

文章编号: 1001-7372(2005)02-0034-06

非自由液化场地地基动力性能大型 振动台模型试验研究

凌贤长¹, 王丽霞^{1,2}, 王东升³, 王志强⁴, 王 臣¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 吉林建筑工程学院 交通工程系 吉林 长春 130021;
3. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116023; 4. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要:基于1:10模型大型振动台试验,研究非自由液化场地的地基动力性能。液化场地条件下,与自由场地基相比,非自由场地地基的自振频率明显加大、动力耗能作用提高较小。土层液化前且在小震输入下,地基动力变形的线性特征较突出,主要表现为对地震波的动力放大作用,加速度反应自下而上逐渐增大;土层完全液化后,地基加速度反应自下而上也逐渐增大,这是由于液化地基的层间剪切运动加快且加快的速率自下而上逐渐增大所致。地基孔压变化主要受两方面因素影响:一是随埋深减小,孔压减小,但孔压比增大;二是离桩距离越近,孔压和孔压比越大。土层液化前,输入波主要峰值过后,自下而上孔压消散逐渐减慢。较大震输入下,自下而上孔压有减小的趋势,但最大孔压比均很快达到液化孔压比;输入波主要峰值过后,孔压消散很缓慢,尤其是孔压消散随埋深减小越来越慢。试验中还出现瞬时负孔压的有趣现象,这也许是由于可液化土层发生瞬时膨胀作用所致。

关键词:桥梁工程;非自由液化场地;大型振动台模型试验;地基动力性能;加速度反应;孔隙水压力
中图分类号: U442.55 **文献标志码:** A

Study of large scale shaking table proportional model test of the dynamic property of foundation in unfreedom ground of liquefaction

LING Xian zhang¹, WANG Li xia^{1,2}, WANG Dong sheng³, WANG Zhi qiang⁴, WANG Chen¹

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Department of Traffic Engineering, Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021, China;
3. School of Civil Engineering and Hydraulic, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;
4. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: On the basis of the large scale shaking table 1:10 scale model test, the dynamic property of foundation in unfreedom ground of liquefaction is studied. In ground of liquefaction, compared to freedom foundation, the self vibration frequency of unfreedom foundation obviously increases, yet its property of dynamic energy dissipation improves a little. Before liquefaction of soil and in input of a small shake, the dynamic deformation of foundation mainly appears linear characteristics, which primarily exhibits in the amplification effect to earthquake waves, the response of acceleration gradually strengthens from bottom to top. After soil liquefied entirely, the response of foundation acceleration also gradually strengthens from bottom to top, which is that

收稿日期: 2004-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50178027); 国家自然科学基金项目(50378031)

作者简介: 凌贤长(1963), 男, 安徽庐江人, 哈尔滨工业大学教授, 博士生导师, 理学博士, 博士后. E-mail: xianzhang_ling@263.net

the shear movement between layers of liquefied foundation is accelerated and the increased speed of the shear movement is gradually accelerated from bottom to top. The variation of pore pressure in foundation is primarily affected by following two factors; the first is that with depth decreasing, the pore pressure will decrease while the pore pressure ratio will increase; the second is that the smaller the distance to a pile, the bigger the pore pressure and pore pressure ratio. Before soil liquefied, and when the primary peak of inputted waves has gone, the dissipation of pore pressure becomes gradually slower from bottom to top. While inputting a bigger shake, the pore pressure is in the tendency of lowering from bottom to top, but the peak pore pressure ratio all arrives at the liquefaction pore pressure ratio, and when the primary peak of inputted waves has gone, the pore pressure dissipates very slowly, particularly the dissipation of pore pressure becomes slower and slower with the decrease of depth. In this test, it is occurred that an interesting phenomena of transient minus pore pressure is perhaps attributed to the transient shear swell effect of liquefaction soil.

Key words: bridge engineering; unfreedom ground of liquefaction; large scale shaking table proportional model test; dynamic property of foundation; response of acceleration; pore water pressure

0 引言

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^[1~6]。因此,各国学者均十分重视液化场地桥梁抗震的研究,其中液化场地条件下地基动力性能和土—结构动力相互作用已成为一个热点^[1,2]。目前,大型振动台模型试验在液化场地地基动力性能和桩—土—桥梁结构地震相互作用研究方面正日益获得越来越广泛的应用^[1~19]。国外早就开展此项试验工作^[2~11],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^[3]。中国在这方面的研究工作起步较晚^[1,2,12~16],而且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研究。当然,此项试验一直是国际上公认的难点。鉴于此,2001年和2003年,国家自然科学基金连续资助了笔者先后提出的《液化场地桩—土—桥梁结构动力相互作用振动台试验研究》、《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》的立项申请。已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的部分前期研究工作,获得一些新的认识。因篇幅所限,以下仅基于非自由场地液化1:10模型振动台试验,阐述非自由液化场地地基动力性能的试验研究成果。

1 试验概况

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3.0 m厚的硬塑亚粘土层,中

部为21.5 m厚的冲积饱和砂土层,下部为厚度超过80.0 m的轻亚粘土层。桥墩为钢筋混凝土三柱式单排钻孔摩擦桩墩。地震时,因地基液化引起桩折断、桥墩整体倒塌。

模型地基的砂土为普通上海黄砂(含砾中粗砂),粘土也为就地采用的轻亚粘土。通过受力等效换算办法,从原型三柱式桩墩中取出独柱墩作为试验研究对象。根据1:10相似设计结果^[20],并考虑振动台承载力和土箱容积,模型地基总厚度取2.0 m,下伏饱和砂土层厚1.7 m,上覆粘土层厚3.0 m;采用微粒混凝土且配镀锌铁丝预制直径0.1 m、长2.62 m的模型桩—柱墩。传感器布置如图1所示。

采用的振动台为MTS三向模拟地震振动台,电液伺服驱动式,台面尺寸4 m×4 m,最大载质量25 t。土箱为一长2.0 m×宽1.5 m×高2.0 m的层状剪切变形土箱,如图2所示,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,并且土箱不与地基发生共振,土箱的阻尼也不对模型动力反应产生不良影响;此外,试验时又在与振动方向垂直的土箱两侧内壁各设置一厚100.0 mm的海绵,以进一步减小土箱边界对波的反射作用。

试验输入的地震波为El Centro波(NS)和微幅白噪声两种。输入微幅白噪声(0.02g)的目的在于测定模型地基—桩—柱墩体系的自振频率和阻尼比。模型地基和桩—柱墩动力响应的宏观现象是:0.15g El Centro波输入下,地基砂土层的上部轻微液化,模型桩—柱墩不破坏;0.5g El Centro波输入

下,地基砂土层全部液化,强烈喷砂冒水,地基下沉,模型桩一柱墩破坏,如图2所示。

2 地基动力性能试验结果

2.1 地基自振特性

在 El Centro 波输入之前,由微幅白噪声扫描获得地基的自振频率为 13.29 Hz, 阻尼比为 13.82%, 动力放大系数为 4.31, 能量损失系数为 1.74, 应变滞后于应力相角为 17.23。而在自由场地液化 1:10 模型振动台试验中,采用同样方法得到的自由场地基的自振频率为 6.45 Hz, 阻尼比为 12.71%, 动力放大系数为 3.97, 能量损失系数为 1.59, 应变滞后于应力相角为 15.85。非自由场与自由场地基的厚度、结构、制作方法及土的类型、固结时间等均相同,然而前者的自振频率、阻尼比、动力放大系数、能量损失系数、应变滞后于应力相角等均较后者大,尤其是前者自振频率为后者的 2 倍多,这也许是因为在地基中加入桩一柱墩之后,使得非自由场地基一结构体系的整体动刚度较自由场单一地基体系的动刚度有所提高,所以自振频率随之明显加大;另一方面,前者阻尼比、能量损失系数、应变滞后于应力相角只稍较后者的大一些,说明在地基中加入桩一柱墩后,非自由场地基一结构体系的材料动力耗能作用仅稍有提高。由此可知:在液化场地条件下,对于刚性较大的工程结构来说,非自由场地基一结构体系较自由场单一地基体系的震害作用有所加剧。

2.2 地基加速度反应特性

0.15g El Centro 波输入下,地基加速度时程曲线及对应的傅立叶谱如图 3 所示。由图 3(a)可知:

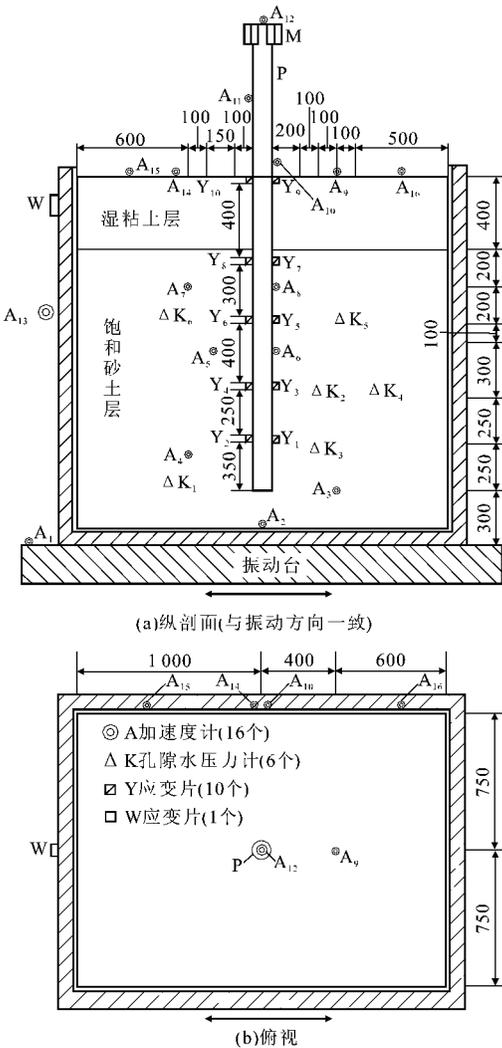


图 1 传感器布置/mm
 Fig.1 Distribution of sensors

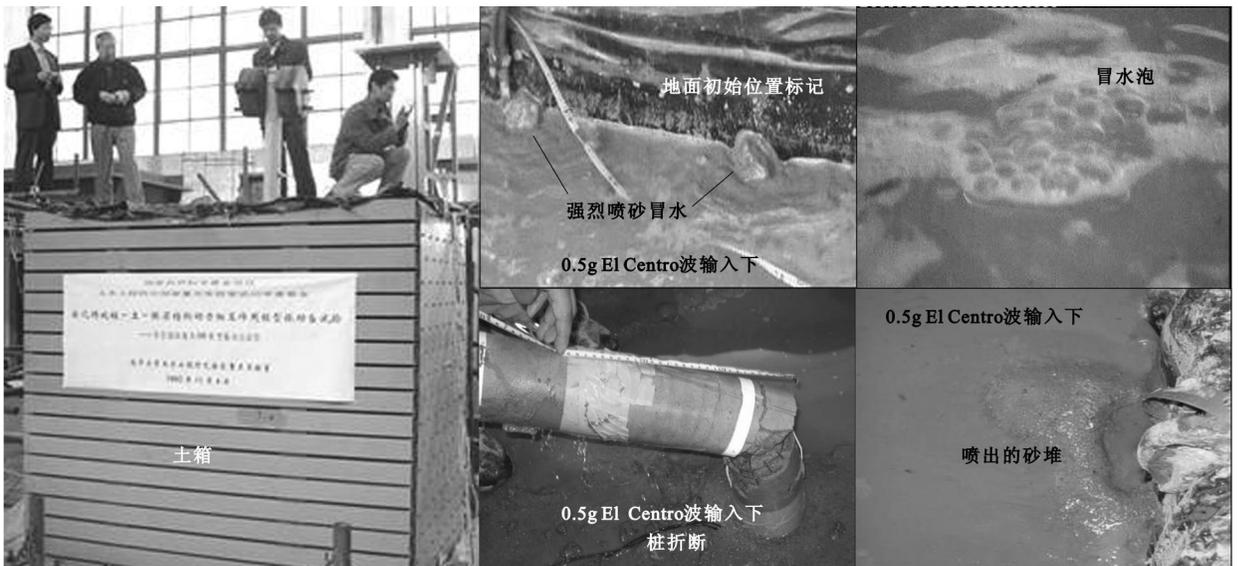


图 2 模型地基和桩一柱墩动力响应宏观现象

Fig.2 Seismic macrophenomena of model ground and stake frusta

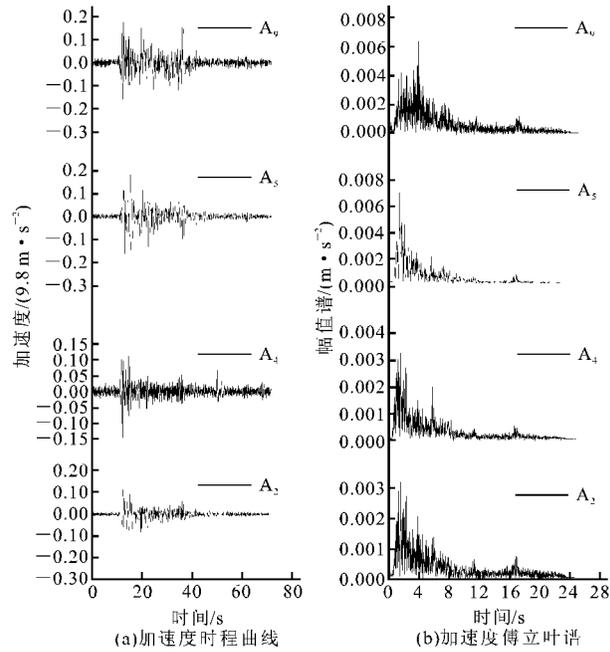


图 3 0.15g El Centro 波输入下地基加速度反应特征曲线

Fig 3 Eigencurve of ground acceleration response to 0.15g El Centro wave

地基加速度反应自下而上逐渐增大, 这也许是由于在小震激励下, 土的结构性破坏较少且孔压不高, 土动力变形的线性特征较突出, 动力耗能作用较小, 因而地基自下而上主要表现为对输入波的动力放大作用。如图 3(b)所示, 下伏砂土层对加速度的放大作用自下而上在低频段逐渐加大, 卓越频率均为 1.5 Hz, 在中高频段逐渐减小, 卓越频率均为 17.2 Hz, 说明砂土层对中高频地震波有一定过滤作用; 上覆粘土层对加速度的放大作用明显减小且过滤部分低频波, 但被放大的频带越来越宽且逐渐扩展到中高频段, 低频段的卓越频率为 4.1 Hz, 中高频段的卓越频率近似为 17.2 Hz, 在粘土层表面出现明显的多峰值。

0.5g El Centro 波输入下, 地基加速度时程曲线及对应的傅立叶谱如图 4 所示。由图 4(a)可知: 地基加速度反应自下而上逐渐增大, 这主要是由于在较大震激励下, 土的结构性绝大部分被破坏或丧失结构性且因孔压迅速上升而很快处于完全液化状态(试验中观察到的现象), 液化地基的层间剪切运动加快且加快的速率自下而上逐渐增大, 所以地基加速度反应因层间剪切运动(液化土体流动)加快而加大, 并且自下而上逐渐增大。如图 4(b)所示, 下伏砂土层自下而上最先放大与地基卓越频率相近的低频段, 并且对加速度的放大作用越来越大, 被放大的

频带越来越窄, 逐渐过滤部分中高频, 低频段存在变化于 0.9~1.3 Hz 之间的卓越频率; 上覆粘土层也放大与地基卓越频率相近的低频段, 但对加速度的放大作用有所减小, 被放大的频带有所加宽且有向中高频带扩展的趋势, 低频段存在 1.1 Hz 的卓越频率。

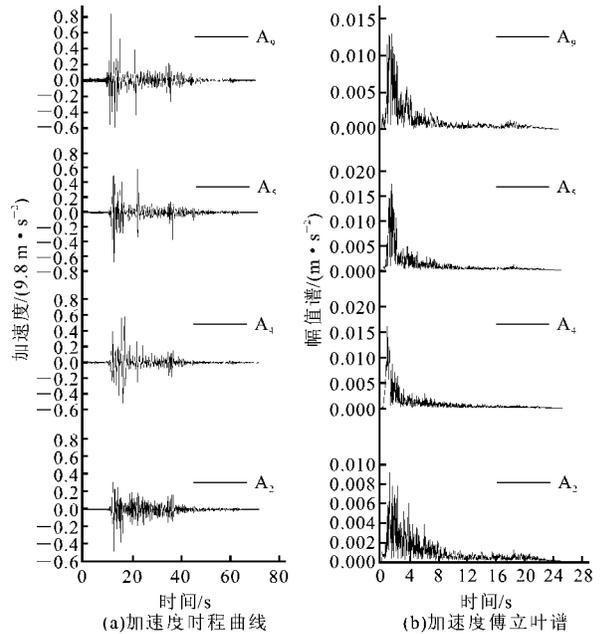


图 4 0.5g El Centro 波输入下地基加速度反应特征曲线

Fig. 4 Eigencurve of ground acceleration response to 0.5g El Centro wave

2.3 地基孔压变化规律

由图 5 可知, 在 0.15g El Centro 波输入下, 孔压变化主要受两方面因素影响: 一是埋深, 随埋深减小, 孔压减小, 但孔压比增大, 这可能是在小震激励下, 上层砂土中孔隙水能够很快沿土箱四周排出(试验中观察到的现象), 但中下层砂土中孔隙水难以在短期内排出, 因而浅层土中孔压较小, 较深层土中孔压相对较大; 二是桩距, 在同一埋深条件下, 离桩距离越近, 孔压和孔压比越大, 这主要是因为离桩越近, 孔压受桩的影响越大, 有利于孔压的上升。主要峰值过后, 孔压呈消散趋势且消散速度自下而上逐渐减慢, 这也许是由于中下部砂层中孔隙水较易在结构性破坏的砂层中加快向上运移, 而上部砂层中孔隙水难以很快透过上覆粘土层向外排泄, 并且又有来自下部孔隙水的一定补给。

由图 6 可知, 0.5g El Centro 波输入下, 自下而上, 孔压有减小的趋势, 但最大孔压比均很快达到了砂土液化所需的孔压比(0.75~1.0), 试验中观察到强烈喷砂冒水、地基下沉、桩一柱墩折断与倒塌, 如

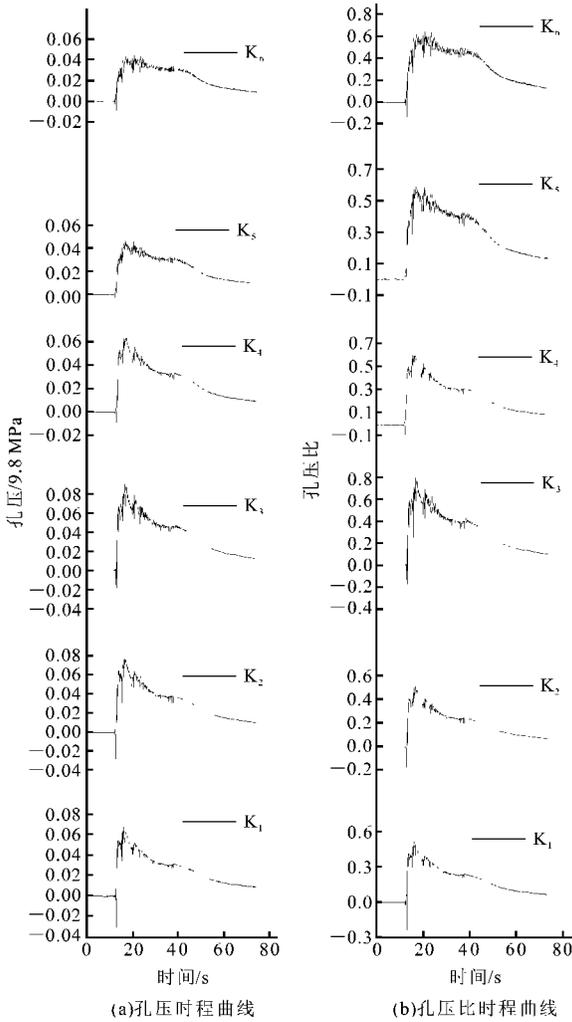


图5 0.15g El Centro 波输入下地基砂土层中孔压变化特征曲线

Fig. 5 Eigencurve of pore water pressure in sand stratum of ground while inputting 0.15g El Centro wave

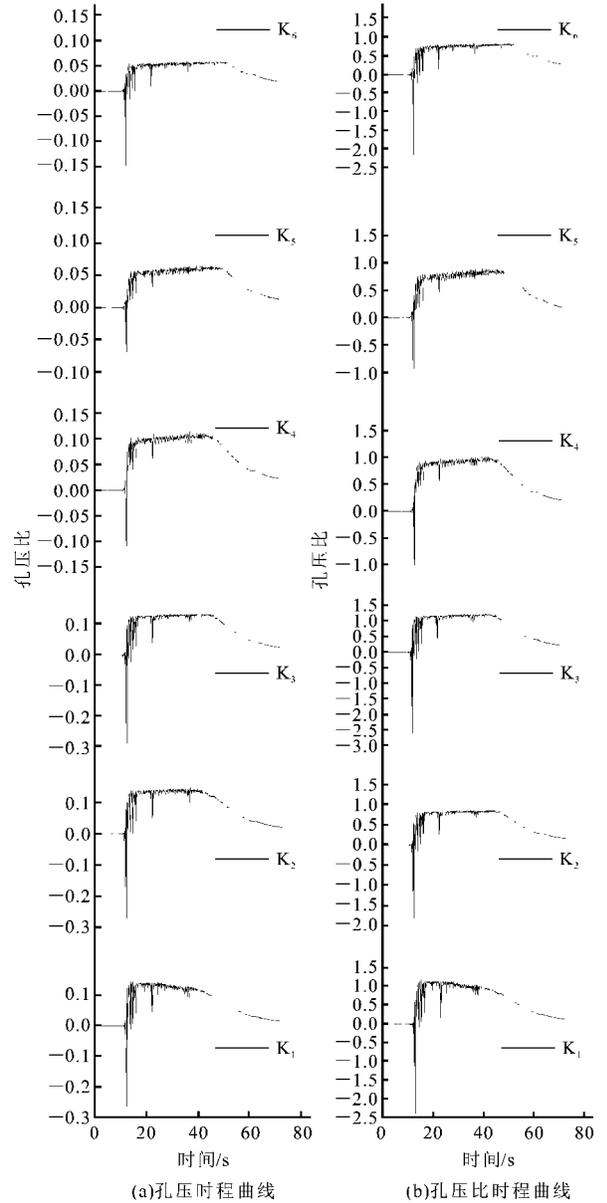


图6 0.5g El Centro 波输入下地基砂土层中孔压变化特征曲线

Fig. 6 Eigencurve of pore water pressure in sand stratum of ground while inputting 0.5g El Centro wave

图2所示。峰值后,孔压和孔压比衰减很缓慢,尤其是自下而上随埋深减小,二者衰减速度越来越慢,并且还出现越来越长不衰减时段或略有上升趋势。因此,较大震输入下,土层液化持续时间很长,并且最强烈的液化作用很可能滞后于地震加速度峰值的到达时刻。

由图5、6还可以看到孔压发展的另一种有趣现象,即在最初加速度峰值到达时刻出现瞬时负压,这也许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。在自由场地液化1:10模型振动台试验中同样出现瞬时负压。KAGAWA等(1994)在日本Tsukuba国家地质学与防灾研究所(NIED)进行液化场地桩-土动力相互作用模型振动台试验中也有此类现象报道。

3 结语

(1)液化场地条件下,与自由场地基相比,非自由场地地基的自振频率明显加大,而动力耗能作用则提高较小。因此,对于刚性较大的工程结构来说,非自由场地地基-结构体系较自由场地单一地基体系的震害作用有所加剧。

(2)土层液化前且在小震输入下,地基动力变形的线性特征较突出、动力耗能作用也较小,因而主要表现为对地震波的动力放大作用,加速度反应自下而上逐渐增大。

(3)土层完全液化后,地基加速度反应自下而上也逐渐增大,但这是另一种放大机理:土层液化后,地基层间剪切运动加快,并且剪切运动加快的速率自下而上逐渐增大。

(4)非自由场地条件下,地基孔压变化主要受两方面因素影响:一是随埋深减小,孔压减小,但孔压比增大;二是离桩距离越近,孔压和孔压比越大。土层液化前,输入波主要峰值过后,孔压消散速度自下而上逐渐减慢。

(5)较大震输入下,自下而上,孔压有减小趋势,但最大孔压比均很快达到土层液化所需的孔压比,土层处于完全液化状态。输入波主要峰值过后,孔压消散很缓慢,尤其是随埋深减小消散越来越慢。因此,土层液化持续时间较长。

(6)当最初加速度峰值到达时还出现瞬时负孔压,这也许是由于砂土层发生瞬时膨胀作用所致。

(7)试验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。

参考文献:

- [1] 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: 大连理工大学出版社, 1999. 170—178.
- [2] 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.
- [3] KAGAWA T, MINOWA C, ABE A. EDUS project (earthquake damage to underground structures) [A] . 12WCEE [C] . Auckland; IAEE, 2000.
- [4] KAWASHIMA K, UNJOH S. Impact of hanshin/awajie earthquake on seismic design and seismic strengthening of highway bridges [J] . Struct. Eng. /Earthquake Eng., JSCE, 1996, 13(2): 211—240.
- [5] GANVE T, YAMAZAKI F, ISHIZAK H, et al. Response analysis of the higashi kobe bridge and surrounding soil in the 1995 hyogoken nanbu earthquake [J] . Earthquake Engng. Struct. Dyn., 1998, 27(3): 557—576.
- [6] TAMURA K. Seismic design of bridge foundation against liquefaction induced ground flow [A] . 12WCEE [C] . Auckland; IAEE, 2000.
- [7] NAKAGAWA T. Experimental study on the soil pile structure interaction by shaking table tests using large scale laminar box [A] . 12WCEE [C] . Auckland; IAEE, 2000.
- [8] SUSUMU Y. Large scale shaking table tests on pile foundations in liquefied ground [A] . 12WCEE [C] . Auckland; IAEE, 2000.
- [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] . 12WCEE [C] . Auckland; IAEE, 2000.
- [10] SATO M. Reproduction of a large scale Ig test on unsaturated sand deposits and pile foundations using centrifuge modelling [A] . 12WCEE [C] . Auckland; IAEE, 2000.
- [11] HATSUKAZU M. Dynamic behavior of pile foundation in liquefaction process — shaking table tests utilizing big shear box [A] . 12WCEE [C] . Auckland; IAEE, 2000.
- [12] 楼梦麟, 王文剑, 朱 杉. 土—结构体系振动台模拟试验中土层边界影响问题 [J] . 地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 30—36.
- [13] 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.
- [14] 徐志英, 施善云. 土与地下结构动力相互作用的大型振动台试验与计算 [J] . 岩土工程学报, 1993, 15(4): 1—7.
- [15] 陈国兴, 王志华, 宰金珉. 土与结构动力相互作用体系振动台模型试验研究 [J] . 世界地震工程, 2002, 18(4): 47—54.
- [16] 石兆吉, 王兰民. 土壤动力特性——液化势及危害性评估 [M] . 北京: 地震出版社, 1999. 23—78.
- [17] 弓俊青, 朱 啼. 以位移为基础的钢筋混凝土桥梁墩柱抗震设计方法 [J] . 中国公路学报, 2001, 14(4): 42—46.
- [18] 宋一凡, 贺拴海, 曹继伟. 基于能量原理的框架桥墩地震力分析 [J] . 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22(1): 36—40.
- [19] 吕志涛. 新世纪的土木工程与可持续发展 [J] . 交通运输工程学报, 2002, 2(1): 1—12.
- [20] 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.