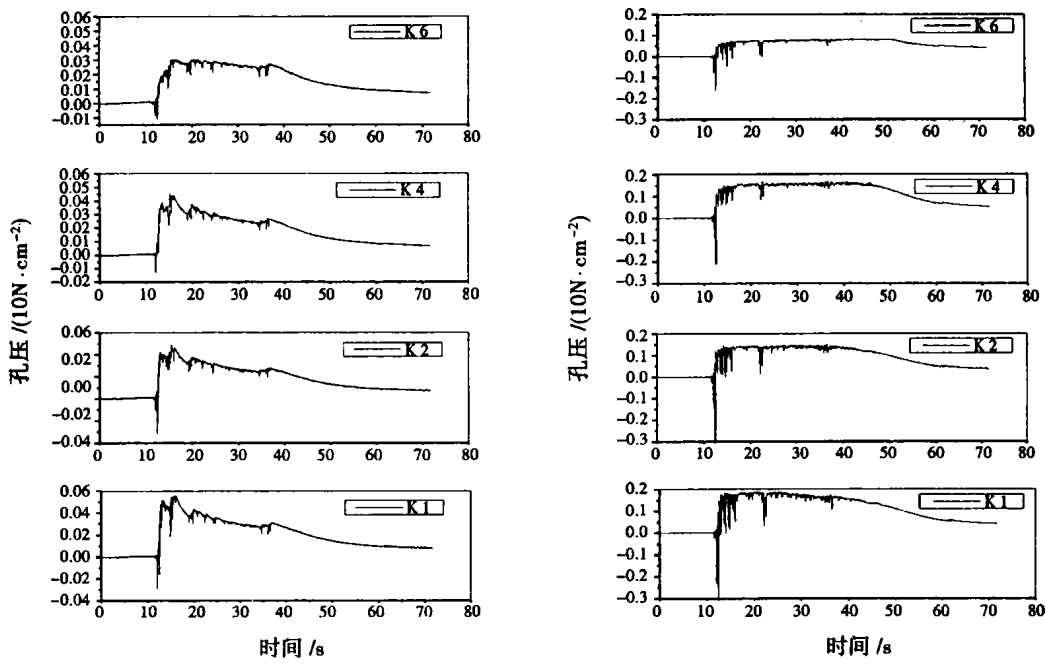


图 4 0.15g El Centro(NS)波输入下地基液化现象照片

8.2 试验结果

输入 0.15g El Centro 波(NS)时, 地基表面开始出现小裂缝, 下伏砂土层上部轻微液化, 土箱四周有水冒出, 如图 4 所示。砂土层中自上而下布置的各个孔压计测得的孔压均很快达到最大值, 如图 5(a)所示。由上部孔压计获得的最大孔压比为 1.0, 其它孔压计尚未达到液化所需的孔压比。

输入 0.5g El Centro 波(NS)时, 地基表面出现大面积裂缝, 整个砂土层全部液化, 强烈喷砂冒水, 如图 6(a, b, c, d)所示。砂土层中自上而下布置的各个孔压计测得的孔压均很快达到最大值, 如图 5(b)所示, 最大



(a)0.15g El Centro 波输入下

(b) 0.5g El Centro 波输入下

图 5 地基砂土层中孔压时程曲线

孔压比全部为 1.0。试验结束 4 小时仍多处冒水泡, 24 小时后清除上覆粘土层可见下伏砂土层局部仍冒水。地基下沉最大达 13.5cm, 如图 6(a, b, d)所示。喷出的水深 9.6cm ~ 11.0cm, 喷出的砂在地基表面形成许多小砂堆, 如图 6(e, f)所示。

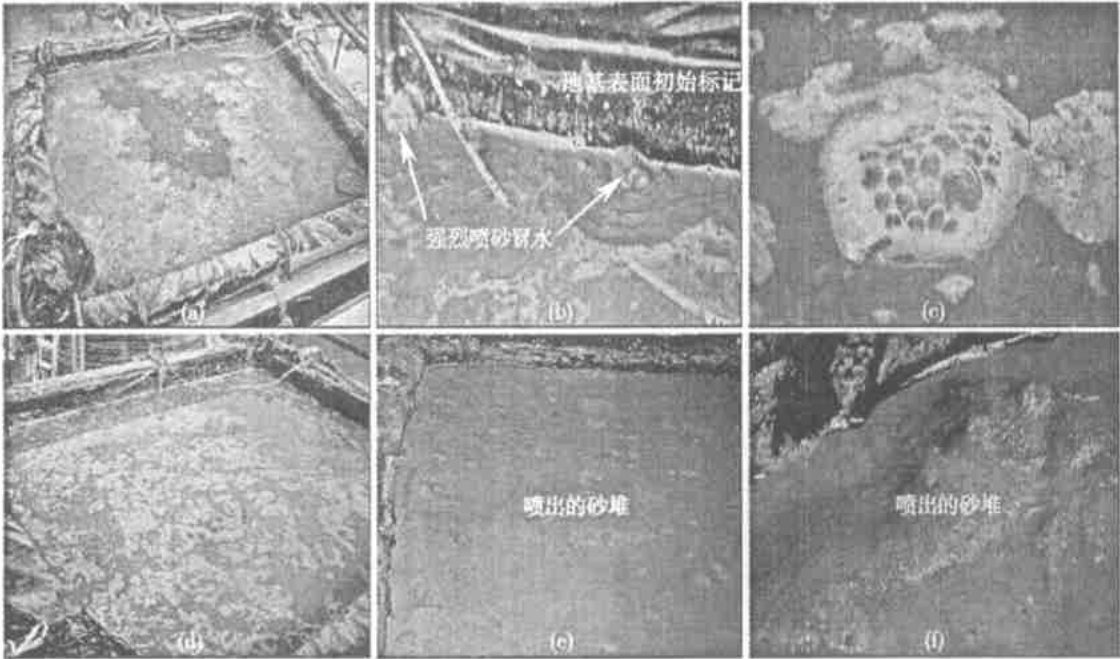


图 6 0.5g El Centro 波输入下地基液化现象照片

根据河北交通规划设计院资料(1978), 1976 年唐山地震中, 胜利桥震害现场的地基也出现十分明显的喷砂冒水现象, 地基下沉达 40~60cm。按本次模型振动台试验相似设计的模型与原型地基沉降量的相似比为 0.314 计, 由这种实际的震陷量换算为模型地基的沉降量为 12.56~18.84cm, 与模型地基沉降量的试验检测值——13.5cm 比较接近。所以, 本次模型振动台试验的地基破坏状况、宏观液化现象与其原型的实际

震害状况比较吻合。

由图 5 还可以看到砂土层中孔压发展的一种有意义现象,即在最初加速度峰值到达时刻出现“瞬时负孔压”,这种负孔压峰值随输入地震加速度峰值的增大而增大、并且沿竖向自下而上逐渐减小。初步研究表明,出现“瞬时负孔压”主要是由于液化砂土层在最初加速度峰值到达时发生“瞬时膨胀作用”所致,所以孔压计在瞬时测得的不是压力,而是吸力,即瞬时记录为负值。在本次“非自由场地液化 1:10 模型振动台试验”中,同样由此现象发生。Kagawa 等(1994)在日本 Tsukuba 国家地质学与防灾研究所(NIED)进行液化场地土—桩动力相互作用模型振动台试验中也有类似现象报道。

9 结语

在本次模型振动台试验中,特别注意对土层液化边界条件的模拟,因为这是确保试验成功的重要条件之一,并将直接影响模型与原型之间震害的可比性。然而,应该指出,虽然比较重视模型相似比及土层液化边界条件模拟等研究工作,但是客观地说,本次模型振动台试验并非定量试验,而只是含有一定量化的定性试验。因为限于目前的研究水平,只要涉及场地或地基的动力模型试验,一些重要影响因素,如地基的阻尼、基频等不可能完全量化模拟或控制。这也是目前国外此类试验中正热衷探讨的一个重要问题。

致谢:本次模型振动台试验得到了国家自然科学基金资助项目(59895410)和土木工程防灾国家重点实验室访问学者基金的联合资助。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十分关注本次试验,并且提出了许多有益的建议。同济大学土木工程防灾国家重点实验室积极配合且优先安排实验工作。在此,一并表示由衷的感谢。

参考文献:

[1] Kawashima K, Unjoh S. Impact of Hanshin/Awajie Earthquake on Seismic Design and Seismic Strengthening of Highway Bridges[J] . Strual 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[A] . Schiff A. T. Edited. Critical Issues and State of Art in Lifeline Earthquake Engineering[C] . New York: ASCE, 1995: 121— 126.

[3] Philip J M. Shaking table scale model tests of nonlinear soil— pile— superstructure interaction in soft clay[D] dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. University of California, Berkley, 1998.

[4] Kagawa T, Minowa C, Abe A. EDUS Project (Earthquake Damage to Underground Structures)[A] . 12WCEE[C] , New Zealand, 2000, Reference NO. 0329.

[5] K Tamura *et al* Seismic Design of Bridge Foundation against Liquefaction— Induced Ground Flow[A] 12WCEE[C] . 2000, NO. 1231.

[6] Susumu Y, *et al* Large— Scale Shaking Table Tests on Pile Foundations in Liquefied Ground[A] 12WCEE, 2000, NO. 1474.

[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[A] . 12WCEE[C] , New Zealand, 2000, Reference NO. 0903.

[8] Sato M, *et al* . Reproduction of a Large— Scale Ig Test on Unsaturated Sand Deposits and Pile Foundations Using Centrifuge Modeling[A] . Proc 12th World Conf Earthquake Eng[C] , New Zealand, 2000, No. 2093.

[9] 张敏政. 地震模拟试验中相似律应用的若干问题[J] . 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 52— 58.

[10] 林皋、朱彤、林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J] . 大连理工大学学报, 2000, 40(1): 1— 8.