

支盘桩 - 土 - 高层建筑结构振动台试验的研究

钱德玲¹, 夏京¹, 卢文胜², 徐雁飞¹, 李健全¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 设计和实施支盘桩 - 土 - 高层建筑结构动力相互作用体系的振动台试验, 再现框架结构和桩基的震害现象。通过振动台试验, 研究相互作用体系的地震响应、支盘桩对结构体系的阻抗作用和单、双跨框架结构抗震性能的差异, 对该体系的试验现象、基频、阻尼比、振型、位移反应和上部结构顶层加速度反应进行了计算和分析。结果表明: 相互作用对结构的动力特性和地震反应均有较大的影响, 支盘桩具有较好的抗压、抗拔和抗扭曲作用; 相同工况时上海人工波激励下的结构最大位移反应比 El Centro 波大, 说明结构的破坏除与震级有关外, 还与地震波的波形有关; 双跨框架结构的抗震性能明显好于单跨, 并与汶川地震中很多单跨教学楼倒塌的现象一致。研究结果对抗震设计和防灾减灾具有重要的研究意义。

关键词: 桩基工程; 挤扩支盘桩; 桩 - 土 - 结构; 动力相互作用; 振动台试验; 抗震性能

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)10 - 2024 - 07

STUDY OF SHAKING TABLE TEST OF SQUEEZED BRANCH PILE-SOIL-HIGH-RISE STRUCTURE INTERACTION SYSTEM

QIAN Deling¹, XIA Jing¹, LU Wensheng², XU Yanfei¹, LI Jianquan¹

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China; 2. Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Shaking table test of dynamic interaction of squeezed branch pile-soil-high-rise structure system is designed and carried out, which reproduces the earthquake damage phenomenon of pile foundation and frame structure. The seismic response of dynamic interaction system, the seismic effects of squeezed branch pile and the difference of aseismic capability between single-span and double-span frame structure are studied based on the shaking table test. The test phenomenon, natural frequency, damping ratio, vibration mode, displacement response, acceleration response at the top of superstructure of the system are calculated and analyzed. The test results show that the influence of interaction on structural dynamic characteristics and seismic response is large, the resistant effects of compression, tension and torsion of squeezed branch pile are obvious, the aseismic capability of double-span frame structure is superior to that of single-span frame structure, which is good consistent with collapse phenomenon of many single-span buildings under Wenchuan earthquake. Maximal displacement of structure under excitation of the Shanghai artificial-wave is larger than that of El Centro wave under the same condition, which means the damage of structure not only is related to magnitude but also to the waveform of the seismic waves. The results will have important significance in aseismic design and prevention of seismic disaster.

Key words: pile foundations; squeezed branch pile; pile-soil-structure; dynamic interaction; shaking table test; aseismic performances

收稿日期: 2009 - 06 - 09; **修回日期:** 2009 - 07 - 04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40772171, 50278030); 安徽省自然科学基金资助项目(050450402)

作者简介: 钱德玲(1956 -), 女, 博士, 1982年毕业于合肥工业大学地质工程系, 现任教授, 主要从事地震工程和基础工程方面的教学与研究工。E-mail: dlqian@sina.com

1 引言

地震时高层建筑、桩基础和地基组成一个复杂的动力体系, 并产生相互作用。地震波通过地基和基础激励上部结构产生振动和变形, 而上部结构又将变形能反馈到地基和基础上, 使整个动力体系处于相互制约、相互影响的变形协调之中^[1]。然而, 地震中建筑物的倒塌和破坏表明抗震设计存在一定的缺陷, 并引起了人们对建筑物抗震问题的极大关注, 对模拟地震反应的振动台模型试验也就越来越引起重视。

吕西林等^[2, 3]开展了振动台模型试验, 研究结构与地基基础的动力相似关系和相互作用的关键技术问题。研究表明地震作用下结构 - 地基 - 基础相互作用与刚性地基上结构的反应不同, 如结构的动力特性发生改变(自振周期、阻尼比和振型的改变)、结构的地震反应发生改变(内力及位移的改变)和地基的运动特性发生改变(结构自振频率、加速度幅值的改变)。这些研究成果为振动台模型试验奠定了基础, 对改进或提出合理的理论计算模型和分析方法起到了重要的作用^[4~6]。

随着模型相似理论和结构抗震试验技术的发展, 振动台模型试验已成为研究地基和结构动力相互作用的有效方法和必要途径。但是, 无论是国外还是国内, 也无论是振动台模型试验还是计算机动态仿真试验, 均是采用常规的直杆桩基础进行试验和研究的。众所周知, 地基变形导致对基础的作用力发生改变, 从而直接影响上部结构的稳定性及其破坏形式。因此, 根据支盘桩抗拔、抗压和抗震的性能, 笔者于 2009 年元月在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行了支盘桩 - 高层建筑结构体系的振动台试验。试验结果表明: 相互作用体系对结构的动力特性和结构的地震反应均有较大的影响, 结构破坏形式与基础形式、土层性质等因素有关。

2 振动台模型试验设计

2.1 动力相似关系

振动台模型试验的一个重要基础性研究课题是动力相似理论, 这种相似关系也是地震工程领域中最难解决的问题。动力相似关系包括几何尺寸、动力特性、材料性质和地震波输入等, 原型和模型

必须满足相似学第二定律^[7]。根据原型与模型处于相同的重力场和惯性力与重力的比值相等, 导出了相似关系^[7, 8](如表 1 所示)。本次试验进行了模型的相似关系设计, 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 的 π 定理导出各物理量之间的相似关系式和相似系数。

表 1 模型的动力相似系数^[7, 8]

Table 1 Dynamic similarity coefficients of model^[7, 8]

相似系数名称	原型: 模型	相似系数名称	原型: 模型
长度 S_l	10.000	质量密度 S_ρ	1.000
线位移 $S_x = S_l$	10.000	质量 $S_m = S_\rho S_l^3$	1 000.000
角位移 S_θ	1.000	刚度 $S_k = S_E S_l$	37.600
面积 $S_A = S_l^2$	100.000	时间 $S_t = (S_m / S_k)^{\frac{1}{2}}$	5.157
弹性模量 S_E	3.760	频率 S_f	0.194
应力 $S_\sigma = S_E$	3.760	阻尼 $S_c = S_m / S_t$	193.900
应变 S_ϵ	1.000	速度 $S_v = S_x / S_t$	1.939
泊松比 S_μ	1.000	加速度 $S_a = S_x / S_t^2$	0.376

2.2 土体边界条件及土箱设计

自然条件下, 地基是无边界的土体, 而在振动台试验中, 由于振动台实际尺寸的限制, 只能用有限尺寸的容器来装土。容器边界上的波动反射以及体系振动形态的变化将会给试验结果带来一定的误差, 即所谓的“模型箱效应”。因此必须使容器中的模型土与土体自由场的边界条件在地震作用下以同样的方式变形。

本课题采用柔性容器作为模型箱, 模型箱为直径 3 m 的圆筒形, 圆筒侧壁采用厚 5 mm 的橡胶膜, 外侧用 $\phi 4 \text{ mm} @ 60 \text{ mm}$ 钢筋做圆筒式加固, 目的是提供径向刚度, 且允许土体做层状水平剪切变形。土箱直径 D 与结构平面直径 d 之比 $D/d = 5$, 满足结构模型的尺寸与周围土体边界相比小于一定比例的要求。为了检验柔性容器土体边界模拟条件的合理性, 同济大学振动台实验室进行了 3 次自由场运动的振动台试验^[5]。从图 1 可以看到, 在距离边界较近的范围内, 边界影响是较为明显; 而在距离边界一定距离后, 各测点的加速度放大系数基本一致, 说明边界对内部土体的影响已经很小, 容器较好地消除了边界效应以及对土体地震动反应的影响^[5]。图中还可以看到, 输入上海人工波(测点 S1, S2)时的地震反应均较输入 El Centro 波(测点 E1, E2)时的大, 原因是上海人工波的低频成分较为丰富。

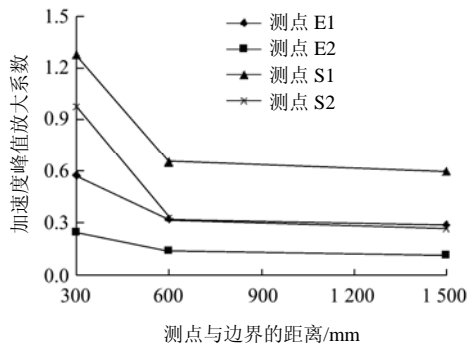


图1 边界效应

Fig.1 Boundary effect

2.3 模型的设计与制作

根据现有的试验条件，在桩-土-结构遵循相同的动力相似关系的情况下，本文设计并制作了缩尺比例为 1:10 的试验模型。桩型为 6 根支盘桩，上部结构采用 12 层钢筋混凝土框架，x 向为双跨，y 向为单跨。模型土为一次性制样，分为 3 层，自上而下分别为粉质黏土、砂质粉土和砂土，可以认为原型体系为典型的上海小高层建筑体系。为了掌握土层中天然含水量和土的物理力学性质，在填土装入土箱前，按一定比例将土和水搅拌在一起，同时取样测定含水量，然后再放入土箱内静置。3 d 后再加水至土箱的一半高度，相当于地下水的标高，试验后取样再次测定不同土层的含水量和其他物理性质指标。

2.4 测点布置及量测

试验中采用加速度计、应变计和位移计来量测

桩-土-结构的动力反应，并在桩土界面上埋设土压力盒以量测桩土接触压力，土中埋设孔隙水压力计量测孔隙水压力的变化情况，测点布置见图 2。

2.5 试验加载制度

振动台台面输入波形采用 El Centro 波、上海人工波和 Kobe 波。在每次输入不同量级的加速度峰值之前都输入小振幅白噪声激励，以观察模型的频率和阻尼比的变化情况。输入波主要为 x 单向激励，部分工况为 y 单向激励和同时输入了 x, z 向地震波。振动台台面输入加速度峰值按小量级分级递增，按相似关系调整加速度峰值和时间间隔，本次试验加载制度可参考有关研究^[9, 10]。

3 试验现象的研究与分析

为了对比研究框架结构单、双跨抗震性能的差异，故将上部框架结构模型设计成 x 向为双跨，y 向为单跨，并相应地进行了 x 向和 y 向的地震波输入。

3.1 试验现象及分析

本次试验所观察到的宏观现象为：(1) 当输入较小量级地震波时，土箱或土体摆动不大，上部框架结构摆动幅度也很小。(2) 随着输入加速度峰值的增加，土体及上部结构的摆动幅值逐渐增大。(3) 在相同工况下输入不同地震波波形时，土体及上部结构的震动反应以上海人工波为最大，El Centro 波输入时的结构反应较小，而 Kobe 波最小，这是因

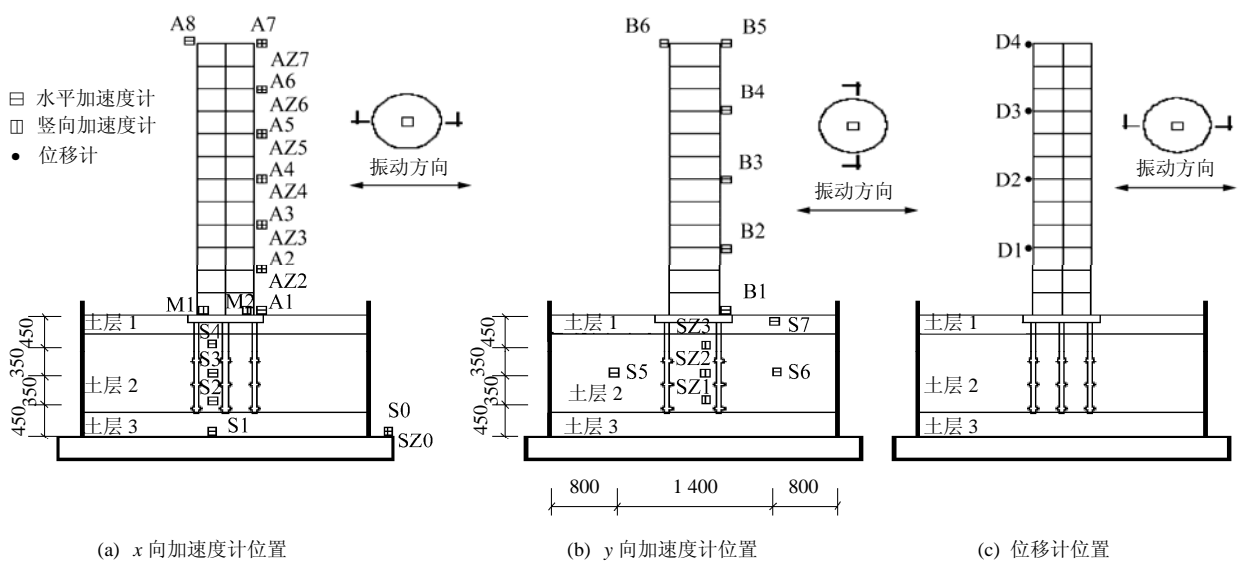


图2 试验测点布置图(单位: mm)

Fig.2 Measuring points arrangement of the test(unit: mm)

为上海人工波的低频分量十分丰富, 与体系频率非常接近所致。(4) 当输入相同加速度峰值时, 上部框架结构在 x 向(双跨)的摆动幅度明显小于 y 向(单跨), 说明双跨框架结构的抗震性能明显好于单跨, 这与汶川地震中很多单跨教学楼倒塌的震害现象一致。

在整个试验过程中, 承台基本保持水平, 框架结构也没有出现倾斜和沉降。主要原因一是因为本次试验的土体为分层土, 桩尖位于压缩模量较大的砂土中, 持力层具有较高的承载力; 二是由于支盘桩具有较好的抗压、抗拔和抗扭曲作用^[11, 12], 减少了结构摆动的幅值。通过前期的研究表明: 支盘桩与筏板组合成桩筏基础, 桩与桩间土组成一个共同承担外荷载的桩 - 土体系, 结构整体弯曲受到支盘桩的约束, 同时将上部结构反馈给桩基的地震惯性力, 通过支盘扩散到地基中, 支盘上下端始终处于受压和受拉的循环状态, 有效地吸收了部分地震波能量, 减小了高层结构的动力效应, 从而减轻了震灾^[12]。

试验中, 随着不同工况的进行, 在小震激励下上部框架结构没有发现任何裂缝, 结构完好无损。但随着地震激励的增大, 3~8 层框架梁的梁端和框架柱的柱端均出现了塑性铰和可见的细微竖向裂缝, 而其余各层没有产生明显的裂缝。在 x 和 y 向分别激励下, 框架结构在两个方向上均有裂缝产生, 且平行于 x 方向梁、柱上的裂缝要明显多于平行于 y 方向, 这是因为在 y 向地震波输入时上部框架结构的振幅明显大于 x 向。试验结束后, 挖出支盘桩, 发现沿桩身分布着一些水平波状裂缝, 且平行于 x 方向上桩身裂缝比平行于 y 方向上多, 裂缝集中于第一个支盘以上部分, 第一个支盘以下及桩尖均未发现裂纹。上部框架结构及支盘桩的裂缝见图 3。



图 3 上部结构及支盘桩的裂缝情况

Fig.3 Cracks of superstructure and squeezed branch pile

3.2 地震激励下结构性能的研究

3.2.1 基频和阻尼比

为了研究地震激励后结构的损伤程度和抗震性能, 分别计算和给出表 2 在 x , y 向地震波输入时, 上部结构沿 x , y 方向上顶层测点的基频和阻尼比。

表 2 支盘桩 - 土 - 框架结构体系的基频和阻尼比
Table 2 Natural frequency and damping ratio of pile-soil-frame structure system

工况	x 向上结构顶层测点		y 向上结构顶层测点	
	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
1WN	3.27	10.398	3.27	7.951
12WN	2.27	7.489	2.77	6.859
20WN	1.76	12.216	1.51	12.252
28WN	1.51	13.907	1.26	12.698

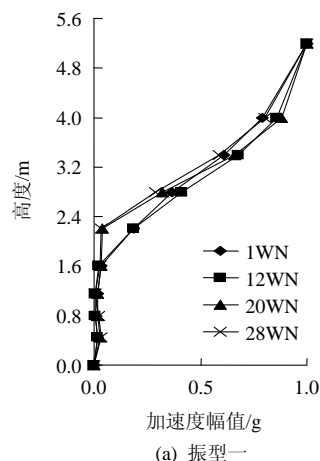
从表 2 可以得出如下规律:

(1) 随着输入加速度峰值的增加, 体系的频率逐渐降低、阻尼比逐渐增大。这是土体软化、桩基裂缝和上部框架结构裂缝扩展共同作用的结果。

(2) x 向上框架结构顶层测点的阻尼比明显大于 y 向上, 说明 x 向结构吸收地震波的能力比 y 向强, 即 x 方向(双跨)框架结构的抗震性能明显比 y 向(单跨)好。

3.2.2 振型曲线

振型曲线是表征结构抗震性能的一个重要性指标。图 4 为试验中实测的各振次 x 向的振型曲线, 图中 1.6 m 处为土体表面。由振型曲线可见, 基础处明显存在平动和转动现象, 振型曲线在基础处偏离零点位置, 这是支盘桩 - 土 - 上部结构的动力相互作用的结果。但平动和摆动幅度较小, 且随着振次的增加, 其变化不大, 说明支盘桩具有较大的平



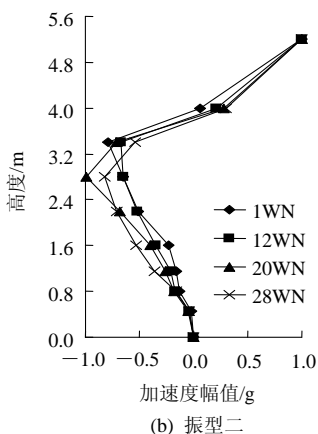


图4 模型的x方向振型曲线
Fig.4 Vibration shapes of x-direction in the model

动和转动刚度，起到了阻抗作用。上部结构第一振型以剪切型为主，且随着振次的增加、上部结构裂缝逐步的扩展和刚度的下降，振型幅值零点位置也逐渐下移，第一振型剪切型特征也就更加突出^[2]，说明了基础平动和转动程度均与土体条件、基础形式有关。

3.2.3 结构位移的分析

上部结构的位移是基础平动、摆动和结构本身弹塑性变形及其相互作用的综合响应。图5为上部结构在El Centro波(EI)和上海人工波(SH)相同工况时沿x向的最大位移反应。由图5可知，该体系上部结构位移较小，且随着输入地震波加速度峰值的增加，上部结构的最大位移反应也增大。这是因为随着振次的增加，土体软化呈非线性发展、支盘桩基础平动和转动刚度逐渐下降、上部结构裂缝扩展和刚度逐渐降低共同导致上部结构位移反应的逐渐加大。同时可以看到上海人工波激励下的结构最大位移反应比El Centro波的大，与当时看到的试验

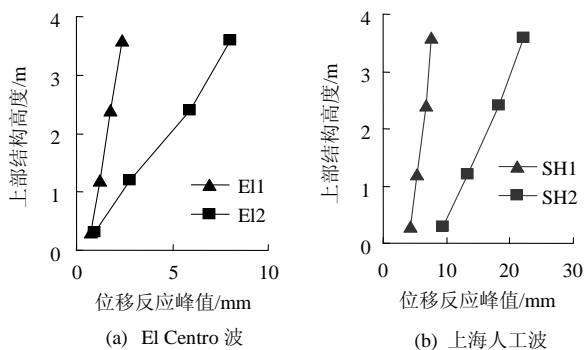


图5 上部结构x向位移反应峰值
Fig.5 Peak x-direction displacements of superstructure

现象一致。说明结构的破坏除与震级有关外，还与地震波的波形有关。

4 相互作用体系的动力响应

为了获得相互作用的地震反应，根据试验资料和测试的数据，对上部框架结构顶层的加速度反应进行了分析。根据结构动力学原理，上部框架结构顶层的总体加速度 \ddot{u} 由桩基平动加速度分量 \ddot{u}_g 、桩基转动引起的摆动加速度分量 $H\ddot{\theta}$ 和上部结构变形加速度分量 \ddot{u}_c 三部分组成^[8, 13, 14]。图6给出了在上海人工波作用时，上部结构顶层加速度各分量的时程曲线及傅氏谱，经分析可以得到如下规律：

(1) 通过图6(a), (b)比较可得，当在较小的地震波激励(SH1)时，上部结构顶层的加速度 \ddot{u} 主要由上部结构的变形加速度分量 \ddot{u}_c 组成，其次是桩基平动加速度分量 \ddot{u}_g 和桩基转动引起的摆动加速度分量 $H\ddot{\theta}$ 。因为支盘桩与土的动力相互作用有效地提高了基础的阻抗性能，同时桩端支承于较密实的砂土中，使得基础平动和转动刚度较大，而上部结构的刚度较小。当在较大地震波激励(SH2)时，上部结构顶层的加速度仍是由上部结构的变形加速度分量控制，但摆动加速度分量明显增加，平动加速度分量仍然很小。说明随着振次的增加，上部结构出现裂缝后，刚度迅速下降。

(2) 从时程图可以看出，桩基平动加速度分量、桩基转动引起的摆动加速度分量和上部结构的变形加速度分量三者并不同步，在相同时间内有时同相有时反相，在组成上部结构顶层加速度时，相互叠加或相互抵消。但在较大地震波激励时以反相为主。随着输入加速度峰值的增加，上部结构顶层加速度的峰值也逐渐增大，且组成它的3个加速度分量的峰值都增大。

(3) 由图6(c)可知，随着输入加速度峰值的增大，各加速度分量的频谱组成由低频向高频移动，其中以上部结构变形加速度分量最为明显。这是因为支盘桩的锚固作用，使得基础具有较高的抗压、抗拔和抗侧移能力，从而保证了基础的平动和转动刚度。随着输入地震激励的增大，上部框架结构出现裂缝并扩展，使结构刚度下降，略去了高频部分，保留了低频部分。

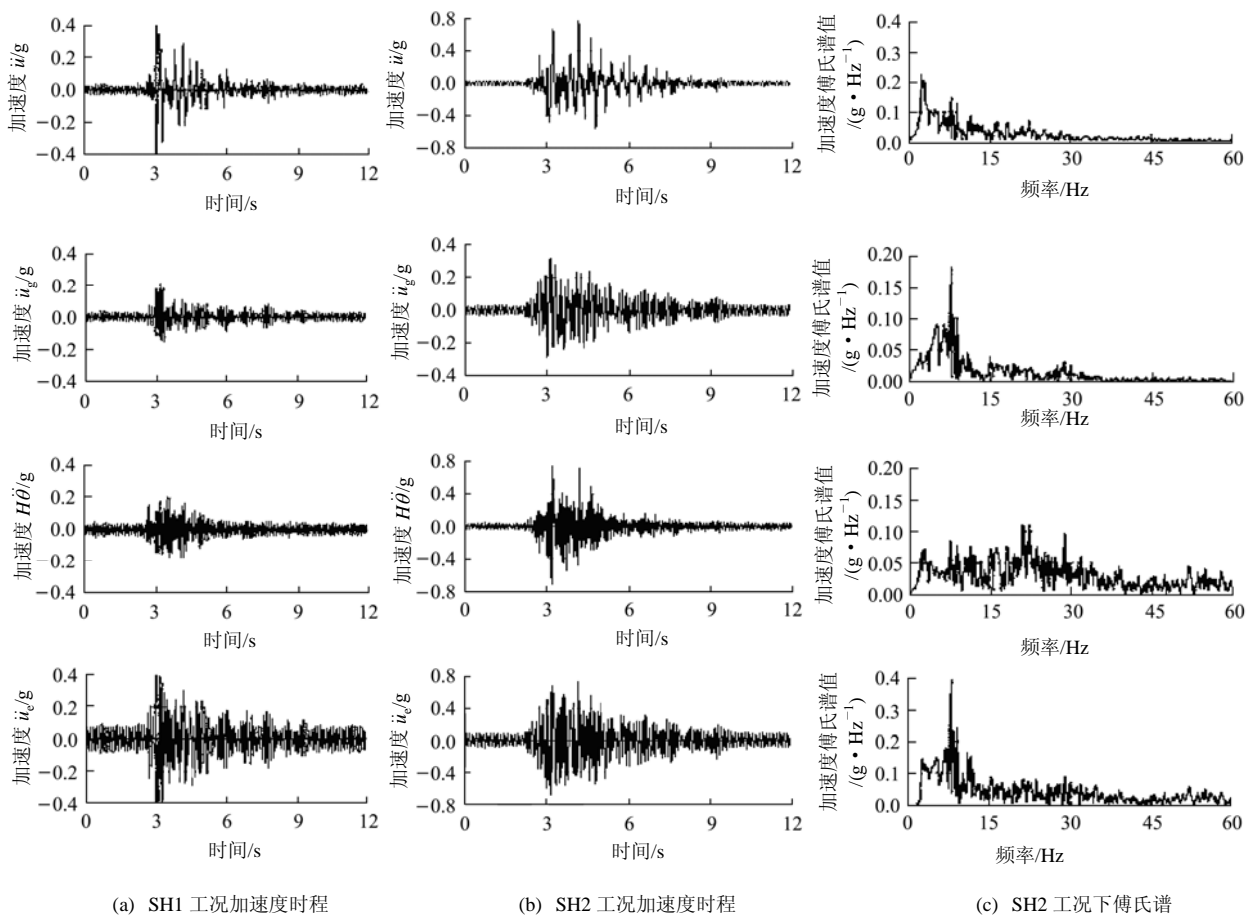


图 6 上部结构顶层加速度时程曲线和各分量的傅氏谱值

Fig.6 Accelerative time-history curves and corresponding Fourier spectra of each component of superstructure

5 结 论

通过支盘桩 - 土 - 上部结构动力相互作用的振动台试验研究, 得到了相互作用体系的地震响应, 主要规律如下:

(1) 从试验现象来看, 当输入相同加速度峰值时, 上部结构在 y 向地震波输入时的摆动幅度明显大于 x 向, 说明双跨框架结构的抗震性能明显好于单跨, 这与汶川地震中很多单跨教学楼倒塌的现象一致。

(2) 随着输入加速度峰值的增加, 体系的频率逐渐降低、阻尼比逐渐增大。这是土体软化、桩基裂缝扩展和上部框架结构的裂缝开展共同作用的结果。

(3) 由振型曲线可见, 基础处存在明显的平动和摆动现象, 但幅度都很小, 且随着振次的增加,

其变化不大, 说明支盘桩的支盘具有较大的平动和转动刚度, 起到了阻抗作用。

(4) 从最大位移反应曲线上看, 该体系上部结构的位移较小, 且随着振次的增加, 结构的最大位移反应也逐渐增大。相同工况时上海人工波激励下结构的最大位移反应比 El Centro 波大, 与试验时看到的现象一致, 说明结构的破坏除与震级有关外, 还与地震波的波形有关。

参考文献(References):

[1] PRASAD S K, TOWHATA L. Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering[J]. Current Science, 2004, 87(10): 1 398 - 1 404.

[2] 吕西林, 陈跃庆, 陈 波, 等. 结构 - 地基动力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, 2000, 20(4): 20 - 29.(LU Xilin, CHEN Yueqing, CHEN Bo, et al. Shaking table testing

- of dynamic soil-structure interaction system[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2000, 20(4): 20 - 29.(in Chinese))
- [3] 楼梦麟, 钟 珞, 袁景凌. 地基土 - 结构相互作用模型试验仿真思路[J]. *结构工程师*, 2001, (增): 80 - 83.(LOU Menglin, ZHONG Luo, YUAN Jingling. Simulation method of interaction between ground soil and structure[J]. *Structural Engineers*, 2001, (Supp.): 80 - 83.(in Chinese))
- [4] 李培振, 陈跃庆, 吕西林, 等. 较硬分层土 - 桩基 - 结构相互作用体系振动台试验[J]. *同济大学学报*, 2006, 34(3): 307 - 313.(LI Peizhen, CHEN Yueqing, LU Xilin, et al. Shaking table testing of hard layered soil-pile-structure interaction system[J]. *Journal of Tongji University*, 2006, 34(3): 307 - 313.(in Chinese))
- [5] 陈跃庆, 吕西林, 黄 炜. 结构 - 地基相互作用振动台试验中土体边界条件的模拟方法[J]. *结构工程师*, 2000, (3): 25 - 30.(CHEN Yueqing, LU Xilin, HUANG Wei. Simulation method of soil boundary condition in shaking table tests of soil-structure interaction[J]. *Structural Engineers*, 2000, (3): 25 - 30.(in Chinese))
- [6] 伍小平, 孙利民, 胡世德, 等. 振动台试验用层状剪切变形土箱的研制[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(7): 781 - 785.(WU Xiaoping, SUN Limin, HU Shide, et al. Development of laminar shear box used in shaking table test[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2002, 30(7): 781 - 785.(in Chinese))
- [7] 鲁 亮, 吕西林. 振动台模型试验中一种消除重力失真效应的动力相似关系研究[J]. *结构工程师*, 2001, (4): 45 - 48.(LU Liang, LU Xilin. Study of dynamic similitude law for shaking table test to reduce gravity distortion effect[J]. *Structural Engineers*, 2001, (4): 45 - 48.(in Chinese))
- [8] 陈跃庆, 吕西林, 李培振, 等. 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 Yueqing, LU Xilin, LI Peizhen, et al. Shaking table testing for layered soil-foundation-structure interaction system[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2001, 21(3): 104 - 113.(in Chinese))
- [9] 杨树标, 李荣华, 刘建平, 等. 振动台试验模型和原型相似关系的理论研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2007, 24(1): 8 - 11.(YANG Shubiao, LI Ronghua, LIU Jianping, et al. Theoretical study on similarity relation of vibroplatform test model and original mold[J]. *Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science)*, 2007, 24(1): 8 - 11.(in Chinese))
- [10] 王东坡. 支盘桩 - 地基 - 结构相互作用体系的振动台试验研究[硕士学位论文][D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.(WANG Dongpo. Shaking table tests of branch piles-soil-structure interaction system[M. S. Thesis][D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2005.(in Chinese))
- [11] 钱德玲. 具有高抗拔性能的支盘桩在工程中的应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(4): 678 - 682.(QIAN Deling. Engineering application study of squeezed branch pile with high antipulling behavior[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(4): 678 - 682.(in Chinese))
- [12] 钱德玲, 雷 超, 王东坡, 等. 相互作用体系中桩基的动力响应[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(6): 709 - 714.(QIAN Deling, LEI Chao, WANG Dongpo, et al. Dynamic response of pile foundation in interaction system[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(6): 709 - 714.(in Chinese))
- [13] 武思宇, 宋二祥, 刘华北, 等. 刚性桩符合地基抗震性能的振动台试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(1): 77 - 82.(WU Siyu, SONG Erxiang, LIU Huabei, et al. Shaking table test study on a seismic behavior of rigid pile composite foundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 77 - 82.(in Chinese))
- [14] 施卫星, 李振刚, 李素贞, 等. 深圳罗湖商务大厦模型振动台对比试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(1): 12 - 16.(SHI Weixing, LI Zhengang, LI Suzhen, et al. Comparative test on shaking table model of Luohu commercial tower[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2008, 36(1): 12 - 16.(in Chinese))