

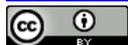
Site Test on Vibration Influence Induced by Large Scale Shaking Table Array

Xun He, Guangzhen Li, Xiaosong Ren, Gang Zong

Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction in College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: hexun215@126.com

Received: Oct. 4th, 2014; revised: Nov. 5th, 2014; accepted: Nov. 14th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In order to evaluate the effect of vibration induced by large scale shaking table array, site test on the ground vibration acceleration was done inside and outside the civil lab. Two conditions, as no table working and 2 tables working with sines input of different frequencies from 1 to 40 Hz and peak acceleration of 0.5 g are included. By vibration attenuation curve from the test result, the damping ratio of different frequency is got and the effectiveness of the large mass stiffness is also verified for vibration reduction.

Keywords

Shaking Table Array, Ground Borne Vibration Test, Attenuation Rate of Ground Vibration, Damping Ratio

大型振动台阵的振动影响实测研究

何 汛, 李广振, 任晓崧, 宗 刚

同济大学, 土木工程学院结构工程与防灾研究所, 上海
Email: hexun215@126.com

收稿日期: 2014年10月4日; 修回日期: 2014年11月5日; 录用日期: 2014年11月14日

摘要

为研究某大型土木实验室内四点振动台阵正常运行所致的振动影响,对实验室内部和外部进行表面加速度的实地测试。测试内容主要分为两个时段,一是设备静止时段,二是设备运行时段,两个振动台满布刚性质量,最大加载质量接近60 T,施加1~40 Hz的多条正弦波激励,最大水平加速度0.5 g。根据室内外各测点的表面加速度振动衰减曲线的实测结果,得到了不同频率下的基础结构阻尼比,验证了大质量刚性基础减振方案的有效性。

关键词

四点振动台阵,脉动测试,地表振动衰减率,阻尼比

1. 测试概况

振动台实验室由多功能振动台实验区域、多功能地锚实验区域和疲劳机实验区域等组成。振动台区域有长、短两条槽道,长槽长70 m,短槽长35 m,基础埋深达6.3 m,基础部分的混凝土总重量达到25,000 t,基础部分的平面图和剖面图见图1。四台振动台可以在槽道内自由移动,组合多种工况,四个台子的最大试件重量分别为70 T、70 T、30 T和30 T,最大加载水平加速度1.5 g [1]。

振动台正常工作时会成为很大的振动源,会对实验室结构和周围环境产生影响,为此需要有效地减轻振动台产生的振动响应,设计时采用大质量块刚性基础减震措施[2] [3]。本文为研究大质量块基础减震效果,对设备静止时室内外脉动进行测试并对比;为了解设备正常运行时室内基础表面加速度情况,选取不同频率正弦波输入振动台,测试不同点加速度响应,分析其振动衰减情况。

2. 测试仪器

采用了如图2所示的强震动测试仪器 Basalt 和图3所示的 EpiSensor 加速度计。强震测试仪 Basalt 具有3+1传感器通道的数字记录器,每个通道均具备独立 Δ - Σ 24位模数转换器,以及Black Fin数字信号处理器,数据采集的动态范围为:200 sps~127 dB,100 sps~130 dB。传感器为三分向EpiSensor力平衡式加速度计,可测三向加速度,传感器的动态范围为155 dB+。

3. 脉动测试

3.1. 时频分析原理

本文所采用的时频分布为二次型时频分布,能较好地描述信号的瞬时功率谱密度,是对信号能量的直观描述。作为Rihaczek分布的实部,Margenau-Hill-Spectrogram时频分布较其他分布类型对能量等效处理的方式不同,其定义的本身即是对离散信号有限能量的直接表达,本文对信号时频能量的分析即是基于Margenau-Hill-Spectrogram时频分布进行的。

Margenau-Hill类型的时频分布主要分为有两种基本形式,即为Margenau-Hill时频分布和Margenau-Hill-Spectrogram时频分布[4] [5],其定义[6] [7]分别如下:

1) Margenau-Hill时频分布

Margenau-Hill时频分布的定义如下:

$$MH_x(t, \nu) = R \{ x(t) X^*(\nu) e^{-j2\pi\nu t} \} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} (x(t+\tau) x^*(t) + x(t) x^*(t-\tau)) e^{-j2\pi\nu\tau} d\tau \quad (1)$$

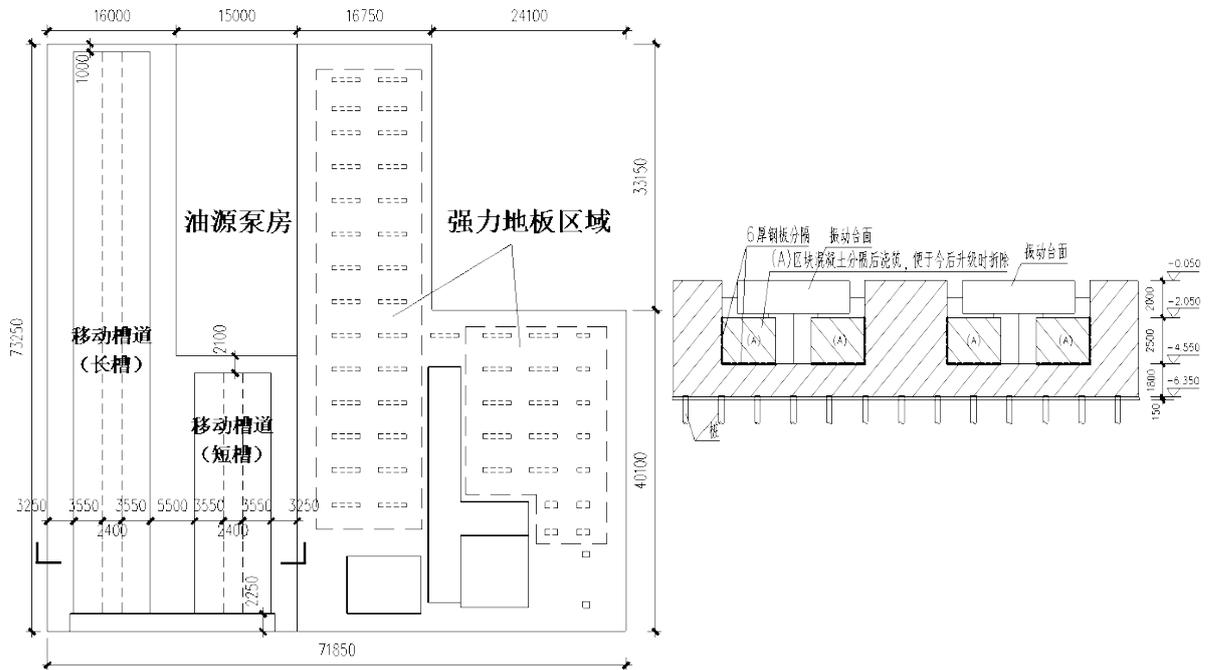


Figure 1. Plan and cross-section of shaking table trenches

图 1. 振动台槽道平面及剖面示意图



Figure 2. EpiSensor acceleration tester

图 2. Basalt 加速度测试仪



Figure 3. EpiSensor acceleration sensor

图 3. EpiSensor 加速度传感器

式中, $MH_x(t, \nu)$ 为时频分布系数, $j = \sqrt{-1}$ 为虚数单位, $R\{\}$ 为取实部操作, $x(t)$ 为目标信号, $X^*(\nu)$ 为信号 $x(t)$ 的傅里叶变换的共轭, ν 为信号频率, t 和 τ 为时间积分变量。

2) Margenau-Hill-Spectrogram 时频分布

Margenau-Hill-Spectrogram 时频分布的定义如下:

$$MHS_x(t, \nu) = R \left\{ \frac{1}{K_{gh}} F_x(t, \nu; g) F_x^*(t, \nu; h) \right\} \quad (2)$$

式中, $MHS_x(t, \nu)$ 为时频分布系数, $j = \sqrt{-1}$ 、 $R\{\}$ 、 $x(t)$ 、 ν 、 t 等变量的意义上。 g 和 h 分别为对信号多加的时间窗和频率窗, $K_{gh} = \int h(u) g^*(u) du$ 为窗函数的积分, 用于调整因信号加窗引起的附加能量项; $F_x(t, \nu; g)$ 是信号加时间窗的Rihaczek分布, $F_x(t, \nu; h)$ 是信号加频率窗的Rihaczek分布。

下文的时频分析均是基于Margenau-Hill-Spectrogram时频分布而进行的。限于篇幅所限, 本文仅给出部分典型样本时频图。

3.2. 数据分析

仪器测得 x 、 y 、 z 三个方向数据, x 、 y 向分别为沿槽道和垂直槽道水平向, z 向为竖向。将测试所得数据整理并统计, 将获得的有效记录进行去基线和子样截取, 获得室内外脉动样本各 9 条, 参数统计结果见表 1。

首先对竖向数据进行分析, 典型时程如图 4、图 5 所示, 脉动样本峰值统计见表 1。从时频图(图 6、图 7)上可以看出, 室外竖向脉动频率成分较为丰富, 相比之下, 室内测试则显得更为安静, 脉动频率也较明显, 这是由于大质量基础滤掉部分频率脉动, 起到一定减振效果。由表 1 可知室外地脉动的峰值要比室内地脉动峰值大, 后者约为前者的 28%, 可以看出大基础质量块的减振效果明显。对室内外竖向脉动做功率谱分析, 如图 8、图 9, 可以较为清晰的看出, 室内脉动一阶频率值约为 1.4 Hz, 室外脉动一阶频率值约为 1.5 Hz。对沿槽道方向、垂直槽道方向的地表面加速度的时频曲线进行分析(图 10、图 11), 可见脉动频率较为单一, 主要集中在 3 Hz 左右。

4. 正弦波加载测试

4.1. 测试工况选择

当地脉动频率与结构自振频率接近时会引起结构的共振, 通过对实验室内大质量块基础表面脉动进行记录和分析, 可推断出大质量基础在水平方向 3 Hz 左右可能会出现局部振型, 在选择正弦波激励时可参照这一点; 大质量混凝土基础尺寸为 73.25 m × 71.85 m × 6.3 m, 推断其一阶自振频率较高, 为了更全面地研究高频激励下振动台基础表面可能出现响应的情况, 还需选用高频激励进行输入, 因此本次测试选用频率范围在 1~40 Hz 的正弦波进行加载。

综合以上原因, 并加入对振动台实验室安全的考虑, 测试选用一组频率范围在 1~40 Hz, 加速度值在 0.3 g~0.5 g 的正弦波, 每种频率正弦波分两个方向各加载一次, 加载方式为两点同时输入相同激励, 加载点位置见图 12, 槽道内两振动台均满载 30 T, 输入正弦波具体参数见表 2。X1-X12 工况沿槽道方向加载, Y1-Y12 工况沿槽道垂向加载。正弦波加载分三组进行, 第一次依次加载工况 X1-X9, 第二次依次加载工况 Y1-Y9, 第三次依次加载工况 X10-X12、Y10-Y12。

4.2. 测点布置

测试分三次进行, 第一次测试沿槽道方向(x 向)布置 Sx1-Sx12 共十二个测点; 第二次测试垂直槽道

Table 1. Statistics of peak value of ground borne vibration along vertical direction (m/s^2)
表 1. z 向脉动样本峰值的统计值(m/s^2)

样本	室内	室外	比值
最大值	4.66×10^{-4}	2.38×10^{-3}	0.20
最小值	3.91×10^{-4}	1.06×10^{-3}	0.37
平均值	4.23×10^{-4}	1.52×10^{-3}	0.28
标准差	1.10×10^{-4}	4.30×10^{-4}	1.39×10^{-1}
变异系数	0.20	0.28	0.39

Table 2. Parameters of sine input wave
表 2. 加载正弦波参数

工况号	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12
加载频率(Hz)	1	3	5	7	9	12	15	18	21	30	35	40
持时(s)	20	20	10	10	10	5	5	5	5	5	5	5
设计幅值(g)	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

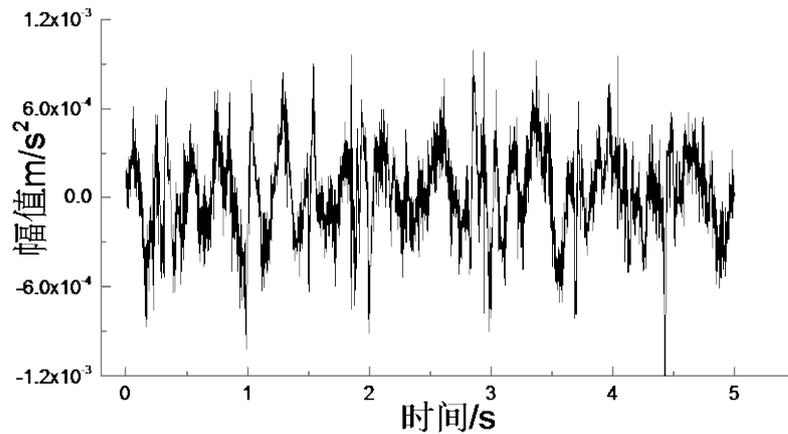


Figure 4. Vertical acceleration time history of outdoor ground borne vibration
图 4. z 向室外脉动时程

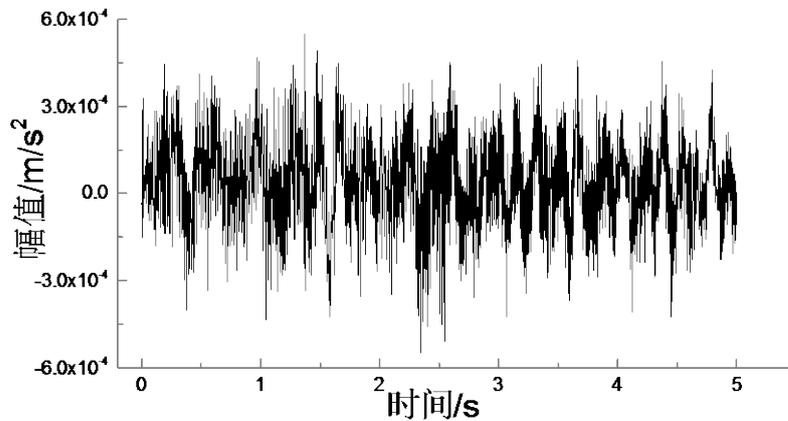


Figure 5. Vertical acceleration time history of indoor ground borne vibration
图 5. z 向室内脉动时程

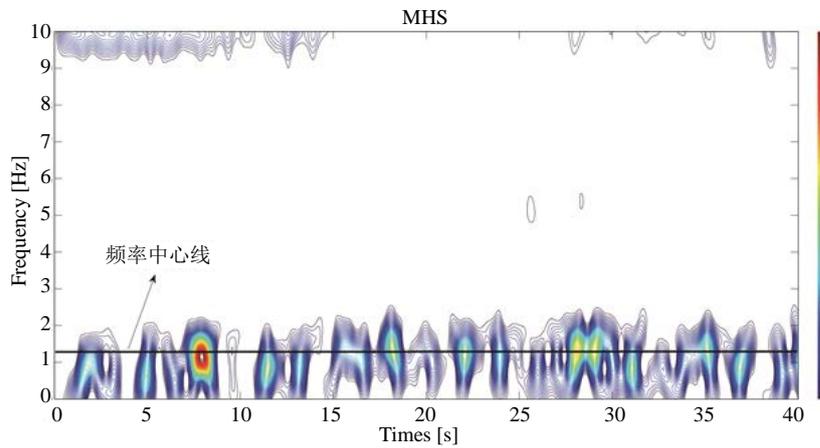


Figure 6. Time-frequency distribution spectrogram of ground borne vibration along vertical direction (indoor)

图 6. z 向脉动时频图(室内)

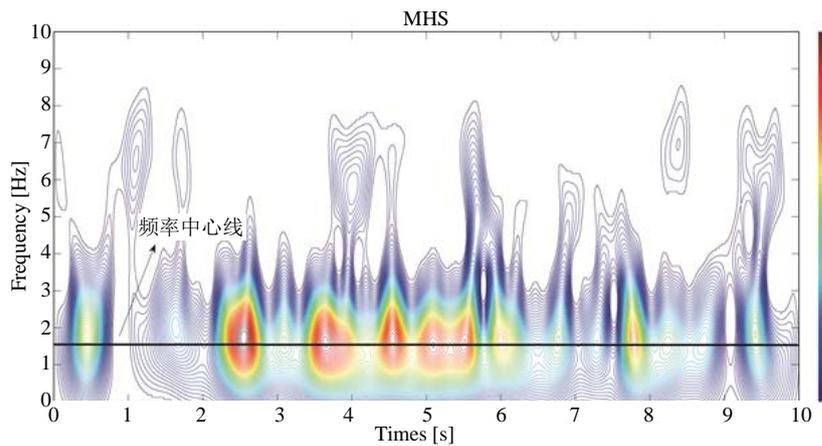


Figure 7. Time-frequency distribution spectrogram of ground borne vibration along vertical direction (outdoor)

图 7. z 向脉动时频图(室外)

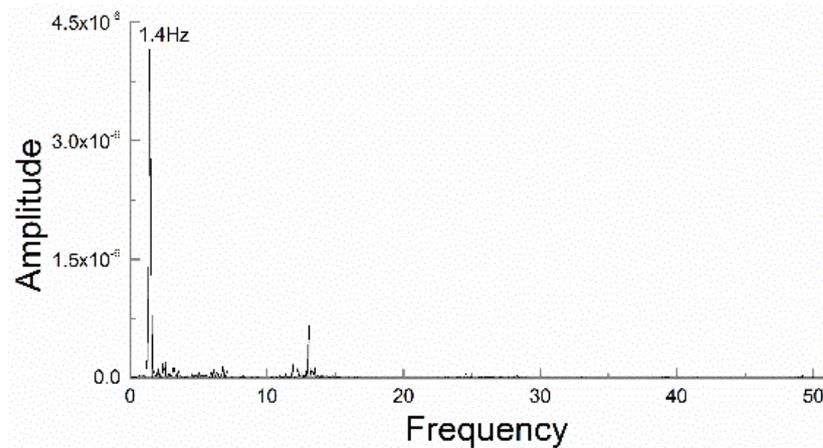


Figure 8. Power spectral density spectrum of ground borne vibration along vertical direction (indoor)

图 8. z 向地脉动功率谱(室内)

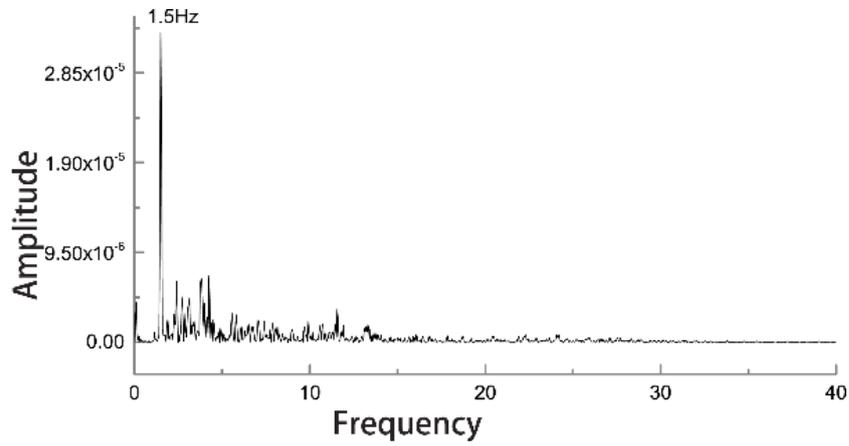


Figure 9. Power spectral density spectrum of ground borne vibration along vertical direction (outdoor)

图 9. z 向地脉动功率谱(室外)

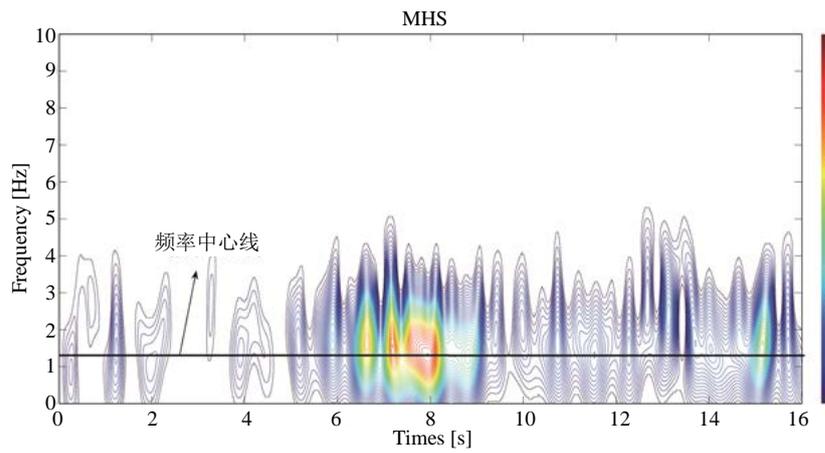


Figure 10. Time-frequency distribution spectrogram of ground borne vibration along longitudinal direction (indoor)

图 10. x 向脉动时频图(室内)

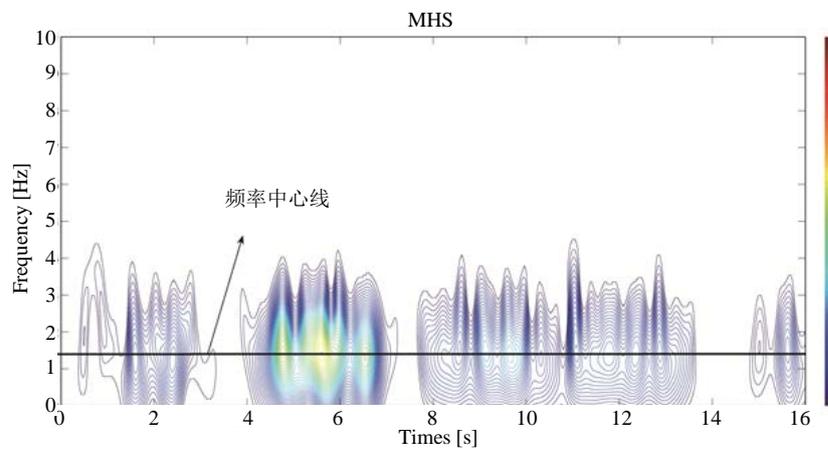


Figure 11. Time-frequency distribution spectrogram of ground borne vibration along transverse direction (indoor)

图 11. y 向脉动时频图(室内)

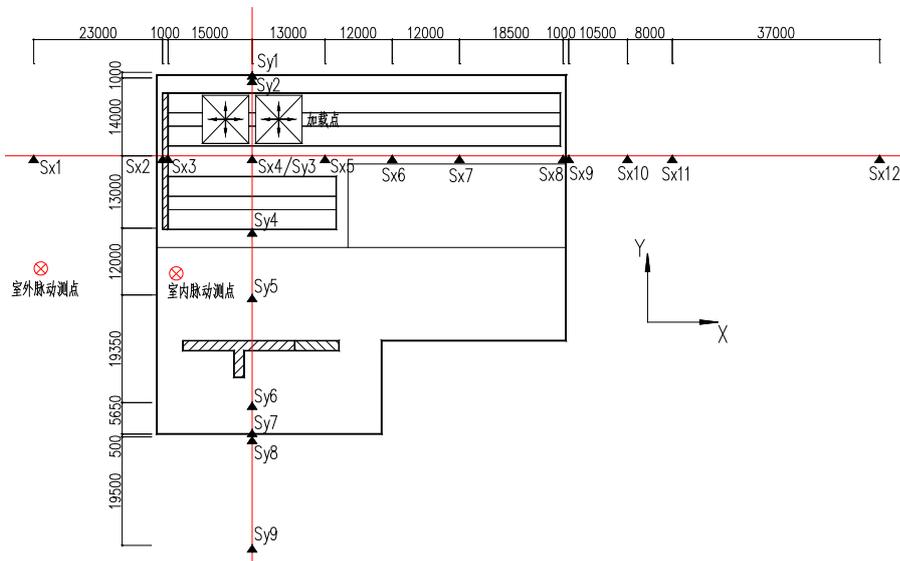


Figure 12. Layout of test points along longitudinal and transverse direction
图 12. 测点布置图

方向(y 向)布置 Sy-Sy9 共九个测点;第三次测试在上一次测试的九个 y 向测点基础上,再加上 Sx3、Sx5、Sx7 三个 x 向测点。测点布置图见图 12,每次单方向加载时,都保证在加载方向布置位于一条直线上的测点,方便研究该方向上加速度的衰减情况。

4.3. 结果分析

测试时仪器记录地面 x、y、z 三个方向加速度,本次研究的加速度峰值衰减率主要以激励方向的地面振动参数为分析对象。限于篇幅,本文仅列出部分测点数据。

图 13 为仪器测得的典型加速度时程,选取的测点为 Sx4,可以看到时程图呈正弦激励作用下的强迫振动典型曲线特点,包括强迫振动段和振动衰减段。

可以根据强迫振动下的振动衰减曲线求解阻尼比。图 14 为有阻尼自由衰减时程曲线,振幅 $Ae^{-\xi\omega t}$ 随时间按指数规律减小,阻尼比越大,衰减越快。实际计算时,近似取 $\omega_d \approx \omega$, $T_d \approx T$,经过 m 个周期 T_m 后,振幅 y_m 与 y_{m+n} 的比值为:

$$\xi = \frac{1}{2\pi m} \ln \left(\frac{y_n}{y_{n+m}} \right) \quad (3)$$

表 3 为混凝土基础表面某点阻尼比随频率变化的情况,数值大小在 0.08~0.18 之间,大于一般混凝土结构阻尼比。这是由于大质量块基础被周围土体包围,带有土的频率,因此阻尼比较大。

图 15、图 16 为 x 向、y 向加速度峰值衰减率曲线,其中衰减率 = 实测加速度峰值/输入正弦波加速度幅值。x 向加载时,激励从离加载振动台最近的 Sx4 测点开始,向两边传递,到达基础边缘时,由于此处是混凝土与地基土交界处,变形协调原因使局部产生挤压,加速度值会突然有一个较大的增幅,然后在土上继续传播,衰减到脉动水平。其中测点 Sx12 离基础边界最远,距离为 56 m,加载不同频率正弦波时该点衰减率平均值为 1.31%。同理,y 向加载时,由于加载点与基础上边缘距离很近,仅 8 m,正弦波传递到交界处加速度会有更大增幅,在加载 35 Hz(y 向)正弦波时,此交界点 Sy2 出现本次测试最大加速度值 0.8 g,大于输入正弦波加速度幅值 0.5 g。激励在向基础下边缘传播的过程中逐渐减小,最远测点设在周围土上,该点距基础下边缘 20 m,衰减率平均值为 1.35%。

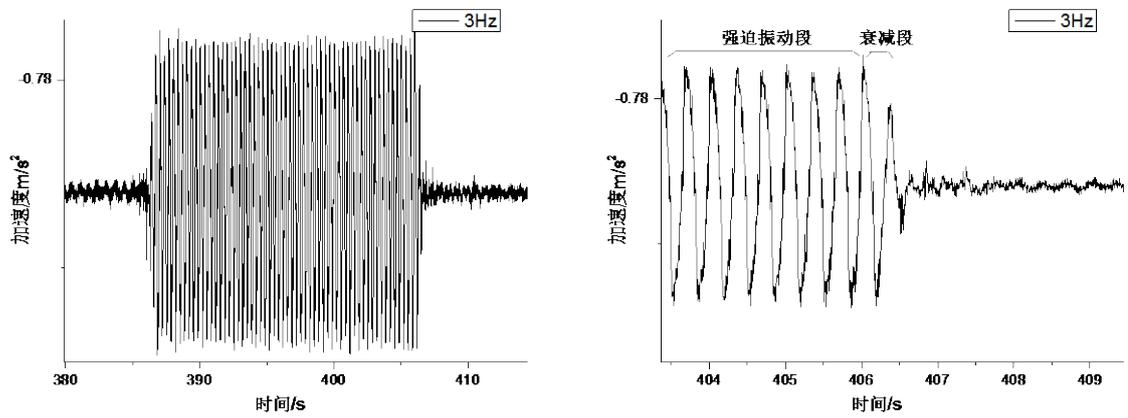


Figure 13. The time history of measured acceleration
图 13. 实测加速度时程

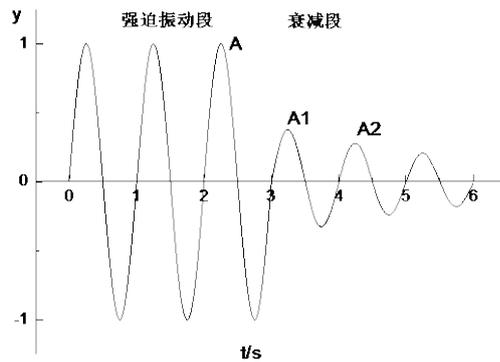


Figure 14. Attenuation curve of free vibration
图 14. 自由振动衰减时程曲线

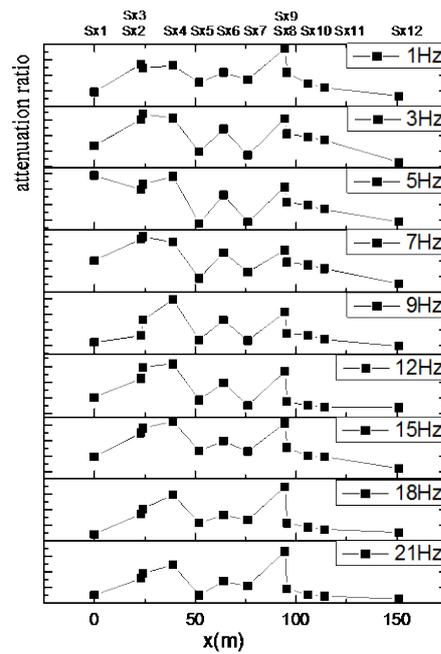


Figure 15. The longitudinal acceleration attenuation ratio
图 15. x 向地表振动加速度衰减率

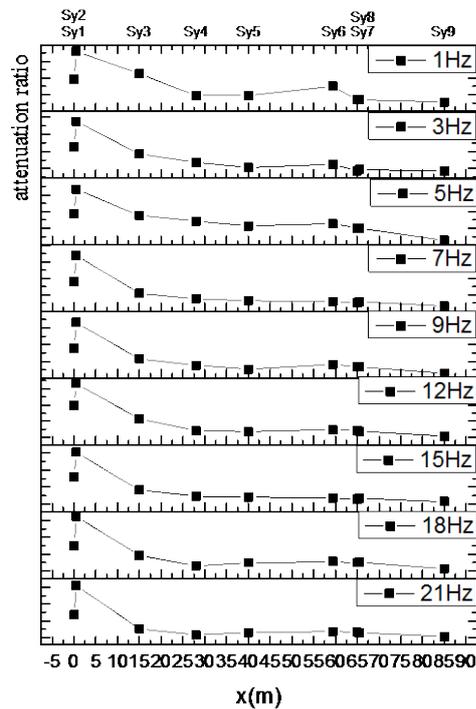


Figure 16. The transverse acceleration attenuation ratio
图 16. y 向地表振动加速度衰减率

Table 3. Damping ratio under different frequency excitation
表 3. 不同频率激励下的阻尼比

	Sx8 测点, x 向加载阻尼比								
频率(Hz)	1	3	5	7	9	12	15	18	21
阻尼比	0.08	0.14	0.08	0.10	0.10	0.10	0.11	0.13	0.18

5. 小结

振动台实验室基础属于大质量刚性实体式基础, 其输入激励形式模拟地震输入, 具有宽频特点, 计算方法与一般动力基础[8]不同。本次测试在以往测试成果上进行进一步研究, 基于脉动测试的基础上, 增加多组正弦激励加载下的测试, 研究不同频率激励下结构的响应; 根据实测结果, 得出地面加速度响应衰减曲线, 验证了该基础对 1~40 Hz 频段的激励减振有效; 同时通过对强迫振动衰减段做进一步分析, 研究其阻尼特性, 计算得到基础的结构阻尼比大小在 0.08~0.18 之间, 此结果可用于进一步数值分析。

参考文献 (References)

- [1] 任晓崧 (2013) 对于大型土木实验室建设的认识—以同济大学新建多功能振动试验中心项目为例. *实验室研究与探索*, **23**, 178-181.
- [2] 陶余飞 (2012) 非固定多点激励条件下的大型动力基础振动影响分析. 硕士学位论文, 同济大学, 上海.
- [3] Ren, X.S., Tao, Y.F. and Zhou, B. (2013) Study on vibration induced by the shaking tables array in large scale civil lab. *Proceedings of the 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-13)*, 11-13 September 2013, Sapporo, 8 p.
- [4] 葛哲学, 陈仲生 (2006) MATLAB 时频分析技术及其应用. 人民邮电出版社, 北京, 2-5, 66-82.
- [5] Boashash, B. (2003) Time frequency signal analysis and processing. Library of Congress Cataloging in Publication Data.

- [6] Papandreou-Suppappola, A. (2003) Applications in time-frequency signal processing. CRC Press LLC, Boca Raton.
- [7] Auger, F., Flandrin, P., Goncalves, P. and Lemoine, O. (1995) Time-frequency toolbox.
- [8] (1983) 动力机器基础设计手册. 建筑工业出版社, 北京.