

# 竖向地震作用下钢-钢筋混凝土塔式 组合结构抗震性能研究

白国良 郝 彬

(西安建筑科技大学, 陕西西安 710000)

**摘要:** 为研究钢-钢筋混凝土塔式太阳能发电组合结构在竖向地震作用下的抗震性能, 对一实际工程的 1/18 缩尺模型结构进行模拟地震振动台试验。通过观察试验现象和分析试验结果, 得出结论为: 模型结构竖向前三阶频率分别为 18.55Hz、20.12Hz 和 22.14Hz; 结构质心处加速度反应最大, 紫铜结构的加速度反应小于混凝土筒体的加速度反应; 结构质心处位移反应最大, 最大值为 4.79mm; 强震作用下竖向地震影响对结构起控制作用, 同等水准地震作用下水平向地震加速度反应最大值出现时间晚于竖向地震加速度反应最大值; 结构塔顶竖向伸缩效应不明显。

**关键词:** 塔式结构; 组合结构; 振动台试验; 竖向地震; 抗震性能

**中图分类号:** TU398 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)03-0012-08

## Seismic performance study on steel-reinforced concrete composite tower under vertical earthquake excitation

Bai Guoliang Hao Bin

(Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** In order to study the seismic performances of steel-reinforced concrete composite towers under the action of vertical earthquake, the 1/18 scaled model of an actual project was tested on the shaking table. By observing the phenomenon and analyzing the results, it is concluded that the first three vertical frequencies are 18.55Hz, 20.12Hz and 22.14Hz, respectively. The acceleration responses at the mass center of the structure are maximum, and the acceleration responses of the copper structure are smaller than that of the concrete. The maximum displacement at the center of mass of the structure is 4.79mm. The structure is controlled by the vertical strong earthquake. For vertical and lateral earthquakes with the same level, the maximum horizontal acceleration always occurs later than the vertical acceleration. The vertical telescopic effect on the top of the tower is not obvious.

**Keywords:** tower; tower structure; composite structure; shaking table test; vertical earthquake; seismic performance

**E-mail:** lovers2008@163.com

## 引 言

据记载钱培风<sup>[1]</sup>于 1957 年首先提出地面竖向运动引起的纵波应力是造成砖烟囱破坏的主要原因。在 1978 年, 他列举大量实际震害调查结果, 认

为传统的计算方法不能很好解释砖烟囱的破坏现象, 并提出必须考虑地面竖向运动引起的纵波应力的新观点。理论验算结果表明, 地震时砖烟囱的纵波应力数值很大, 不容忽视; 1958 年王光远<sup>[2]</sup>对地震中作用下高耸结构的纵向振动进行研究, 将高耸结构简化为变截面悬臂杆, 计算结构表明纵向振动使得上部压应力大大降低甚至会出现拉应力, 急速增大下部压应力, 降低自重所产生的压应力, 认为计算高耸结构时, 除了要考虑水平地震作用, 还应

基金项目: 国家自然科学基金(51478381)

作者简介: 白国良, 博士, 教授

收稿日期: 2018-01-09

该考虑竖向地震作用的影响；任耀辉<sup>[3]</sup>用 ANSYS 建立某高耸烟囱的有限元模型研究烟囱结构在竖向地震作用下的静动力响应特性，并研究阻尼比、二阶效应及地震波强弱对烟囱在三维地震作用下的弹塑性分析的影响，分析表明地震作用下，水平地震作用对烟囱的动力响应特性起主要作用，但竖向地震作用对烟囱抗震性能有明显影响；沈俊杰等<sup>[4]</sup>研究了高耸结构的竖向地震随机响应分析，提出了可用于计算结构竖向地震应力的绝对加速度均方差反应谱，对位于强震区的结构，竖向地震可能起着决定性的破坏作用；孙波<sup>[5]</sup>利用 ANASYS 对高耸烟囱建模分析，对比烟囱模型振动台试验结果，发现竖向地震动对高耸烟囱的破坏起着决定性作用，当前的竖向地震动的计算理论尚不完善。钢-钢筋混凝土塔是一种新能源发电组合结构，由与烟囱类似的混凝土塔身和钢结构塔顶组成<sup>[6-10]</sup>。为研究这种新型结构在复杂的地震动过程中，竖向地震对结构的影响是否起决定性作用，在试验室开展了钢-钢筋混凝土塔式组合结构模型的模拟地震振动台试验工作。

### 1 试验概况

#### 1.1 模型设计

模型拟采用铅粉微粒混凝土模拟原型混凝土，以解决配重不足问题。用铅粉代替原结构混凝土粗骨料，并添加外加剂保证混凝土结构质量均匀；用镀锌铁丝模拟原结构钢筋；原结构顶部钢结构部分钢材用紫铜替代。混凝土塔筒内部电梯井对结构整体刚度贡献可忽略不计，且由于混凝土楼梯间方案会影响施工进度，在国内混凝土楼梯间方案一般不会采用，故模型中不予考虑。各钢结构平台以紫铜管代替，电气设备均以铁块替代；上部钢结构以工字型、槽型和 L 形紫铜等效简化焊接布置，如图 1，图 2 所示。

根据实验室条件和现实可用材料，控制模型的几何相似比为 1/18，加速度相似比为 2.25/1，材料等效应力和弹性模量相似比为 1/3，具体相似关系见表 1。

模型中混凝土筒体采用铅粉混凝土材料实现结构和设备及其他荷载配重，混凝土筒中钢结构平台采用扁钢管焊接在混凝土中预埋件上交叉布置；上部钢结构桁架采用紫铜材料代替钢材满足结构和平台配重，设备及其他荷载采用厚钢板均匀分布在各层平台上，具体见表 2。

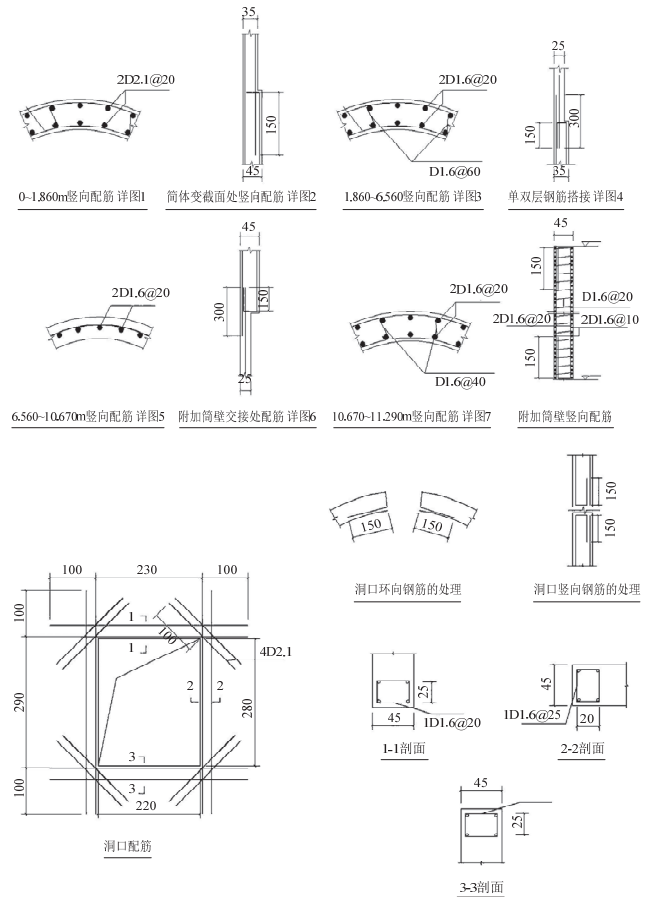


图 1 混凝土筒体结构配筋

Fig.1 Reinforcement of concrete cylinder

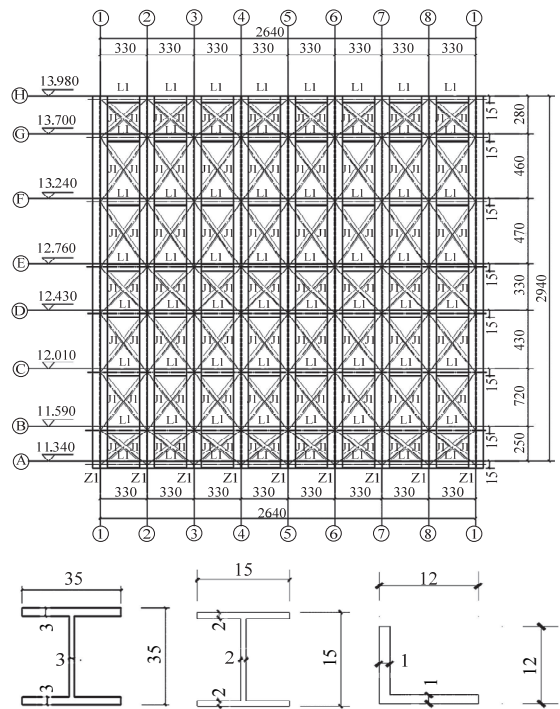


图 2 紫铜结构柱、梁和斜撑截面

Fig.2 Columns, beams and diagonal braces sections of copper

表 1 模型相似关系

Table 1 Similitude ratio of model

物理量	相似比
应力 $S_\sigma$	1/3
弹性模量 $S_E$	1/3
应变 $S_\epsilon$	1
密度 $S_\rho$	2.7
质量 $S_m$	1/2187
长度 $S_l$	1/18
周期 $S_T$	0.16
频率 $S_f$	6.37
加速度 $S_a$	2.25
重力加速度 $S_g$	1

表 2 结构质量分布

Table 2 Mass distribution

名称	原结构质量 (t)	模型质量 (t)
钢结构/紫铜结构	结构和平台	650
	设备及其他	795
	结构	19228
混凝土结构	平台	250
	设备及其他	1774
总计	22697	7.56

模型试验中通过材性试验得到各材料性能参数见表 3。

表 3 材料力学性能

Table 3 Mechanical properties of materials

组别	轴心抗压强度(MPa)	极限抗拉强度(MPa)	弹性模量(MPa)
混凝土	15.2	—	16100
紫铜	—	231	99000

试验中模型结构实际重约 15t, 高 14.4m, 包含混凝土底座 2.7m × 2.7m × 0.4m, 混凝土筒体 11.1m, 顶部紫铜结构高 3m, 如图 3 所示。



图 3 试验模型整体结构

Fig.3 The overall structure of the test model

### 1.2 试验设备及测点布置

试验用设备为西安建筑科技大学结构与抗震试验室 MTS 4.1m × 4.1m 三维六自由度地震模拟振动台试验系统, 具体参数见表 4。

表 4 振动台参数

Table 4 Vibration table parameters

方向	最大加速度/台面负载	最大速度	最大位移
水平(x)	1.2g~0.8g/15t~30t	1000m/s	±100mm
水平(y)	0.8g~0.6g/15t~25t	600m/s	±50mm
竖向(z)	0.7g~0.5g/15t~25t	600m/s	±50mm

试验设计在结构底部、顶部、壁厚变化处及各构件连接处分别安置位移拾振器 2 个和加速度传感器 11 个。具体测点布置方案如图 4 所示。

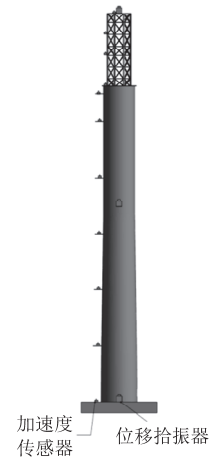


图 4 测点布置

Fig.4 Arrangement of measuring points

### 1.3 试验选波及工况设置

实际工程为 II 类场地条件, 试验选择两条天然波为 El-Centro 波和 Taft 波, 一条人工拟合地震波。利用 SeismoSignal 软件进行反应谱分析, 具体结果如图 5 所示。

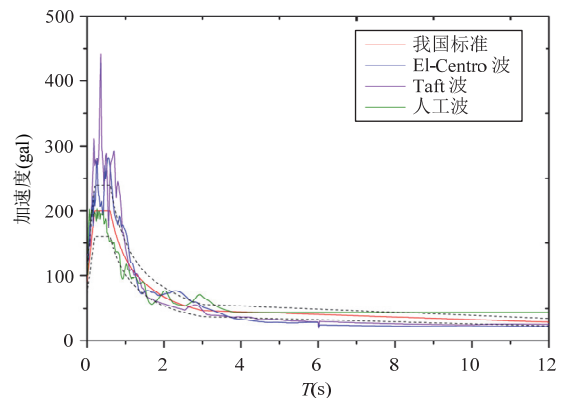


图 5 反应谱曲线

Fig.5 Response spectrum curve

试验中设计的地震波激励方向为竖向 Z 方向输入。试验地震波工况输入顺序按加速度设计值由小到大排列，具体试验工况见表 5。

表 5 试验工况

Table 5 Test conditions

工序	调整后的地震烈度	模型最大加速度 (g)		台面激励
		Z 方向		
1	6 度设防	0.030		白噪声
2		0.113		El-Centro 波
3		0.113		Taft 波
4		0.113		人工波
5	8 度多遇	0.030		白噪声
6		0.158		El-Centro 波
7		0.158		Taft 波
8		0.158		人工波
9	7 度设防	0.030		白噪声
10		0.225		El-Centro 波
11		0.225		Taft 波
12		0.225		人工波
13	8 度罕遇	0.030		白噪声
14		0.900		El-Centro 波
15		0.900		Taft 波
16		0.900		人工波
17		0.030		白噪声

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验现象

按加速度相似准数调整后的 6 度设防地震作用下，模型结构混凝土筒壁表面未发现明显裂缝，紫铜结构未出现变形和可见的局部屈曲，结构处于弹性阶段。

调整后的 8 度多遇地震作用下，模型结构混凝土筒壁质心处附近表面出现多条水平向细小裂纹，紫铜结构未出现变形和可见的局部屈曲。模型混凝土筒体结构开始进入塑性阶段，紫铜结构仍处于弹性阶段。

调整后的 7 度设防地震作用下，模型结构混凝土筒壁 4m 和 7m 处各出现一条较长水平向裂缝，紫铜结构未出现变形和可见的局部屈曲。模型混凝土筒体结构已经进入塑性阶段，紫铜结构依然处于弹性阶段。

调整后的 8 度罕遇地震作用下，模型结构混凝土

土筒壁表面出现较多新裂缝，原有裂缝继续发展，S 面 4m 处裂缝环向贯通，7m 处出现一条环向贯通裂缝，紫铜结构未出现变形和可见的局部屈曲。模型混凝土筒体结构发生破坏，紫铜结构始终处于弹性状态，见图 6。

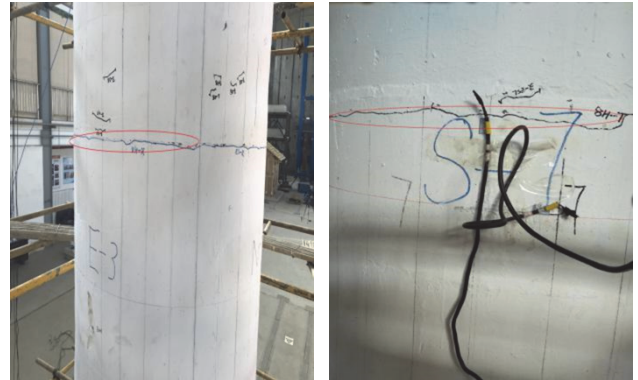


图 6 结构裂缝

Fig.6 Structural cracks

### 2.2 动力特性

在每个水准地震工况开始前和结束后，对模型结构进行白噪声扫描。通过加速度传感器收集的数据，计算分析得出模型结构在不同水准地震作用下的自振频率，如表 6、图 7、图 8 所示。

表 6 竖向前三阶各水准地震作用下频率

Table 6 The first three order frequencies of vertical direction

调整后竖向地震		一阶	二阶	三阶
震前	频率(Hz)	18.55	20.12	22.14
6 度设防	频率(Hz)	18.53	19.97	22.09
8 度多遇	频率(Hz)	18.19	19.14	20.31
7 度设防	频率(Hz)	17.14	18.46	19.31
8 度罕遇	频率(Hz)	16.04	17.38	18.33

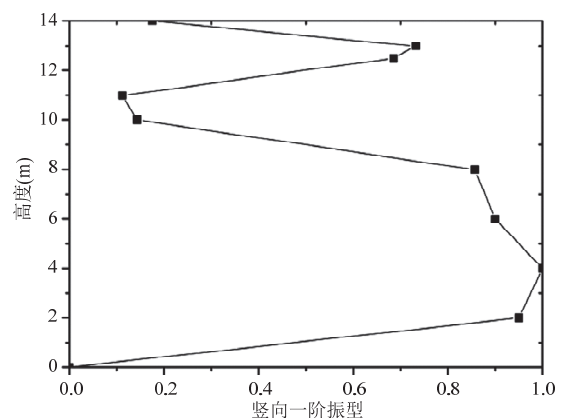


图 7 竖向一阶振型

Fig.7 The first mode of vertical direction

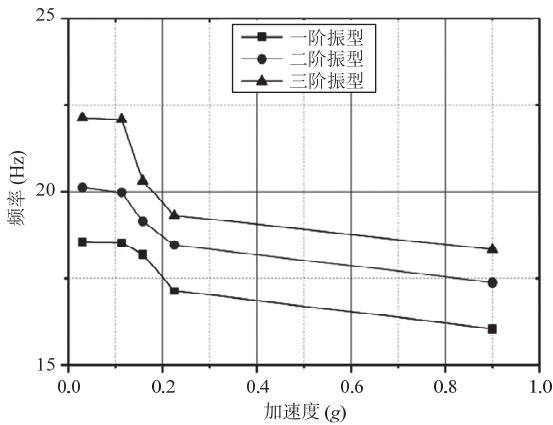


图8 竖向地震作用下前三阶频率变化

Fig.8 The first three order frequencies of regular on vertical direction

上述试验结果可以看出，第一次白噪声扫描模型结构的竖向前三阶频率分别为 18.55Hz、20.12Hz 和 22.14Hz。结构在经历调整后的 8 度罕遇地震后，竖向前三阶频率分别降为 16.04Hz、17.38Hz 和 18.33Hz，相比震前频率下降了 13.5%、13.6% 和 17.2%。结构的频率随台面地震波激励值的增大而降低。

### 2.3 加速度反应

试验结束后，分析通过 LMS 数据采集仪收集的加速度传感器反应信号，得到不同水准地震作用下模型结构各测点 Z 方向加速度时程反应的最大加速度，并计算出对应位置的加速度放大系数  $\beta$ 。具体结果如图 9~图 11 所示。

通过对钢-钢筋混凝土塔式组合结构上述试验结果分析，相同水准地震条件下，模型结构质心处加速度反应最大。紫铜结构和混凝土筒体结构呈现出

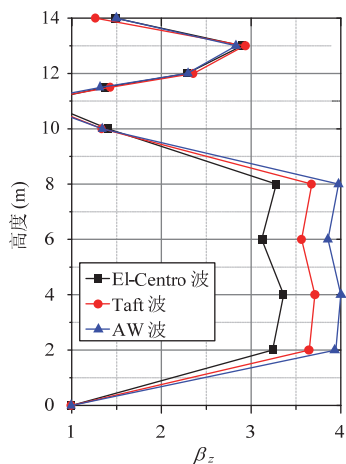


图9 调整后的 6 度设防地震加速度放大系数

Fig.9 Amplified factors of acceleration under 6 degree fortification after adjustment

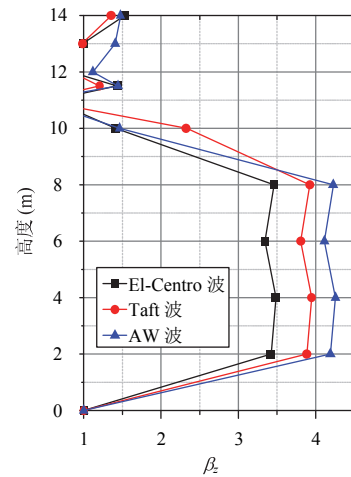


图10 调整后的 7 度设防地震加速度放大系数

Fig.10 Amplified factors of acceleration under 7 degree fortification after adjustment

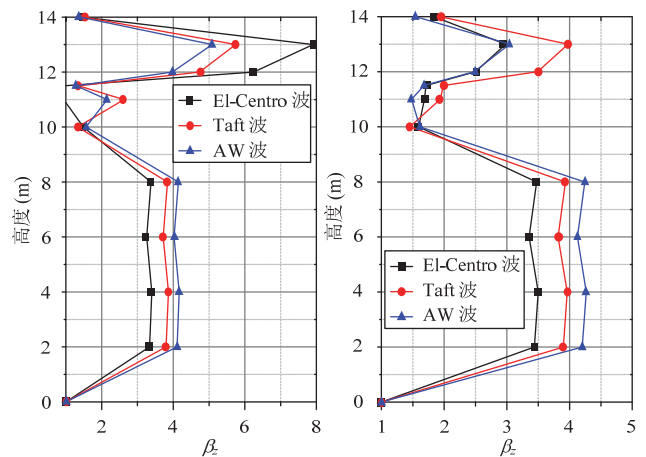


图11 调整后的 8 度多遇和罕遇地震加速度放大系数

Fig.11 Amplified factors of acceleration under 8 degree frequent and rare after adjustment

相同的规律，即随着高度的升高加速度反应逐渐增大再减小，以结构 2/3 高处处为界限；紫铜结构的加速度反应小于混凝土筒体的加速度反应，说明紫铜结构平台上的设备荷载对紫铜结构的竖向地震抗震有一定的帮助；随着台面激励加速度输入值的逐渐升高，加速度放大系数有所降低。模型结构紫铜和混凝土连接处的加速度反应基本一致，加速度放大系数变化趋缓，说明连接处刚度较大，节点性能良好。

### 2.4 位移反应

通过位移拾振器收集的时程位移数据和对加速度传感器测得的加速度时程反应进行二次积分，可以得出模型结构在不同水准地震工况下的各高度相对于底座的最大位移反应。具体结果如图 12~图 14 所示。

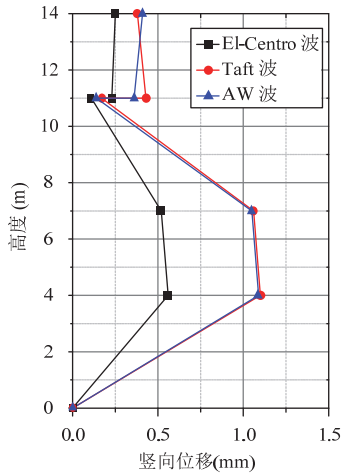


图 12 调整后的 6 度设防地震最大位移反应  
Fig.12 The maximal displacements of 6 degree fortification after adjustment

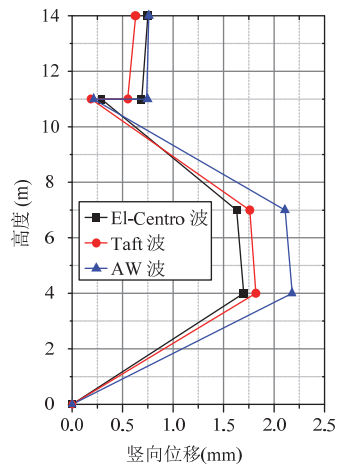


图 13 调整后的 7 度设防地震最大位移反应  
Fig.13 The maximal displacements of 7 degree fortification after adjustment

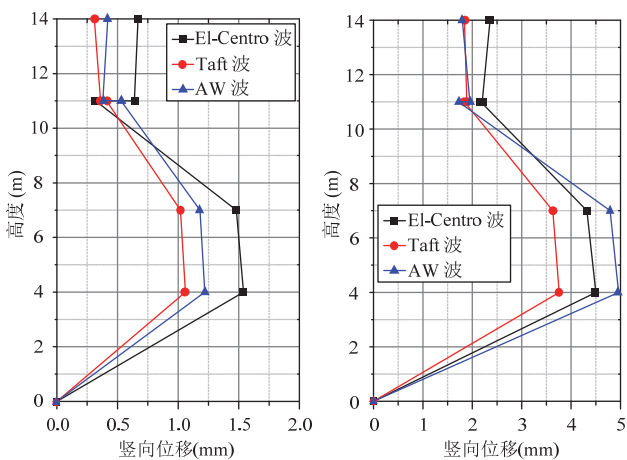


图 14 调整后的 8 度多遇和罕遇地震最大位移反应  
Fig.14 The maximal displacements of 8 degree frequent and rare after adjustment

分析上述试验结果可得，模型结构质心处位移反应最大，最大值为 4.79mm；模型结构位移反应最大值在紫铜和混凝土连接处表现基本一致，说明连接处连接紧密，性能良好；调整后的 8 度罕遇地震作用工况结束后，连接处混凝土筒体开裂，连接处位移反应差值变大，连接作用相对有所降低；结构塔顶竖向位移反应较小，说明竖向的伸缩效应不明显。

### 2.5 轴力分布

根据模型结构的竖向加速度反应和结构质量分布，计算得到模型结构在不同水准地震作用下的轴力分布。具体结果如表 7 和图 15 所示。

表 7 调整后的各水准地震作用下轴力最大值  
Table 7 The maximum axial forces after adjustment (kN)

位置	6 度设防	7 度设防	8 度多遇	8 度罕遇
14m	0.2	0.4	0.2	1.1
13m	1.2	0.9	2.3	6.2
12.5m	1.4	1.1	2.8	7.8
11m	0.5	0.9	1.5	7.5
10m	3.0	7.5	3.6	15.9
8m	12.9	26.8	15.1	62.2
6m	17.1	35.6	20.0	82.6
4m	24.3	50.4	28.3	116.9
2m	30.3	62.8	35.2	145.6
底部	10.7	21.3	12.2	49.5

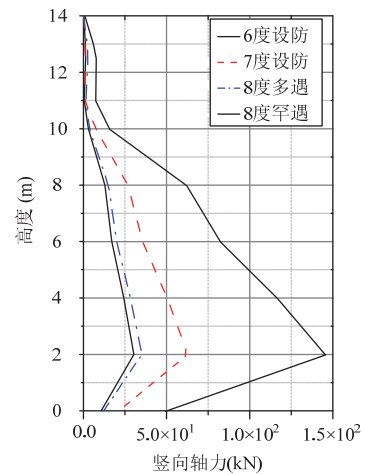


图 15 调整后的各水准地震作用下轴力分布包络图  
Fig.15 The axial forces distribution after adjustment

从上述试验结果分析可得：钢-钢筋混凝土塔式组合结构质心下部所受轴力较大，最大值为 145.6kN；轴力值在塔顶结构和混凝土结构连接处发生较大突变，塔顶紫铜结构比下部混凝土结构轴力

最大值小 18 倍左右;结构塔顶的设备荷载对结构的竖向地震反应影响不大。

### 3 竖向地震和水平地震对比分析

为探究钢-钢筋混凝土塔式组合结构在相同地震水准作用下,对结构起控制作用的究竟是水平地震作用还是竖向地震作用。在钢-钢筋混凝土塔式组合结构模拟地震振动台试验中,分别设置了调整后的 6 度设防、7 度设防、8 度多遇和 8 度罕遇四个工况(输入地震波为人工波)来对比研究地震控制系数  $\alpha$ (水平向加速度最大值和竖向加速度最大值之比)的大小和竖向地震与水平向加速度反应最大值出现时间的先后。具体结果如表 8、图 16、图 17 所示。

从上述结果可以看出,在调整后的 6 度设防、8 度多遇和 7 度设防地震作用下,水平向地震加速度反应大于竖向地震加速度反应,地震控制系数  $\alpha$  分别为 1.739、1.897 和 1.602。在调整后的 8 度罕遇地震作用下,竖向地震加速度反应大于水平向地震加速度反应,地震控制系数  $\alpha$  为 0.880。此结果表明,调整后的 8 度罕遇地震作用下竖向地震影响

表 8 调整后的竖向和水平向地震对比

Table 8 Seismic contrast under vertical and horizontal earthquakes after adjustment

方向	指标	6 度设防	7 度设防	8 度多遇	8 度罕遇
X	出现时间(s)	9.46	11.42	9.02	12.09
	加速度最大值(g)	1.120	2.065	1.654	2.583
Z	出现时间(s)	2.02	9.16	8.75	4.16
	加速度最大值(g)	0.644	1.289	0.872	2.935
$\alpha(a_x/a_z)$		1.739	1.602	1.897	0.880

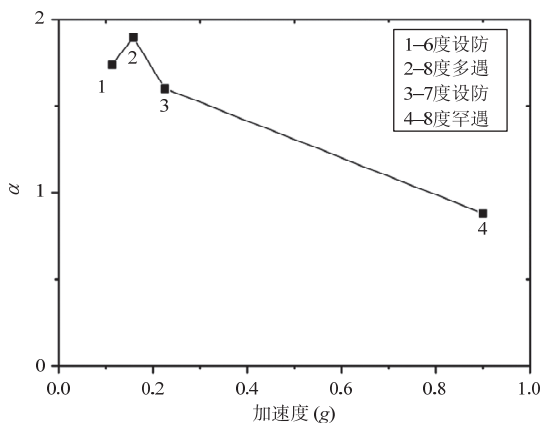


图 16 地震控制系数

Fig.16 Seismic control factors

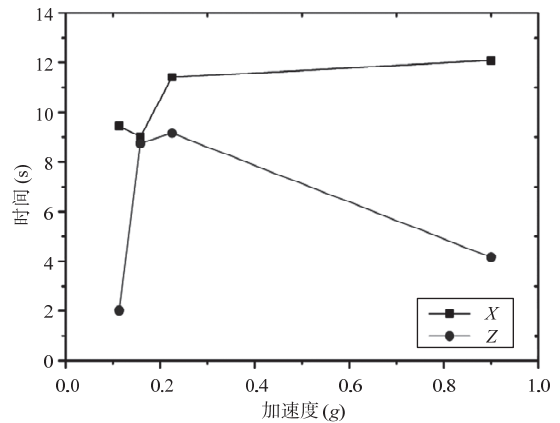


图 17 加速度反应最大值出现时间

Fig.17 Time of the maximum acceleration occurs

开始对结构起控制作用;竖向地震加速度反应最大值出现时间总是先于水平向地震。因此竖向地震作用对结构的影响不容忽视,尤其是在调整后的 8 度罕遇地震下,竖向地震对钢-钢筋混凝土塔式组合结构起绝对的控制作用。

### 4 结论

通过 1/18 的钢-钢筋混凝土塔式组合模型结构模拟竖向地震振动台试验研究,可以得出如下结论:

(1) 模型结构竖向前三阶频率分别为 18.55Hz、20.12Hz 和 22.14Hz。8 度罕遇地震作用下,下降为 16.04Hz、17.38 和 18.33Hz。

(2) 在竖向地震作用下,加速度时程反应呈现出相同的规律,即随着高度的升高加速度反应逐渐增大再减小,以结构 2/3 高程处为界限。结构质心处加速度反应最大;紫铜结构的加速度反应小于混凝土结构的加速度反应。

(3) 随着台面激励加速度输入值的逐渐升高,加速度放大系数逐渐降低;紫铜结构和混凝土结构连接处的加速度反应大小基本一致,加速度放大系数变化趋缓,说明连接处刚度较大,节点性能良好。

(4) 结构质心处位移反应和轴力最大,最大位移为 61mm,最大轴力为 145.6kN。

(5) 竖向地震作用对结构的影响不容忽视。调整后的 8 度罕遇地震作用下竖向地震影响对结构起绝对控制作用。

### 参考文献

[1] 钱培风,苏文藻,张悉德,等. 烟囱在地震作用下的纵波应力[J]. 力学学报,1978(2): 125-134

[2] 王光远. 在地震作用下高耸结构的纵向振动[J]. 土木

- 工程学报, 1958, 5(2): 140-149
- [3] 任耀辉. 烟囱竖向地震作用下抗震性能分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008 (Ren Yaohui. The seismic behavior of chimney under vertical earthquake action [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008 (in Chinese))
- [4] 沈俊杰, 张宪宏. 高耸结构的竖向地震随机响应分析[J]. 土木工程学报, 1993, 26(6): 56-63 (Shen Junjie, Zhang Xianhong. Response analysis of a high building under vertical stochastic ground motion [J]. China Civil Engineering Journal, 1993, 26(6): 56-63 (in Chinese))
- [5] 孙波. 烟囱在地震力作用下的动应力反应分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2002 (Sun Bo. The seismic dynamic response of chimney [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002 (in Chinese))
- [6] 王雪亮, 瞿伟廉, 刘晖. 广州新电视塔的动力特性有限元分析[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(1): 142-144, 156 (Wang Xueliang, Qu Weilian, Liu Hui. Finite element analysis on dynamic characteristics of Super High Tower in Guangzhou [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(1): 142-144, 156 (in Chinese))
- [7] 陈乐育. 高耸结构在竖向地震作用下的动力反应分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007 (Chen Leyu. Dynamic response analysis of high-rise structures under the vertical seismic action [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007 (in Chinese))
- [8] Chung Y L, Nagae T, Hitaka T, et al. Seismic resistance capacity of high-rise buildings subjected to long-period ground motions: E-defense shaking table test [J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(6): 637-644
- [9] Ghannoum W, Saouma V, Haussmann G, et al. Experimental investigations of loading rate effects in reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(8): 1032-1041
- [10] Miyamura T, Yamashita T, Akiba H, et al. Dynamic FE simulation of four-story steel frame modeled by solid elements and its validation using results of full-scale shake-table test [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(9): 1449-1469

白国良 (1955— ), 男, 博士, 教授。主要从事钢筋混凝土结构、钢与混凝土组合结构、高层与超高层建筑及复杂工业建筑混合结构体系等方面的研究。

郝彬 (1987— ), 男, 博士研究生。主要从事混合、组合结构高层与超高层建筑及复杂工业建筑结构体系方面的研究。

(上接第 11 页)

34(7): 148-157 (Xu Jinjun, Chen Zongping, Xue Jianyang, et al. Failure mechanism of interface bond behavior between circular steel tube and recycled

aggregate concrete by push-out test [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(7): 148-157 (in Chinese))

伍凯 (1980— ), 男, 博士, 副教授。主要从事钢与混凝土组合结构研究及结构抗震研究。

陈峰 (1993— ), 男, 硕士研究生。主要从事钢与混凝土组合结构研究。

徐方媛 (1992— ), 女, 硕士研究生。主要从事钢与混凝土组合结构研究。

徐佳楠 (1995— ), 男, 硕士研究生。主要从事钢与混凝土组合结构研究。

徐超 (1987— ), 男, 博士研究生。主要从事钢与混凝土组合结构研究。