

土木工程防灾国家重点实验室论文集

(1991—1992)

朱伯龙 主编



同济大学出版社

前 言

土木工程防灾国家重点实验室自 1991 年 10 月经国家计划委员会、国家教育委员会验收后，已运行了近三年的时间，并资助了 20 个开放课题在我实验室开展研究工作。

本论文集为第一集，它是实验室各学科组和试验室前期研究的成果。今后若无特殊情况，每年将出版一集，其内容还将包括开放课题的研究成果。

实验室运行时间不长，存在着经验不足和资金缺乏的困难，但全室同仁愿为我国的防灾、减灾研究作出努力，并愿与海内外同仁共同合作，在“国际减灾十年”活动中作出贡献。

土木工程防灾国家重点实验室主任

沈祖炎

1994.5

(沪)新登字 204 号

编 辑 委 员 会

主任委员 李国豪

副主任委员 沈祖炎

委 员 项海帆 朱伯龙

范立础 徐植信

责任编辑 郁 峰

封面设计 王肖生

土木工程防灾国家重点实验室论文集

朱伯龙 主编

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

1995 年 7 月第 1 版 1995 年 7 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 10.25 字数: 260 千字

印数 1—800

定价: 12.00 元

ISBN 7-5608-1555-3/TU·163

目 录

上海电视塔 1:50 整体模型模拟地震振动台

试验研究	施卫星	朱伯龙	邢国娟(1)
钢筋混凝土筒仓地震反应研究	施卫星	朱伯龙(11)	
考虑伸缩缝、橡胶支座影响的梁式桥非线性			
地震反应分析	范立础	袁万城	姜 林(20)
空间钢框架平扭耦合地震反应研究	沈祖炎	李国强(31)	
交叉钢支撑滞回特性的试验与理论研究	沈祖炎	李国强	王 革(39)
钢梁柱恢复力模型研究	潘士劼	李国强	刘卫国 苏仰明(47)
斜拉桥塔的驰振响应分析	顾 明	项海帆(55)	
上海电视塔的风洞试验研究		项海帆(63)	
桥梁颤振分析的数值解法——Scanlan 法的改进	朱乐东	项海帆(74)	
裙板对结合梁式桥断面绕流特性影响的流谱分析	施宗城	张伯寅(82)	
团集质量体系随机风振理论及其应用		张相庭(90)	
459m 上海广播电视塔 1:50 模型的结构振动			
控制试验研究	邹祖军	朱伯龙	王肇民 朱照容(100)
火灾作用下钢筋混凝土梁内的温度分布	陆洲导	朱伯龙(122)	
钢筋混凝土连续梁抗火性能的研究	陆洲导	朱伯龙(129)	
钢框架结构火灾反应分析	沈祖炎	李国强(141)	
附录 I 土木工程防灾国家重点实验室课题基金申请指南			
附录 II 土木工程防灾国家重点实验室开放课题基金项目			

附录 I 土木工程防灾国家重点实验室课题基金申请指南

附录 II 土木工程防灾国家重点实验室开放课题基金项目

CONTENTS

Simulated Earthquake Experiment Study of a 1 / 50—Scale

Shanghai TV Tower Model

..... Shi Weixing Zhu Bolong Xing Guojuan (10)

A Study of Seismic Response of Reinforced Concrete Silos

..... Shi Weixing Zhu Bolong (19)

Nonlinear Seismic Response for Multi-set of Continuous Girder

Bridge Considering the Effects of Expansion Joints and

Rubber Bearing Fan Lichu Yuan Wancheng Jiang Lin (30)

Research on Torsionally Coupled Seismic Response of Space

Steel Frames Shen Zuyan Li Guoqiang (38)

Test and Theory Research on Hysteretic Behavior of Steel

Diagonal Bracing Shen Zuyan Wang Ge Li Guoqiang (46)

Research on Restoring Force Model of Steel Beam—Columns

..... Pan Shijie Li Guoqiang Liu Weiguo Shu Yangming (54)

Galloping Responses of Cable—Stayed Bridge Pylons

..... Gu Ming Xiang Haifan (62)

Wind Tunnel Test Study on the Shanghai TV Tower

..... Xiang Haifan (73)

A Numerical Method for Bridge Flutter Analysis

—An Improvement of Scanlan's Method

..... Zhu Ledong Xiang Haifan (81)

Analysis of Flow Pattern Visualization for the Effect of Skirt Plate

on Flow Characteristics Around the Composite Girder

Bridge Section Shi Zongcheng Zhang Boyin (89)

Random Vibration Theory due to Wind—Excitation for System

with Lumped—Masses and its Application Zhang Xiangting (99)

**Test Research on Vibration Control of 1 : 50 Model Structure of
459m Shanghai Radio & TV Tower with Water Tanks**
... Zou Zujun Zhu Bolong Wang Zaoming Zhu Zhaorong (120)

**Temperature Distribution in Reinforced Concrete Beam when
Exposed to Fire Lu Zhoudao Zhu Bolong (128)**

Study on Fire Resistance of Continuous Reinforced Concrete Beams
..... Lu Zhoudao Zhu Bolong (140)

Analysis of Fire Response of Steel Frames
..... Shen Zuyan Li Guoqiang (149)

上海电视塔 1:50 整体模型模拟地震振动台试验研究

施卫星 朱伯龙 邢国娟

摘 要

本文是对上海 459m 广播电视塔 1:50 微粒混凝土模型进行模拟地震振动台试验的探讨,对电视塔结构的动力特性和在地震动下的加速度、位移和应变反应,以及破坏过程和破坏部位等作了研究。

一、引 言

上海电视塔是国家重点工程,它位于浦东陆家嘴,高 459m,占地 3.5ha,是亚洲第一高塔和世界第三高塔。上海电视塔建成以后,能发射 10 个调频立体声广播和 9 个电视频道。可为消防、公安、交通、气象、环保、测震、无线通讯等提供高空工作站,是新上海的重要标志。它于 1991 年 9 月开工,1994 年投入使用。

上海电视塔为预应力钢筋混凝土结构,由桩基、地下室、塔身、钢筋混凝土桅杆、钢桅杆和三个球体组成。该塔塔身是三根直径为 9m、成正三角形分布的筒体,三个筒体之间有七组环梁相连,向上过渡为单筒体,顶部为箱形截面钢桅杆。为了增加结构的稳定性,减少水平荷载作用下塔体结构底部内力,塔体下部设有三根直径为 7m、与地面成 60° 的斜筒来支撑塔体。上海电视塔所在场地抗震设防烈度为 7 度,且为典型的软土地基,抗震设计难度较大,如能保证在地震作用下该塔不发生破坏,将在国际上产生巨大的影响,为此,很有必要对该塔进行地震工程试验研究。受上海市科委、华东建筑设计研究院的委托,同济大学土木工程防灾国家重点实验室承担了这一科研任务,并于 1991 年 12 月在振动台试验室进行了上海电视塔 1:50 整体模型模拟地震振动台试验。

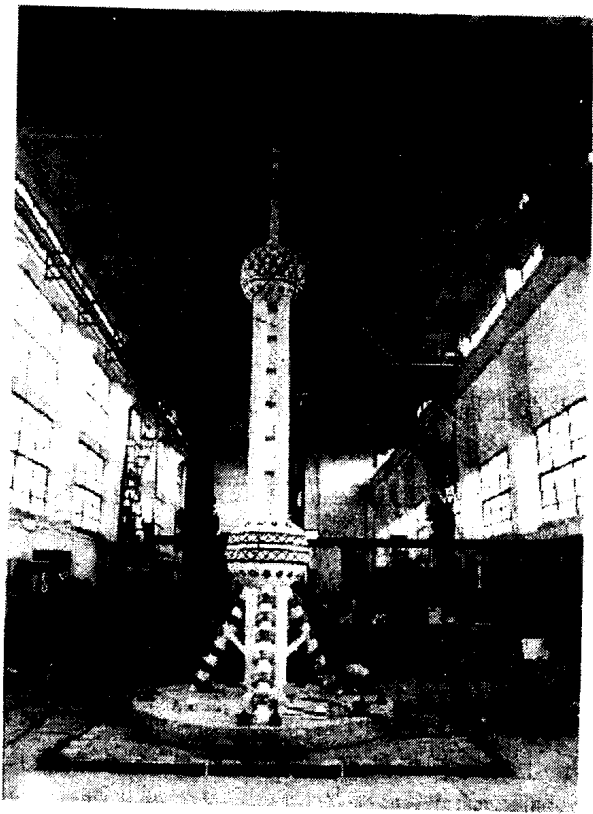
二、模型试验方法

(一) 模型

根据上海电视塔的实际情况和试验室条件,取整体模型几何相似比为 $1/50$,采用人工质量模型,忽略重力加速度,模型材料为微粒混凝土和镀锌铁丝,微粒混凝土配合比见表 1,人工质量采用铅块。在上球以下三主筒中央分别用单根钢筋模拟原型结构配置的预应力钢丝束对模型施加预应力。为使模型的预应力筋与原型相似,在钢筋的端部串联了一组弹簧。模型的主要相似关系见表 2,模型总高度为 9.18m,制成的模型外形见照片 1。

表 1 微粒混凝土配合比

材料 混凝土标号	配合比	细骨料		粗骨料 (0.6~1.2mm)	水泥 (#425)	水
		0~0.3mm	0.3~0.6mm			
C15		0.26	1.03	1.32	1	0.65
C10		0.30	1.18	1.52	1	0.75



照片 1 模型全貌

表 2 模型和原型的主要相似关系

相似参数	公 式	相 似 值
长 度	C_L	0.02
密 度	C_ρ	6.975
弹性模量	C_E	0.50
质 量	$C_m = C_\rho C_L^3$	5.58×10^{-5}
时 间	$C_t = C_L \sqrt{(C_\rho / C_E)}$	0.075
频 率	$C_f = 1 / C_t$	13.39
速 度	$C_v = C_L / C_t$	0.267
加速度	$C_a = C_L / C_t^2$	3.58
模型质量	373.94 kg	
附加铅块	4056.06 kg	
模型总量	4430.00 kg	

(二) 测试内容

本试验测试内容包括加速度、位移和应变反应，测点布置见图 1，传感器编号及数量见表 3。由于试验采用三向输入地震波，所以已不能采用常规的接触式位移传感器，而采用由加速度经二次积分求得的位移反应失真又较大。清华大学人体运动检测分析室和土木系测量教研组研制的 HF- II 型红外光点运动分析系统曾成功地解决了中央电视台发射塔模型三向模拟地震振动台试验中位移反应的测试问题。为此，我们特委托清华大学人体运动检测分析室和土木系测量教研组联合承担上海电视塔整体模型模拟地震振动台试验位移反应测试任务。按试验要求，应记录塔尖、太空仓和上球在 X, Y, Z 三方向的振动时程曲线，所以采用了两台红外光点摄像机。试验时，模型塔固定在振动台台面上，一架红外光点摄像机安装在模型正上方的桥式吊车上，用于测试模型各点的水平位移，另一架红外光点摄像机安装在振动台外的钢制测试架上，用于测试模型各点的竖向位移。

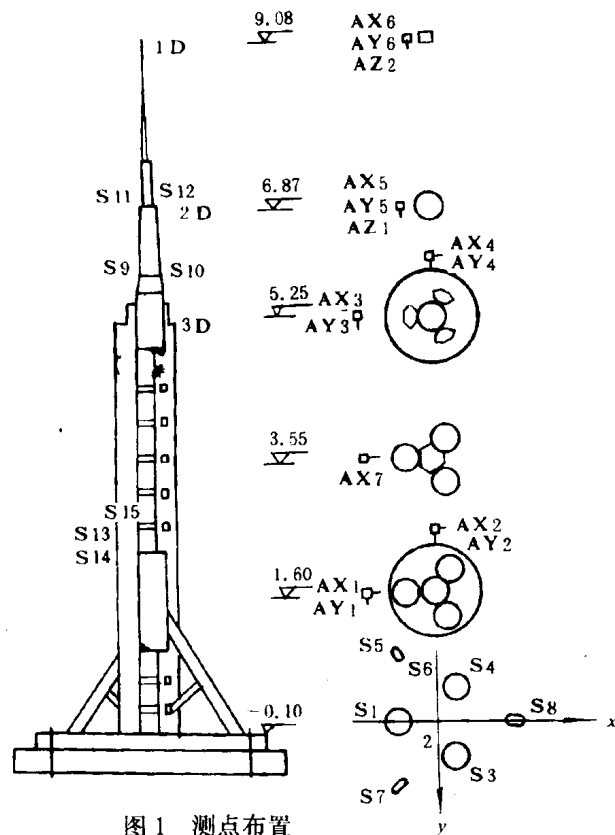


图 1 测点布置

表 3 传感器的编号和数量

测量内容	加 速 度	应 变	绝对位移
传感器数量	15	15	3
横向传感器	AY ₁ —AY ₆		1D—3D
纵向传感器	AX ₁ —AX ₇	S ₁₅	
竖向传感器	AZ ₁ —AZ ₂	S ₁ —S ₁₄	

(三) 振动台台面输入波形

本试验的目的是研究模型塔的自振频率、振型、阻尼和在多遇七度、八度、九度，罕遇七度、八度地震作用下结构的地震反应、破坏现象、破坏机理，并按相似关系推算原型塔的地震反应和抗震性能。为了达到预期的试验目的，结合上海电视塔所在场地土的性质，我们选用了三类地震波：

第Ⅰ类：根据地震危险性分析得到的人工地震波，分多遇地震三组和罕遇地震三组。

第Ⅱ类：天然地震记录，包括 EL-CENTRO, PASADENA, SAN-FERNANDO 三组地震记录。

第Ⅲ类：拟合规范反应谱的人工地震波。

台面输入内容见表 4。

表 4 台面输入一览表

烈度	序号	地震波类型	地震波峰值 (g)			名义输入 (g)		
			X	Y	Z	X	Y	Z
	1	白 噪 声	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
多遇七度	2	063-1.S1	0.208			0.147		
	3	063-1.S2		0.091			0.111	
	4	063-1.S	0.234	0.097		0.147	0.111	
	5	EL-CENTRO	0.152	0.133	0.034	0.147	0.111	0.086
	6	PASADENA	0.147	0.111	0.086	0.147	0.111	0.086
	7	白 噪 声	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
多遇八度	8	S-063.1	0.367	0.196	0.092	0.294	0.222	0.172
	9	S-063.2	0.248	0.208	0.194	0.294	0.222	0.172
	10	EL-CENTRO	0.235	0.209	0.132	0.294	0.222	0.172
	11	PASADENA	0.302	0.223	0.196	0.294	0.222	0.172
	12	003-1.S	0.328	0.188	0.138	0.294	0.222	0.172
	13	003-2.S	0.512	0.588	0.364	0.588	0.443	0.344
多遇九度	14	EL-CENTRO	0.530	0.390	0.230	0.588	0.443	0.344
	15	PASADENA	0.770	0.430	0.420	0.588	0.443	0.344
罕遇七度	16	003-3.S	0.820	0.660	0.549	0.898	0.667	0.525
	17	EL-CENTRO	0.723	0.541	0.390	0.898	0.667	0.525
	18	SAN-FERANADO	0.975	0.470	1.440	0.898	0.667	0.525
	19	白 噪 声	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
罕遇八度	20	S-003.1	1.430	0.697	0.886	1.632	1.232	0.955
	21	EL-CENTRO	1.380	0.900	0.804	1.632	1.232	0.955
	22	003-3.S	1.630	1.150	0.890	1.632	1.232	0.955

三、试验结果

(一) 动力特性

对由白噪声输入时模型的加速度反应进行频谱分析得到的模型 X 方向前五阶自振频率和阻尼比见表 5，振型见图 2。试验结果表明：

(1) 模型的前两阶频率很接近，说明钢桅杆很柔，在第一振型中，钢桅杆的贡献也很大。

(2) 该塔具有与其他钢筋混凝土电视塔相同的振动特点——振型退化和鞭梢效应。

(3) 将 X 方向的频率、振型与 Y 方向的频率、振型进行比较，结果完全相同，说明电视塔结构是中心对称结构，不需要考虑扭转。

(4) 电视塔结构的阻尼比为 3% 左右。

表 5 模型的实测频率和阻尼比

振型	1	2	3	4	5
频率 (Hz)	2.604	3.906	8.464	13.02	17.58
阻尼比	0.030	0.030	0.025	0.018	0.030

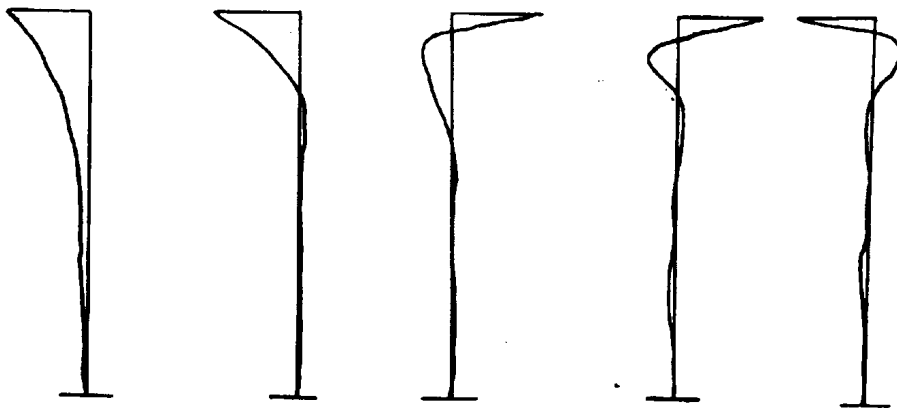


图 2 模型实测振型

(二) 地震反应

1. 试验现象

在多遇七度、八度、九度地震波输入时，钢桅杆振动剧烈，而上球以下的塔身振动很小，观察结构各部位，均未开裂。在进行罕遇七度试验时，输入第一组波 (003-3.S) 后，混凝土桅杆出现了第一条裂缝，裂缝距上球顶 23cm，没有贯通。输入第二组波 (EL-CENTRO) 后，混凝土桅杆裂缝贯通。输入第三组波 (SAN-FERANADO) 后，钢桅杆最上面一段在与下一段连接处弯折，混凝土桅杆上已有的裂缝加宽。输入白噪声时，最上面一段钢桅杆根部折断。在进行罕遇八度试验时，输入第一组波 (S-003.1)

后，混凝土桅杆除已有裂缝完全裂开外，又出现了多道细微环向裂缝。输入第二组波（EL-CENTRO）后，在三个主体筒变截面处出现水平裂缝，上部裂缝大，下部裂缝小。连梁与主体筒连接处出现竖直裂缝，裂缝都在连梁上，筒体相应部位完好。再输入第三组波（003-3.S）后，结构破坏加剧，钢桅杆最下面一段顶部裂开。

2. 结构动力放大系数

表 6 为在不同烈度当量 EL-CENTRO 地震波输入下，结构模型下球、上球、混凝土桅杆顶点和钢桅杆顶点部位的加速度响应最大值与台面输入加速度峰值的比较，以及这四个典型部位在地震作用下的动力放大系数。表 7 为同一烈度、不同地震波作用下结构的动力放大系数。

表 6 不同烈度 EL-CENTRO 地震波作用下模型的动力放大系数

烈度	质点位置	下 球		上 球		混凝土桅杆顶点			钢桅杆顶点		
	坐标方向	x	y	x	y	x	y	z	x	y	z
多遇七度	质点加速度 (g)	2.02	1.59	1.12	1.27	4.25	3.13	1.69	39.5	37.3	2.24
	台面加速度 (g)	1.49	1.31	1.49	1.31	1.49	1.31	0.33	1.49	1.11	0.33
	动力放大系数	1.36	1.21	0.75	0.97	2.86	2.39	5.12	26.5	28.6	6.79
多遇八度	质点加速度 (g)	2.80	4.43	2.09	2.29	7.15	6.00	7.41	18.8	14.9	9.81
	台面加速度 (g)	2.30	2.04	2.30	2.04	2.30	2.04	1.30	2.30	2.04	1.30
	动力放大系数	1.22	2.17	0.91	1.12	3.11	3.43	5.72	8.17	7.30	7.57
多遇九度	质点加速度 (g)	4.27	7.47	3.64	3.31	6.52	9.83	17.2	15.5	15.6	24.6
	台面加速度 (g)	5.19	3.83	5.19	3.83	5.19	3.83	2.27	5.19	3.83	2.27
	动力放大系数	0.82	1.95	0.70	0.86	1.26	2.57	7.57	2.99	4.08	10.8
罕遇七度	质点加速度 (g)	7.34	11.2	4.87	6.31	10.2	13.3	13.5	6.26	4.44	22.7
	台面加速度 (g)	7.09	5.30	7.09	5.30	7.09	5.30	3.85	7.09	5.30	3.85
	动力放大系数	1.04	2.12	0.69	1.19	1.44	2.51	3.50	0.88	0.84	5.90
罕遇八度	质点加速度 (g)	9.82	8.61	3.95	7.01						
	台面加速度 (g)	8.08	7.43	8.08	7.43						
	动力放大系数	1.22	1.16	0.49	0.93						

表 7 同一烈度、不同地震波作用下模型的动力放大系数

地震波类型 \ 质点位置	上 球	混凝土桅杆顶点	钢桅杆顶点
S-063.2	1.106	3.465	8.500
EL-CENTRO	1.016	3.267	7.737
PASADENA	1.068	2.854	8.396
003-1.S	1.172	2.569	7.889

试验结果表明，在多遇七度地震波作用下，钢桅杆顶点的动力放大系数为 27.53，混凝土桅杆顶点的动力放大系数为 2.53，上球的动力放大系数为 0.86，下球的动力放大系

数为 1.287，混凝土桅杆顶点的垂直放大系数为 5.117，钢桅杆顶点的垂直放大系数为 6.792。随着地震烈度增加，混凝土桅杆顶点、钢桅杆顶点、上球的水平动力放大系数大幅度下降，下球部位变化很小。在罕遇七度地震波作用下，上球动力放大系数增大，说明混凝土桅杆和钢桅杆已失效。随着地震烈度增加，垂直动力放大系数有增大趋势，垂直振动对结构的影响不容忽视。不同地震波的作用对上球以下塔身的反应影响不大，而对上球以上桅杆的反应影响较大。因此，用几种不同的地震来分析电视塔结构的地震反应是必要的。

3. 单向输入与双向输入时结构的动力放大比较

在进行多遇七度地震波输入时，先输入 X 方向，然后输入 Y 方向，最后同时输入 X，Y 两向拟合地表反应谱的人工加速度时程（063-1.S）。表 8 为 Y 方向输入和 X，Y 双向同时输入时结构的动力放大系数。试验结果表明，双向输入时，钢桅杆顶点的动力放大系数与单向输入时的结果差异不大，顶点位移双向稍大。但在双向输入时，混凝土桅杆顶点、上球的动力放大系数成倍增大。因而对于电视塔模型，由于高振型的影响，双向输入的结果，不能看作两个单向输入结果的简单叠加。

表 8 单、双向输入结构的动力放大系数

质 点 位 置		上 球	混凝土桅杆顶点	钢桅杆顶点
Y 向 输 入	质点加速度 (g)	0.998	1.666	39.23
	台面加速度 (g)	0.897	0.987	0.897
	动力放大系数	1.113	1.858	43.74
X、Y 双 向 输 入	质点加速度 (g)	2.024	4.264	42.02
	台面加速度 (g)	0.952	0.952	0.952
	动力放大系数	2.125	4.478	44.13

4. 电视塔结构模型的应变分析

本次振动台试验中，在混凝土塔三根圆筒根部、三根斜撑根部、第五道连梁上及与之相连的筒体、混凝土桅杆底部以及钢桅杆底部共布置了 15 片应变片，见图 1。通过对塔体各部位的应变值进行比较，可以预测电视塔模型的开裂部位、开裂顺序并比较应力的的大小。表 9 是在罕遇七度 EL-CENTRO 地震波作用下模型的应变试验结果。从表中可以看出，混凝土桅杆底部 X 方向应变片 S₁₀ 的应变最大，S₁₀=437.7μ ϵ ，说明混凝土桅杆底部已开裂，与实际观察到的裂缝位置相吻合。

表 9 应变反应

位 置	编 号	最大压应变 (μ ϵ)	最大拉应变 (μ ϵ)
混凝土主体筒根部	S ₁	54.5	32.6
	S ₂	30.3	34.8
	S ₃	102.1	97.8
	S ₄	105.7	168.5

续表 9

位 置		编 号	最大压应变 ($\mu\epsilon$)	最大拉应变 ($\mu\epsilon$)
混凝土斜撑根部		S ₅	105.3	277.6
		S ₆	104.6	214.5
		S ₇	225.7	207.1
		S ₈	163.8	211.2
混凝土桅杆底部		S ₉	92.2	229.6
		S ₁₀	13.5	437.7
钢桅杆底部		S ₁₁	65.1	64.2
		S ₁₂	83.3	82.7
标高 3.65m 处	筒	S ₁₃	50.0	122.4
		S ₁₄	169.5	169.7
	梁	S ₁₅	264.1	264.1

比较主体筒根部和斜撑根部的应变值可知，斜撑的应变值大于主体筒的应变，如果是大震作用，裂缝将出现在斜撑根部而不是主体筒根部，因而斜撑的存在增加了电视塔结构的抗震能力。

5. 模型的位移包络图

模型实测位移包络图见图 3，在罕遇七度地震波作用下，钢桅杆顶部最大位移达 4.0cm。

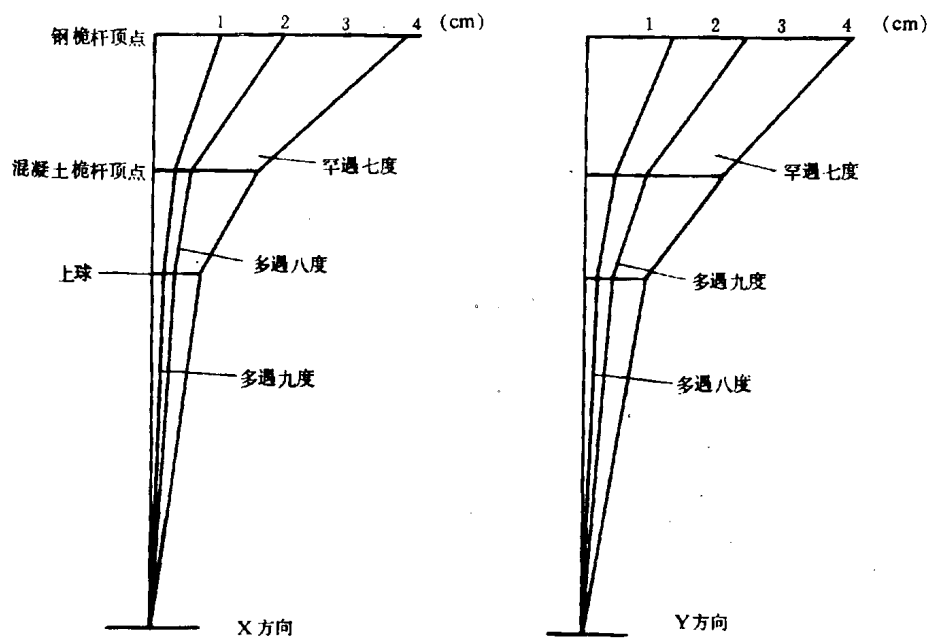


图 3 实测位移包络图

四、结 论

(1) 电视塔模型实测基频为 2.604Hz, 第二频率为 3.906Hz。根据相似关系, 原型塔的第一周期为 5.14s, 第二周期为 3.43s。从振型图上来看, 第一振型为塔身振型, 第二振型的拐点存在于混凝土桅杆与钢桅杆的交接处, 第三振型的两个拐点, 一个在钢桅杆上, 一个在混凝土桅杆上, 说明钢桅杆和混凝土桅杆的刚度远小于混凝土塔身的刚度。

(2) 结构在双向地震波作用下的地震反应, 不能简单看作两个单向地震输入的结构地震反应的叠加。

(3) 上海电视塔为一空间框架结构体系, 且下部设有三根斜撑, 它是一个多次超静定结构, 与一般单筒结构相比, 更有利于抗震。

(4) 不同的地震波有不同的频谱特性、场地土类型和持续时间, 因而将引起结构不同的地震反应, 应综合考虑各种地震波对结构的作用。

(5) 分析结构各典型质点的动力放大系数, 在钢桅杆顶点处, 放大系数最大, 其次是在混凝土桅杆顶点, 说明其受高振型影响大, 鞭梢效应明显。在罕遇七度地震作用下, 模型塔钢桅杆顶点最大位移达 4.0cm, 相当于原型塔顶端位移为 2.0m。

(6) 根据模型试验结果, 上海电视塔在基本烈度七度地震作用下, 结构整体安全。在基本烈度八度地震作用下, 钢桅杆最上面一段弯折, 混凝土桅杆底部出现裂缝, 塔身完好。在罕遇八度地震作用下, 钢桅杆多处弯折, 混凝土桅杆出现多道环向裂缝, 塔身在筒体变截面处和连梁上出现裂缝, 结构达破坏状态。

(7) 与其他大部分电视塔一样, 上海电视塔的钢桅杆和混凝土桅杆是结构的薄弱环节。

Simulated Earthquake Experiment Study of a 1 / 50—Scale Shanghai TV Tower Model

Shi Weixing Zhu Bolong Xing Guojuan

Abstract

The aseismic behavior of Shanghai TV Tower is discussed in this paper. Shanghai TV Tower is 459—meter high, which is the highest tower in Asia and the third high tower in the world. The structure system of Shanghai TV Tower adopts a spaced—frame structure. Compared with the single—tube structure, it belongs to the redundant structure. This kind of structure system has not been employed so far in towers in the world, so it is great significance to study its aseismic behavior.

The main work included in this paper is as follows:

1. Shanghai TV Tower which is being constructed in Pudong is been as the prototype. The model has 1 / 50 scale, whose material and dimensions are designed according to the simulated principle. The model is made of microconcrete and steel bar. It is 9—meter high.
2. On the three dimensional simulated earthquake shaking table, the frequencies and vibration modes of the model are measured when the white—noise signals are input.
3. The space earthquake response and collapse processes of the model are discussed when three dimensional earthquake waves of different earthquake intensities are input.

The experimental results show that the Tower is safety in seven—degree earthquake. If the ground motion is stronger than seven—degree, steel mast will buckle and the concrete mast will crack. The Tower will be failure in nine—degree earthquake. Like other television towers, steel mast and concrete mast are the weak positions of Shanghai TV Tower.

钢筋混凝土筒仓地震反应研究

施卫星 朱伯龙

摘 要

本文对两个钢筋混凝土筒仓进行了模拟地震振动台试验,研究了地震动下贮料侧压力沿高度的分布、贮料侧压力与台面加速度之间的关系和筒仓的地震反应,并把筒仓作为一多质点系统,考虑贮料质量非线性、阻尼非线性和刚度非线性,对筒仓进行了非线性地震反应分析,最后对原型筒仓的抗震性能进行了分析。

一、引 言

筒仓作为一种现代结构,遭受地震、特别是强烈地震,还不多见,然而人们却看到了它在地震中的破坏。在 1977 年 3 月 4 日罗马尼亚的地震中^{〔1〕},有些粮仓的支承结构、顶部结构发生了破坏,顶部小楼根部开裂甚至倒塌,采用柱支承的筒仓,柱子在弯矩最大部位开裂。

从 60 年代起,国外对筒仓进行了一些动力方面的研究^{〔2~5〕},但他们的研究方向大多局限于贮料的动力有效质量问题,而对筒仓的地震反应和破坏现象研究还很少。随着筒仓应用范围的扩大和筒仓规模的增大,对筒仓抗震性能的研究变得越来越紧迫,为此,本文通过模拟地震振动台试验和理论分析,对钢筋混凝土筒仓的地震反应和抗震性能进行了研究。

二、模型试验

(一) 模型设计

本文采用两个模型,分别称作 A 模型和 B 模型,其中, A 模型是黄岛电厂二期贮煤仓的真实模型,见图 1,模型相似系数见表 1。B 模型是 A 模型的改进型,它省去了内筒结构,支承结构由外筒和内柱组成,漏斗直接搁在外筒上,并去掉了仓上建筑,所以,其高度降为 3.5m。两模型均用[#]50 砂浆和钢丝网建造,贮料为煤。

表 1 模型相似系数

物理量	符号	表达式	相似系数
长 度	C_l	C_l	0.1
时 间	C_t	$\sqrt{C_l}$	0.3162
频 率	C_ω	$1/\sqrt{C_l}$	3.162