

# 相互作用体系中桩基的动力响应

钱德玲, 雷超, 王东坡, 孙昌玲

(合肥工业大学土木建筑工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 率先在国内开展了对一种新型变截面桩-土-高层建筑结构体系动力相互作用的试验研究。通过振动台模型试验, 观察了桩-土-结构体系动力相互作用的现象, 验证和掌握了新型桩体与结构的震害特点。根据试验测定的数据, 研究了支盘桩-高层建筑结构体系的动力特性和地震反应, 重点分析了支盘桩的动力响应。通过计算和分析得出: 桩-土接触压力时程曲线揭示了在地震动激励下桩-土之间存在着拉开和再接触的现象, 表明支盘桩在动力相互作用过程中承受了拉、拔荷载, 说明和证实了当基础具有较大的抗拉、抗拔和抗扭曲能力时, 才能更好的发挥动力相互作用体系的抗震性能和减轻震灾; 桩基两侧对应测点的应变时程曲线呈反向关系, 表明在地震作用下, 相同时间内桩基一侧受拔, 另一侧受压, 解释了地震区房屋产生倾斜、倾倒震害现象的根本原因。

**关键词:** 振动台试验; 动力响应; 高层建筑结构; 拉压效应; 减轻震灾

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)06-0709-06

**作者简介:** 钱德玲(1956-), 女, 博士, 合肥工业大学教授, 硕士生导师, 主要从事工程抗震、岩土工程方面的教学和科研工作。

## Dynamic response of pile foundation in interaction system

QIAN De-ling, LEI Chao, WANG Dong-po, SUN Chang-ling

(College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** An experimental research on dynamic interaction of pile-soil-structure system was first developed in China. Phenomena of the dynamic interaction of the system were observed, so earthquake damage characteristics between a new type of pile and structure were verified and discovered by shaking table test. Dynamic characteristics and seismic response of the system were studied, and dynamic response of squeezed branch piles was analyzed based on the test data. It was shown by calculation and analysis that the separating and reclosing phenomena occurred between pile and soil under the action of the seismic exciting force, not only revealing that squeezed branch piles were pulled up and pressed down in the course of dynamic interaction, but also explaining and verifying that seismic capability and reduced earthquake damage would be obtained in the dynamic interaction system only when the foundations had greater pulling, pressing and twisting resistant capability. Phenomena of pulling up on one side and pressing down on the other side in the pile foundation were revealed according to reverse direction relation of time-course curve from the corresponding measure points on the sides of pile foundation under seismic action at the same time, and it explained essential reason why the buildings were inclined and toppled in the seismic region.

**Key words:** shaking table test; dynamic response; high-rise structure; pulling and pressed effect; reducing earthquake damage

## 0 引言

为了提高地基承载力和建筑物的抗震性能, 高层建筑和高速铁路桥梁基础常采用桩基<sup>[1]</sup>, 因此有关桩-土-结构体系动力相互作用的研究受到了极大的关注<sup>[2-3]</sup>。试验研究的方法有现场试验、振动台模型试验和离心试验。现场试验虽然能获取地震时的实测资料, 但由于费用昂贵而很少进行。振动台模型试验则具有费用较低、操作性强、灵活性强和可重复性的特点, 因而受到科研人员的重视。特别是现代超高层建

筑的兴起, 振动台试验已成为验证超高层建筑抗震设计可靠性的检验手段。但是, 动力相互作用的研究是一个新颖而又极其复杂的课题, 他涉及到在振动台有限尺寸内模拟土层的无限边界以及对地震动输入的影响、模型与原型的相似关系等问题。近二十年来, 无论是建筑结构工程还是桥梁工程, 人们都致力于直杆

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50278030); 安徽省自然科学基金资助项目(050450402)

收稿日期: 2005-05-09

桩-土-结构体系(简称直杆桩体系)的动力试验,而对于变截面桩-土-结构体系的振动台模型试验则进行的很少。因此,通过振动台模型试验,了解和观察桩-土-结构体系动力相互作用的响应规律、验证或寻找新型桩体与结构的震害特点是非常重要的。在地震动激励下,建筑物的倒塌、倾覆、弯剪等是上部结构-基础-地基共同作用的结果,这些现象的主要原因之一是基础抗压、抗拔和抗扭性能较差,导致高层建筑发生扭曲和整体倾覆,这种组合效应给建筑平面内的各柱带来大小不等的拉拔、压扭作用,使边柱和角柱承受过大的变形<sup>[4]</sup>。鉴于变截面桩具有较高的抗拔、抗压承载力、抗扭曲性能以及对地震动的阻抗特性等,本文率先在国内开展了对一种新型变截面桩(挤扩支盘桩)-地基-高层建筑结构体系动力相互作用的研究。

## 1 振动台模型设计与试验

为了了解在地震动激励下支盘桩-地基-上部结构体系动力相互作用的特性,本文设计了一个 12 层框架结构-支盘桩-分层土模型,在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行了一次振动台模型试验。该模型的上部结构采用双向单跨 12 层钢筋混凝土框架,桩基础为 5 根挤扩支盘桩,桩长 1200 mm,直径 60 mm。模型土分为 3 层,自上而下分别为粉质粘土、砂质粉土和砂土。该模型的缩尺比例为 1/10,质量密度相似系数  $S_\rho = 1$ ,土、结构的弹性模量相似系数均为  $S_E = 3.76$ 。按照 Buckingham  $\pi$  定理导出了各物理量之间的相似关系式和相似系数<sup>[5]</sup>。为了减小模型箱效应(即模型箱里的土在地震作用下应以与原型自由场同样的方式变形),模型箱采用了直径为 3 m 的圆桶形柔性容器,桩基设计见图 1,模型照片见图 2。试

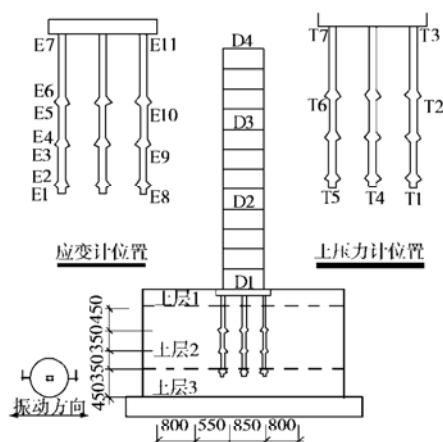


图 1 模型设计及传感器位置

Fig. 1 Design model and places of transducer

验中,为了量测该体系的动力响应,在上部结构框架上安装了加速度传感器和位移计,在支盘桩不同位置处粘贴了应变传感器,并在桩土界面上埋设了土压力盒量测桩-土接触压力,土中埋设了孔隙水压力传感器用以量测孔隙水压力的变化情况,各种传感器设置的位置见图 1。



图 2 桩基模型照片

Fig. 2 Photo of pile's model

## 2 试验加载制度

振动台台面输入的波形采用了 EL Centro、Kobe 和上海人工波 3 种,试验时加速度峰值从小量级开始分级递增,台面输入按相似关系调整加速度峰值和时间间隔。每次改变加速度峰值时都输入小振幅的白噪声激励,以观察模型的频率和阻尼比的变化情况。台面激励主要为 X 向,部分工况同时输入 X 和 Z 双向激励。试验加载制度见表 1。

## 3 桩基的动力响应

在相互作用体系中,桩基的动力响应是决定体系抗震性能的重要组成部分。为了获取动力响应的数据,在设计时,我们沿桩身不同深度处埋设了应变片和土压力计,将土压力计重点埋在承力盘下与土的接触面上,测得了不同工况下的桩身应变和桩土接触压力。有关测点的埋设位置见图 1。

### 3.1 桩身应变分布规律

#### (1) 应变幅值沿深度的变化规律

为了与直杆桩进行对比,研究和了解支盘的拉、压作用以及动力特性,我们特意将应变片粘贴在桩顶和支盘的上下端。图 3 是不同波形和不同工况下的桩身应变幅值的分布图,从图中曲线变化上分析,桩身应变幅值在不同深度或位置处是不同的,即 3 个支盘的上下端应变幅值均不相等,表明桩身应变幅值大小与土层性质、地震波频谱组成、激励大小等因素有关。具体分析如下:

表 1 支盘桩-土-结构体系振动台试验加载制度

Table 1 The loading system of pile-soil-structure system experiment

| 序号    | 工况          | 加 速 度 峰 值/g |     |       |       | 备 注        |
|-------|-------------|-------------|-----|-------|-------|------------|
|       |             | 原 型         |     | 模 型   |       |            |
|       |             | X 向         | Z 向 | X 向   | Z 向   |            |
| 1     | 1WN         | —           | —   | 0.070 | —     | 七度居多<br>七度 |
| 2~4   | EL1、SH1、KB1 | 0.035       | —   | 0.093 | —     |            |
| 5~7   | EL2、SH2、KB2 | 0.100       | —   | 0.266 | —     |            |
| 8、9   | ELZ2、KBZ2   | 0.100       | 0.1 | 0.266 | 0.266 |            |
| 10    | 10WN        | —           | —   | 0.070 | —     | 八度         |
| 11~13 | EL3、SH3、KB3 | 0.200       | —   | 0.532 | —     |            |
| 14、15 | ELZ3、KBZ3   | 0.200       | 0.2 | 0.532 | 0.532 |            |
| 16    | 16WN        | —           | —   | 0.070 | —     |            |
| 17~19 | EL4、SH4、KB4 | 0.250       | —   | 0.665 | —     |            |
| 20、21 | ELZ4、KBZ4   | 0.250       | 0.2 | 0.665 | 0.532 |            |
| 22    | 22WN        | —           | —   | 0.070 | —     |            |
| 23~25 | EL5、SH5、KB5 | 0.300       | —   | 0.798 | 0.532 |            |
| 26、27 | ELZ5、KBZ5   | 0.300       | 0.2 | 0.798 | —     |            |
| 28    | 28WN        | —           | —   | 0.070 | —     |            |
| 29~31 | EL6、SH6、KB6 | 0.350       | —   | 0.931 | 0.532 |            |
| 32、33 | ELZ6、KBZ6   | 0.350       | 0.2 | 0.931 | —     |            |
| 34    | 34WN        | —           | —   | 0.070 | —     |            |
| 35    | EL7         | 0.400       | —   | 1.064 | 0.532 |            |
| 36    | ELZ7        | 0.400       | 0.3 | 1.064 | 0.798 |            |
| 37    | 37WN        | —           | —   | 0.070 | —     |            |
| 38    | EL8         | 0.500       | —   | 1.330 | —     |            |
| 39    | ELZ8        | 0.500       | 0.3 | 1.330 | 0.798 |            |
| 40    | 40WN        | —           | —   | 0.070 | —     |            |

注：①EL—EL Centro 波（X 单向）；ELZ—EL Centro 波（X、Z 双向）；SH—上海人工波（X 单向）；KB—Kobe 波（X 单向）；KBZ—Kobe 波（X、Z 双向）；WN—白噪声。②受振动台输入能量限制，工况 39 未做。

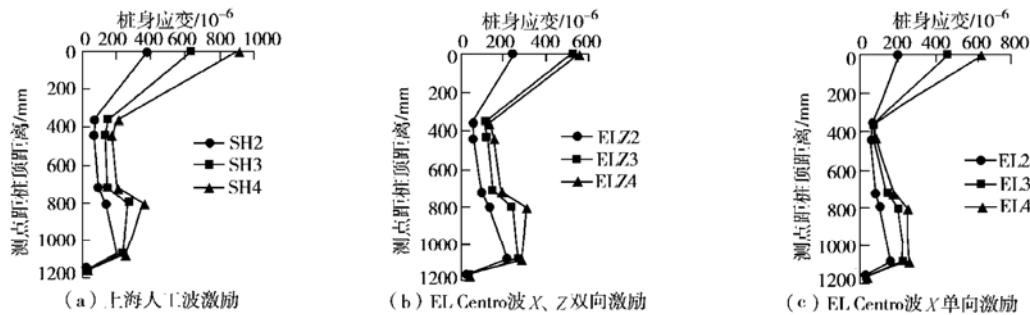


图 3 不同峰值地震波输入下桩身应变分布图

Fig. 3 Distribution of strain peak value of the pile under different accelerations

a) 桩顶处的应变最大，第 1 盘（位于最上面）上下端的应变较小，第 2 盘下端和第 3 盘上端的应变较大，而桩底处的应变最小。从土层分布上来看：桩顶位于较软的粉质粘土层上而造成桩顶应变最大；第 1 和第 2 盘位于较硬的砂质粉土层上桩身应变较小；而第 3 盘的上端正好位于砂质粉土和砂土的交界面上，土层性质的改变使这一桩段的应变增大；第 3 盘的下端位于砂土上，应变最小，这说明土层性质的变化影响着桩身应变大小和分布。从各测点测得的应变来看，在地震作用下，3 个支盘均承受了动力荷载，

使桩身应变沿桩身分布大致趋于平衡，不至于应力集中在某一段而导致桩身断裂。试验结束后，我们仔细观察桩身裂缝：除了在桩顶看到一些不明显的细微裂缝外，其他部位均无裂缝产生，这与桩身应变分布情况完全吻合。

b) 从图 3 曲线分布上看，随着台面输入的加速度峰值增大，桩身应变也增大，但增量减小，表明在地震作用下，土体刚度在下降，频率减小，阻尼比增大，桩身应变与激励峰值的增加不再是线性关系。

c) 桩身应变大小与激励地震波的波形和频谱有

关。在输入相同的加速度峰值情况下，上海人工波激励下的桩身应变较大，而 EL Centro 波较小。EL Centro 波的 X 单向和 X、Z 双向激励下的应变变化不大。

(2) 桩基两侧应变时程曲线的分布规律

图 4 是桩基两侧对应测点的应变时程曲线，从图中明显看到 E5 和 E10、E7 和 E11 两对对应测点的应变时程曲线呈反向关系，表明在地震作用下，桩基一侧受拉，另一侧受压，揭示了地震区高层建筑产生倾

斜、倾倒震害现象的根本原因。我们知道，当桩基（直杆桩）在拉、压往复荷载作用下，只要克服桩周摩擦力后，就失去了阻力。如果在桩身设置多级支盘，支盘就象伞一样支撑在地基上，提供拉、压阻力，其抗震性能就大不一样。现根据图 4 应变时程曲线的特点作以下几点分析：

a)相同加速度峰值输入下不同测点应变时程曲线的特征

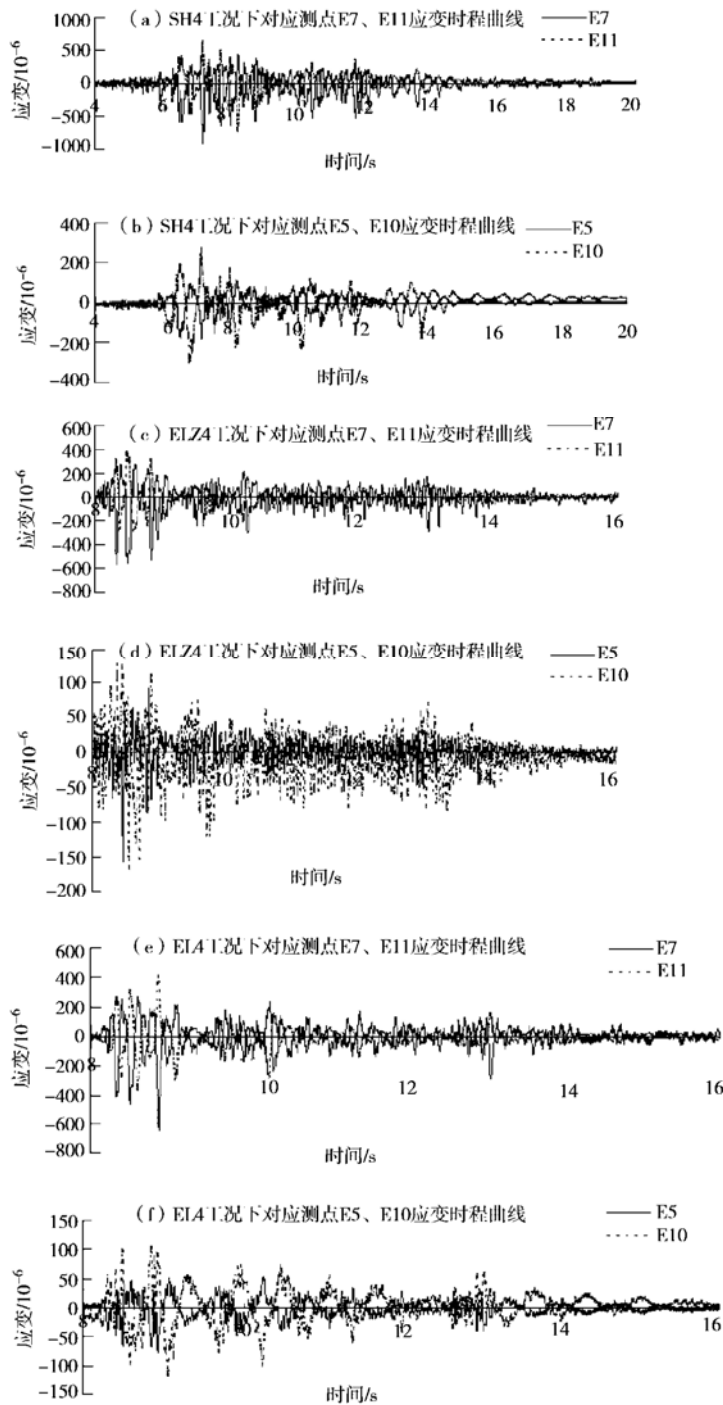


图 4 桩基两侧对应测点应变时程曲线

Fig. 4 Time-course curve of strain in the sides of pile foundation

桩基两侧对应测点 E5 和 E10、E7 和 E11 的应变时程曲线均呈反向规律。因篇幅所限, 我们只选取了桩顶和第一盘的 4 个对应测点进行了分析, 其他对应测点情况基本相同。在上海人工波激励下, 位于桩顶的 E7 和 E11 测点的应变大于 E5 和 E10 两测点。EL Centro 波激励下, X 向和 X、Z 双向应变时程曲线也有类似的特征, 也就是说, 当地震动为水平运动和竖向运动时桩基两侧都出现反向关系。但是, 从曲线上看, 在相同时段内, 出现反向应变值却不同。如果曲线反向代表拉压关系, 那么, 同一时刻两个对应测点的拉力和压力大小也不同, 表明体系各点受到的应力和变形是不均衡的, 这可能与上部结构的摆幅、刚度或振型有关。

b)不同波形相同加速度峰值激励下应变时程曲线的特征

上海人工波 SH4 和 El Centro 波 EL4 是 X 向相同台面加速度峰值输入下的 X 向应变时程曲线, 从曲线上看, 上海人工波的应变幅值明显大于 EL4, 这是因为上海人工波低频成分较为丰富, 说明体系变形与地震时的波形和频谱有关, 这和我们试验时所观察到的结构加速度反应现象是相同的。

3.2 桩土接触压力分布规律

试验前, 沿深度共埋设了 7 个土压力盒, 2 个对称分布在承台两侧底部与土接触的部位, 2 个位于平行于 X 方向的第一盘下与土接触的位置, 中桩和两根角桩的底部各一个(见图 1)。由于土压力盒质量问题, 试验中 T5 和 T6 已损坏, T1 在 EL4 工况后也已损坏, 不再有数据显示。因此, 沿深度只有 3 个测点可作分析, 且只能在 5 到 15 序号的工况中进行对比分析。

(1) 桩土接触压力沿深度的分布

图 5 是桩土接触压力曲线, (a) 图是相同波形不同工况 EL Centro 波 X 向和 X、Z 双向激励下桩土接触压力。由图可知, 承台与土的接触压力非常小, 可忽略不计, 荷载主要由桩基来承担。第一盘下的接触压力较大, 表明支盘在地震动作用下承受动荷载, 并通过支盘耗散能量, 以减轻对上部结构的冲击力以及耗散上部结构反馈给基础的振动能量。第二盘虽然没有

设置土压力盒, 但从第一盘的桩土接触压力就可确定第二盘与土仍然存在着桩土接触压力, 这从图 3 应变分布曲线上就得到证实, 而桩底接触压力较小。从曲线上来看, 双向振动的接触压力大于 X 单向振动的, 导致桩底出现较大的接触压力。(b) 图是 EL Centro 双向波和上海人工波的对比, 两者差别不大, 随着台面输入加速度峰值增加, 桩土接触压力也增加, 桩底出现较大的接触压力, 表明支盘和桩底与土之间存在着桩 - 土接触压力。

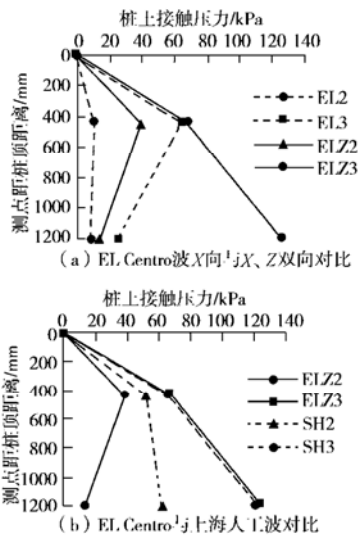


图 5 桩土接触压力曲线

Fig. 5 Peak value curve of pile-soil contact pressure

(2) 中桩与角桩的接触压力

将角桩 T1 和中桩 T4 的桩土接触压力进行对比, 明显看出角桩的接触压力大于中桩(见表 2), 说明在地震动激励下, 角桩承受较大的压力, 这与静力作用下, 桩、土的荷载分配规律完全吻合, 即角桩和边桩承受的压力大于中桩。

表 2 中桩与角桩的桩-土接触压力

Table 2 Pile-soil contact pressures

| 土压力<br>盒编号 | 桩土接触压力/kPa |      |      |
|------------|------------|------|------|
|            | EL2        | EL3  | EL4  |
| T1         | 8.72       | 25.1 | 26.5 |
| T4         | 2.3        | 3.88 | 6.37 |

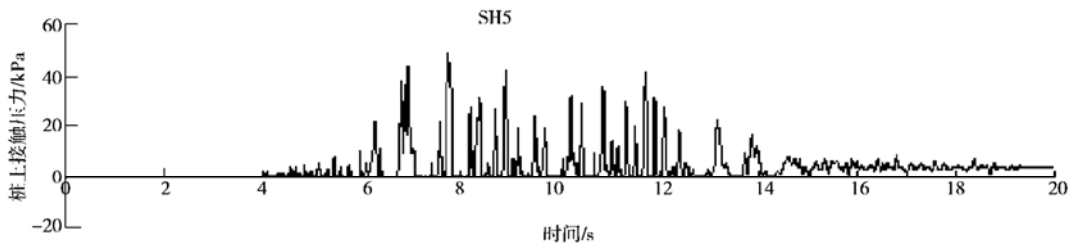


图 6 T2 的桩土接触压力时程曲线

Fig. 6 Time-course curve of T2 of pile-soil contact pressure

### (3) 桩土接触压力时程曲线分析

图6是土压力盒T2在上海人工波SH5工况激励下的桩土接触压力时程曲线, T2位于第一盘下, 从时程图上看, 盘与土体之间存在着初始接触压力, 并出现接触压力为零的时刻, 表明桩土之间存在脱开和再接触的状态<sup>[6]</sup>, 这是桩-土-高层建筑结构体系动力相互作用的一个典型特征, 也说明了桩土之间确实存在着拉拔效应。充分证实了桩基必须具有较高的抗拉和抗压能力, 才具有相互作用体系良好的抗震性能以及达到减轻震灾的目的。

## 4 结 论

模拟高层建筑结构与地基基础的动力相互作用问题一直是模型试验中的一个重大理论与实践问题, 通过振动台模型试验即可发展和丰富模型试验的动力相似理论, 又可验证设计方案, 为在试验室模拟实际结构提供指导, 有助于工程结构抗震的研究和发展<sup>[7-9]</sup>。本文对支盘桩-地基-高层建筑结构体系振动台模型试验进行了研究, 重点分析了桩基的动力响应, 得出以下几点结论:

(1) 相互作用体系对结构动力特性和结构地震反应均有较大的影响, 结构的抗震性能与基础形式、土层性质等因素有关, 支盘桩的抗震稳定性有了初步的显示。

(2) 通过桩-土接触压力分析, 揭示了在地震动激励下桩-土之间存在着拉开和再接触的现象, 表明支盘桩在动力相互作用过程中承受了拉、压荷载, 说明和证实了当基础具有较大的抗拉、抗拔和抗扭曲能力时, 才能发挥动力相互作用体系的抗震性能和减轻震灾。

(3) 相互作用体系中, 桩基的动力特征是角桩和边桩承受较大的动荷载, 这与静力状态下荷载分布规律一致。

(4) 从桩身应变沿深度的变化规律上看, 桩身应变在不同深度或位置处是不同的, 即3个支盘的上下端应变均不相等, 表明桩身应变与土层性质、地震波频谱组成、激励大小等因素有关。

(5) 桩基两侧对应测点的应变时程曲线呈反向关系, 表明在地震作用下, 相同时间内桩基一侧受拉, 另一侧受压, 揭示了地震区房屋产生倾斜、倾倒震害现象的根本原因之一。

### 参考文献:

[1] 韦晓, 范立础, 王君杰. 考虑桩-土-桥梁结构相互作用

振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 91-97. (WEI Xiao, FAN Li-chu, WANG Jun-jie. Shaking table test on soil-pile-structure interaction [J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4): 91-97.)

[2] GOHL W, FINN W. Seismic response of single pile in shake table studies[C]// Proceedings of 5th Canadian Conference on Earthquake Engineering. Ottawa, 1987: 435-444

[3] JUN T, NOBUO F, SHIGEHARU Y. Experimental evaluation of dynamic characteristics of low and medium-rise buildings with soil-structure interaction [C]// The 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland: New Zealand, 2000: 2244.

[4] 王伟, 王俭. 桩箱基础与地基相互作用高层建筑抗震性能研究[J]. 世界地震工程, 2001, 17(4): 128-134. (WANG Wei, WANG Jian, Study on seismic property of tall buildings with interaction between piled-box foundation and soil ground [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2001, 17(4): 128-134)

[5] SABINS G M, HARRIS H G. Structural modeling and experimental techniques[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1983: 141-167.

[6] 陈波, 吕西林, 李培振, 陈跃庆. 均匀土-桩基-结构相互作用体系的计算分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 91-99. (CHEN bo, Lü Xi-lin, LI Pei-zhen, CHEN Yue-qing. Computational analysis of dynamic homogeneous soil-pile-structure interaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3): 91-99.)

[7] 吕西林, 陈跃庆. 高层建筑结构-地基动力相互作用效果的振动台试验对比的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(2): 42-48. (Lü Xi-lin, CHEN Yue-qing. Study on effect of soil-structure interaction by shaking table test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(2): 42-48.)

[8] DON H, et al. Dynamic response of single pile and soil-pile interaction [J]. Canadian Geotech J, 1996, 33: 80-96.

[9] 陈跃庆, 吕西林, 李培振, 陈波, 胡质理. 分层土-基础-高层框架结构相互作用体系振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(3): 104-113. (CHEN Yue-qing, Lü Xi-lin, LI Pei-zhen, et al. Shaking table test for layered soil-foundation-structure interaction system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(3): 104-113.)